

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : **Systèmes de Télécommunications**

---

---

**Régénération tout-optique par similariton  
du signal OTDM à très haut débit**

---

---

Présenté par :

**BEDOUI Mohamed Amine**

**HORRI Omar**

Sous la direction de :

**Dr . GRAINI Leila**

Juillet 2019

## **Dédicace**

**<< l'éducation a des racines amères, mais ses fruits sont doux >>**

**Que ce travail témoigne de mes respects :**

**A mes parents .....**

**Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et Mes profonds sentiments envers eux.**

**Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.**

**A mes frères**

**A mes sœurs**

**A tous mes professeurs**

**A tous mes amis et mes collègues.....**

**Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.**

## **Remerciement**

*Avant de commencer la présentation de ce travail nous profitons de l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements pour notre collègue Tijani Ali qui nous a accompagné de près durant tout ce travail, pour sa disponibilité, pour la confiance qu'il a su nous accorder et les conseils précieux qu'il nous a prodigués tout au long de la réalisation de ce projet.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements pour notre encadreur, d'avoir accepté de nous encadrer pour notre projet de fin d'étude, ainsi que pour son soutien, ses remarques pertinentes et son encouragement.*

*Nos remerciements vont aussi à tous nos professeurs, enseignants et toutes les personnes qui nous ont soutenus jusqu'au bout, et qui ont pas cessé de nous donner des conseils très importants en signe de reconnaissance.*

*Louanges à Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage. Espoir et abnégation de réussir dans ce parcours d'érudition et de savoir.*

*Je remercie mon père, ma mère, mes frères et sœurs.*

*Et toutes amies pour leur aide et leur soutien moral.*

*Je remercie chaleureusement Madame Graini Leila*

*Je remercie à mes de groupe de télécommunication une grande salutation pour tous les étudiants 2 master TLC.*

# التجديد البصري بواسطة النبض ذاتية التماثل (similaritons) لإشارات OTDM عالية التدفق

## الملخص:

تتطلب الروابط البصرية المستقبلية عالية التدفق والمسافة الطويلة استخدام أجهزة بصرية بسيطة وغير مكلفة لاستبدال بعض أجهزة التجديد الإلكترونية البصرية الحالية لتحسين الأداء وخفض التكاليف. يعد جهاز التجديد Mamyshev 2R، المثير للاهتمام بشكل خاص لهذا النوع من التطبيقات عنصرًا رئيسيًا.

في هذا العمل، ندرس نظريًا و عددًا تقنيًا Mamyshev تتحد مع مساهمات النبض ذاتية التماثل (similaritons) مع هذه التقنية. نهتم بالإمكانات التي يمكن أن تقدمها هذه النبضات مع التضخيم بغرض تجديد 2R لإشارات OTDM بطريقة بصرية كليًا. ندرس أيضًا تكوين تجديد بصري على مرحلتين من أجل استعادة الطول الموجي الأولي.

يتم التحقق من صحة كفاءة هذا المجدد البصري باستخدام حلقة إعادة دوران 80 كم لاختبار أدائها، والقدرة على تقليل الضوضاء في "0" وتقلبات الشدة في "1" لإشارة OTDM.

قمنا بتطبيق محاكاة لنظام نقل بالألياف البصرية بسرعات تتراوح بين 40 جيجابت / ثانية إلى 160 جيجابت / ثانية وقيم مختلفة من طول الألياف. تتم دراسة جودة الإرسال من خلال تقييم معدل الخطأ (BER)، وعامل الجودة (Q)، ومخطط العين للإشارات عند الاستقبال.

الكلمات المفتاحية: التجديد البصري بالكامل ، مُجدد Mamyshev 2R، النبض ذاتية التماثل (similaritons) ، إشارة OTDM ، الألياف غير الخطية للغاية.

# All-optical regeneration based on similariton of high bit-rate OTDM signal

## Abstract:

Future optical high-bit-rate and long-haul links will need the use of simple and cost effective all-optical devices to replace some of the existing optoelectronic repeaters in order to enhance the performance and reduce the cost. A key component is Mamyshev 2R regenerator, which is particularly interesting for this type of application.

In this work, we propose theoretical and numerical studies of all-optical 2R regeneration of Mamyshev combined with the contributions of similaritons. We are interested in the potential for similaritons and the self-similar amplification can claim in order to regenerate an OTDM signals with an optical manner. We are also studying a two-stage regeneration which allows restoring the initial wavelength.

The efficiency of the 2R regenerator is evaluated for a 80-km recirculating loop to test its performance, and the ability to decrease noise in '0' and intensity fluctuations in '1' of an OTDM signal.

We have implemented a simulation of an optical fiber transmission system with bit-rate ranging from 40 Gbit/s to 160 Gbit/s and for different fiber length values. The performances of transmission are evaluated by calculating the Bit Error Rate (BER), the Q factor, and eye diagrams of received signals.

Keywords: All-optical regeneration, Mamyshev 2R regenerator, optical similariton , OTDM signal, highly nonlinear fiber.

# Régénération tout-optique par similariton du signal OTDM à très haut débit

## Résumé :

Les futures liaisons optiques haut débit et longue distance nécessiteront l'utilisation de dispositifs tout optique simples et peu onéreux pour remplacer certains des régénérateurs optoélectroniques existants afin d'améliorer les performances et de réduire les coûts. Le régénérateur Mamyshev 2R, qui est particulièrement intéressant pour ce type d'application, est un élément clé.

Dans ce travail nous étudions théoriquement et numériquement la technique de Mamyshev combiner avec les apports de similaritons. Nous nous intéressons au potentiel auquel les similaritons et l'amplification auto-similaire peuvent prétendre dans le but de la régénération 2R des signaux OTDM de manière tout optique. Nous étudions également une configuration à deux étages de régénération qui permet de restaurer la longueur d'onde initiale.

L'efficacité de ce régénérateur est validée à l'aide d'une boucle à recirculation de 80 km pour tester sa performance, et la capacité de diminuer le bruit dans les '0' et les fluctuations d'intensité dans les '1' d'un signal OTDM.

Nous avons mis en œuvre une simulation d'un système de transmission par fibre optique à de débit allons de 40 Gbits/s à 160 Gbit/s et pour différentes valeurs de longueur de la fibre. La qualité de transmission est étudiée par l'évaluation du taux d'erreur binaire (BER), de facteur de qualité (Q), et de diagramme de l'œil des signaux reçus.

Mots clés : Régénération tout optique, régénérateur 2R de Mamyshev, similariton optique, signal OTDM., fibre hautement non linéaire.

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT

DEDICACES

RESUME

TABLE DES MATIERES .....I

LISTE DES FIGURES .....IV

LISTE DES TABLEAUX.....IX

INTRODUCTION GENERALE.....01

**Chapitre I : Généralités sur les systèmes de transmission par fibre optique à très haut débit**

**I.1 Introduction .....04**

**I.2 Réseaux optiques .....04**

**I.2.1 Le réseau long et très long distance .....04**

**I.2.2 Le réseau métropolitain .....05**

**I.2.3 Le réseau d'accès .....05**

**I.3 Liaisons optiques .....05**

**I.3.1 Le module d'émission : Transmetteur optique .....06**

**I.3.1.1 Diode laser.....06**

**I.3.1.2 La modulation .....08**

**I.3.1.3 Formats de modulation .....10**

**I.3.2 Le module de réception .....12**

**I.3.2.1 La photodiode .....13**

**I.3.3 Le canal de transmission : La fibre optique .....14**

**I.4 Origines des dégradations du signal .....15**

**I.4.1 Effets linéaires dans la fibre .....15**

**I.4.1.1 L'atténuation dans la fibre .....15**

**I.4.1.2 La dispersion dans la fibre .....17**

**I.4.2 Effets non linéaires.....17**

**I.4.2.1 L'effet de Kerr.....17**

**I.5 La régénération .....18**

**I.5.1 La régénération (1R) .....19**

**I.5.2 La régénération (2R) .....21**

**I.5.3 La régénération (3R) .....21**

<b>I.6</b>	Augmentation de la capacité des liaisons .....	<b>22</b>
<b>I.6.1</b>	Le multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexage).....	<b>22</b>
<b>I.6.2</b>	Le multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexage) .....	<b>23</b>
<b>I.7</b>	Conclusion .....	<b>24</b>
 <b>Chapitre II : La Régénération 2R tout-optique</b>		
<b>II .1</b>	Introduction.....	<b>24</b>
<b>II.2</b>	Comparaison de la régénération optoélectronique et tout optique.....	<b>24</b>
<b>II.3</b>	La Régénération tout optique .....	<b>27</b>
<b>II.4</b>	La Régénération 2R tout optique .....	<b>28</b>
<b>II.4.1</b>	La fonction de transfert .....	<b>28</b>
<b>II.4.2</b>	Les types de lafonction de transfert (FdT) .....	<b>30</b>
<b>II.4.3</b>	Les technique de la régénération 2R : Etat de l'art .....	<b>30</b>
<b>II.4.3.1</b>	La Boucle optique non-linéaire (NOLM) .....	<b>31</b>
<b>II.4.3.2</b>	Le SOA comme convertisseur de longueur d'onde régénérateur.....	<b>31</b>
<b>II.4.3.3</b>	Le modulateur à électro-absorption (MEA) . .....	<b>32</b>
<b>II.4.3.4</b>	L'automodulation de la phase dans les fibres .....	<b>33</b>
<b>II.5</b>	Régénérateur 2R de Mamyshev .....	<b>34</b>
<b>II.5.1</b>	Régénérateur 2R de Mamyshev simple étage .....	<b>34</b>
<b>II.5.2</b>	Régénérateur de Mamyshev à double étage .....	<b>36</b>
<b>II.5.3</b>	Impact des paramètres du régénérateur Mamyshev .....	<b>37</b>
<b>II .6</b>	Conclusion .....	<b>40</b>
 <b>Chapitre III : Régénération 2R tout optique par similaritons</b>		
<b>III.1</b>	Introduction.....	<b>41</b>
<b>III.2</b>	Amplification d'une impulsion ultra courte .....	<b>41</b>
<b>III.2.1</b>	Régime de dispersion anormale.....	<b>41</b>
<b>III.2.2</b>	Régime de dispersion normale .....	<b>42</b>
<b>III.3</b>	Similaritons optiques.....	<b>45</b>
<b>III.3.1</b>	Définition .....	<b>45</b>
<b>III.3.2</b>	Génération de similariton.....	<b>45</b>
<b>III.3.3</b>	Modélisation de imilaritons.....	<b>46</b>
<b>III.3.3.1</b>	Similariton actif .....	<b>46</b>
<b>III.3.3.2</b>	Similariton passif .....	<b>48</b>
<b>III.3.4</b>	Propriétés de similariton.....	<b>50</b>
<b>III.4</b>	Régénération 2R tout optique par similaritons. ....	<b>51</b>
<b>III.4.1</b>	La fonction de transfert .....	<b>51</b>

<b>III.4.2</b> Régénérateur 2R active simple étage .....	<b>52</b>
<b>III.4.3</b> Régénérateur 2R passive de deuxième étage .....	<b>54</b>
<b>III.5</b> Conclusion .....	<b>55</b>
<b>Chapitre IV : Résultats de la simulation</b>	
<b>IV.1</b> Introduction.....	<b>56</b>
<b>IV.2</b> Présentation du logiciel OptiSystem .....	<b>56</b>
<b>IV.2.1</b> Introduction .....	<b>56</b>
<b>IV.2.2</b> Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem .....	<b>56</b>
<b>IV.2.3</b> Applications du logiciel OptiSystem .....	<b>57</b>
<b>IV.2.4</b> Avantage du logiciel OptiSystem .....	<b>57</b>
<b>IV.2.5</b> Interface du logiciel OptiSystem .....	<b>57</b>
<b>IV.2.6</b> Principales caractéristiques du logiciel Optisystem... ..	<b>58</b>
<b>IV.3</b> Critères de qualité d'une transmission .....	<b>59</b>
<b>IV.3.1</b> Le diagramme de l'œil .....	<b>59</b>
<b>IV.3.2</b> Le taux d'erreur binaire (TEB) .....	<b>59</b>
<b>IV.3.3</b> Le facteur de qualité $Q$ .....	<b>60</b>
<b>IV.4</b> Partie de simulation .....	<b>60</b>
<b>IV.4.1</b> Liaison de transmission sans régénération .....	<b>60</b>
<b>IV.4.1.1</b> Analyse du signal transmis sur la ligne de transmission .....	<b>60</b>
<b>IV.4.2</b> Liaison de transmission avec régénération 2R par similariton.....	<b>66</b>
<b>IV.4.2.1</b> Génération des similaritons .....	<b>66</b>
<b>IV.4.2.2</b> Régénération 2R par similariton.....	<b>69</b>
<b>IV.4.2.2.1</b> Configuration back to back.....	<b>69</b>
<b>IV.4.2.2.2</b> Configuration en ligne de transmission longue distance .....	<b>74</b>
<b>IV.5</b> Conclusion .....	<b>82</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>83</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>85</b>
<b>Glossaire</b>	

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<i>Figure I. 1</i>	Schéma d'une liaison optique point à point	05
<i>Figure I. 2</i>	Structure d'une diode laser au GaInAsP.	06
<i>Figure I. 3</i>	Processus d'absorption.	07
<i>Figure I. 4</i>	Processus d'émission spontanée.	07
<i>Figure I. 5</i>	Processus d'émission stimulée.	07
<i>Figure I. 6</i>	Schéma et principe de la modulation directe.	08
<i>Figure I. 7</i>	Schéma et principe de la modulation externe.	09
<i>Figure I. 8</i>	(a) Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder. (b) la fonction de transfert en intensité et en phase d'un Mach-Zehnder.	10
<i>Figure I. 9</i>	Représentation temporelle (a) et spectrale (b) d'un signal codé en format NRZ.	11
<i>Figure I. 10</i>	Représentation temporelle (a) et spectrale (b) d'un signal codé en format RZ.	12
<i>Figure I. 11</i>	Chaîne de détection.	13
<i>Figure I. 12</i>	Structure d'une photodiode PIN.	14
<i>Figure I. 13</i>	Fibre optique.	14
<i>Figure I. 14</i>	Courbe de variation des pertes linéiques en fonction de la longueur d'onde pour les fibres monomodes standard.	16
<i>Figure I. 15</i>	Dispersion chromatique dans une fibre.	17
<i>Figure I. 16</i>	SPM dans une fibre.	18
<i>Figure I. 17</i>	Principe des trois étapes de régénération d'un signal au format RZ.	19
<i>Figure I. 18</i>	Principe de la régénération 1R	20
<i>Figure I. 19</i>	Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec pompage optique.	20
<i>Figure I.20</i>	Principe de la régénération 2R.	21
<i>Figure I.21</i>	Principe de la régénération 3R.	22
<i>Figure I.22</i>	La technique de multiplexage TDM.	23
<i>Figure I.23</i>	La technique de multiplexage WDM.	23

\*\*\*\*\*

<b>Figure II. 1</b>	Montage du régénérateur OEO	25
<b>Figure II. 2</b>	Fonction de transmission d'une porte optique non linéaire	28
<b>Figure II. 3</b>	Régénération par auto modulation (a) et par modulation croisée (b)	29
<b>Figure II. 4</b>	Les différents fonction de transfert	30
<b>Figure II. 5</b>	Architecture du NOLM à fibre pour la régénération	31
<b>Figure II. 6</b>	Principe de la modulation croisée du gain dans les amplificateurs optiques à semi-conducteurs.	32
<b>Figure II. 7</b>	Principe de modulation en courant de l'absorption (a) – Schéma de principe des modulateurs à électro-absorption (b).	32
<b>Figure II. 8</b>	Schéma d'un régénérateur 2R a base sur l'automodulation de la phase dans les fibres.	33
<b>Figure II. 9</b>	Le schéma de régénérateur 2R de Mamyshev.	34
<b>Figure II. 10</b>	Principe de la régénération 2R basé sur SPM : Régénérateur de Mamyshev en haut, élargissement spectral et filtrage optique associé en bas.	35
<b>Figure II. 11</b>	Régénérateur Double étage asymétrique de régénérateurs pour diminuer la gigue temporelle : (a) Configuration, (b) diagramme de l'œil du signal en entrée du régénérateur 1, (c) diagramme de l'œil du signal en sortie du régénérateur 1 (de type C) ainsi qu'en entrée du régénérateur 2, (d) diagramme de l'œil du signal en sortie du régénérateur 2 et (e) diagramme de l'œil du signal en sortie d'un régénérateur simple étage de type B pour un débit de 40 Gbit/s.	37
<b>Figure II. 12</b>	FdT pour différentes durées d'impulsions.	38
<b>Figure II. 13</b>	FdT pour différentes valeurs de la dispersion de la fibre (a), FdT pour différentes longueurs de fibre (b), FdT pour différents coefficients non-linéaires (c).	38
<b>Figure II. 14</b>	FdT pour différents décalages du filtre en sortie de la fibre (a), et FdT pour différentes largeur spectrale du filtre (b).	39

\*\*\*\*\*

<b>Figure III. 1</b>	Amplification d'une impulsion gaussienne de 5 ps de largeur et 3 Pj d'énergie initiale dans une fibre à dispersion anormale. (a) Profil d'intensité initial de l'impulsion, (b) Après une amplification de 24.7 dB (c) après une amplification de 28.7 dB	42
----------------------	---	----

<b>Figure III. 2</b>	Profil temporel (a) et spectre (b) d'une impulsion sécante hyperbolique de 300 W de puissance crête et de 2.5 ps de largeur à mi-hauteur propagée dans 60 m de fibre a une dispersion $\beta_2 = 5 \text{ ps}^2.\text{km}^{-1}$ et une non-linéarité $\gamma = 3 \text{ W}^{-1}.\text{km}^{-1}$	43
<b>Figure III. 3</b>	Amplification d'une impulsion gaussienne de 5 ps de largeur et 3 pJ d'énergie initiale dans une fibre à dispersion normale. (a) Profil d'intensité initial de l'impulsion, (b) Après une amplification de 24.7 dB (c) Après une amplification de 28.7 dB. Comparaison avec un ajustement par une forme parabolique (cercles)	44
<b>Figure III. 4</b>	Profils d'intensité à différentes longueurs de propagation (paramètres identique). (b) Evolution du profil d'intensité suivant la distance de propagation.	44
<b>Figure III. 5</b>	Génération de similariton (a) avec un pompage copropagatif (b) avec un pompage contrapropagatif.	46
<b>Figure III. 6</b>	Evolution temporelle (a) et spectrale (b) d'une impulsion Gaussienne vers un similariton dans un amplificateur de 2 m (traits continus). (c) : Evolution du profil impulsionnelle dans l'amplificateur de 2 m.	51
<b>Figure III. 7</b>	Configuration de régénérateur 2R actif simple étage basé sur l'amplification similariton.	53
<b>Figure III. 8</b>	Configuration de régénérateur 2R actif double étage basé Sur l'amplification similariton.	54

\*\*\*\*\*

<b>Figure IV. 1</b>	Interface graphique du logiciel OptiSystem	58
<b>Figure IV. 2</b>	Modification composant du paramètre.	58
<b>Figure IV. 3</b>	Exemples de diagrammes de l'œil simulé (a) et expérimental (b).	59
<b>Figure IV. 4</b>	Système de transmission sans régénération	60
<b>Figure IV. 5</b>	Signal optique à l'entre de la ligne de transmission.	61
<b>Figure IV. 6</b>	Graph de la puissance du signal à la sortie de la ligne de transmission de 80 Km et un débit 40 Gb/s	62

<b>Figure IV. 7</b>	Diagramme de l'œil pour une longueur de ligne de transmission de 80 Km et un débit 40 Gb/s	62
<b>Figure IV. 8</b>	Variation de facteur de qualité en fonction de nombre de boucle pour un débit 40 Gb/s	63
<b>Figure IV. 9</b>	Graph de la puissance du signal à la sortie de la ligne de transmission de 80 Km et un débit de 80 Gb/s.	63
<b>Figure IV. 10</b>	Diagramme de l'œil pour une longueur de ligne de transmission de 80 Km et un débit 80 Gb/s	64
<b>Figure IV.11</b>	Variation de facteur de qualité en fonction de nombre de boucle pour un débit 80 Gb/s	64
<b>Figure IV.12</b>	Graph de la puissance du signal à la sortie de la ligne de transmission de 80 Km et un débit 160 Gb/s	65
<b>Figure IV.13</b>	Diagramme de l'œil pour une longueur de ligne de transmission de 80 Km et un débit 160 Gb/s	65
<b>Figure IV.14</b>	Variation de facteur de qualité en fonction de nombre de boucle pour un débit 160 Gb/s	66
<b>Figure IV.15</b>	Génération des similaritons par la configuration contra-propagatif.	67
<b>Figure IV.16</b>	Forme temporelle, et le spectre des impulsions gaussiennes d'entrée (a), Forme temporelle, et le spectre des impulsions des similaritons générés (b)	68
<b>Figure IV.17</b>	Spectre du signal généré par auto modulation de phase (SPM) (a), et spectre du similariton (b).	68
<b>Figure IV.18</b>	Schéma explicatif d'une liaison B2B avec un régénérateur 2R double étage par similariton.	69
<b>Figure IV.19</b>	Spectre du signal d'entrée (en vert), spectre après élargissement auto-similaire (en rouge grenat), et à la sortie du filtre décalé (en rouge).	70
<b>Figure IV.20</b>	Deuxième étage de régénérateur 2R par similariton.	71
<b>Figure IV.21</b>	Allure temporelle de signal initial (a), et son spectre (b)	71
<b>Figure IV.22</b>	Allure temporelle de signal à l'entrée du régénérateur (a), et son spectre (b).	71
<b>Figure IV.23</b>	Allure temporelle de signal à la sortie de 1 <sup>er</sup> étage de régénérateur (a), et son spectre (b)	72
<b>Figure IV.24</b>	Allure temporelle de signal à la sortie de 2 <sup>ème</sup> étage de régénérateur (a), et son spectre (b)	72
<b>Figure IV.25</b>	Variation de facteur de qualité en fonction de débit binaire.	73
<b>Figure IV.26</b>	Liaison de transmission avec un régénérateur 2R double étage	74

<b>Figure IV.27</b>	Allure temporelle de signal à l'entrée de régénérateur pour un débit 40 Gb/s.	75
<b>Figure IV.28</b>	Allure temporelle de signal à la sortie de 1 <sup>er</sup> étage de régénérateur pour un débit 40 Gb/s.	76
<b>Figure IV.29</b>	Allure de signal à la sortie de 2 <sup>eme</sup> étage de régénérateur pour un débit 40 Gb/s.	76
<b>Figure IV.30</b>	Diagramme de l'œil pour une longueur 80 Km de ligne de transmission avec régénération et un débit 40 Gb/s	77
<b>Figure IV.31</b>	Allure temporelle de signal à l'entrée de régénérateur pour un débit 80 Gb/s	77
<b>Figure IV.32</b>	Allure temporelle de signal à la sortie de 1 <sup>er</sup> étage de régénérateur pour un débit 80 Gb/s.	78
<b>Figure IV.33</b>	Allure de signal à la sortie de 2 <sup>eme</sup> étage de régénérateur pour un débit 80 Gb/s.	78
<b>Figure IV.34</b>	Diagramme de l'œil pour une longueur 80 Km de ligne de transmission avec régénération et un débit 80 Gb/s	78
<b>Figure IV.35</b>	allure temporelle de signal à l'entrée de régénérateur pour un débit 160 Gb/s	79
<b>Figure IV.36</b>	Allure temporelle de signal à la sortie de 1 <sup>er</sup> étage de régénérateur pour un débit 160 Gb/s.	79
<b>Figure IV.37</b>	Allure de signal à la sortie de 2 <sup>eme</sup> étage de régénérateur pour un débit 160 Gb/s.	80
<b>Figure IV.38</b>	Diagramme de l'œil pour une longueur 80 Km de ligne de transmission avec régénération et un débit 160 Gb/s	80
<b>Figure IV.39</b>	Evolutions du facteur de qualité d'un signal optique régénéré en fonction de la distance de transmission pour différents débits	81

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<i>Tableau II. 1</i>	Influence des paramètres sur la forme de la FdT du régénérateur de Mamyshev.	40

# Introduction générale

## INTRODUCTION GENERALE

Avec la révolution au développement du multimédia dans notre époque, la fibre optique est plus suffisant comme un support de transmission, donc il devient un élément très important aux télécommunications car nous assumons le très grand débit et capacité avec des longues distance. Pour les très longues distances le signal original devient dégradé à cause des effets linéaires et non linéaires ; l'atténuation dans la fibre, le bruit d'émission spontanée des amplificateurs optiques, et la dispersion chromatique.

Avec l'augmentation du débit par canal, la compensation des dispersions chromatiques et de polarisation est de plus en plus délicate à mettre en œuvre. Il devient alors utile, voir indispensable, de régénérer le signal à l'aide de traitements appropriés. Si aujourd'hui une technique courante consiste à passer par l'électronique, une voie prometteuse pour des débits supérieurs à 40 Gbit/s consiste à utiliser l'optique non linéaire pour réaliser ces fonctions de manière tout optique.

La technique de la régénération est pour éliminer les dégradations subies par le signal et à la foi augmenter la puissance du signal, réduire la gigue d'amplitude et la gigue temporelle. La régénération fonctionne en trois étapes qui sont la réamplification, la remise en forme et la resynchronisation. On parle alors de régénération 3R (pour Reamplification, Reshaping and Retiming). Le niveau 1R est bien maîtrisé et utilisé couramment grâce à l'utilisation des amplificateurs EDFA, le troisième niveau (3R) est aujourd'hui réalisé en insérant dans les réseaux des répéteurs optoélectroniques. Les techniques tout-optique permettent notamment de réaliser des dispositifs de régénération de type 2R, réamplification et remise en forme, moins complexes et plus compacts que les dispositifs de régénération 3R. Cependant, ces technologies sont beaucoup moins matures et bénéficient de moins d'investissement que les techniques électroniques de traitement du signal ce qui explique qu'elles ne sont pas déployées dans les réseaux de transmission optique. Il apparaît donc nécessaire de trouver des solutions alternatives au traitement électronique de l'information, notamment au niveau des opérations de régénération.

Un des enjeux des futurs réseaux de télécommunications réside dans l'augmentation de l'efficacité des dispositifs réalisant ces fonctions non-linéaire de régénération pour le traitement tout optique du signal, qui doivent être compacts, robustes, peu coûteux et ultrarapides. Les dispositifs basés sur l'utilisation d'une non-linéarité dans la fibre optique

basant sur l'auto-modulation de phase ou SPM (Self Phase Modulation) sont très prometteurs en raison de leur temps de réponse quasi instantané (de l'ordre de  $10^{-15}$  s).

Le régénérateur basant sur SPM dite de Mamyshev est le plus simple des dispositifs étudiés pour la remise en forme des signaux optiques avec la possibilité de mise en œuvre à faible coût, et semble être une technique prometteuse pour la prochaine génération de réseau tout optique. Néanmoins, la faiblesse de la technique de Mamyshev ne fonctionner qu'avec de très bons taux d'extinction en entrée et de nécessiter de très fortes puissances optiques d'entrées et plusieurs centaines de mètres de fibre hautement non-linéaire. En plus, cette technique résulte un temps de retard supplémentaire (gigue temporelle) qui apparaît sur les impulsions du signal de sortie.

Pour surmonté ces limites, une évolution significative de ce concept consiste à combiner les apports d'un nouveau type d'impulsion appelée similaritons optique avec cette technique. C'est donc dans ce cadre de mémoire que nous nous proposons d'évaluer les potentialités d'un nouveau type de régénérateur 2R tout optique dite régénérateur de Mamyshev actif.

Notre mémoire est divisée en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons décrire les systèmes de transmission optique à très haute débit, les types de réseaux optique, la liaison optique point à point et ses composants, ainsi que les sources de dégradation subies par le signal au cours de sa la propagation dans la ligne de transmission. Ensuite les niveaux de la régénération seront passés en revue. Les deux principales techniques (TDM, WDM) employées pour augmenter la capacité des liaisons seront également présentées.

Dans le second chapitre, nous allons bien orienter vers la régénération tout optique, on se basant sur la régénération 2R tout optique qui est l'objectif de notre travail. Après une comparaison entre les technique optoélectroniques et tout optique pour bien montrer les avantages de cet dernier, nous résumerons brièvement les techniques de régénération 2R tout optique proposées dans la littérature, afin d'appuis sur les régénérateurs 2R tout optique à base de fibres optique hautement non-linéaire dite de Mamyshev. Nous allons présenter également, les types de fonction de transfert (FTD), le régénérateur de à double étage ainsi que les limites de ce régénérateur, et les paramètres influant sur la performance de celui-ci.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de régénérateur 2R tout optique par similariton, ce régénérateur basé sur celle de Mamyshev est dit actif. Nous allons commencer par le principe et la modélisation de similariton, ses caractéristiques et, ces deux types de génération active et passive. Ensuite, on va montrer les deux configurations de régénérateur simple et double étage dans le but d'éliminer les gigos d'amplitude et temporelle et de restaurer la longueur d'onde d'origine du signal.

Le dernier chapitre, à pour objectif de présenter le logiciel de simulation OptiSystem qu'on a utilisé pour simulé deux laissons: sans régénération et avec régénération 2R de Mamyshev en utilisant la technique de similariton dans le but d'amélioré la qualité de signal. Ce régénérateur sera évalué dans une configuration back to back, puis dans une ligne de transmission pour tester sa performance, et sa capacité de diminuer le bruit dans les '0' et les fluctuations d'intensité dans les '1' d'un signal optique OTDM monocanal.

La qualité du signal régénéré sera évaluée en termes de BER, de diagramme de l'œil et de facteur de qualité pour différentes valeur de débit binaire, et de longueurs de la liaison.

# Chapitre I

Généralités sur les systèmes  
de transmission par fibre  
optique à très haut débit

## **I.1 Introduction :**

Ce chapitre introduit les systèmes de transmissions par fibre optique. Après une brève introduction des différents types de réseaux optiques, nous décrivons les éléments constituant une liaison optique point à point à savoir l'émetteur et le récepteur du signal, ainsi que le canal de transmission. L'origine des principales dégradations subies par le signal au cours de sa transmission sont ensuite passées en revue, à savoir l'atténuation, la dispersion et les effets non linéaires dans la fibre, et le bruit d'émission spontanée amplifiée par des amplificateurs optiques. La régénération est un processus dédié à supprimer les dégradations subies par le signal lors de sa propagation, c'est-à-dire à la fois augmenter la puissance moyenne du signal, réduire le bruit d'amplitude ainsi que la gigue temporelle, ainsi, son fonctionnement divisé en trois étapes appelées régénération 1R, 2R, et 3R sont exposées brièvement. Les deux principales techniques employées pour augmenter la capacité des liaisons sont également présentées.

## **I.2 Réseaux optiques [1]:**

Selon la distance cible de transport de l'information, le réseau est dit longue et très longue distance ( $> 150$  Km), « d'accès » (jusqu'à l'utilisateur) ou encore « métropolitain » (entre le transport longue distance et l'utilisateur).

### **I.2.1 Le réseau long et très long distance :**

Le réseau longue distance (Long Haul) qui couvre typiquement des distances comprises entre 150 et 700 km permet de relier des villes, des régions entre elles. Les réseaux très longue distance (Very Long Haul entre 700 et 1500 km - Ultra Long Haul  $> 1500$  km) sont, quant à eux, plus dédiés aux liaisons internationales. Enfin les liaisons sous-marines doivent répondre aux contraintes liées à leur environnement.

Les liaisons longue et très longue distances sont en général de type « point à point » où une fibre permet de relier un point à un autre par opposition à une liaison dite « en anneau » où l'architecture de la liaison est plus complexe.

Si les liaisons terrestres doivent être le plus flexible possible, les liaisons sous-marines sont, elles, développées pour une liaison donnée. Le type de fibre (très faibles pertes  $\sim 0,2$  dB / km) et l'espacement entre répéteurs (30-65 km) sont alors optimisés pour une meilleure performance de chaque liaison. Dans les liaisons terrestres par contre,

les maîtres mots sont la flexibilité et le coût. La fibre présente alors souvent plus de pertes et l'espace entre répéteurs peut varier entre 80 et 120 km.

### I.2.2 Le réseau métropolitain :

Le réseau métropolitain, comme son nom l'indique, se situe à l'échelle des villes et plus largement des zones métropolitaines. Il présente en général une architecture complexe, où l'information doit commuter du réseau longue distance au réseau local jusqu'à l'utilisateur. La capacité des réseaux métropolitains sont souvent insuffisantes. Car si les réseaux longues distances ont été adaptés aux volumes croissants de communications, le réseau métropolitain présente souvent des zones d'engorgement. Dans le contexte économique actuel, les solutions qui semblent adéquates, sont celles qui permettent d'augmenter la capacité du réseau tout en augmentant les fonctionnalités et la flexibilité de l'infrastructure existante.

### I.2.3 Le réseau d'accès :

Le réseau d'accès optique est le réseau qui évolue le plus à l'heure actuelle. La tendance est au 'tout optique à l'utilisateur. Les solutions peuvent atteindre 2,5 Gbit/s. Ceci implique le développement de nouvelles fonctions optiques adaptées à ce marché principalement tourné vers le très bas coût.

## I.3 Liaisons optiques

Nous considérons dans ces travaux le cas d'une liaison point à point constituée d'un émetteur qui génère un signal numérique optique à partir d'un message électrique. Le transport est ensuite assuré par la fibre optique alternée avec des amplificateurs optiques. En réception, le signal est détecté pour être décodé. La Figure I.1 représente le schéma typique d'une telle liaison.

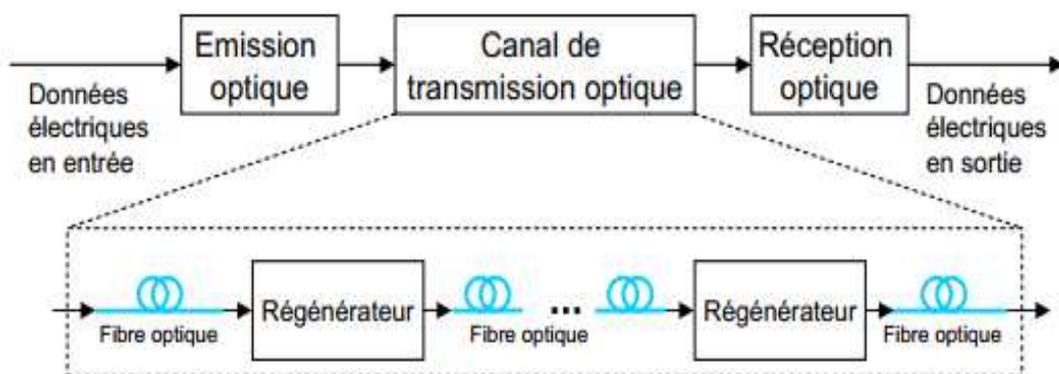


Figure I.1 : Schéma d'une liaison optique point à point

Dès le commencement des télécommunications par fibre optique, le choix des sources optiques s'est appuyé sur les émetteurs à semi-conducteur dont l'évolution des structures s'est faite de manière parallèle aux autres types de lasers [2].

Le laser à semi-conducteur est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques en permettant ainsi une meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre [3].

### I.3.1 Le module d'émission : Transmetteur optique

Le transmetteur est l'équipement capable de convertir les données numériques de l'utilisateur en un signal optique qui sera envoyé sur le canal de transmission. Il est composé d'une diode laser, d'un modulateur et d'un générateur de données.

Un transmetteur optique se caractérise par la puissance transmise et la longueur d'onde émise. Ces paramètres peuvent être fixés par le fabricant ou ajustables.

#### I.3.1.1 Diode laser

Un laser est une source émettant de la lumière cohérente. Le mot LASER provient de l'acronyme Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. En français : amplification de la lumière par émission stimulée de radiation [4].

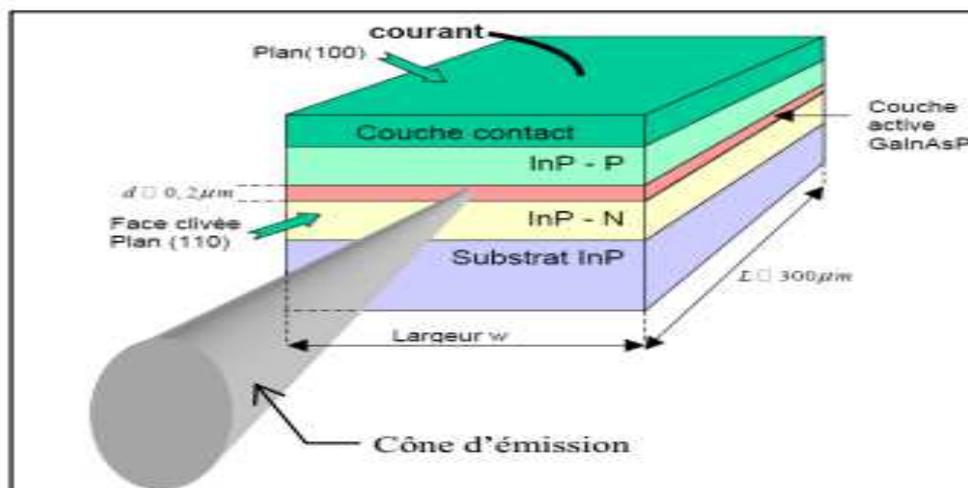


Figure I.2 : Structure d'une diode laser au GaInAsP [5]

La Figure I.2 présente la structure d'une diode laser à l'arséniure de gallium (GaInAsP). La couche active est placée entre deux couches de confinement. En injectant du courant, les électrons sont injectés dans la couche active où ils se recombinent radiativement. Dans les diodes laser, l'amplitude du signal électrique appliqué fait varier proportionnellement la puissance optique émise.

Un laser est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée. Dans un semi-conducteur, un électron peut passer d'un état à un autre de trois manières différentes [4]:

- **Absorption d'un photon incident:** En absorbant un photon d'énergie  $h\nu$ , l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de la bande de valence vers la bande de conduction.

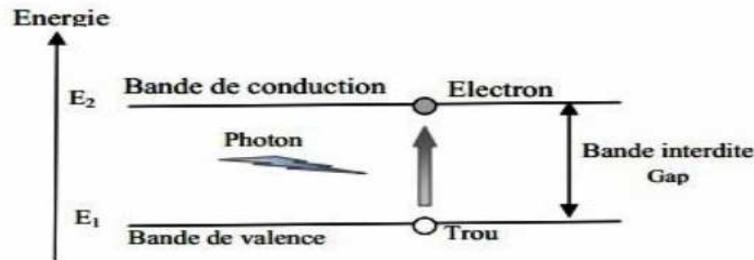


Figure I.3 : Processus d'absorption.

- **Emission spontanée :** La recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence, permet l'émission d'un photon. C'est une émission isotropique où les photons émis ne sont absolument pas en phase les uns avec les autres.

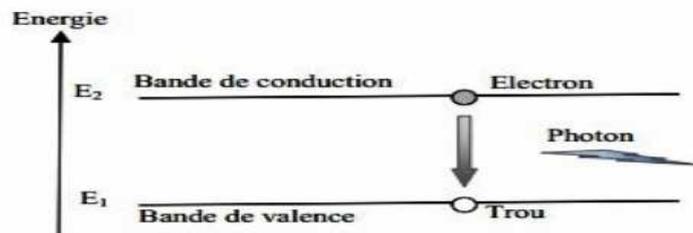


Figure I.4 : Processus d'émission spontanée.

- **Emission stimulée :** Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident.

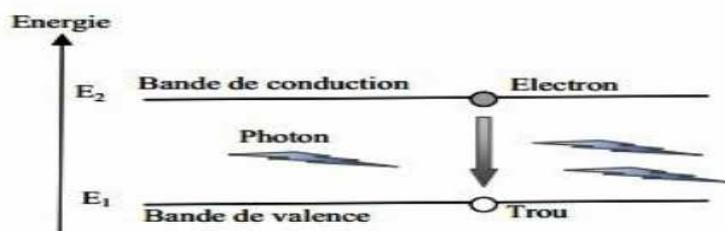


Figure I.5 : Processus d'émission stimulée.

**Remarque :** Un processus d'absorption trouve son application dans la photodiode, celui de l'émission spontanée dans la diode électroluminescente et l'émission stimulée dans la diode laser.

### I.3.1.2 La modulation :

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

#### a. La modulation directe :

C'est la méthode de modulation la plus simple : elle consiste à moduler directement le courant de pompe de la diode laser, ce qui va se répercuter sur la puissance du signal lumineux émis (Figure I.6). Mais une telle modulation du courant de pompe induit aussi un chirp du signal [6], c'est-à-dire une modulation parasite de la phase du signal optique en fonction de la puissance du signal de pompe.

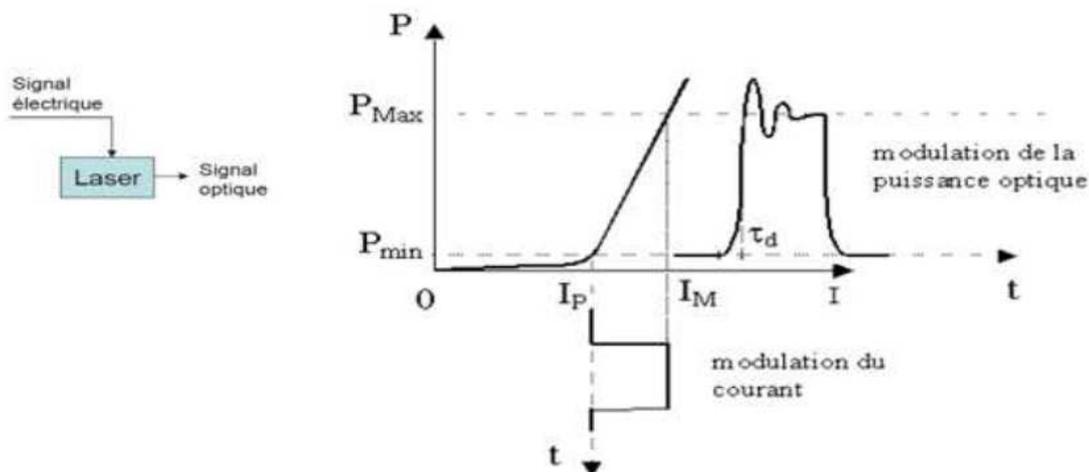


Figure I.6 : Schéma et principe de la modulation directe.

#### b. La modulation externe :

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

La modulation externe (Figure I.7) est une bonne alternative, le laser émettant dans ce cas un simple signal constant, tous les défauts dus à la modulation du courant de polarisation seront éliminés. De plus, la bande passante des modulateurs externes est beaucoup plus élevée (80 GHz) que celle d'une modulation directe (5 GHz) qui est limitée par la fréquence de relaxation des diodes laser.

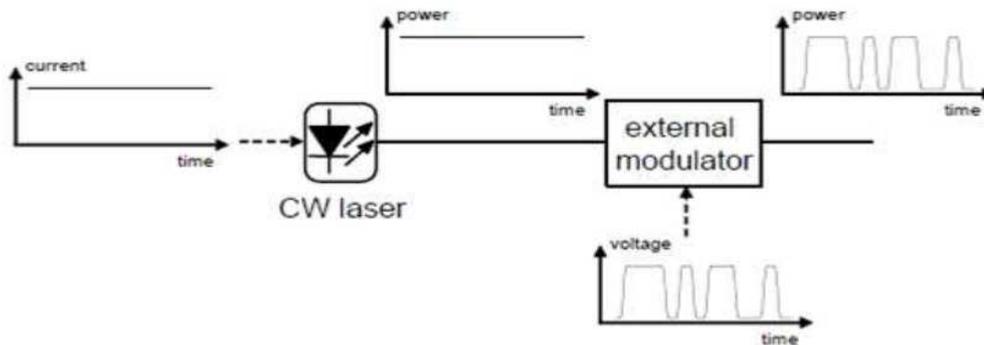


Figure I.7 : Schéma et principe de la modulation externe.

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

- **Le modulateur Mach-Zehnder**

Les effets électro-optiques sont la base de ces types de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique, variant selon la modulation des données [7].

Ce phénomène est appelé effet Pockels si les effets électro-optiques sont linéaires, c'est-à-dire que la variation d'indice est proportionnelle au champ appliqué, et effet Kerr quand elle est proportionnelle au carré du champ. L'effet Pockels est prépondérant dans certains matériaux et permet des modulations de phase et d'amplitude de la lumière.

De tels modulateurs fonctionnant à 1,5  $\mu\text{m}$  ont été réalisés sur substrat de niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) ainsi que dans des matériaux semi-conducteurs (arséniure de gallium ( $\text{GaAs}$ ), ...).

La lumière est couplée dans deux guides par un embranchement en  $Y$ . Les deux faisceaux se recombinaient ensuite dans un deuxième embranchement en  $Y$ . Au moyen d'une ou de deux cellules électro-optiques, placée sur l'un des bras de l'interféromètre, un déphasage relatif entre les deux signaux est appliqué. Ce déphasage est converti en variation d'intensité du signal optique par l'interférence entre les signaux déphasés issus des deux bras. La Figure I. 8 (a), montre un schéma d'un MZM.

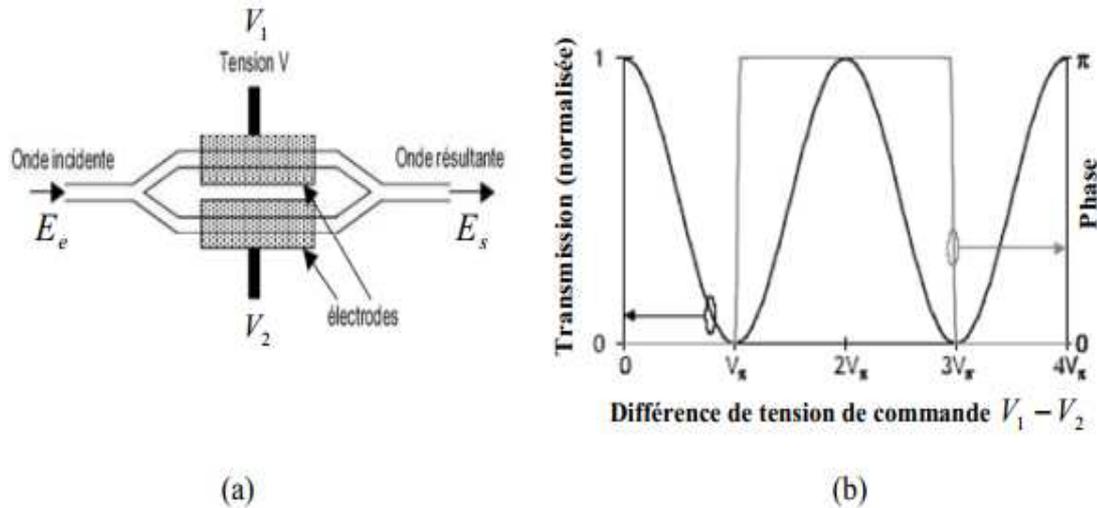


Figure I.8 : (a) Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder. (b) la fonction de transfert en intensité et en phase d'un Mach-Zehnder

Le modulateur MZM est caractérisé par sa fonction de transfert en amplitude décrite, par l'équation I.1[8][9].

$$E_s = E_e \cos\left[\pi\left(\frac{V_1 - V_2}{2V_\pi}\right)e^{-i\left(\pi\frac{V_1 + V_2}{2V_\pi}\right)}\right] \quad (I.1)$$

Avec :

$E_e$  est le champ électrique du signal optique d'entrée, continu car provenant directement de la source laser,

$E_s$  est le champ électrique du signal de sortie,

$V_1$  et  $V_2$  sont les tensions de commande des cellules électro-optiques,

$V_\pi$  est la tension appliquée afin d'obtenir un déphasage de  $\pi$  entre les deux bras du modulateur.

### I.3.1.3 Formats de modulation

Différentes modulations du signal optique permettent le codage du signal. Elles se classent en deux catégories, la modulation d'amplitude (ASK pour Amplitude Shift Keying) pour laquelle le passage d'un symbole binaire à l'autre se caractérise par la présence ou non de signal optique, et la modulation de phase (PSK pour Phase Shift Keying) pour laquelle le passage d'un symbole binaire à l'autre se caractérise par une variation de la phase du signal [10]. La modulation de phase notamment le format DPSK (pour Differential Phase Shift Keying), connaît à l'heure actuelle un regain d'intérêt car elle permet de repousser les limites des performances très haut débit [11] [12]. L'intérêt

suscité pour ce type de format est cependant assez récent et n'a pas fait l'objet d'étude particulière pendant ces travaux.

Les deux principaux formats de modulation d'amplitude sont le format RZ (Return-to-Zero) et le format NRZ (Non-Return-to-Zero).

#### a. Format NRZ (Non Return to Zero)

Le format NRZ est celui le plus utilisé dans les réseaux de télécommunications actuels. Il est donc intéressant d'étudier en laboratoire des fonctions compatibles avec ce format. Comme pour tout format d'amplitude, un symbole '1' correspond à la présence de lumière et un symbole '0' à son absence. Plus précisément dans le cas du format NRZ, à chaque bit correspond un niveau continu. Ainsi, lorsque deux (ou plus) symboles identiques se suivent, le signal reste au même niveau continu. Il n'y a donc pas de retour à zéro entre deux '1' successifs d'où le nom de ce format. Un exemple de séquence de bits codée au format NRZ est représenté sur la Figure I.9 (a) et le spectre d'un tel signal apparaît sur la Figure I.9 (b).

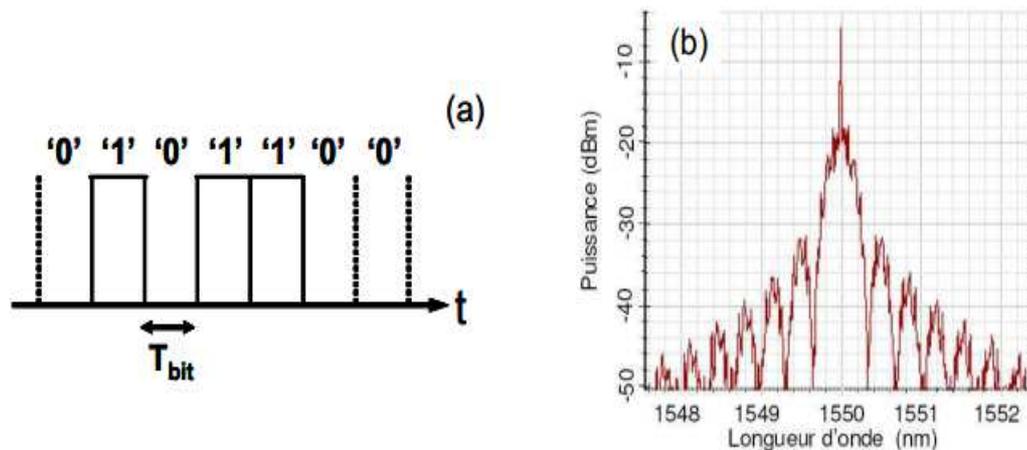


Figure I.9 : Représentation temporelle (a) et spectrale (b) d'un signal codé en format NRZ.

#### b. Format RZ (Return to Zero)

Le format RZ est le format le plus robuste vis à vis des effets non linéaires et de la dispersion de mode de polarisation (PMD pour Polarization Mode Dispersion) [13]. De plus, ce format est propice au multiplexage temporel [14], comme nous le verrons dans la suite de ce paragraphe. Ainsi, le format RZ apparaît comme le format de modulation de type ASK le mieux adapté aux transmissions haut débit [15].

Un signal codé au format RZ est formé d'impulsions correspondant aux symboles '1' et d'absence d'impulsion pour les symboles '0'. Ainsi, deux '1' successifs seront codés par

l'enchaînement de deux impulsions. Il y a donc, contrairement au format NRZ, un « retour au niveau zéro » entre deux '1' successifs, d'où le nom de ce format. La Figure I.10 présente le signal de la Figure I.9 mais cette fois ci codé au format RZ (a) ainsi que le spectre de ce signal RZ(b).

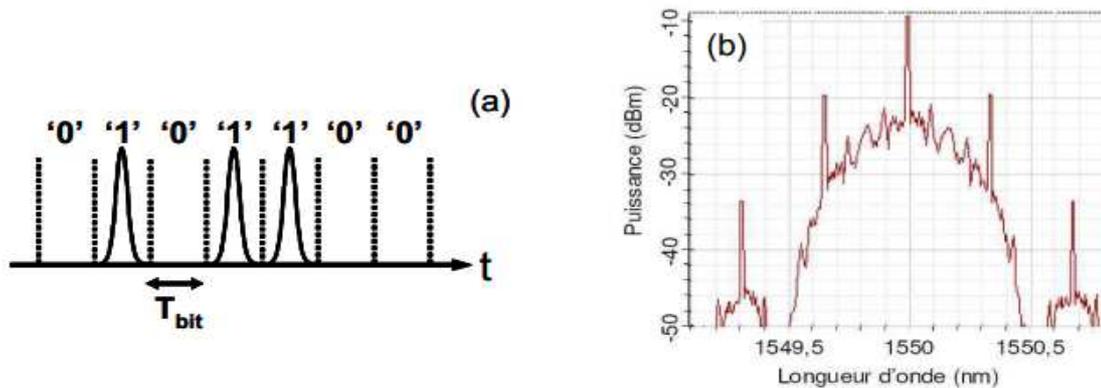


Figure I.10 : Représentation temporelle (a) et spectrale (b) d'un signal codé en format RZ.

En regardant la Figure 1.10 (a), on peut aisément comprendre que les impulsions du format RZ doivent avoir une largeur à mi-hauteur inférieure au temps bit. Dans le cas contraire, des recouvrements entre symboles auront lieu et rendront difficile voire impossible une détection de l'information sans erreur. Par contre, en utilisant des impulsions très courtes par rapport au temps bit, les effets de recouvrements entre symboles survenant par dégradation du signal pourront être limités mais surtout il sera possible de placer plusieurs impulsions dans un même temps bit et ainsi augmenter le débit par technique de multiplexage temporel optique (OTDM pour Optical Time Division Multiplexing).

### I.3.2 Le module de réception

En réception, le signal est détecté puis analysé. La chaîne de détection est représentée sur la Figure I.11. Elle est constituée d'une photodiode rapide qui convertit le signal optique en photocourant. Le signal est ensuite amplifié dans un amplificateur limiteur permettant de maintenir une puissance électrique moyenne constante. Un filtre passe-bas permet de limiter le bruit électrique reçu par un circuit de décision. Une partie du signal est envoyée sur une récupération d'horloge. Le signal est enfin injecté sur le circuit de décision. Certains des éléments de la chaîne sont détaillés dans ce qui suit.

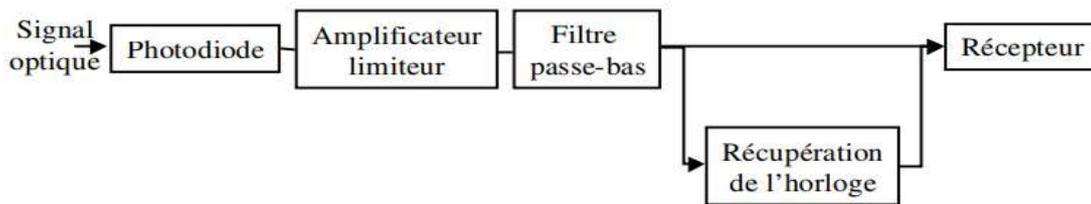


Figure I.11 : Chaîne de détection.

### I.3.2.1 La photodiode

La photodiode est un composant à base de matériaux semi-conducteurs dans laquelle seront pénétrés les photons transmis par la fibre. Sa structure lui permet de transférer efficacement l'énergie de photons incidents sur des électrons contenus dans le matériau (absorption du photon) en provoquant son passage d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Et donc ces électrons excités sont plus ou moins libres de se déplacer dans la structure pour former un courant électrique. Le nombre d'électrons est égal au nombre de photons absorbés. Seuls les photons d'énergies supérieures à la largeur de bande (gap) interdite du semi-conducteur sont absorbés de manière utile et créant les paires électrons-trous. Ce gap fixe donc l'énergie minimale pour assurer le fonctionnement de la photodiode. Cela implique une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$ , au-delà de laquelle le matériau devient transparent au rayonnement.

$$E_{\text{photon}} = \frac{h.c}{\lambda} \geq E_g \quad \lambda_c = \frac{h.c}{E_g} \quad (\text{I.2})$$

Afin d'empêcher les électrons de retomber dans leur état le plus stable, une différence de potentiel est appliquée, sous laquelle les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant.

- **Photodiode PIN**

Pour effectuer la photodétection, en évitant les recombinaisons des paires électrons trous, il faut que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. Cette dernière doit être large pour permettre un bon rendement quantique, d'où l'intérêt de la photodiode PIN, où une région intrinsèque est intercalée entre les régions de type P et de type N. La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque, lorsque la photodiode est polarisée en inverse, où règne un champ électrique qui sépare les

porteurs. La zone traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau [16].

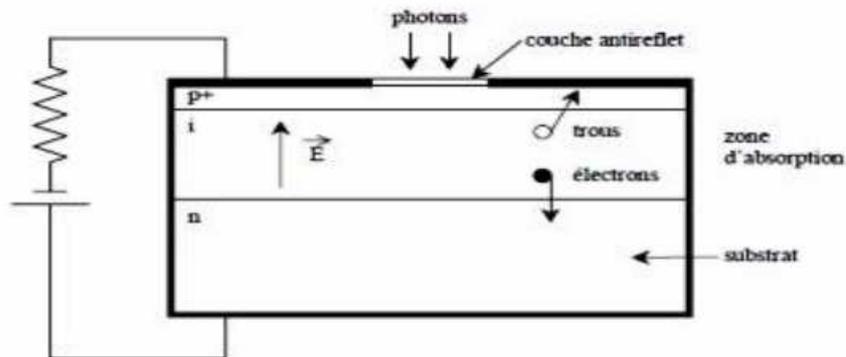


Figure I.12 : Structure d'une photodiode PIN.

### I.3.3 Le canal de transmission : La fibre optique

En se comportant comme un guide d'onde lumineuse, la fibre optique est l'élément de base de la liaison optique. Sa première caractéristique est son atténuation extrêmement faible sur certaines plages de longueurs d'onde, ce qui en fait le moyen de transmission dominant dans les liaisons câblées à longue distance. Elle présente également de nombreux autres avantages [17] :

- pas besoin de ré-amplification fréquente du signal, étant donné la faible atténuation sur des dizaines de kilomètres.
- étant donné que la fibre est insensible aux perturbations électromagnétiques, le signal subit peu de distorsion.
- la capacité de transmettre des données à très haut débit.

La figure I.13 représente une fibre optique de transmission typique. Celle-ci est constituée d'un cylindre central appelé cœur, d'un autre cylindre entourant le cœur appelé gaine et d'une enveloppe protectrice en plastique.

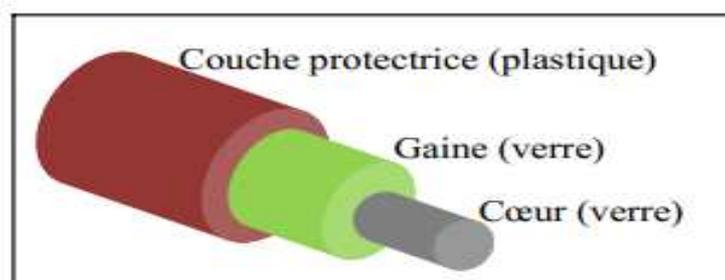


Figure I.13 : Fibre optique.

La fibre optique est, généralement, fabriquée de la silice, un matériau qui ressemble au verre. La silice est un composé de silicium (Si) et d'oxygène (O) dont la formule chimique est  $\text{SiO}_2$  [18]. Nous retrouvons ce composé dans la nature dans différents minéraux tels que le quartz. Le principe de fabrication d'une fibre optique repose sur l'étirage d'une préforme de verre. Grâce à des techniques complexes, on peut ainsi étirer un tube de verre d'un mètre de long sur 10 cm de diamètre jusqu'à en faire une fibre optique de 150 km de long [19].

## **I.4 Origines des dégradations du signal**

### **I.4.1 Effets linéaires dans la fibre**

Les effets de propagation linéaires sont consécutifs à une réponse linéaire du matériau de la fibre à l'excitation électromagnétique induite par le signal, via la susceptibilité  $\chi_1$ . Ils regroupent tous les effets n'impliquant pas d'interactions entre les faisceaux (ou signaux) transmis. Le principe de superposition peut donc s'appliquer (l'intensité totale est la somme de l'intensité de chaque faisceau). Les effets linéaires étant directement liés à la distance de propagation, ils sont donc d'autant plus importants que les distances de transmission augmentent. Ils modifient soit la puissance des impulsions (atténuation) soit leur forme (dispersion).

#### **I.4.1.1 L'atténuation dans la fibre**

La fibre optique s'est imposée comme le meilleur moyen de transport de l'information au vu de sa robustesse, ses propriétés mécaniques de résistance aux torsions et tractions, sa faible épaisseur mais surtout sa faible atténuation. Cette dernière induit effectivement des pertes minimales en comparaison de celles induites par les câbles coaxiaux en cuivre. Cependant, elle n'est pas nulle et peut donc devenir pénalisante pour de longues distances de propagation [20].

Le signal subit au cours de sa propagation dans la fibre des pertes liées à l'atténuation de la fibre de transport. L'atténuation est essentiellement due à l'absorption de la silice et à la diffusion Rayleigh. La diffusion Rayleigh provient des fluctuations locales de l'indice de réfraction liées à la fabrication de la fibre. La présence d'impuretés, et particulièrement la présence d'ions  $\text{OH}^-$  peut également accentuer l'absorption du signal. C'est essentiellement pour bénéficier de ce minimum d'atténuation que la plage de longueurs d'onde des télécommunications optiques s'est imposée autour de 1,55  $\mu\text{m}$ .

Les fibres actuelles possèdent une atténuation de l'ordre de 0,2 dB / km autour de cette longueur d'onde, ce qui est loin devant les autres milieux de propagation.

Les pertes linéiques quant à elles, correspondent aux pertes d'insertion par unité de longueur que l'on exprime souvent en dB/km. Pour retrouver les pertes linéiques en  $km^{-1}$ , on peut utiliser la formule suivante [5] :

$$\alpha (Km^{-1}) = \frac{\ln(10)}{10} \alpha (dB.Km^{-1}) = 0.23\alpha (dB.Km^{-1}) \quad (I.3)$$

La Figure I.14 montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice. D'après cette figure, l'atténuation minimale de 0,22 dB/km est très proche du minimum théorique pour la silice (0,14 dB/km). La différence s'explique par le fait que l'on ne peut pas utiliser de la silice pure. On doit doper soit le cœur, soit la gaine et cela augmente les fluctuations de composition et donc les pertes par diffusion.

Il existe trois fenêtres, la première fenêtre, de 0,8 à 0,9  $\mu m$ , n'est pas un minimum d'atténuation, mais un optimum d'utilisation des matériaux les plus économiques. Cette fenêtre permet des liaisons peu coûteuses à courtes distances ou en réseau local. L'ensemble des pertes présente deux fenêtres de transmission de part et d'autre du pic OH- autour de 1,3  $\mu m$  et autour de 1,55  $\mu m$ . La deuxième fenêtre est de 1,28 à 1,33  $\mu m$ . Cette dernière présente une atténuation de 0,33 dB/km. La troisième fenêtre est de 1,525 à 1,625  $\mu m$ . Elle présente une atténuation minimale de l'ordre de 0,2 dB/km et contient deux sous-bandes, la bande C de 1,529 à 1,561  $\mu m$  et la bande L de 1,569 à 1,602  $\mu m$ . C'est la fenêtre choisie pour quasiment toutes les applications modernes.

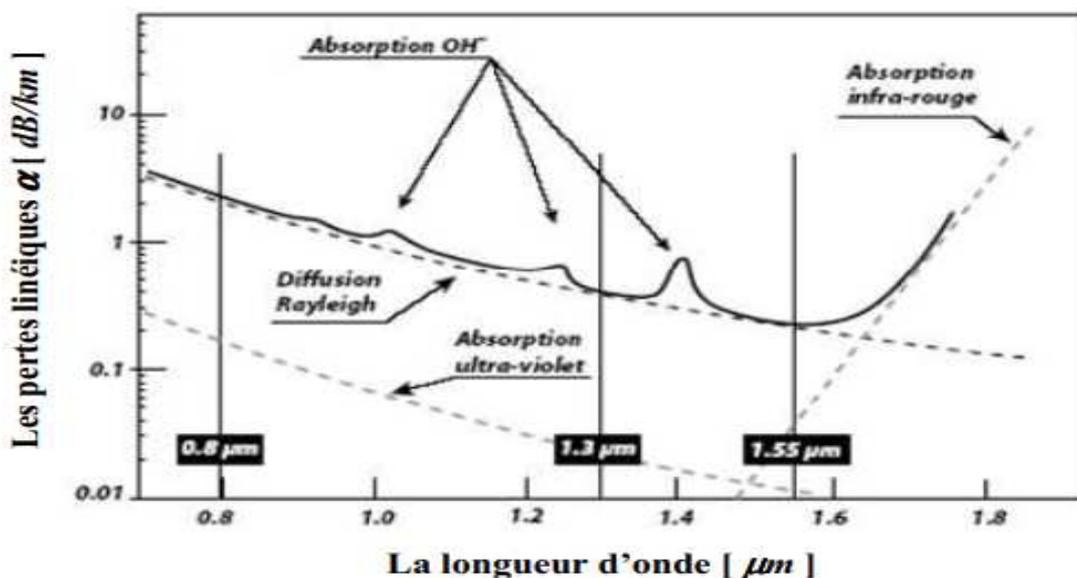


Figure I.14 : Courbe de variation des pertes linéiques en fonction de la longueur d'onde pour les fibres monomodes standard.

### I.4.1.2 La dispersion dans la fibre [21] :

La dispersion se traduit notamment par un étalement dans le temps que subissent de brèves impulsions lumineuses émises dans la fibre optique. Les causes de dispersion sur les fibres optiques sont principalement :

- La dispersion modale due aux différences de temps de propagation des modes ayant parcouru des trajets de longueur différente.
- La dispersion chromatique due entre autres à la dépendance de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.



Figure I.15 : Dispersion chromatique dans une fibre.

## I.4.2 Effets non linéaires

### I.4.2.1 L'effet de Kerr

Un type d'effet non-linéaire très important dans les fibres optiques est l'effet Kerr. Celui-ci apparaît lorsque l'intensité du signal devient si importante qu'elle peut modifier significativement l'indice de réfraction  $n$  de la fibre [22].

$$n = n_0 + n_2 |E|^2 = n_0 + n_2 I \quad (I.4)$$

Où  $n_0$  est l'indice de réfraction linéaire de la silice,  $n_2$  l'indice de réfraction non-linéaire,  $E$  l'amplitude du champ électrique et  $I$  l'intensité du signal.

Cette dépendance de l'indice de réfraction à l'intensité du signal est à l'origine de certains effets non-linéaires intéressants comme l'auto-modulation de phase et la modulation de phase croisée.

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

L'auto-modulation de phase (ou SPM pour Self Phase Modulation) introduit une dépendance de la phase à l'intensité du signal durant sa propagation dans une fibre. Le déphasage non-linéaire du signal à une distance  $L$  s'écrit [23] :

$$\phi_{NL}(z, T) = \gamma \cdot P \cdot L \quad (I.5)$$

Où  $P$  est la puissance optique et  $\gamma$  le coefficient non-linéaire  $\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega}{c \cdot A_{eff}}$ . Avec  $\omega$  : la pulsation du signal,  $c$  : la vitesse de la lumière dans le vide,  $A_{eff}$  la surface effective de la fibre.

Cette phase dépendante du temps modifie la largeur, et la forme du spectre (Figure I.16).

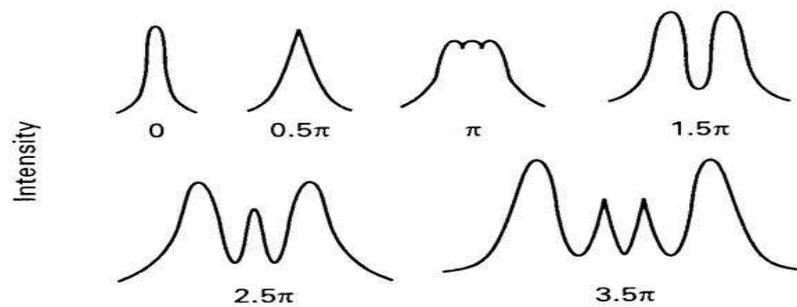


Figure I.16 : SPM dans une fibre.

### b. La modulation de phase croisée (XPM)

C'est un décalage de phase non linéaire  $\phi_{NL}$  d'un champ optique induit par la Co-propagation de champs à différentes longueurs d'onde. La XPM est toujours accompagnée de la SPM et est due à la dépendance de l'indice de réfraction effectif d'une onde, non seulement de l'intensité de cette onde mais aussi de l'intensité des autres ondes en Co-propagation [24].

- **Bilan des effets non linéaire**

Les effets non linéaires présentés dans ce paragraphe sont à l'origine de dégradations du signal des liaisons optiques (génération de bruit d'amplitude, d'interférences entre symboles).

Ces effets non linéaires sont également à l'origine d'une gigue temporelle, dite de 'Gordon Haus' du nom de J.P. Gordon et de H. Haus, à l'origine de son identification [25]. La gigue de Gordon Haus est une gigue temporelle due aux effets combinés de l'effet Kerr, de la dispersion chromatique et du bruit d'amplitude. En effet lorsque la puissance du signal est telle qu'il y'a de l'effet Kerr, une modulation de l'amplitude liée au bruit d'amplitude conduit à une modification de l'indice de réfraction. Ceci modifie la fréquence moyenne de l'impulsion qui voit alors une vitesse de groupe légèrement différente de celle vue par des impulsions d'amplitude différentes. Les fluctuations d'amplitude se traduisent finalement dans ces conditions par des fluctuations de temps d'arrivée des impulsions, la gigue temporelle.

## I.5 La régénération

La régénération est l'une des solutions pour repousser les limites en distance et en capacité des lignes de transmission optique [26]. La solution tout optique est une solution qui entre totalement dans le contexte des réseaux transparents. Le principe de la

régénération est de diminuer les dégradations subies par le signal au cours de sa propagation à savoir principalement son atténuation, l'augmentation du bruit d'amplitude sur les symboles et l'apparition de gigue temporelle. La régénération peut s'échelonner en trois étapes : la régénération 1R pour l'étape de ré-amplification; pour une régénération 2R du signal, s'ajoute à cette amplification une remise en forme du signal qui tend à limiter le bruit d'amplitude; enfin la régénération 3R permet de compléter la régénération 2R par une re-synchronisation des données pour limiter l'accumulation de gigue temporelle.

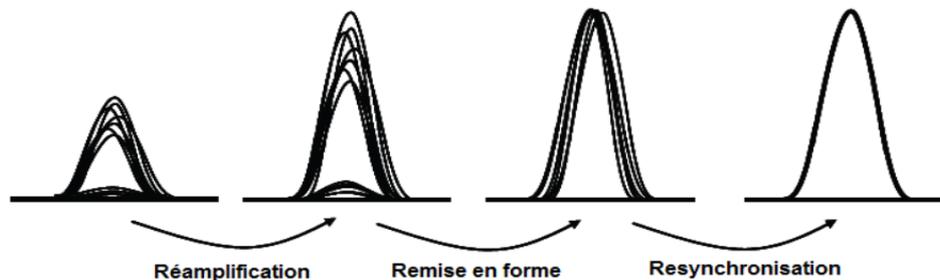


Figure I.17 : Principe des trois étapes de régénération d'un signal au format RZ.

### I.5.1 La régénération (1R) :

Bien que le coefficient d'atténuation des fibres optiques soit faible (0,2 dB/km dans la bande de télécommunications autour de 1550 nm), les communications sur de longues distances imposent l'utilisation d'amplificateurs. Avant l'apparition des amplificateurs optiques, les pertes étaient compensées par la régénération du signal par des répéteurs électriques qui transformaient d'abord le signal optique en signal électrique puis l'amplifient avant de le re-transformer en signal optique. Ces répéteurs électriques devenaient vite complexes et onéreux, en particulier pour les systèmes multicanaux ou sous-marins, d'où l'idée d'amplifier directement le signal optique. Plusieurs types d'amplificateurs optiques ont été développés durant les années 80. Les amplificateurs à semi-conducteurs (ou SOA pour Semiconductor Optical Amplifier) furent initialement utilisés, mais leur intérêt a vite diminué à cause des problèmes de diaphonie entre canaux. La mise au point de l'amplificateur à fibre dopée erbium (ou EDFA pour Erbium-Doped Fiber Amplifier) a constitué une révolution dans le domaine des télécommunications optiques. En effet, son fort gain ( $> 30$  dB), sa grande puissance de saturation, sa large bande d'amplification ( $> 30$  nm) et son insensibilité à la polarisation en font un composant clé des systèmes de télécommunications optiques. Néanmoins, avec les pompes fixées à 980 nm ou/et 1480 nm, l'EDFA se limite à amplifier uniquement dans une bande spectrale (la bande C) [27].

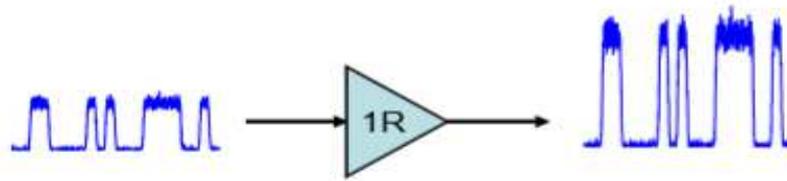


Figure I.18 : Principe de la régénération 1R

Avec l'accroissement du nombre de canaux dans la fibre grâce à la technique WDM (Wavelength Division Multiplexing), la bande spectrale offerte par les EDFA, limitée au maximum à 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant. Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale (la largeur et la flexibilité). C'est l'amplificateur Raman (ou RA pour Raman Amplifier), qui, grâce à l'effet Raman, crée un gain sur une très large bande ( $> 100$  nm) à une distance de 13 THz à partir de la longueur d'onde de pompe. De nos jours, les deux types d'amplification EDFA et RA sont combinés pour exploiter les points forts de chaque type d'amplification afin d'optimiser les systèmes à longue distance [27].

Le principe des amplificateurs optiques de type EDFA (Figure I.18) est d'utiliser le phénomène d'émission stimulée de l'ion erbium pour réaliser le processus d'amplification. Cependant, ce phénomène d'interaction entre la matière et le rayonnement s'accompagne également de phénomènes d'absorption et d'émission spontanée. Or, une partie des photons générés par émission spontanée est guidée et également amplifiée. Cette émission a lieu de manière aléatoire au cours du temps et n'est pas cohérente avec le signal. C'est ce que l'on appelle le bruit optique d'émission spontanée amplifiée (ASE) [28][29].

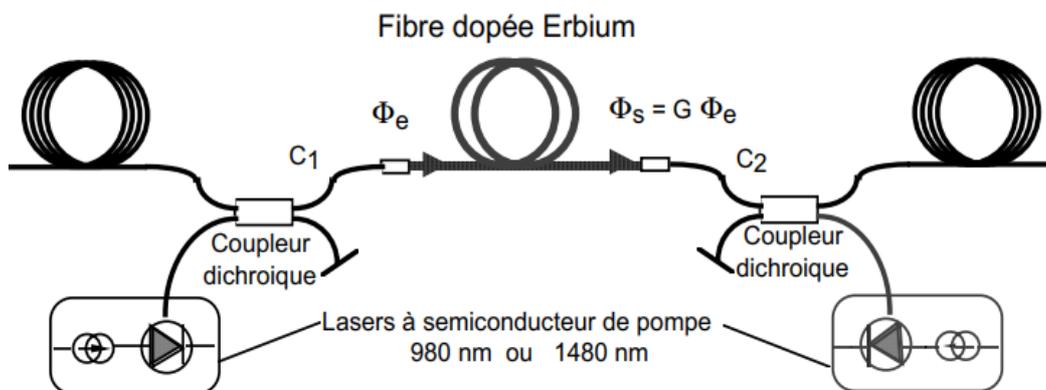


Figure I.19: Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec pompage optique.

Le facteur de bruit optique de l'amplificateur s'écrit :

$$NF = \frac{1}{G} + 2 \cdot n_{sp} \cdot \frac{G-1}{G} \quad (I.4)$$

Où  $G$  est le gain,

$n_{sp}$  le facteur d'émission spontanée.

L'accumulation d'émission spontanée amplifiée dans une liaison comportant plusieurs amplificateurs optiques, conduit à une dégradation progressive du Rapport Signal sur Bruit Optique (OSNR pour Optical Signal-to-Noise Ratio),).

### I.5.2 La régénération (2R) :

La seconde étape de régénération est la régénération 2R qui va ré-amplifier le signal mais aussi le remettre en forme. Elle doit permettre de compenser l'accumulation du bruit des amplificateurs optiques soit en convertissant les données sur une porteuse non bruitée, soit en convertissant les données sur une porteuse non bruitée, soit en améliorant le taux d'extinction du signal.

La Figure I.19 présente le schéma de principe du régénérateur 2R. Les régénérateurs 2R sont en général formés d'un amplificateur optique linéaire suivi d'une porte optique non-linéaire [30].

Toutefois, la régénération 2R ne corrige que les fluctuations d'amplitude du signal. Elle ne corrige pas les fluctuations temporelles des symboles, connues sous le nom de gigue temporelle ou "jitter" en anglais. L'accumulation de gigue peut conduire à une dégradation du TEB (taux d'erreurs binaires). La régénération 3R, présentée dans le paragraphe suivant, est la solution pour éviter ce problème.

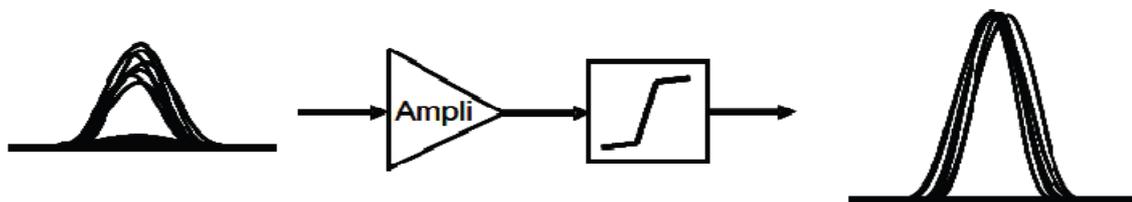


Figure I.20 : Principe de la régénération 2R.

### I.5.3 La régénération (3R) :

Le principe de la régénération 3R est représenté sur la Figure I.20. En plus des composants clés pour la régénération 2R : un amplificateur et une porte non-linéaire, la régénération 3R nécessite une récupération d'horloge pour retrouver le rythme des données.

Une partie du signal dégradé est envoyée dans cette récupération d'horloge, qui va générer une horloge optique ou électrique synchronisée avec le signal. Cette horloge va ensuite modifier la transmission de la porte non-linéaire, ce qui permet une resynchronisation du signal et ainsi une réduction de la gigue temporelle.

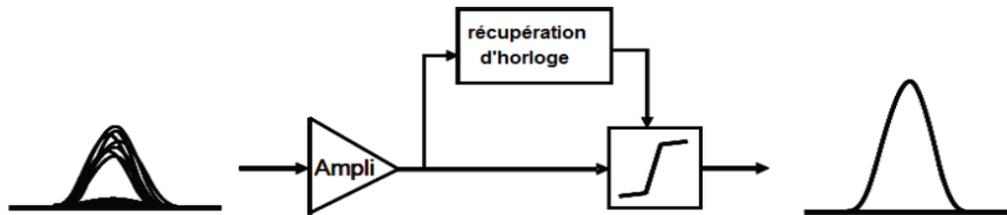


Figure I.21 : Principe de la régénération 3R.

## I.6 Augmentation de la capacité des liaisons

La bande passante d'une fibre optique monomode utilisée dans les transmissions optiques représente la fenêtre sur laquelle l'atténuation reste suffisamment faible, est de 25 THz autour de 1.55  $\mu\text{m}$  [31]. Elle est suffisamment large pour que sa réponse ne distorde pas le signal même dans les transmissions à plusieurs Gb/s. Cependant, l'électronique dans l'émetteur et le récepteur n'est pas capable d'exploiter cette performance offerte par la fibre optique et elle limite la vitesse de transmission dans ces liaisons. Il existe principalement trois façons pour résoudre ce problème.

Durant de nombreuses années, rajouter des fibres était la seule façon dont disposaient les sociétés pour augmenter la capacité des transmissions optiques. Ce qui a permis d'atteindre un débit de 2,5 Gb/s. cependant cette solution est très onéreuse et l'installation est aussi difficile. Donc cette solution serait pratiquement impossible à envisager.

### I.6.1 Le multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexage) : [32]

Le TDM permet une division des signaux selon des périodes de temps. Ainsi, il est possible d'envoyer quelques signaux distincts sur une seule fibre en employant des segments de temps préalablement définis. Dans le système TDM, l'émetteur est constitué par N sources optiques en parallèle modulées au débit B b/s. Cette technique nécessite que les impulsions soient de durée inférieure à  $T_b/N$  afin d'éviter le recouvrement.

La technique TDM peut s'effectuer de manière tout-optique, on parle alors d'OTDM (Optical TDM), ou de manière électrique, on parle donc d'ETDM (Electrical TDM). La différence entre l'ETDM et l'OTDM réside dans le fait que, dans l'ETDM, le modulateur optique doit fonctionner non pas au débit des données transmises mais à celui du signal

sortant du multiplexeur, ce qui fait qu'à la sortie du multiplexeur le débit est de  $N \times B$  si on considère le nombre d'utilisateurs  $N$  et le débit de données  $B$ .

La technique ETDM/OTDM permet d'atteindre des débits de 1 Tb/s mais elle est beaucoup trop coûteuse étant donné qu'il est nécessaire de réaliser de gros investissements dans de nouvelles infrastructures.

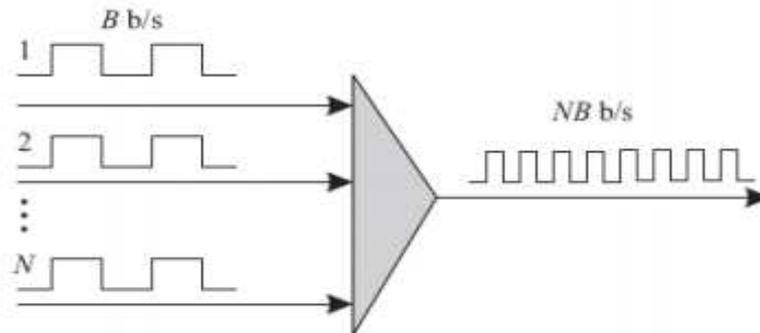


Figure I.22 : La technique de multiplexage TDM.

### I.6.2 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexage)

Son principe consiste à envoyer plusieurs ondes de longueurs différentes sur la même fibre. La modulation d'une onde se fait d'une façon classique. Les ondes sont ensuite multiplexées par des systèmes optiques passifs. L'avantage de la technique WDM est qu'elle n'est pas tributaire de la vitesse des équipements électroniques. Cependant le nombre de longueurs d'onde qu'une fibre peut transporter est limité : d'une dizaine de longueurs d'ondes il y a quelques années, on est passé à plusieurs centaines aujourd'hui. De plus, en WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux [33].

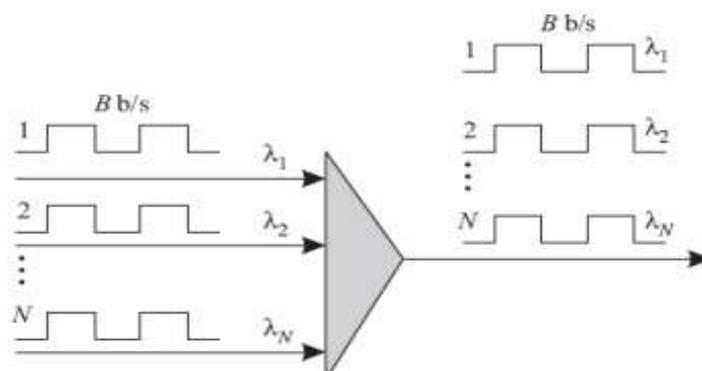


Figure I.23 : La technique de multiplexage WDM.

### **I.7 Conclusion :**

Nous savons à présent ce qu'est un signal optique pour les télécommunications, et comment il est généré, émit et reçu. La description complète d'une liaison optique composant par composant, a été effectuée.

Nous avons vu à la lecture de ce chapitre que le signal numérique transmis dans une liaison optique subit un grand nombre de dégradations. Ces dégradations, et malgré les différentes compensations possibles, limitent la portée des liaisons car le signal détecté peut ne pas être analysé correctement et l'information ne pas être transmise convenablement.

La régénération optique, qui fait l'objet de ces travaux, est une solution pour étendre la portée des liaisons. Elle a été étudiée ici brièvement. Une étude plus approfondie rendra compte de la régénération 2R optique, et de sa potentiel est introduite dans le chapitre suivant.

# Chapitre II

La régénération 2R tout optique

## II.1 Introduction:

Dans les systèmes de télécommunications par fibre optique, l'étude des phénomènes physiques combinés aux progrès technologiques donne de réels espoirs d'augmenter de façon considérable les débits de transmissions. Ce chapitre aborde des solutions technologiques pouvant prétendre à l'amélioration du signal à très haut débit. De par une perpétuelle demande de l'augmentation des débits de communication de la part des particuliers associée à une logique économique favorisant de solution technologique peu coûteuse, l'étude de la régénération du signal est une composante importante dans les systèmes de Télécommunication actuels.

Dans ce chapitre, nous introduirons les principes de base de la régénération tout-optique et nous détaillerons les différentes technologies envisagées pour son implantation. La solution offerte par la régénération opto-électronique sera aussi abordée afin notamment d'identifier et de mettre en avant les avantages des approches tout-optiques. Nous résumerons brièvement les techniques de régénération 2R tout optique proposées dans la littérature. On se basant sur l'étude de régénérateur 2R tout optique à base de fibres optique hautement non-linéaire dite de Mamyshev.

## II.2 Comparaison de la régénération optoélectronique et tout-optique :

La régénération optoélectronique consiste à traiter le signal dégradé dans le domaine électrique. Pour ce faire, il nécessite un système de détection pour convertir le signal optique en signal électrique, et un système d'émission pour reconvertir le signal régénéré dans le domaine optique pour continuer la transmission. La Figure II.1 illustre le principe d'un régénérateur optoélectronique.

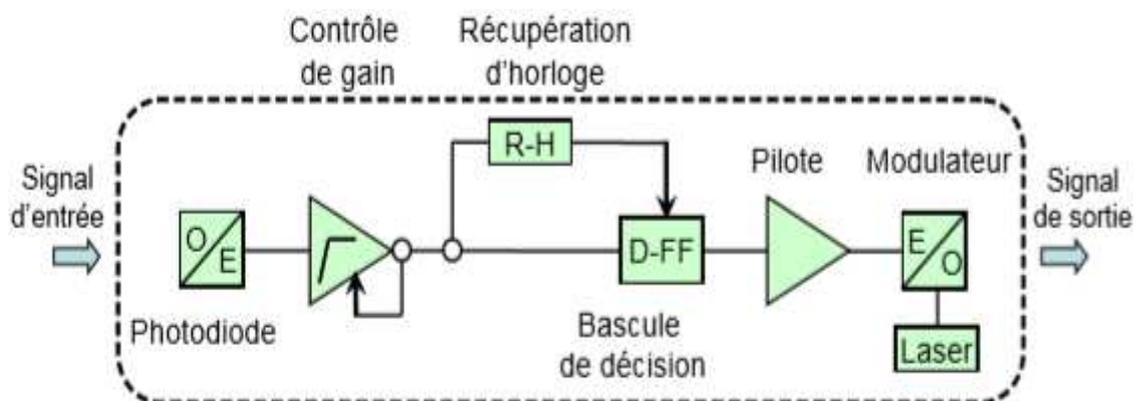


Figure II.1 : Montage du régénérateur OEO [1]

Le régénérateur est constitué tout d'abord une photodiode large bande pour convertir le signal optique dégradé en signal électrique (convertisseur optoélectronique O/E). Ce signal va être ensuite amplifié par un amplificateur contrôlé en gain pour limiter la tension en sortie. Une partie du signal est envoyée sur une récupération d'horloge électrique (R-H) qui va générer une horloge électrique synchronisée avec des données. L'autre partie du signal est envoyée dans une bascule de décision (D-FF pour Decision-Flip Flop) qui va comparer la tension du signal à chaque transition de l'horloge (moment de décision) avec une tension de seuil de décision ( $V_s$ ). La bascule va émettre un 1 si la tension du signal est supérieure à  $V_s$ , et un 0 si la tension du signal est inférieure à  $V_s$ . Cette bascule de décision peut par conséquent être considérée comme une porte électrique non-linéaire pour une régénération 3R. Le signal électrique est ensuite envoyé dans un amplificateur électrique appelé pilote car il vient moduler un modulateur qui permet de transférer les données électriques régénérées sur une porteuse optique issue d'un laser accordable en longueur d'onde. [1]

❖ **Avantages et inconvénients d'un régénérateur optoélectronique :**

**a. Avantages :** [1]

- Pour les systèmes de transmission à 10 Gbit/s assurer une grande capacité d'intégration
- Pour les systèmes à 40 Gbit/s viennent d'arriver à leur maturité et sont commercialement disponibles.
- Les régénérateurs optoélectroniques sont intrinsèquement flexibles en longueur d'onde et assurent les meilleures performances en régénération (3R).
- l'évolution du TEB (taux d'erreurs binaires) est linéaire dès le premier passage dans le régénérateur optoélectronique.
- Pour les régénérateurs optiques, le nombre d'erreurs accumulées à la traversée des premiers régénérateurs est d'autant plus important que le régénérateur possède une fonction de transfert faiblement non-linéaire. Après un certain nombre de cascades, l'évolution du TEB devient linéaire quelle que soit la non-linéarité du régénérateur. En conséquence, les régénérateurs optoélectroniques (non-linéarité plus forte que les régénérateurs optiques) sont bien plus efficaces que la régénération optique.

**b. Inconvénients :**

- Les régénérateurs optoélectroniques sont une solution pour le traitement du signal dans les réseaux de transmission optique aujourd'hui, ils restent malgré tout coûteux. Sur une liaison optique à 10 Gbit/s.

- La montée en débit par canal, les circuits électroniques doivent être large bande, ce qui entraîne une augmentation très importante du coût de fabrication et du coût de fonctionnement liées à la complexité et à la forte consommation énergétique des composants électroniques à haut débit.
- La consommation d'un régénérateur optoélectronique au laboratoire est d'environ 10 W sans tenir compte du contrôleur de température [2].
- Dans une configuration WDM, le traitement des différents canaux ne peut être réalisé qu'en parallèle, canal par canal. Il nécessite par conséquent l'équivalent d'un système complet (récepteur/décision/émetteur) pour chaque longueur d'onde.

### **II.3 La Régénération tout optique :**

L'optoélectronique est malgré tout la seule solution pour la régénération dans les réseaux de télécommunications optiques aujourd'hui avec le débit jusqu'à 10 Gbit/s. Comme nous le précisons précédemment, le coût d'installation et de fonctionnement d'un régénérateur optoélectronique à un débit de 40 Gbit/s ou au-delà est particulièrement élevé. Par conséquent, la régénération optique pourrait apporter plusieurs avantages aux futurs réseaux optiques, si elle remplissait les conditions suivantes [1]:

- Faible coût
- Faible encombrement
- Faible consommation électrique
- Transparent au débit
- Traitement du signal à très haut débit et compatible en WDM
- Conversion de longueur d'onde pour la commutation

De plus, Les performances offertes par la fonction « en marche d'escalier » de la régénération optoélectronique peuvent finalement être considérées largement supérieures au besoin des systèmes de transmission longue distance. Ainsi les solutions de régénération optique deviennent très attractives.

Comme nous avons montré dans le premier chapitre, la régénération d'un signal nécessite trois étapes qui sont la réamplification 1R, la remise en forme 2R et la resynchronisation 3R. Le niveau 1R est bien maîtrisé et utilisé couramment grâce à l'utilisation des amplificateurs EDFA, le troisième niveau (3R) est aujourd'hui réalisé en insérant dans les réseaux des répéteurs optoélectroniques. Une approche alternative aux répéteurs

optoélectroniques est le traitement tout-optique du signal, qui consiste à régénérer le signal dans le domaine optique. Cette solution offre la possibilité de réduire considérablement le coût d'installation par rapport à la solution optoélectronique surtout pour les systèmes à haut débit par canal (40 Gb/s et au-delà). Les techniques tout-optique permettent notamment de réaliser des dispositifs de régénération de type 2R, réamplification et remise en forme, moins complexes et plus compacts que les dispositifs de régénération 3R. Cependant, ces technologies sont beaucoup moins matures et bénéficient de moins d'investissement que les techniques électroniques de traitement du signal ce qui explique qu'elles ne sont pas déployées dans les réseaux de transmission optique. Il apparaît donc nécessaire de trouver des solutions alternatives au traitement électronique de l'information, notamment au niveau des opérations de régénération 2R.

## II.4 La Régénération 2R tout optique :

### II.4.1 La fonction de transfert (FdT) :

Les régénérateurs 2R tout optique sont en général formés d'un amplificateur optique linéaire suivi d'une porte optique non-linéaire. Au cours de l'étape d'amplification, l'accumulation de bruit d'émission spontanée amplifiée conduit à une réduction du rapport signal sur bruit optique et à une diminution du taux d'extinction. L'étape de remise en forme permet d'améliorer le taux d'extinction et de limiter le bruit d'amplitude. Elle s'effectue grâce à la fonction de transmission (fonction de transfert) d'une porte optique non linéaire.

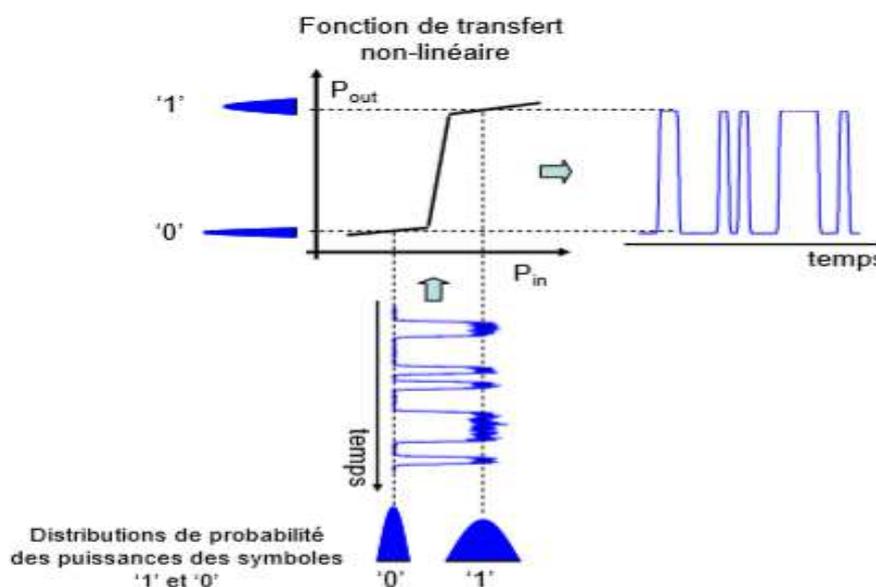


Figure II.2: Fonction de transmission d'une porte optique non linéaire [1]

La Figure II.2 représente un exemple de fonction de transmission d'une porte optique non linéaire. Grâce à la présence de paliers au-dessous et au-dessus d'une puissance incidente donnée, les fluctuations d'intensité du signal incident ne sont pas transmises à travers la porte et ce ni sur les symboles '1', ni sur les symboles '0'. Si d'autre part le rapport des niveaux hauts et bas de la transmission de la porte est suffisamment grand, la porte non linéaire permet une amélioration du taux d'extinction du signal. La porte non linéaire représentée sur la Figure II.2 est dite 'en marche d'escalier' et correspond, à une fonction idéale pour réduire le bruit d'amplitude. Selon le dispositif utilisé pour la réalisation de la porte optique non linéaire, la régénération peut s'effectuer selon deux mécanismes. Le premier, schématisé sur La Figure II.3 est dit d'auto-modulation c'est à dire que le signal dégradé commande la porte et en sort régénéré. Le deuxième est dit de modulation croisée; le signal dégradé (la pompe) module toujours la transmission de la porte, mais un autre signal est injecté dans la porte (la sonde) et voit la modulation de la transmission créée par le signal dégradé. Le signal en sortie de la porte est ainsi modulé au rythme des données. Le plus souvent, il y a conversion de longueur d'onde du signal dégradé vers le deuxième signal. Ce mécanisme est représenté sur la Figure II.3.b Notons qu'à moins de puissance injecter un deuxième signal à la même longueur d'onde que celle du signal incident, ce type de dispositif impose l'utilisation d'un deuxième dispositif du même type pour retrouver la longueur d'onde initiale. Il peut également être inséré à un nœud de routage d'une liaison, pour mettre à profit la conversion de longueur d'onde. Associée à une fonction de filtrage, la conversion de longueur d'onde peut en effet permettre le routage de l'information comme ceci a été montré par exemple dans [3].

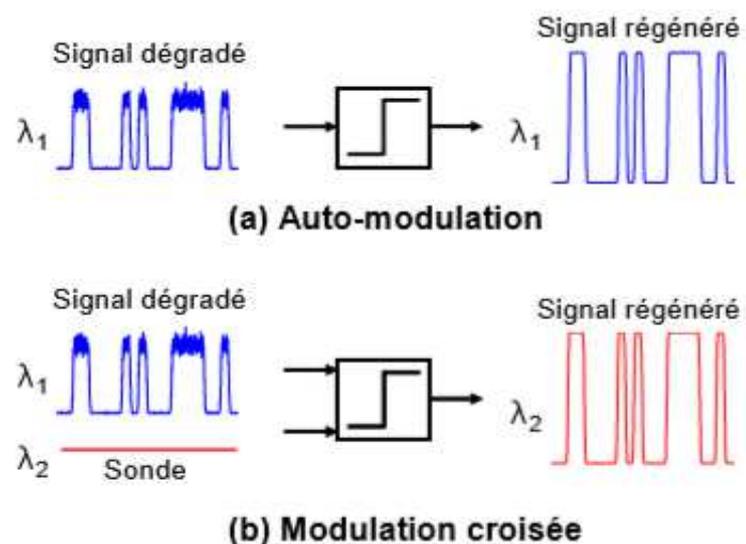


Figure II.3 : Régénération par automodulation (a) et par modulation croisée (b) [1]

### II.4.2 Les types de la fonction de transfert (FdT) :

Un régénérateur est souvent considéré comme un composant ayant une réponse non linéaire par rapport à la puissance du signal en entrée. Une fonction de transfert (FdT) en forme de marche d'escalier est souvent le but recherché mais cette forme est rarement obtenue en pratique. Il existe trois types de FdT en fonction des paramètres du régénérateur. Ces paramètres concernent aussi bien le signal (forme temporelle, durée des impulsions TFWHM), la fibre (dispersion  $D$ , longueur  $L$ , coefficient non-linéaire  $\gamma$ , pertes  $\alpha$ ,) et le filtre (décalage par rapport à la fréquence initiale  $\delta\nu$  ou décalage par rapport à la longueur d'onde initiale  $\delta\lambda$ , bande passante  $\Delta\lambda$ ). [4]

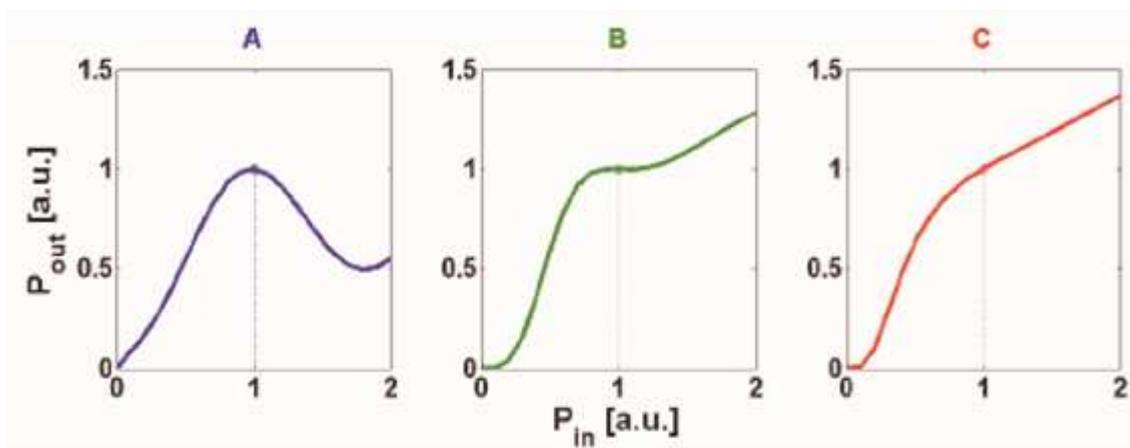


Figure II.4 : Les différents fonction de transfert

La Figure II.4 indique qu'il existe des FdT de type "A" où l'évolution de la puissance des "1" en sortie présente un maximum en fonction de l'évolution de la puissance des "1" en entrée, de type "B" où l'évolution de la puissance des "1" en sortie reste constante sur une certaine plage de variation de la puissance des "1" en entrée et de type "C" où l'évolution de la puissance des "1" en sortie augmente continûment en fonction de la puissance des "1" en entrée. Comme nous verrons plus loin, la forme la plus adaptée à la régénération est la forme de type B qui se rapproche le plus de la marche d'escalier et pour faciliter la conception [5][6].

### II.4.3 Les technique de la régénération 2R : Etat de l'art : [7][8].

Il existe plusieurs milieux non-linéaires qui peuvent réaliser une porte non-linéaire pour la régénération 2R tout-optique, y compris des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA), la Boucle optique non-linéaire (NOLM), absorbants saturables (SA), et la non linéarité de la fibre optique hautement non linéaires, etc. Les solutions à base de

fibres ont l'avantage d'être directement intégrées aux réseaux existants et d'être des opérations passives.

Dans ce qui suit, nous allons présenter un état de l'art sur les régénérateurs 2R tout optique.

#### II.4.3.1 La Boucle optique non-linéaire (NOLM) :

Le NOLM est un interféromètre non-linéaire basé sur l'interféromètre de Sagnac, largement étudié dans la littérature. Dans cette partie, nous nous intéresserons uniquement au NOLM tout fibré possédant une non-linéarité en transmission basée sur l'automodulation de la phase dans les fibres non-linéaires. Le principe de base est présenté sur la Figure II.5. Le NOLM est une boucle fibrée réglée par construction sur l'extinction (interférences destructives en sortie). Le signal en entrée (clock pulse) est alors complètement réfléchi. Si nous injectons un signal intense portant les données dans la boucle (« input signal »), si les impulsions d'horloge et les impulsions de signal coïncident temporellement, il se produit une modulation croisée de la phase sur les « 1 ». Si le déphasage instantané entre les composantes co et contra-propagatives dans le coupleur d'entrée / sortie du NOLM vaut  $\pi$ , tout le signal est transmis en sortie. En filtrant l'horloge en sortie, nous retrouvons les données copiées sur l'horloge (3R) (une conversion de longueur d'onde).

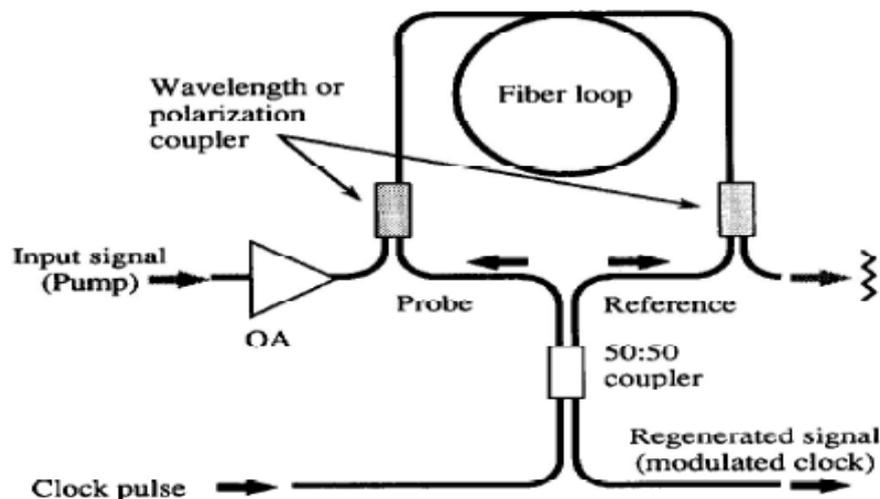


Figure II.5 : Architecture du NOLM à fibre pour la régénération

#### II.4.3.2 Le SOA comme convertisseur de longueur d'onde régénérateur :

L'opération de base dans les réseaux dits transparents (à débit d'information par canal variable) est la conversion de longueur d'onde.

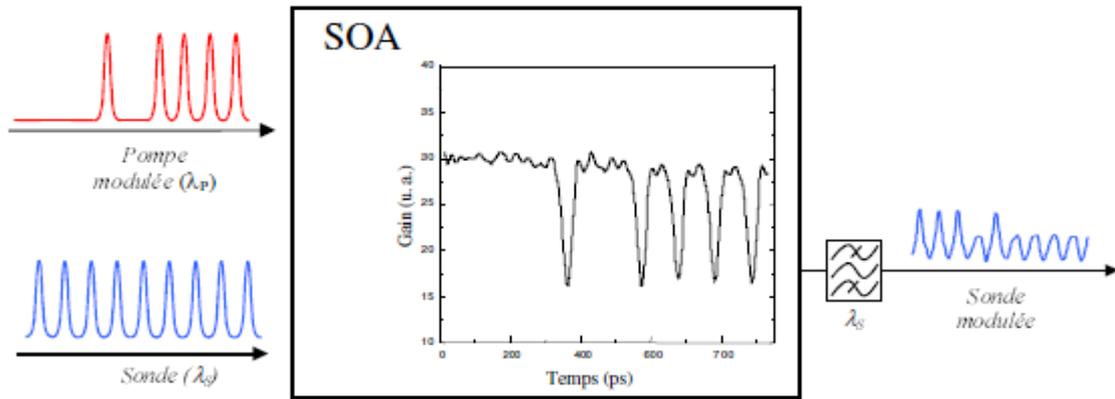


Figure II.6 : Principe de la modulation croisée du gain dans les amplificateurs optiques à semi-conducteurs

La Figure II.6 présente le principe de la conversion de longueur d’onde par modulation croisée du gain (XGM) dans les SOA. Les données sur la pompe vont moduler le gain du SOA si leur puissance crête est suffisante. La sonde possède une faible puissance optique qui ne va pas moduler le gain du SOA. Nous observons en sortie du SOA la sonde modulée dont le taux d’extinction va correspondre globalement au taux de compression du gain. On note que l’on peut réaliser cette opération aussi bien avec une sonde impulsionnelle (horloge optique) qu’avec une sonde continue. La limitation principale du régénérateur à base de SOA est le temps de retour à l’équilibre du gain.

**II.4.3.3 Le modulateur à électro-absorption (MEA) :**

Le champ électrique appliqué à la jonction P-N module le spectre d’absorption (Effet Stark confiné) qui décale le spectre vers les hautes longueurs d’onde et affaiblit l’absorption. La Figure II.7 représente le spectre d’une telle structure pour diverses tensions de polarisation.

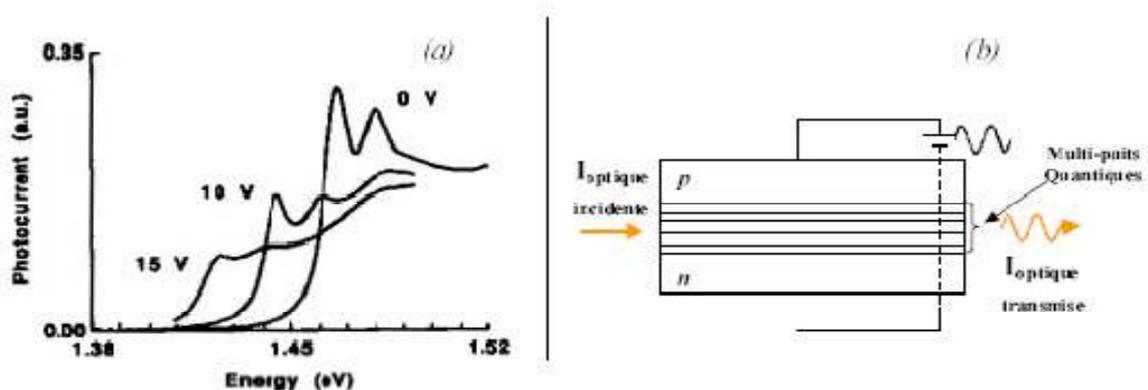


Figure II.7 : Principe de modulation en courant de l’absorption (a) – Schéma de principe des modulateurs à électro-absorption (b)

Le MEA peut utiliser en 'opto-optique'. C'est le signal optique incident qui, en étant absorbé, crée des porteurs qui, à leur tour, modifient le champ électrique local, ce qui module l'absorption. Le signal optique incident peut de cette manière, moduler le spectre d'absorption du dispositif.

La Figure II.7 (a) présente l'atténuation de l'absorption pour trois courants de polarisation: Plus le courant est important et plus le pic de transmission à 1,465 eV (1,5  $\mu\text{m}$ ) diminue. La Figure II.7 (b) présente la structure de guide d'onde à base de multi-puits quantiques utilisé pour la réalisation de MEA. Ainsi, une modulation du courant électrique ou de l'intensité optique dans le guide va permettre de moduler l'absorption et donc entraîner une modulation de la lumière incidente.

L'intérêt de ces modulateurs est la dynamique de l'absorption (inférieure à 10 ps) beaucoup plus rapide que celle de la recombinaison des porteurs de charge dans les SOA.

#### II.4.3.4 L'automodulation de la phase dans les fibres :

Cette technique est basée sur le décalage en fréquence des « 1 » par rapport aux « 0 » par automodulation de la phase (SPM) dans les fibres hautement non-linéaires (fibres à cristaux photoniques). SPM est un phénomène très rapide (lié à l'effet Kerr : de l'ordre de  $10^{-15}$  s) ce qui en fait un dispositif très intéressant pour les systèmes de régénération à très haut débit (liaisons point à point terrestres ou sous-marines).

Un filtrage sélectif des « 1 » permet une amélioration du taux d'extinction (les « 0 » n'étant que partiellement transmis).



Figure II.8: Schéma d'un régénérateur 2R à base sur l'automodulation de la phase dans les fibres.

La régénération 2R tout optique par l'automodulation de phase est proposée par Mamyshev en 1998, et a donné l'issue à un grand nombre de travaux et ont montré la faisabilité de cette technique. Ce régénérateur est le plus simple des dispositifs étudiés pour la régénération 2R et la remise en forme des signaux optiques avec la possibilité de mise en œuvre à faible coût, et semble être une technique prometteuse pour la prochaine génération de réseau tout optique.

## II.5 Régénérateur 2R de Mamyshev :

### II.5.1 Régénérateur 2R de Mamyshev simple étage:

La Figure II.9 est un exemple de régénérateur Mamyshev basé sur SPM, publié en 1998 [9] et qui a servi de référence pour les nouveaux modèles de régénérateurs 2R et 3R à ce jour. Un tel dispositif, proposé par Mamyshev, est un régénérateur optique à 2R (ré-amplification) basé sur élargissement spectral induit par automodulation de phase (SPM) suivi d'un filtrage. Les régénérateurs ont été démontrés dans la fibre hautement non linéaire.

Ce régénérateur classique de Mamyshev 2R est une suppression simple des fluctuations des amplitudes "0" et "1" [10], basé sur l'automodulation de phase (SPM), dans laquelle le signal bruyant est suffisamment amplifié au départ par un amplificateur de fibre à dopage à l'erbium (EDFA), puis l'impulsion passe par un processus d'élargissement induit par l'effet SPM pour se propager par une fibre hautement non linéaire (HNLF) et à la fin, ce signal est filtré et reformaté par un filtre passe-bande (BPF), qui réduit également le bruit indésirable en sortie du régénérateur.

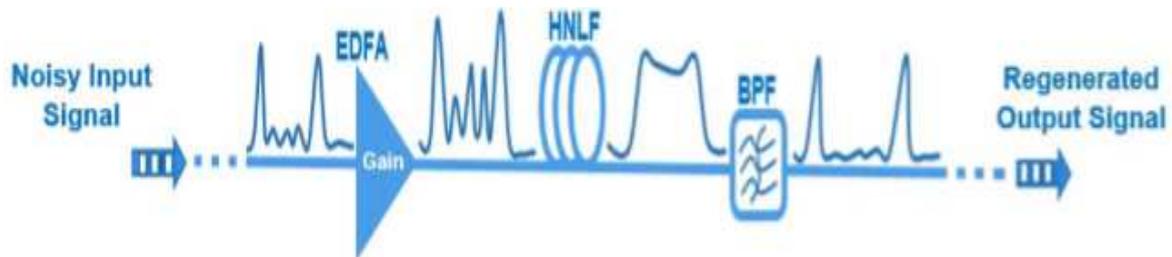


Figure II.9 : Le schéma de régénérateur 2R de Mamyshev

La régénération 2R, pour "re-amplification", est Elle a pour rôle de réaliser, en plus d'une amplification, une remise en forme du signal. Celle-ci consiste en une amélioration du taux d'extinction (ER pour Extinction Ratio), défini comme le rapport entre la puissance moyenne des "1" et la puissance moyenne des "0" ( $ER = I_1/I_0$ ) ainsi que la réduction du bruit d'amplitude sur les symboles "1" et "0" du signal. Toutefois, la régénération 2R ne corrige que les fluctuations d'amplitude du signal. Elle ne corrige pas les fluctuations temporelles des symboles, connues sous le nom de gigue temporelle ou "jitter" en anglais. L'accumulation de gigue peut conduire à une dégradation du TEB.

L'automodulation de phase (SPM) dans la fibre optique génère des fréquences en dehors du spectre initialement centré autour de  $f_s$  conduisant à un élargissement du spectre. Plus la puissance incidente est importante, plus le spectre s'élargit (Figure II.10).

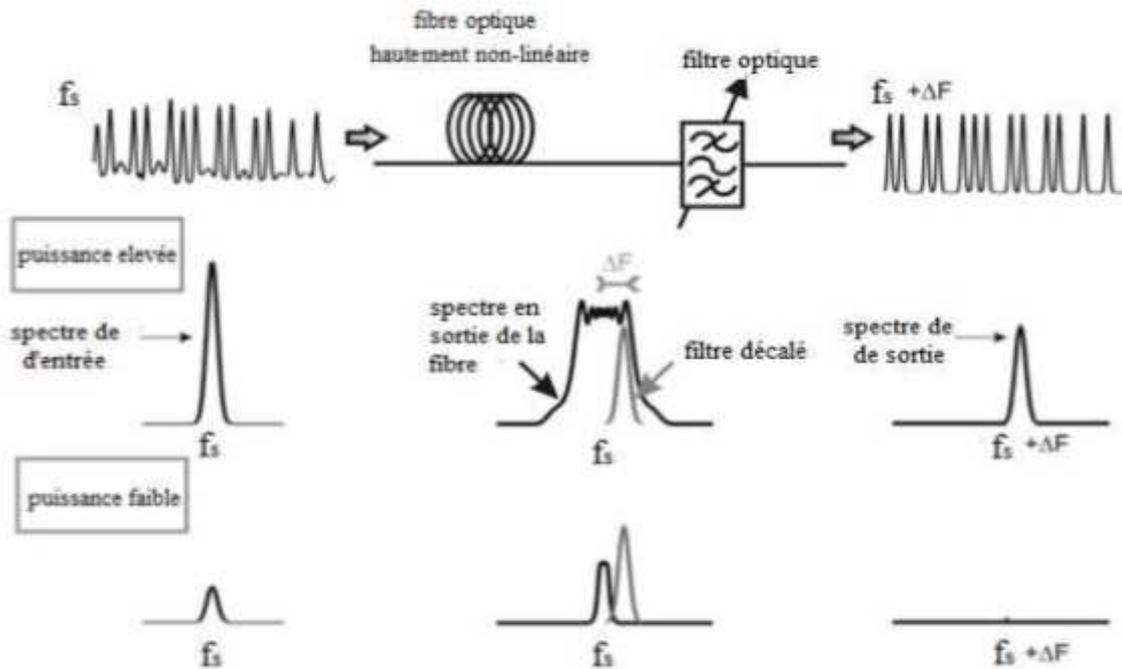


Figure II.10 : Principe de la régénération 2R basé sur SPM : Régénérateur de Mamyshev en haut, élargissement spectral et filtrage optique associé en bas

En sortie, un filtre décalé de la fréquence centrale ( $\Delta F$ ) rejette les signaux de puissance faible dont le spectre n'a pas été élargi et transmet ceux dont l'élargissement spectral est supérieur au décalage spectral du filtre. Lorsque les données de forte puissance (symbole « 1 ») traversent la fibre optique, le SPM élargit le spectre du signal optique, elles sont donc transmises par le filtre. Par contre, dans le cas des données de faible puissance (les « 0 »), le phénomène de SPM, et donc d'élargissement spectral, n'a pas lieu et le filtre coupe le signal. Le filtre joue également le rôle d'un limiteur de puissance. Les fortes puissances crêtes qui entraînent un décalage en fréquence trop important (au-delà du filtre) ne sont donc pas transmises. Ainsi, si le décalage du filtre est bien choisi, tous les symboles « 1 » en sortie ont la même amplitude, ce qui entraîne une amélioration du taux d'extinction et une stabilisation du niveau de puissance des symboles « 1 ».

En résumé, pour un train d'impulsions gaussien avec une fréquence centrale à  $\omega_s$  et une largeur de bande spectrale initiale de  $\Delta\omega$ , la largeur de bande spectrale des impulsions s'élargit, après une longueur  $L$  de fibre, pour devenir:

$$\Delta\omega_{SPM} = \sqrt{2} \exp\left(\frac{1}{2}\right) \Delta\omega\gamma P_0 L, \tag{II.1}$$

Où  $\gamma$  est le coefficient non linéaire et  $P_0$  la puissance de crête de l'impulsion d'entrée.

À la sortie de la fibre, un filtre passe-bande optique est utilisé. Le filtre n'est pas centré sur la fréquence centrale de l'impulsion d'entrée mais est décalé de  $f_s$  vers la fréquence  $f_s + \Delta f$ :

Le Régénérateur de Mamyshev provoque donc, une conversion de longueur d'onde du signal à régénérer. Si la conversion de longueur d'onde peut être un avantage dans certains cas lorsqu'on associe à la fonction de régénération une fonction de routage optique par exemple), elle peut s'avérer gênante dans le cas où la seule fonction de régénération, transparente à la longueur d'onde, est recherchée. Pour éviter le phénomène de conversion de longueur d'onde, Mamyshev propose de cascader deux régénérateurs identiques mais de décalage fréquentiel opposé. Ceci permet de revenir à la longueur d'onde initiale [11]. Nous appellerons cette configuration de régénérateur "double-étage" par opposition à la configuration "simple-étage" où la conversion de longueur d'onde n'est pas évitée.

### II.5.2 Régénérateur de Mamyshev à double étage

Un régénérateur idéal doit réduire le bruit d'un signal dégradé tout en conservant les caractéristiques du signal, en particulier les durées d'impulsions et la longueur d'onde. Or, le régénérateur de Mamyshev, parce qu'il nécessite un filtre optique décalé, provoque une conversion de longueur d'onde. Pour pallier cet inconvénient, Mamyshev a proposé de mettre en cascade deux régénérateurs identiques (mais de décalages opposés) pour revenir à la longueur d'onde initiale. Cette solution offre en plus l'avantage d'être plus efficace en termes de réduction du bruit. Dans une configuration à double étage, en accord avec les études précédentes, il paraît logique que le deuxième régénérateur soit de type B afin de réduire au mieux le bruit en sortie du régénérateur. Cependant, comme nous venons de le voir, le régénérateur de type B introduit une gigue temporelle additionnelle. Concernant le premier étage du régénérateur complet, il nous a semblé judicieux de nous poser la question de savoir quelle devrait être sa fonction de transfert optimale (types A, B ou C?). L'idée sous-jacente est de réduire la gigue temporelle intrinsèque du régénérateur. Si l'on reprend l'analyse théorique de la gigue temporelle introduite par le régénérateur de type B, nous constatons que :

- Ce sont les variations de puissance des impulsions qui introduisent la gigue temporelle,
- Le signe du décalage  $\Delta T$  entre deux impulsions de puissances différentes dépend du sens du décalage du filtre de sortie. [4]

Par conséquent, deux régénérateurs en cascade, dont les décalages de filtres sont de signe opposé, peuvent potentiellement annuler la gigue temporelle du dispositif complet, à condition que le premier régénérateur conserve une gigue d'amplitude convenablement choisie. Notre étude théorique a montré que l'utilisation d'un régénérateur de type C, entant que premier étage d'un régénérateur double-étage, permet de remplir cette fonction [4]. La configuration double-étage, qui permet de limiter la gigue introduite par le régénérateur, Des impulsions synchronisées correspondant à des "1" et des "0" de différents niveaux sont envoyées dans la première fibre (Figure II.11). Le premier régénérateur est utilisé autour d'un point de fonctionnement qui n'élimine pas complètement le bruit sur les "1". Sa fonction de transfert est de type C [12]. On remarque que les impulsions ne sortent pas synchronisées du régénérateur. En raison du sens du décalage du filtre, les impulsions les plus puissantes sont en avance sur les impulsions les moins intenses. Le deuxième régénérateur, utilisé avec un filtre qui recentre le signal autour de  $\nu_0$ , a pour effet de réduire le bruit d'amplitude et de re-synchroniser les impulsions (Figure II.11).

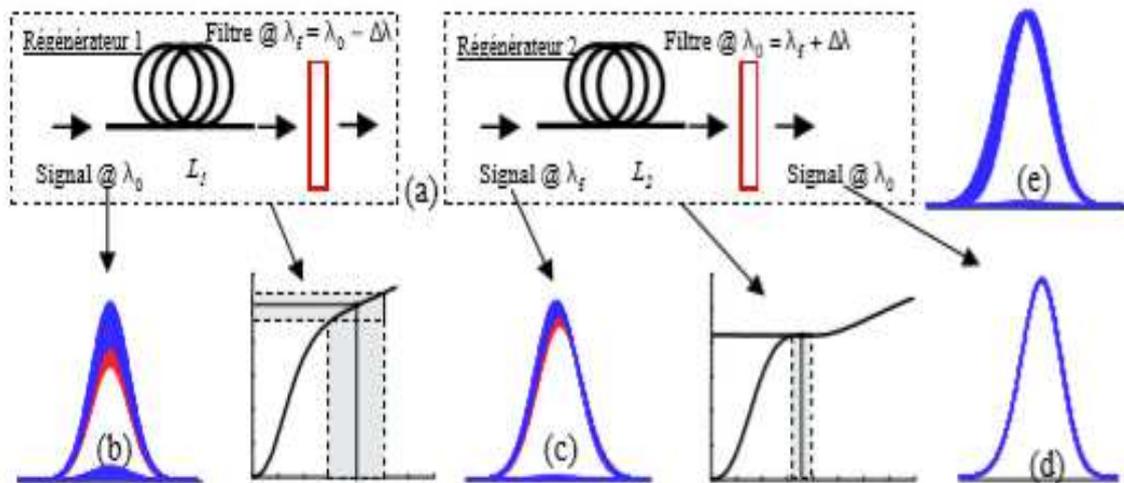


Figure II.11 : Régénérateur double étage asymétrique pour diminuer la gigue temporelle : (a) Configuration, (b) diagramme de l'œil du signal en entrée du régénérateur 1, (c) diagramme de l'œil du signal en sortie du régénérateur 1 (de type C) ainsi qu'en entrée du régénérateur 2, (d) diagramme de l'œil du signal en sortie du régénérateur 2 et (e) diagramme de l'œil du signal en sortie d'un régénérateur simple étage de type B. [12]

### II.5.3 Impact des paramètres du régénérateur Mamyshev [13].

Dans le dispositif de Mamyshev qui est basé sur l'élargissement SPM, tous les paramètres de celui-ci tels que le signal (forme temporelle, durée des impulsions  $T_{FWHM}$ , et l'énergie initiale), la fibre (dispersion, longueur, coefficient non-linéaire  $\gamma$ , pertes) et le

filtre (décalage par rapport à la fréquence initiale ou décalage par rapport à la longueur d'onde initiale, bande passante) modifient plus ou moins la forme de la fonction de transfert du régénérateur et par conséquent influent sur l'efficacité de celui-ci. Une connaissance précise des paramètres du régénérateur est donc requise pour permettre une diminution du bruit dans les '0' et une réduction du bruit dans les '1'.

### a. Variation de la largeur temporelle à mi-hauteur des impulsions

La Figure II. 12 : montre l'impact de la variation de la largeur temporelle des impulsions sur la forme de la FdT.

Il apparait que la largeur temporelle des impulsions joue un rôle très important sur la forme de la FdT. Un changement d'environ 20 % sur la durée de l'impulsion occasionne un changement radical de la FdT en type A ou C, toutes choses égales par ailleurs.

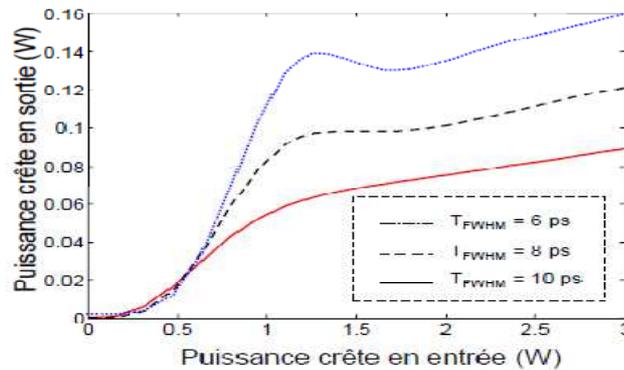


Figure II. 12 : fonction de transfert pour différentes durées d'impulsions [13].

### b. Variation des paramètres de la fibre (dispersion, longueur et non-linéarité) :

La Figure II. 13 : montre l'impact de la variation de la valeur de la dispersion, de la longueur, et de coefficient non-linéaire de la fibre sur la forme de la FdT.

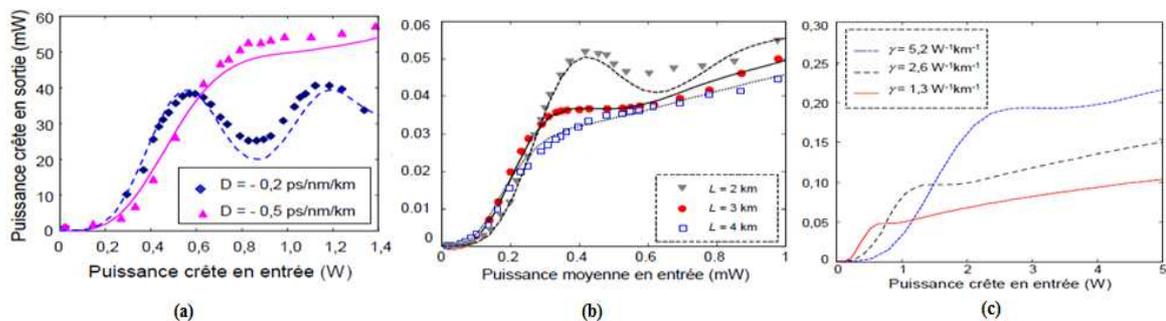


Figure II. 13 : fonction de transfert pour différentes valeurs de la dispersion de la fibre (a), fonction de transfert pour différentes longueurs de fibre (b), FdT pour différents coefficients non-linéaires (c) [13].

Il apparaisse que :

- La dispersion joue un rôle très important sur la forme de la FdT (La Figure II. 13 (a)). Un contrôle précis de la valeur de la dispersion sera donc nécessaire pour l'élaboration d'un régénérateur de Mamyshev.
- La longueur de fibre influence fortement la forme de la FdT. La puissance P1 est significativement augmentée lorsque L diminue (La Figure II. 13 (b)).
- La forme de la FdT n'est que légèrement modifiée (La Figure II. 13 (c)). Ce qui change de manière significative, c'est la puissance crête P1 correspondant à la zone du plateau.

### c. Variation des paramètres du filtre (décalage et largeur spectrale) :

La Figure II. 14 : montre l'impact de décalage du filtre et sa et largeur spectrale sur la forme de la FdT. Il apparaisse que :

- Le décalage du filtre modifie non seulement le type de FdT (A, B ou C) mais il intervient également sur la réduction du bruit sur les "0". Plus le filtre est décalé, meilleure est la réduction du bruit sur les "0". Par contre, la puissance moyenne requise est plus importante ; Le choix du décalage du filtre est donc un compromis entre la réduction du bruit sur les "0" et le coût du dispositif en termes de puissance optique.
- Il n'y'a pas de grand impact sur la forme de la FdT du régénérateur mais sur le rendement en termes de puissance du régénérateur. Plus la largeur spectrale du filtre est grande, plus la puissance du signal en sortie est grande. Il nous faut cependant rappeler que c'est la largeur du filtre de sortie qui fixe la largeur temporelle des impulsions en sortie de régénérateur.

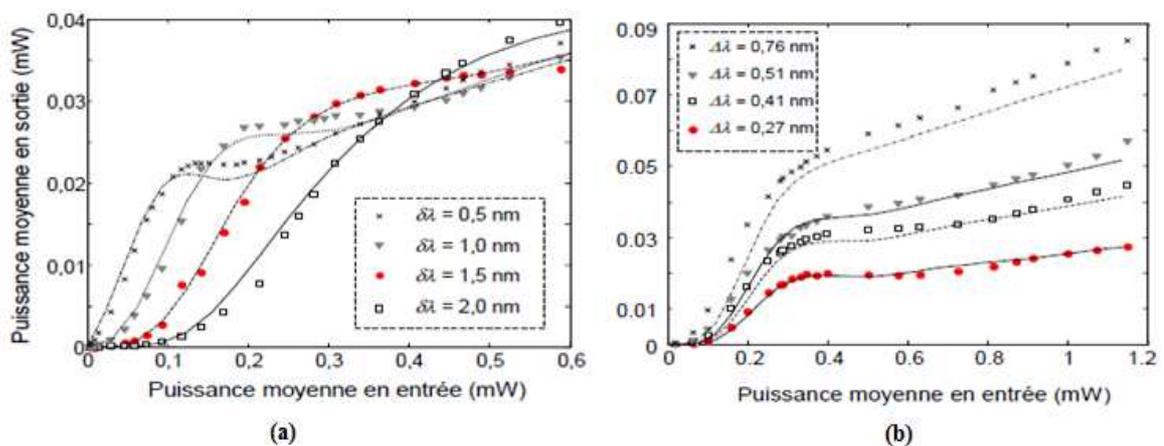


Figure II. 14 : fonction de transfert pour différents décalages du filtre en sortie de la fibre (a), et fonction de transfert pour différentes largeurs spectrales du filtre (b) [13].

Le tableau II.1, résume l'effet des différents paramètres sur la forme de la FdT du régénérateur de Mamyshev.

Paramètres	Influence	Sens de variation des valeurs pour passer du type A au type C
Forme d'impulsions	Faible	-
Largeur temporelle	Forte	↘
Dispersion de la fibre	Forte	↗
Longueur de la fibre	Forte	↗
Non-linéarité de la fibre	Faible	-
Pertes	Faible	↗
Décalage du filtre	Forte	↗
Largeur spectrale du filtre	Forte	↗
Pente de dispersion	Forte si $D \approx 0$	-
Variation de D le long de L	Faible si Période $< L/2$	-

Tableau II.1 : Influence des paramètres sur la forme de la fonction de transfert du régénérateur de Mamyshev [13].

## II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, le concept de régénération 2R tout optique du signal a été introduit. Les principales caractéristiques que doit présenter un dispositif pour la régénération ont été exposées. Les techniques qui nous ont paru les plus marquantes dans la littérature ont été mentionnées. Le dispositif de régénération 2R tout optique de Mamyshev a été étudié en détail. Ce régénérateur montre sa simplicité de mise en œuvre, et ses capacités d'éliminer les impulsions de bruits parasites dans les '0' bits, ainsi de réduire les fluctuations dans le niveau '1' bits du signal simultanément.

Une évolution significative de ce concept consiste à combiner les apports des similaritons avec cette technique. Ce dispositif est appelé régénérateur de Mamyshev actif, fait l'objet d'une étude théorique dans le chapitre suivant.

# Chapitre III

Régénération 2R tout optique  
par similariton

### **III.1 Introduction:**

La méthode de Mamyshev repose sur l'élargissement spectral important des impulsions induit par auto-modulation de phase SPM dans une fibre à dispersion normale dépend de l'énergie de chaque impulsion. En utilisant un filtre spectral décalé par rapport à la fréquence centrale du signal, il est alors possible d'opérer une discrimination entre les impulsions d'amplitude importante (les 'uns' optiques) et les impulsions de faible amplitude (des impulsions fantômes), en tirant notamment profit de fibres hautement non-linéaires. C'est notamment en exploitant cette technique de régénération par SPM combiné par les apports des similaritons (impulsion autosimilaire), ce dispositif appelé régénérateur de Mamyshev actif.

Dans ce chapitre, Nous chercherons à appliquer les propriétés des similaritons optiques et l'amplification auto-similaire à l'élaboration du régénérateur 2R tout optique du signal pour les transmissions longues distances à très hauts débits. Pour ce faire, On commence par décrire le comportement des impulsions lors de l'amplification dans les deux régimes de dispersion, ensuite, La mise les modèles mathématiques mettant en évidence la forme parabolique et l'évolution auto-similaire du profil temporel ainsi spectral de l'impulsion similariton seront présentées, ainsi que ses propriétés remarquables. Enfin, Nous étudions une configuration de régénérateur 2R à deux étages ; le premier étage basé sur la génération active de similarion tandis que le deuxième sur la génération passive.

### **III.2 Amplification d'une impulsion ultra courte :**

#### **III.2.1 Régime de dispersion anormale**

Considérons tout d'abord le régime de dispersion anormale. Nous avons représenté Figure III.1 l'évolution du profil d'intensité de l'impulsion pour différentes longueurs d'amplification. Au fur et à mesure de son amplification, l'impulsion subit également une compression. Pour mieux comprendre ce comportement, il est possible d'avancer l'explication qualitative suivante : l'impulsion tente d'adapter sa largeur temporelle pour se rapprocher de la forme d'un soliton, solution de l'ESNL en régime de dispersion anormale. Ainsi, lorsque la puissance crête augmente, il est nécessaire que la largeur temporelle de l'impulsion se réduise. Ce phénomène a été, entre autres, exploité pour générer des trains de solitons à partir d'un battement sinusoïdal, dans une fibre présentant un gain [1,2]. Mais lorsque la puissance devient trop importante, on se rapproche de la situation de solitons

d'ordre supérieur [3], avec notamment la fission de l'impulsion initiale et l'apparition de sous-impulsions. Chaque sous impulsion sera alors amplifiée avant de fissionner elle-même dans de nouvelles impulsions ultracourtes.

Finalement, l'impulsion initiale va "exploser" en une multitude de sous impulsions. L'amplification d'impulsions ultra-courtes dans un régime de dispersion anormale ne permet donc pas d'atteindre des énergies conséquentes : sur la simulation représentée Figure III.1(c), après une amplification de 28.7 dB, la forme de l'impulsion est ainsi sévèrement dégradée.

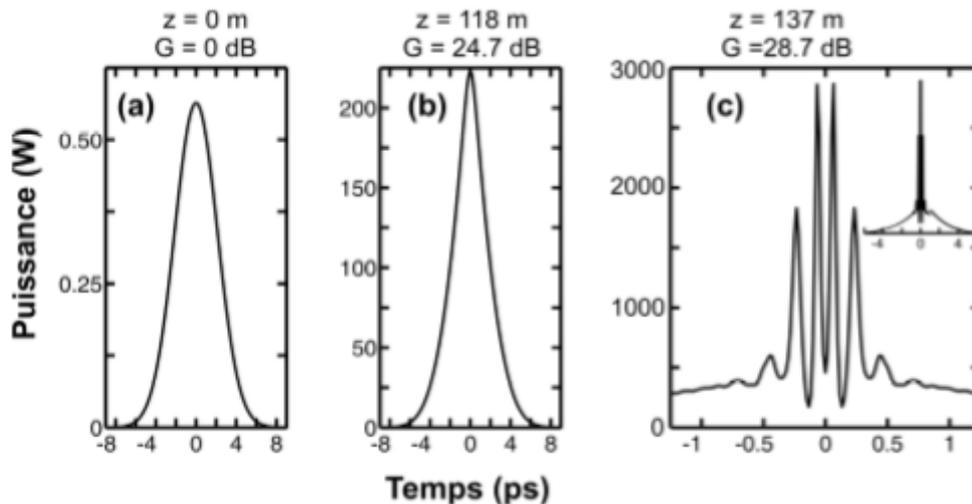


Figure III.1: Amplification d'une impulsion gaussienne de 5 ps de largeur et 3 Pj d'énergie initiale dans une fibre à dispersion anormale. (a) Profil d'intensité initial de l'impulsion, (b) Après une amplification de 24.7 dB (c) après une amplification de 28.7 dB [4]

### III.2.2 Régime de dispersion normale :

#### ➤ Le phénomène de wave breaking :

Lorsqu'une impulsion de forte puissance se propage dans un milieu en régime de dispersion normale, celle-ci acquiert une forme quasi-rectangulaire. L'évolution rapide de l'intensité à ses bords provoque une importante variation de phase, entraînant un étalement des composantes fréquentielles. Du fait que l'impulsion s'élargit temporellement au cours de sa propagation, elle développe alors un chirp positif quasi-linéaire [5]. Cependant au cours de leur évolution dans la fibre optique, ces impulsions subissent un phénomène de bris de vague (wave breaking) qui résulte de l'interaction entre les effets non-linéaires et la dispersion. En effet, dans l'impulsion chirpée, les composantes fréquentielles aux courtes longueurs d'onde se propagent plus rapidement que celles aux longueurs d'onde plus élevées. Dans la zone de chevauchement des deux structures impulsionsnelles que

constituent le cœur et les ailes de celle-ci, les composantes spectrales ont alors la possibilité d'interférer, ce qui provoque la génération de nouvelles composantes fréquentielles [6]. Ce phénomène se caractérise par l'apparition de lobes latéraux de chaque côté du spectre impulsionnel ainsi que par la présence d'oscillations sur les flancs de son profil temporel (Figure III.2).

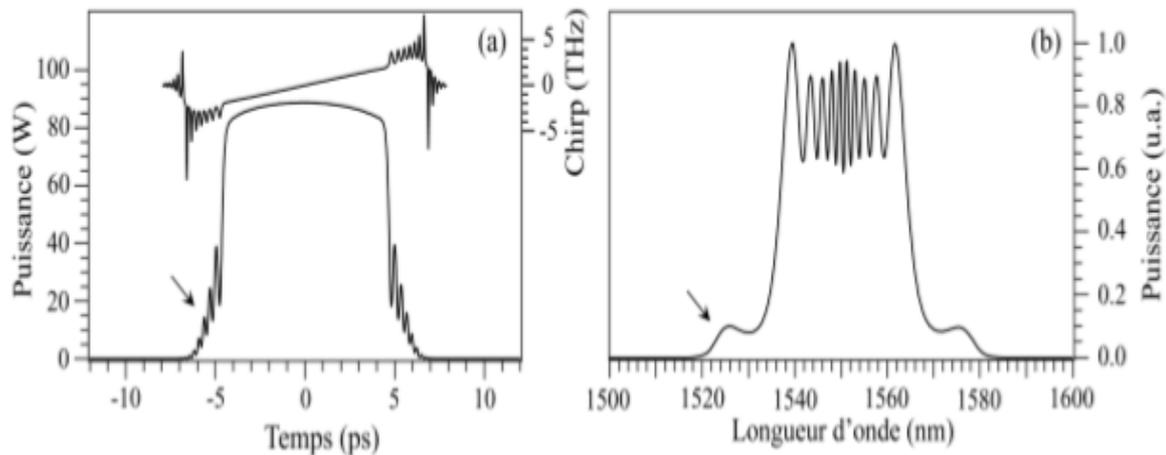


Figure III.2 - Profil temporel (a) et spectre (b) d'une impulsion sécante hyperbolique de 300 W de puissance crête et de 2.5 ps de largeur à mi-hauteur propagée dans 60 m de fibre à une dispersion  $\beta_2 = 5 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$  et une non-linéarité  $\gamma = 3 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  [7].

Afin d'éviter ce phénomène, la solution consiste à trouver une classe d'impulsions dont le chirp soit strictement linéaire, ce qui présuppose que celles-ci évoluent de manière autosimilaire.

#### ➤ Le phénomène d'autosimilarité :

Considérons maintenant l'amplification dans une fibre dont la dispersion est normale. Nous constatons sur la Figure III.3 que l'évolution est radicalement différente. L'impulsion s'élargit progressivement. Un changement de forme apparaît également, l'impulsion gaussienne acquérant un profil d'intensité parabolique. La Figure III.3 (c) montre ainsi un bon accord entre l'impulsion amplifiée et un ajustement parabolique [8].

L'impulsion n'éclate pas en une multitude de sous impulsions ce qui va permettre d'atteindre des niveaux d'amplification bien plus importants. La Figure III.4(a) permet de constater qu'il est possible d'amplifier l'impulsion d'une quarantaine de dB sans observer d'"explosion" similaire à celle observée dans le régime de dispersion anormale. L'impulsion reste monolithique.

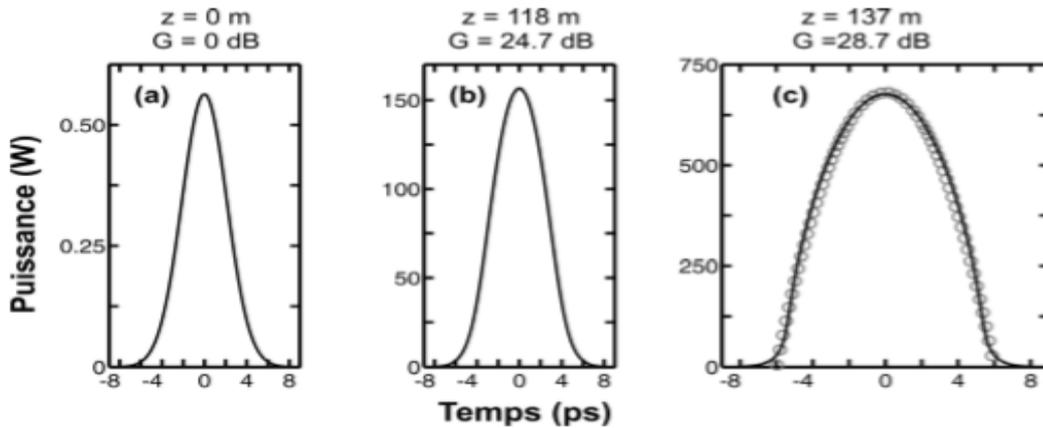


Figure III.3: Amplification d'une impulsion gaussienne de 5 ps de largeur et 3 pJ d'énergie initiale dans une fibre à dispersion normale. (a) Profil d'intensité initial de l'impulsion, (b) Après une amplification de 24.7 dB (c) Après une amplification de 28.7 dB. Comparaison avec un ajustement par une forme parabolique (cercles) [4].

Nous constatons également sur la Figure III.4(b) qu'une fois la forme parabolique acquise, l'impulsion va conserver ce profil d'intensité. Nous n'observons ainsi pas d'évolution similaire de type "wave-breaking" caractéristique de l'évolution d'une impulsion ultra-courte de forte intensité dans une fibre à dispersion normale. L'impulsion connaîtra une augmentation auto-similaire de sa largeur temporelle et de son intensité crête.

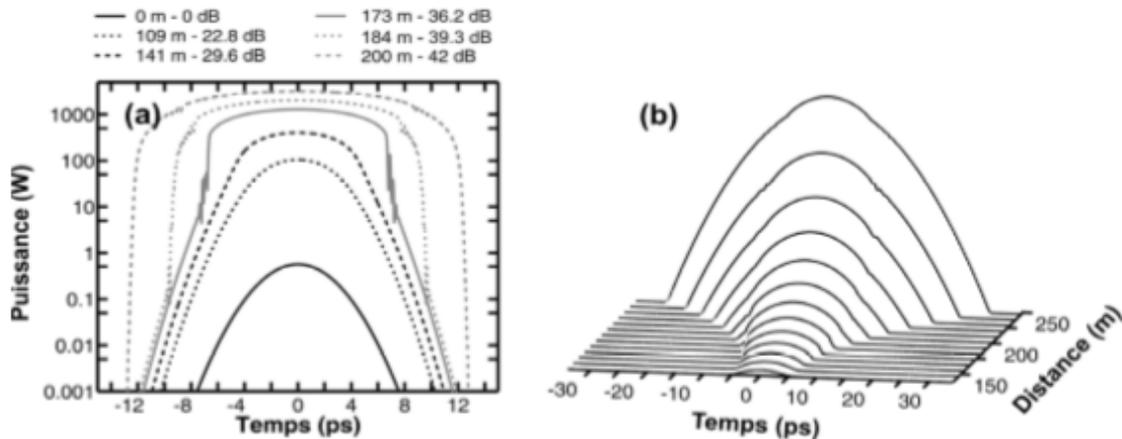


Figure III.4: (a) Profils d'intensité à différentes longueurs de propagation (b) Evolution du profil d'intensité suivant la distance de propagation. [4].

Ce nouveau type d'impulsion a la particularité notable de conserver sa forme parabolique inchangée tout en subissant une croissance simultanée de sa puissance crête et de sa durée temporelle, un tel comportement est une belle illustration d'une évolution auto-similaire.

Dans ces conditions, un nom pour qualifier ces impulsions paraboliques s'est naturellement imposé : le similariton optique.

### III.3 Similaritons optiques:

#### III.3.1 Définition :

L'autosimilarité est un concept clé de différentes disciplines scientifiques et occupe une place centrale dans les sciences non-linéaires, si bien qu'aujourd'hui l'évolution autosimilaire est le sujet d'intenses recherches dans le domaine de la photonique. En effet, celles-ci ont mis en évidence un nouveau régime de fonctionnement des amplificateurs optiques avec la génération de similaritons, classe d'impulsions optiques ultracourtes présentant un profil parabolique et se propageant de manière autosimilaire dans une fibre amplificatrice

L'étude de ces différents comportements a été obtenue par le développement d'amplificateurs à similaritons spécifiques, utilisant les technologies d'amplification Raman et erbium, ou seulement les paramètres de l'amplificateur et l'énergie de l'impulsion initiale déterminent l'évolution de l'impulsion parabolique [4][7].

#### III.3.2 Génération de similaritons:

La génération expérimentale de similaritons a été réalisée dans diverses configurations d'amplification : dans le cas d'un pompage copropagatif, dans le cas d'un pompage contrapropagatif, ou avec les deux types de configurations (Figure III.5).

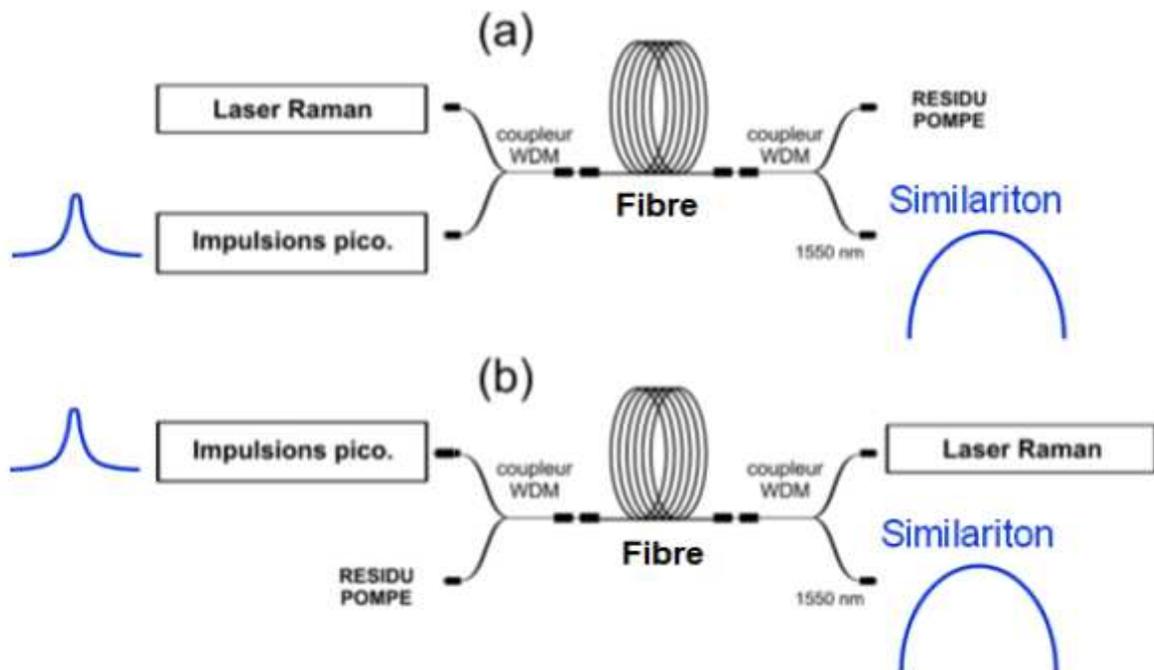


Figure III.5: Génération de similariton (a) avec un pompage copropagatif (b) avec un pompage contrapropagatif.

Le choix de la configuration d'amplification co- et contra-propagatives de pompage n'affecte pas la forme globale du similariton mais va influencer les caractéristiques de l'impulsion amplifiée, sa largeur temporelle, sa puissance crête, son élargissement spectral, ainsi que le chirp du similariton.

- **pompage contra-propagatif** dans ce cas d'une amplification nous somme plus intéressé pour élever la puissance crêtes (énergie des impulsions) à la sortie de pompage
- **pompage co-propagatif** dans ce cas d'une amplification nous somme plus intéressé pour élargit le spectre (augmenté largeur totale à mi-hauteur) à la sortie de pompage

Le but de se pompage c'est que les puissances crêtes varient proportionnellement aux largeurs temporelles donc le spectre en sortie devient configurable a deux coté pour la puissance (amplitude du signal) et le temps (la larguer spectrale) pour avoir un profil parabolique et la possibilité de générer des similaritons dans une fibre optique à dispersion normale [9].

### III.3.3 Modélisation de similaritons : [4] [7]

#### III.3.3.1 Similariton actif :

L'évolution du champ électrique  $E(t)$  dans une fibre optique est décrite par l'équation nonlinéaire de Schrödinger (NLSE) qui dans le cas d'impulsions sous l'influence d'effets dispersifs et non-linéaires, se met usuellement sous la forme:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = \frac{\alpha}{2} A - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} + i\gamma |A|^2 A(z,t) \quad (\text{III.1})$$

Pour mieux comprendre l'évolution d'une impulsion dans une fibre optique, l'équation de Schrödinger non-linéaire est un outil précieux. Cette équation prenant en compte les effets dispersifs et la non-linéarité Kerr avait déjà pu prédire avec précision le comportement des solitons optiques dans une fibre.

Pour modéliser l'amplification optique, un terme de gain est introduit. L'équation n'a plus alors, sous cette forme, de solutions exactes Le recours à des techniques d'analyse auto-similaire a alors permis de proposer une expression mathématique de l'impulsion optique s'amplifiant dans une fibre.

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

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A + i \frac{g}{2} A \quad (\text{III.2})$$

Cette équation inclut des termes de dispersion de d deuxième ordre  $\beta_2$ , l'effet non linéaire  $\gamma$ , ainsi que le terme du gain  $g$ . Où  $A$  est l'amplitude de l'impulsion variant lentement.

Il s'agit d'une équation différentielle partielle non linéaire, où il est très difficile d'obtenir la solution analytique. Une approche numérique est donc souvent nécessaire afin de simuler la propagation des impulsions dans les fibres.

Un grand nombre de méthodes numériques peuvent être employées à cette fin. L'une des méthodes qui a été employée intensivement pour les milieux dispersifs et non linéaires est la méthode de Fourier à pas divisé (Split- Step Fourier SSF) du fait de sa vitesse et de sa précision.

La solution de l'équation (III.2) est donnée par :

- Dans le domaine temporel :

$$\begin{cases} A_p(z, t) = A_p(z) \sqrt{1 - \frac{t^2}{T_p^2(z)}} \exp\left(-i \frac{C_p}{2} t^2 + i\varphi_p\right) & \text{si } |t| \leq T_p \\ A_p(z, t) = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$\begin{cases} A_p(z) = \frac{1}{2} U_{ini}^{1/3} \left(\frac{g}{\sqrt{\beta_2 \gamma / 2}}\right)^{1/3} \exp\left(\frac{g}{3} z\right) \\ T_p(z) = 3 U_{ini}^{1/3} \frac{\sqrt[3]{\beta_2 \gamma / 2}}{g^{2/3}} \exp\left(\frac{g}{3} z\right) \\ C_p(t) = \frac{g}{3\beta_2} t \\ \varphi_p(z) = \frac{3\gamma A_0^2}{2g} \exp\left(\frac{2gz}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

- dans le domaine spectral :

$$P(z, w) = |A(z, w)|^2 = \begin{cases} \frac{3\beta_2 P_0}{g_0} \left(1 - \frac{w^2}{w_p^2}\right) & \text{si } |w| \leq w_p(z) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$\begin{cases} P_0 = |A_p(z)|^2 = \frac{1}{4} \left( \left( \frac{g U_{ini}}{\sqrt{\beta_2 \gamma/2}} \right)^{2/3} \right) \exp\left(\frac{2g}{3} z\right) \\ w_p(z) = \left( \frac{2\gamma P_0}{\beta_2} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{g}{3} z\right) \\ C_p(w) = \frac{3\beta_2}{g} w \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

La variable  $A_p(z)$  correspond à l'amplitude de l'impulsion parabolique de demi-largeur temporel  $T_p(z)$ , spectral  $w_p(z)$ , d'énergie initiale  $U_{ini}$ , et  $P_0$  sa puissance crête. Le paramètre  $\phi_p(z)$  décrit la phase de celle-ci au cours de sa propagation, tandis que  $C_p(t)$  et  $C_p(w)$  définissent les coefficients de chirp linéaire temporel et spectral respectivement. Le champ électrique  $A(0, t)$  correspondant à une telle impulsion peut être exprimé sous la forme:  $A(0, t) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right)$  où  $T_0$  est la durée d'impulsion d'entrée.

Une propriété essentielle de propagation auto-similaire d'impulsions dans une fibre amplificatrice est que les impulsions de différentes formes et différentes durées convergent vers une impulsion de forme parabolique avec la même durée et amplitude [4] [7].

### II.3.3.2 Similariton passif

Les impulsions similaritons sont générées à partir de la combinaison de l'effet dispersif (dispersion normale) et de l'effet d'automodulation de phase (non-linéarité) dans un milieu amplificateur. Il semble cependant impossible de générer ces profils dans un milieu passif, c'est à dire que l'impulsion puisse modifier, par sa simple propagation dans une fibre, sa distribution énergétique pour acquérir un profil asymptotique parabolique et un chirp strictement linéaire.

Or, la solution théorique à ce problème a été proposée avec l'utilisation d'une fibre à dispersion normale décroissante (ND-DDF). Cette théorie est basée sur l'équation non-linéaire de Schrödinger avec gain virtuel c-à-d à dispersion variable (avec un profil  $D(z)$ ).

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial t} = -i \frac{\beta_2}{2} D(z) \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} + i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t) \quad (\text{III.7})$$

Introduisant dans cette équation un nouveau système de variables  $\xi = \int_0^z D(Z')dz'$  et renormalisant l'onde sous la forme :  $U(\xi, t) = \frac{A(\xi, t)}{\sqrt{D(\xi)}}$

L'équation (III.7) devient :

$$\frac{\partial U(\xi, t)}{\partial \xi} = -i \frac{\beta_z}{2} \frac{\partial^2 U(\xi, t)}{\partial \xi^2} + i\gamma |U(\xi, t)|^2 U(\xi, t) + \frac{\Gamma(\xi)}{2} U(\xi, t) \quad (\text{III.8})$$

$$\text{Avec : } \Gamma(\xi) = -\frac{1}{D} \frac{dD}{d\xi} = -\frac{1}{D^2} \frac{dD}{dz}$$

apparaît alors, que le terme  $\Gamma(\xi)$  de l'équation (III.8) peut être vu comme un terme de gain "virtuel". Dans le cas d'une fonction d'évolution de la dispersion de forme hyperbolique:

$$D(Z) = \frac{1}{1+\Gamma_0^2} \quad (\text{III.9})$$

Le paramètre  $\Gamma$  devient constant et prend la valeur  $\Gamma_0 = g_0$ . Cette condition permet alors à de devenir similaire à celle ayant servi à l'élaboration de la théorie généralisée des similaritons. La solution asymptotique avec un chirp linéaire générée dans la fibre ND-DDF est de la forme pour  $|t| \leq T_p(z)$  :

$$A_p(z, t) = \begin{cases} \sqrt{P(z)} \sqrt{1 - \frac{t^2}{T_p^2(z)}} e^{i\phi(z,t)} & |t| \leq T_p(z) \\ 0 & |t| \geq T_p(z) \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Avec  $P$  la puissance crête et  $T_p$  la largeur caractéristique à  $A = 0$ . Pour laquelle les paramètres de l'enveloppe et de la phase sont donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} P(z) = \frac{U_{in}^{2/3}}{4} \left( \frac{2g_0^2}{\gamma\beta_2(1+g_0z)} \right)^{1/3} \\ T_p(z) = 3U_{in}^{1/3} \left( \frac{\gamma\beta_2(1+g_0z)}{2g_0^2} \right)^{1/3} \\ \phi(z, t) = -\frac{g_0}{6\beta_2} t^2 + \gamma \int_0^z P(Z') dz' \\ C(z) = -\frac{\partial \phi(z, t)}{\partial t} = \frac{\Gamma_0}{3\beta_2} t \end{array} \right. \quad (\text{III.11})$$

Avec  $U_{in}$  l'énergie initiale de l'impulsion injectée et  $C$  le chirp de l'impulsion.

La dispersion (paramètre  $\beta_2$ ) à l'entrée de cette fibre, sa courbure de décroissance  $\Gamma_0$  au cours de la propagation et le coefficient de non-linéarité  $\gamma$  déterminent, avec l'énergie de

l'impulsion d'entrée, les caractéristiques de largeur temporelle et de puissance crête du similariton à sa sortie. Comme dans le cas des dispositifs actifs, l'acquisition du régime parabolique dans une telle fibre ne dépend ni de la structure de l'enveloppe, ni du chirp de l'impulsion initiale [10].

### III.3.4 Propriétés de similariton :

A partir de ces équations nous pouvons effectuer plusieurs constatations; la première est que l'impulsion présente une enveloppe temporelle parabolique qui est maintenue au cours de sa propagation dans l'amplificateur, définissant ainsi un régime autosimilaire. La seconde est que l'acquisition de ce profil par une impulsion ne dépend ni de la structure de son enveloppe, ni de sa phase, mais uniquement de son énergie initiale [11]. Enfin le chirp du similariton est indépendant des caractéristiques initiales de l'impulsion, celui-ci dépendant uniquement des paramètres de dispersion et de gain de l'amplificateur. Ces caractéristiques de restructuration des enveloppes temporelle et spectrale ainsi que de la phase impulsionnelle [12], rendent les similaritons aptes à la synthèse et à la régénération de signaux optiques [13] ainsi qu'à une utilisation dans le domaine des télécommunications [14]. Cependant, il faut noter le fait que la largeur temporelle de l'enveloppe ainsi que le chirp de l'impulsion introduite dans l'amplificateur influent sur la dynamique d'évolution de celle-ci vers son régime parabolique [15]. Nous pouvons aussi remarquer que la dispersion et la non-linéarité étant définies par les caractéristiques structurelles de la fibre optique utilisée pour l'amplification, les seules variables d'ajustement, pour que l'impulsion entre dans le régime parabolique, sont donc son énergie et le gain linéique du milieu de propagation. Enfin nous notons que le spectre des similaritons présente aussi une structure parabolique qui s'élargit de manière exponentielle durant la propagation (Figure III.6), impliquant de ce fait une limite physique à ce régime par la bande spectrale d'amplification du milieu à gain [16]. Les similaritons présentant un chirp linéaire et un profil parabolique, ils pourront donc se propager de manière autosimilaire dans une fibre passive à dispersion normale. De plus, l'amplification de ces impulsions s'effectue sans effet de wave breaking, ce qui a permis d'envisager leur utilisation dans des les régénérateurs 2R tout optique.

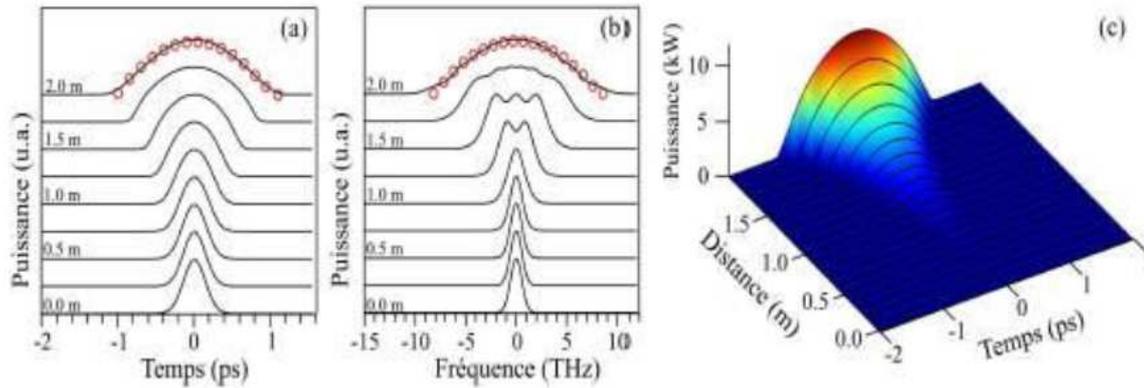


Figure III.6 : Evolution temporelle (a) et spectrale (b) d'une impulsion Gaussienne vers un similariton dans un amplificateur de 2 m (traits continus). (c) : Evolution du profil impulsionnelle dans l'amplificateur de 2 m [7].

### III. 4 Régénération 2R tout optique par similaritons :

Comme une suite logique aux travaux de la régénération 2R tout optique par l'automodulation de phase de Mamyshev, un grand nombre de travaux s'en sont alors suivis et ont démontré la faisabilité de cette technique. Une évolution significative de ce concept consiste à combiner les apports des similaritons avec cette technique, le filtrage spectral des impulsions de similariton peut améliorer la capacité du régénérateur Mamyshev pour éliminer des impulsions de bruit parasite ainsi que pour réduire les fluctuations dans le niveau d'un bit de signal simultanément. Cette capacité repose sur les caractéristiques spécifiques de l'amplification auto-similaire.

#### III.4.1 La fonction de transfert : [17]

L'élargissement auto-similaire et le similariton optique présentent l'intérêt d'être indépendant de la forme initiale de l'impulsion, et dépend que de l'énergie initiale et les paramètres de la fibre. Comme ces paramètres sont connus par le choix de la fibre hautement non-linéaire utilisée pour l'élargissement spectral de similariton par l'amplification similariton, donc, il reste l'étude de l'effet des paramètres du filtre sur la forme de la fonction de transfert.

Comme tous les régénérateurs, la détermination de la fonction de transfert du dispositif de régénération décrit l'évolution de la puissance de sortie en fonction de la puissance initiale est par conséquent un point de départ pour s'assurer de l'adaptation de ceux-ci à la

régénération. Une fonction de transfert (FdT) en forme de marche d'escalier (fonction de transfert idéale) est souvent le but recherché, une telle fonction est déterminée par un système de deux équations :

$$S = \begin{cases} P_1^{\text{out}} = 1 & \text{si } P_1^{\text{in}} < P_{CR} \\ P_1^{\text{out}} = 1 & \text{si } P_1^{\text{in}} > P_{CR} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Où  $P_{CR}$  représente la puissance critique du signal déterminée à partir de la condition suivante :

$$\frac{\Delta f(P_{CR})}{2} = \Delta F \quad (\text{III.13})$$

Avec,  $\Delta f$  est la largeur spectrale du spectre élargi, et  $\Delta F$  est le décalage spectrale du filtre. Donnons pour un élargissement auto-similaire (eq III.13) le résultat suivant:

$$P_{CR} = (2\pi \cdot \Delta F)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(2 \cdot \beta_2^2 \cdot T_0 \cdot L)}{\gamma \cdot G \cdot \log G} \quad (\text{III.14})$$

Avec,  $G$  est le gain de l'amplification, et  $T_0$  la largeur temporelle de l'impulsion initiale.

Les paramètres de filtre (décalage par rapport à la fréquence initiale  $\pm \Delta F$  ou décalage par rapport à la longueur d'onde initiale  $\pm \Delta \lambda$ , bande passante  $\delta f / \delta \lambda$ ) modifient plus ou moins la forme de la fonction de transfert et par conséquent influent sur l'efficacité du régénérateur.

Pour un type de filtre optique passe bande gaussien, sa fonction de transfert est :

$$H(\omega) = \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\delta \omega^2}\right) \quad (\text{III.15})$$

où  $\omega_0$  la fréquence centrale ( $\omega_0 = 2\pi f_0$ ) et  $\delta \omega$  la bande passante ( $\delta \omega = 2\pi \cdot \delta f$ ) sont les deux paramètres pouvant être choisis pour optimiser l'efficacité du régénérateur.

#### III.4.2 Régénérateur 2R active simple étage :

Nous allons chercher à élaborer un dispositif simple étage de régénération 2R tout optique qui se compose de l'amplificateur auto-similaire et d'un filtre optique. Notre approche exploite les propriétés spectrales des similaritons: les impulsions initiales sont

transformées en un train de similaritons optiques durant la propagation dans la fibre qui est ensuite filtré spectralement à l'aide d'un filtre de forme gaussienne. Ce dernier doit être placé judicieusement.

Le schéma de principe de la régénération basé sur l'amplificateur similariton est représenté par la Figure III.7. Un filtre optique passe bande de largeur spectrale bien précise est placé après l'amplificateur similariton dont la fréquence centrale est décalée par rapport à la fréquence centrale de l'onde porteuse. Cette configuration est capable de régénérer un flux de données optiques au format RZ après de concevoir un régénérateur actif de type B.

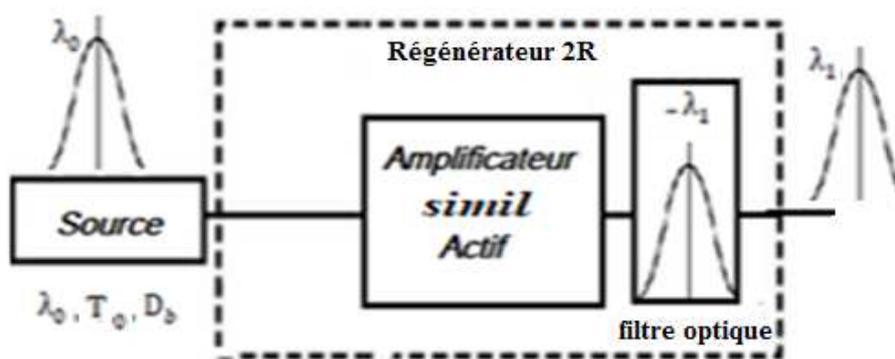


Figure III.7 : Configuration de régénérateur 2R actif simple étage basé sur l'amplification similariton.

Quand la puissance de l'impulsion d'entrée est élevée, elle se transforme en similariton avec un spectre large et plat au cours de la propagation et traverse alors partiellement le filtre optique. Tandis que l'impulsion initiale a de puissance plus faible reste spectralement étroite. En effet, la valeur de la puissance est insuffisante pour provoquer l'effet non linéaire SPM dans la fibre optique qui est l'effet le prédominant à l'élargissement spectral, est alors rejeté par le filtre. Après passage dans le filtre centré autour de la fréquence  $F_f$ , le signal à l'impulsion d'entrée se voit décaler spectralement par rapport à sa fréquence initiale  $f_0$ , en résulte que la fréquence  $F_f$ , se définit par :  $F_f = f_0 + \Delta_f$ , et la largeur spectrale de l'impulsion régénérée est alors égale à la largeur spectrale du filtre optique.

Cependant, cette méthode proposée, implique une conversion de la longueur d'onde du signal initial pouvant être un inconvénient lorsque l'on souhaite que la fonction de régénération soit transparente à la longueur d'onde du signal. Dans le but de s'affranchir de

cette conversion de longueur d'onde, il est possible de mettre en cascade deux régénérateurs ayant un décalage fréquentiel opposé. C'est la configuration double étage.

### III.4.3 Régénérateur 2R passive de deuxième étage :

La proposition double étage est basée sur la conception du deuxième étage basé sur l'élargissement spectrale auto-similaire de manière passive (pas d'amplification). En effet, la puissance de crête élevée de ces impulsions induit un élargissement spectral suffisant dans le deuxième étage. Donc, il n'est pas indispensable d'utiliser un amplificateur à l'entrée de deuxième étage pour garantir un élargissement suffisant comme le cas de régénérateur 2R de Mamyshev [18].

Concernant le premier étage du régénérateur comprend l'amplificateur similariton étudié auparavant est suivi par un filtre gaussien décalé en fréquence par rapport au signal. Le deuxième étage de régénérateur doit utiliser un filtre de décalage opposé pour restituer la longueur d'onde du signal.

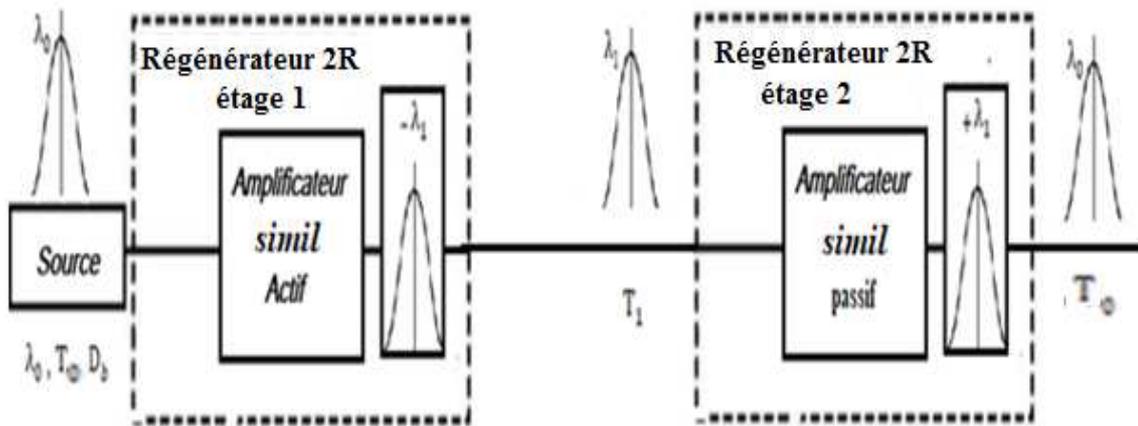


Figure III.8 : Configuration de régénérateur 2R double étage basé sur similariton.

La configuration de régénérateur 2R double étage basé sur similariton est proposée pour les raisons suivantes :

- D'un côté, cette configuration permet de réduire le nombre des amplificateurs requis par rapport à un régénérateur classique due à l'utilisation de l'amplification similariton au premier étage. En effet, la puissance de crête élevée de ces impulsions induit un élargissement spectral suffisant dans le deuxième étage.

- D'un autre côté, ce dispositif peut réduire la gigue temporelle introduite supplémentaire par le processus de la régénération. Par conséquent, deux régénérateurs basés sur l'élargissement spectral auto-similaire en cascade dont les décalages de filtres sont de signe opposé, peuvent potentiellement annuler la gigue temporelle du dispositif complet et conserver la longueur d'onde du signal.

Dans le chapitre suivant, Ce régénérateur 2R tout-optique sera étudié numériquement dans une configuration back to back, c.-à-d. entre l'émetteur et le récepteur, puis inclus dans une ligne de transmission pour tester ses performances, sa capacité de diminuer les fantômes '0' et les fluctuations d'intensité (gigue d'amplitude) dans les '1' d'un flux de données optiques RZ à très haut débit.

### **III.5 Conclusion :**

Nous avons introduit dans ce chapitre un nouveau type d'impulsion ; le similariton optique, impulsion optique présentant un profil d'intensité parabolique et se propageant de manière auto-similaire. Un similariton optique est progressivement généré dans une fibre optique par combinaison des effets liés au gain, à la dispersion normale et à la non-linéarité, et peut être obtenu par amplification, ou de manière passive par les fibres à dispersion normale décroissante (gain virtuel).

Contrairement au régénérateur Mamyshev, l'élargissement spectral vis à vis de l'énergie initiale (la puissance initiale) basé sur l'amplification auto-similaire dépend que de peu de paramètres, ce qui augmente la stabilité de dispositif. Ce qui rend l'utilisation de similariton un bon candidat pour la régénération 2 R tout optique,

# Chapitre IV

Résultats de la simulation

## IV.1 Introduction

La simulation peut jouer un rôle important dans toutes les phases du développement des systèmes de télécommunication, depuis les premières étapes de conception, jusqu'aux étapes de réalisation, de test et de mise en œuvre du système.

Dans ce chapitre, on va étudier le comportement d'un signal optique dans une chaîne de transmission à fibre optique monocanal. On aura donc à tester le comportement du signal optique sur cette ligne de transmission sans régénération et aussi sur une ligne avec régénération. Parmi les trois types de régénération qu'on a cités dans les deux chapitres précédentes on va seulement se verrouiller dans le type de régénération 1R et 2R avec similariton, donc ce chapitre sera divisé en deux parties.

À l'aide du simulateur OptiSystem [1], on réalisera les deux systèmes de transmission (système de transmission avec régénération 1R et système de transmission avec régénération 2R), et grâce à des composants employés dans ce logiciel de simulation, on observera les changements du signal optique dans ces lignes de transmission.

Pour pouvoir juger la qualité du signal optique transmis il suffira d'observer le diagramme de l'œil. La qualité du signal optique est déterminée en calculant le facteur de qualité fourni avec ce diagramme.

## IV.2 Présentation du logiciel OptiSystem : [2]

### IV.2.1 Introduction :

Le logiciel OptiSystem développé par une société canadienne Optiwave ; Optical Communication System Design Software, il permet aux ingénieurs et aux chercheurs de concevoir, simuler et d'analyser des systèmes de transmission optique. La diversité des systèmes simulés peut être étendue par la possibilité d'insérer des fonctions réalisées par l'utilisateur et qui peuvent être ajoutées aux systèmes simulés.

Le logiciel OptiSystem permet de tester et optimiser pratiquement n'importe quel type de liaison optique, il est basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications par fibre optiques.

### IV.2.2 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem :

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.

- La bibliothèque de composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurées à partir de périphériques réels, ces composants s'intègrent aux équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée produit le signal sonore, les diagrammes de l'oeil, l'état de la polarisation.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiseurs sur le moniteur au même port.

### **IV.2.3 Applications du logiciel OptiSystem :**

Parmi les diverses applications d'OptiSystem nous allons citer les plus utilisées :

- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER ou TEB) et le calcul du bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et les réseaux optiques passifs (PON).
- L'espace libre pour les systèmes optique (OSA).
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

### **IV.2.4 Avantage du logiciel OptiSystem**

Les avantages du logiciel OptiSystem sont:

- Obtenir un aperçu de performances du système de fibre optique.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation du système.
- Présentation virtuelle des options de conceptions.

La démarche à suivre pour simuler un système optique se décompose en deux étapes :

- Construire le schéma bloc.
- Analyser le schéma.

### **IV.2.5 Interface du logiciel OptiSystem**

Pour lancer OptiSystem, nous devons effectuer l'action suivante : Dans le menu Démarrer, sélectionnez Programs >Optiwave Software>OptiSystem>OptiSystem se charge et l'interface utilisateur graphique et une fenêtre principale répartit en plusieurs parties apparaît (voir figure IV.1).

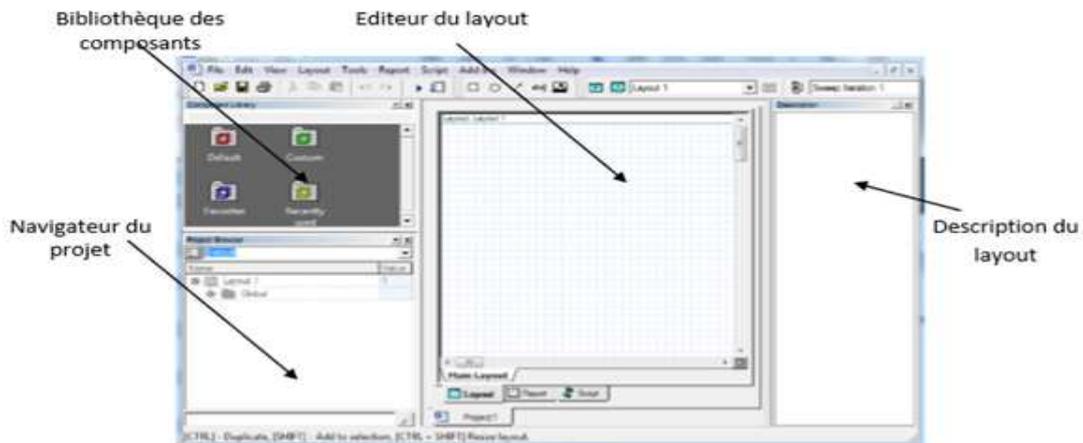


Figure IV.1 : Interface graphique du logiciel OptiSystem

#### IV.2.6 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem :

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la Bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs (Figure IV.2).
- Les outils de visualisation avancée produisent le SAOS Spectral, le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation schémas et beaucoup plus.
- Joindre un nombre arbitraire des visualiser sur le moniteur au même port.
- l'état de l'art et le calcul de flux de données.

Le calcul planificateur contrôle la simulation en déterminant l'ordre d'exécution des modules composants selon les données sélectionnées

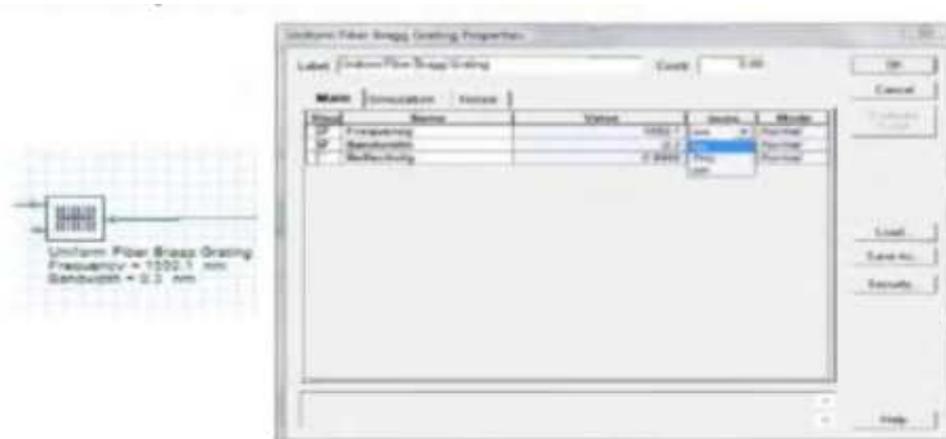


Figure IV.2 : Modification composant du paramètre.

### IV.3 Critères de qualité d'une transmission : [3] [4]

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

#### IV.3.1 Le diagramme de l'œil :

Le diagramme de l'œil est la superposition d'un grand nombre de symboles binaires du signal émis. Il est obtenu, dans le domaine électrique après détection par une photodiode, au moyen d'un oscilloscope à échantillonnage, et d'une synchronisation à la fréquence de l'horloge. Il permet d'évaluer la qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférences entre symboles ou de gigue temporelle.

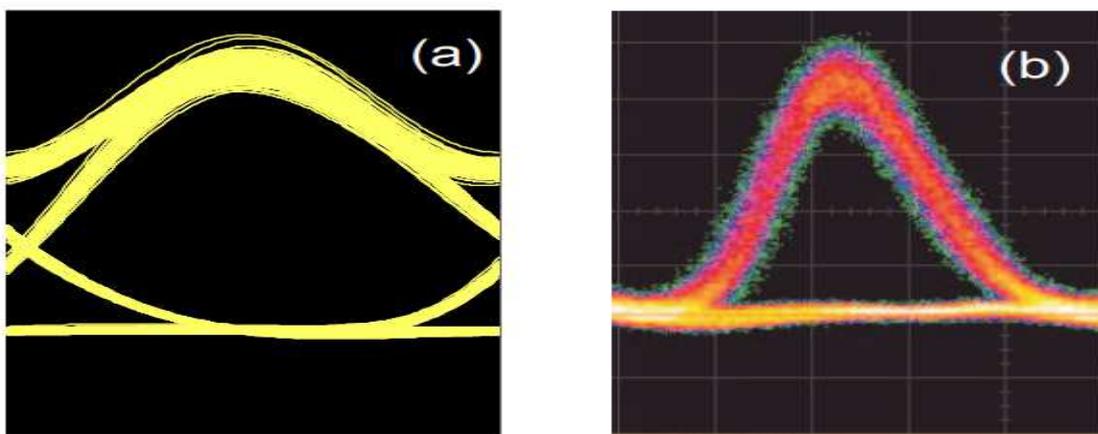


Figure IV.3 : Exemples de diagrammes de l'œil simulé (a) et expérimental (b) [3]

#### IV.3.2 Le taux d'erreur binaire (TEB) :

Le moyen quantitatif pour évaluer la qualité d'une transmission consiste à évaluer la probabilité d'erreur, qui correspond à la probabilité de prendre une décision erronée sur un bit. Le taux d'erreur binaire (TEB) est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits émis.

Le récepteur prend une décision sur la présence d'un symbole "1" ou "0" selon le niveau de signal reçu à un instant donné appelé instant de décision. Si les fluctuations d'amplitude et temporelles sont importantes, la tension d'un symbole "1" peut passer au-dessous du seuil et la tension d'un symbole "0" au-dessus du seuil, des erreurs sont alors commises.

Pour nos travaux dans le laboratoire, un TEB acceptable à la réception est généralement inférieur à  $10^{-9}$ .

### IV.3.3 Le facteur de qualité $Q$ :

Le signal mesure à l'entrée du canal de l'oscilloscope contient une contribution due au signal utile ainsi qu'un apport en bruit dû à l'ensemble des éléments de la chaîne de transmission.

Dans le diagramme de l'œil qui retrace le signal mesure, le signal utile est représenté par les niveaux moyens  $\mu_1$  et  $\mu_0$ . Le 'bruit' représente les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens, il est quantifié en combinant les écarts-types  $\mu_1$  et  $\mu_0$  On définit donc le facteur  $Q$  à partir de la relève du diagramme de l'œil par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\delta_1 + \delta_2}$$

Si le facteur  $Q$  est élevé l'œil est bien ouvert La valeur minimale de facteur  $Q$  est 6.

## IV.4 Partie de simulation:

### IV.4.1 Liaison de transmission sans régénération :

Dans cette partie on va réaliser un schéma de transmission dans une fibre optique mono-canal et d'une longueur variable qui sera représenté dans la figure ci-dessous :

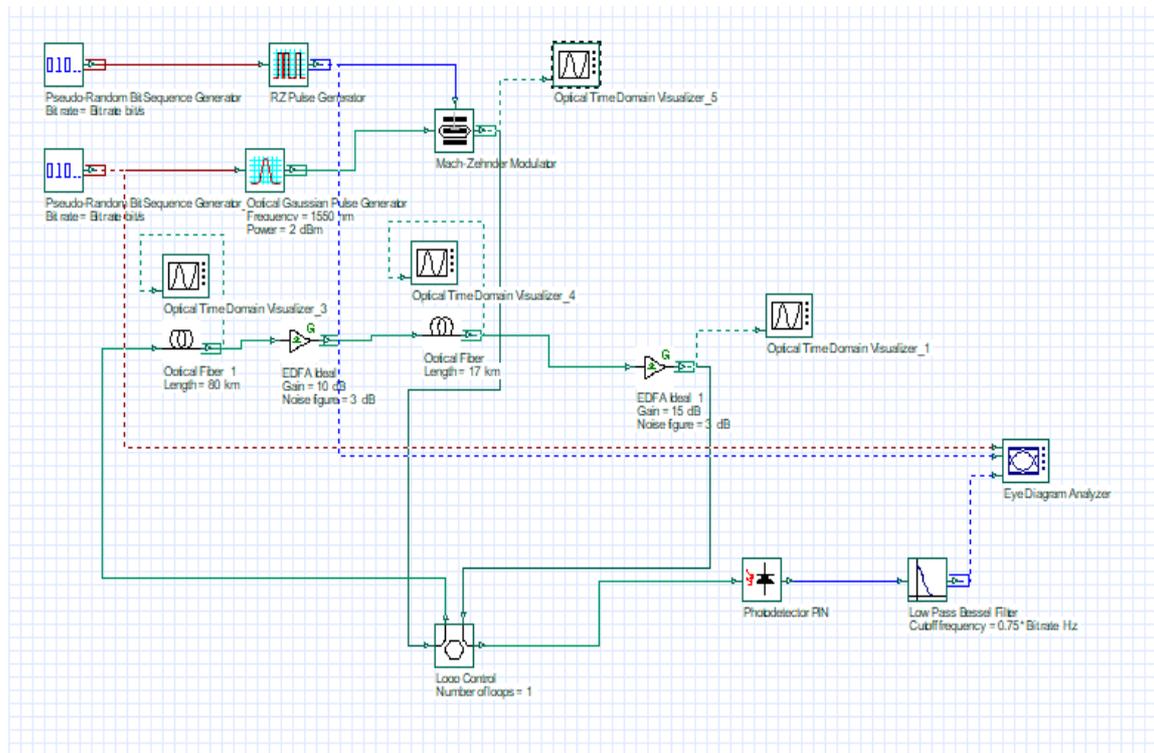


Figure IV.4 : Système de transmission sans régénération

Tout d'abord on génère un signal optique gaussien codé en RZ (Retour-à-Zéro) à un débit de 40Gbits/s, et pour cela on module le signal électrique avec le signal optique par un modulateur Mach-Zehnder comme l'indique la figure ci-dessous.

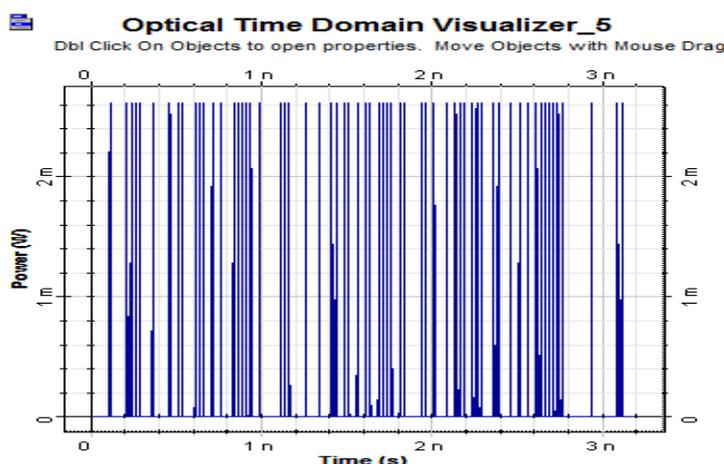


Figure IV.5 : Signal optique à l'entre de la ligne de transmission.

Après on fait passer le signal par la ligne de transmission qui à son tour contient des amplificateurs EDFA pour compensé les atténuations de la fibre optique, une fibre compensatrice de dispersion, et une boucle 'Loop Control' afin de créer un system en boucle qui nous permettra d'augmenter la longueur de la ligne de transmission.

A la fin, en insère à la sortie une photodiode qui nous servira d'obtenir un signal électrique qui passera par un filtre Bessel passe bas pour obtenir un signal électrique linéaire. Le signal de sortie du Filtre Bessel passe bas obtenu sera injecté dans un diagramme de l'œil pour déterminer la qualité du signal optique.

#### IV.4.1.1 Analyse du signal transmis sur la ligne de transmission :

- On a implémenté des visualiseurs dans le domaine optique pour nous dessiner les graphs de la puissance du signal optique avant son entrée dans la ligne de transmission et après sa sortie de la ligne de transmission.
- En utilisant le composant Loop Control on augmentera la longueur de la ligne de transmission en jouant sur le nombre de boucle de ce composant. Dans notre application on a une ligne de transmission de longueur minimale  $L_m$  de 80 Km pour un nombre de boucle du Loop Control égale à 1.
- Le signal de sortie de la ligne de transmission pour chaque longueur de la ligne de transmission, la longueur 'L' de la ligne est égale a la longueur minimale 'L<sub>m</sub>' multipliée par le nombre de boucle 'N' (donc :  $L = L_m \times N$ ).
- on fixe le débit injecter (40, 80 et 160 Gb/s) et on varie la longueur de la ligne (nombre de boucle N).
- on mesure le facteur de qualité du signal pour chaque longueur de ligne de transmission afin de déterminer la qualité du signal pour chaque à longueur de ligne, (on prendra des nombres de boucle égale à 1, 2, 3,4,5,6...).

### a. Ligne de transmission à un débit 40 Gb/s :

Pour un nombre de boucle égale à 1 (  $L = 80$  Km) on a obtenu les signaux suivants :

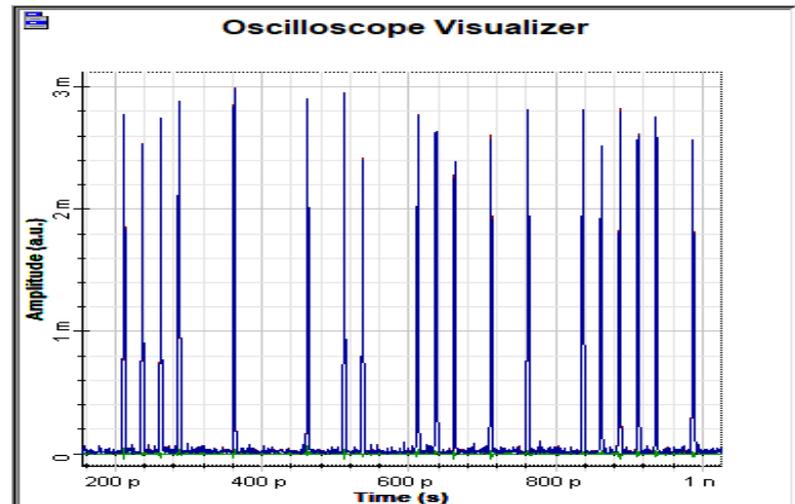


Figure IV.6 : Graph de la puissance du signal à la sortie de la ligne de transmission de 80 Km et un débit 40 Gb/s

À la sortie, en utilisant le composant Eyes Diagram Analyzer on récupérer le diagramme de l'œil du signal transmis et le facteur Q correspondant :

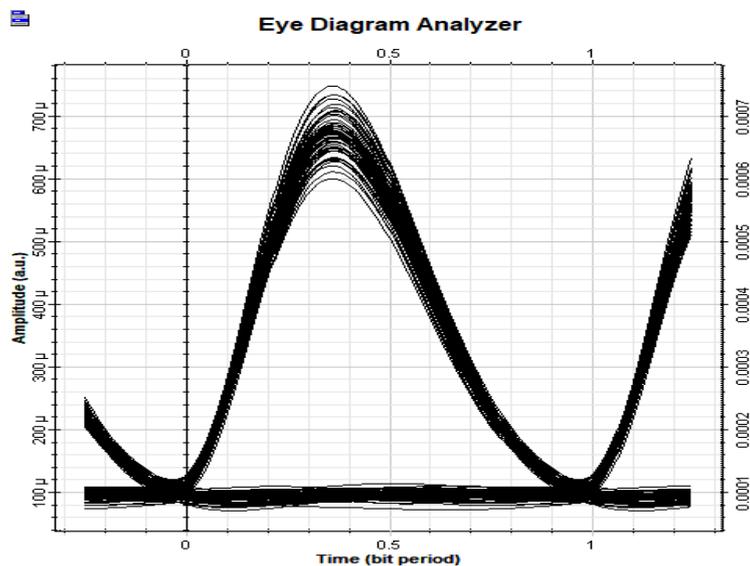


Figure IV.7 : Diagramme de l'œil pour une longueur de ligne de transmission de 80 Km et un débit 40 Gb/s

Pour une seul boucle ( $N=1$ ), On a obtenu un facteur Q égale à 15.86 est supérieur à 6 donc la transmission sur une ligne de longueur de 80 Km avec un débit de 40 Gb/s est de bonne malgré les atténuations rencontrées et l'apparence du bruit lors de la transmission du signal apparue sur le diagramme de l'œil par la gigue d'amplitude.

### ➤ Variation de facteur de qualité en fonction de la longueur

On varie la longueur de la ligne (nombre de boucle N) a partir de 1 jusqu'a 10.

Tels que : longueur minimal de la ligne  $L_m = 80\text{Km}$ .

-la longueur totale de ligne  $L = N * L_m$ .

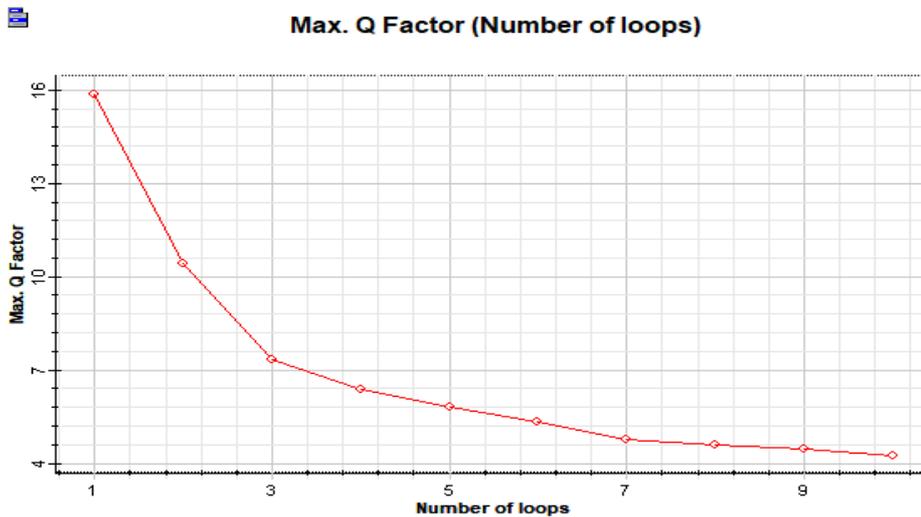


Figure IV.8 : Variation de facteur de qualité en fonction de nombre de boucle pour un débit 40 Gb/s

Figure IV.8 montre la variation de facteur de qualité en fonction de la longueur de la ligne pour un débit de 40 Gb/s. Cette figure montre bien la dégradation de qualité de signal lorsque la longueur de la liaison augmente à cause de l'accumulation de bruit. Ainsi, pour obtenir un facteur Q supérieur à 6, la longueur de la liaison doit être inférieure à 400 Km.

### b. Ligne de transmission à un débit 80 Gb/s

Pour un nombre de boucle égale à 1 ( $L = 80\text{ Km}$ ) on a obtenu les signaux suivants :

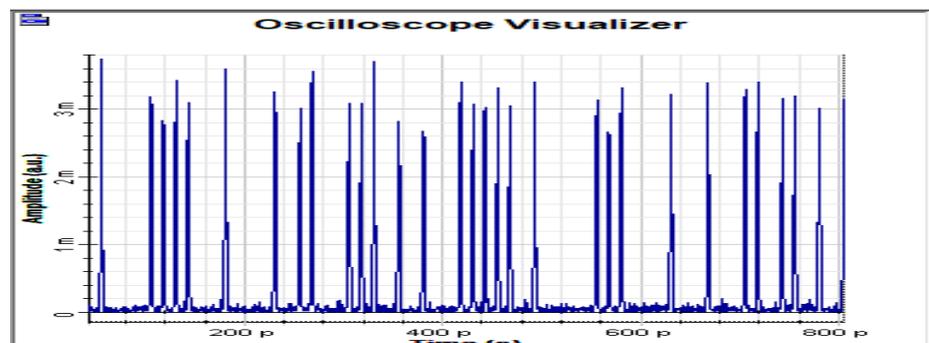


Figure IV.9 : Graph de la puissance du signal à la sortie de la ligne de transmission de 80 Km et un débit de 80 Gb/s.

-le diagramme de l'œil du signal reçu :

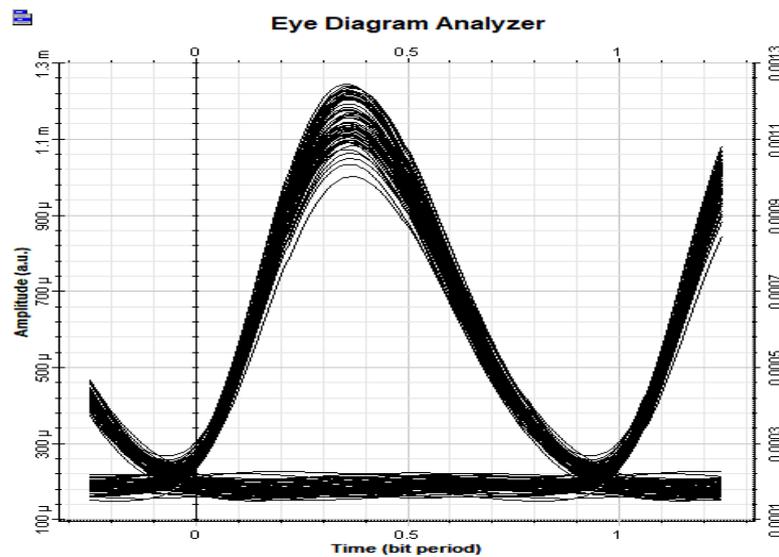


Figure IV.10 : Diagramme de l'œil pour une longueur de ligne de transmission de 80 Km et un débit 80 Gb/s

Pour un nombre de boucle ( $N=1$ ), On a obtenu un facteur Q égale à 13.35 est supérieur à 6 donc la qualité de transmission sur une ligne de longueur de 80 Km est bonne malgré les atténuations rencontrées et l'apparence du bruit lors de la propagation du signal représenter par la gigue d'amplitude sur le diagramme de l'œil.

#### ➤ variation de facteur de qualité en fonction de la longueur

Figure IV.11 montre la variation de facteur de qualité en fonction de la longueur de la ligne pour un débit de 80 Gb/s. Cette figure montre bien la dégradation de qualité de signal lorsque la longueur de la liaison augmente. Ainsi, pour obtenir un facteur Q supérieur à 6, la longueur de la liaison doit être inférieure à 320 Km.

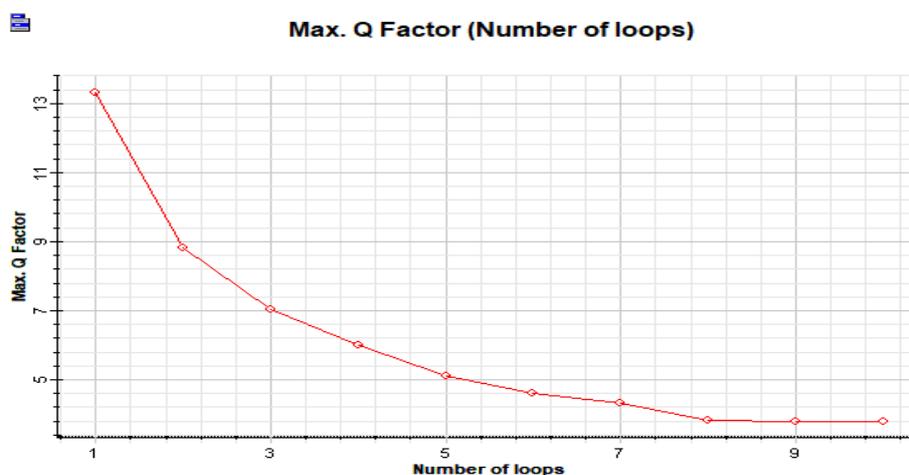


Figure IV.11 : Variation de facteur de qualité en fonction de nombre de boucle pour un débit 80 Gb/s

### c. Ligne de transmission à un débit 160 Gb/s :

Pour un nombre de boucle égale à 1 ( $L = 80$  Km) on a obtenu les signaux suivants :

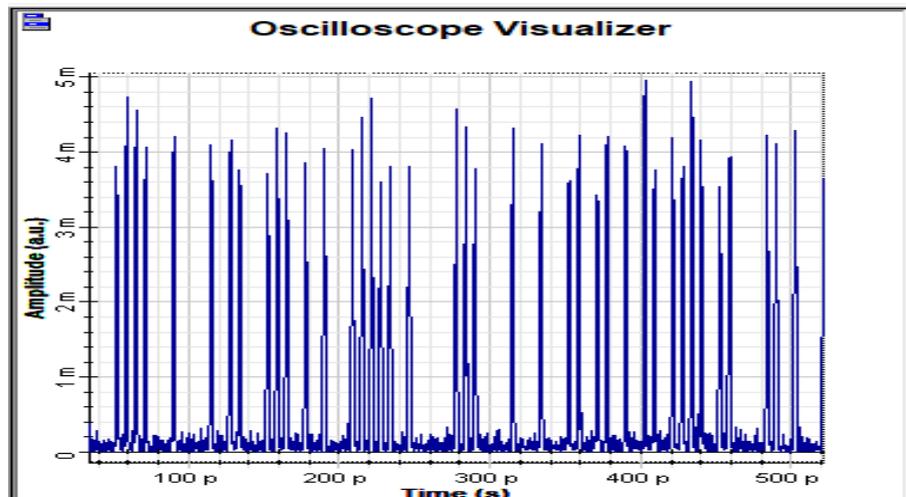


Figure IV.12 : Graph de la puissance du signal à la sortie de la ligne de transmission de 80 Km et un débit 160 Gb/s

-le diagramme de l'œil du signal reçu:

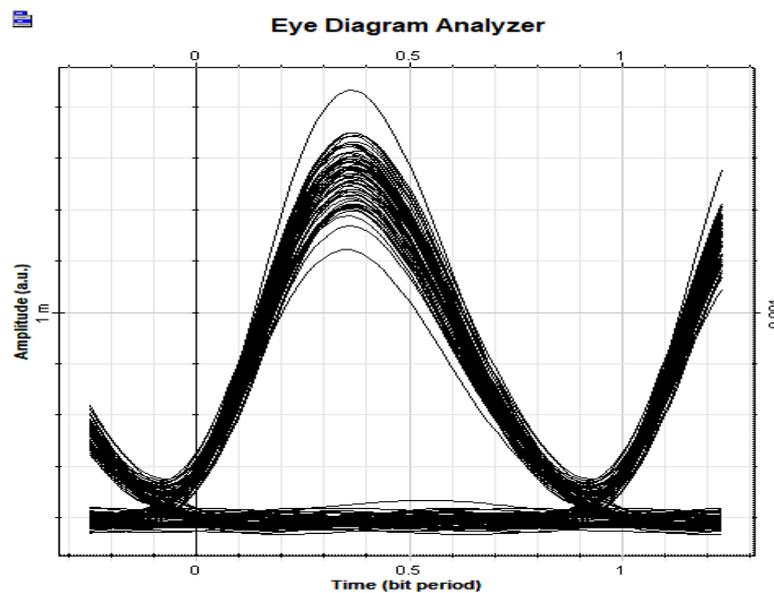


Figure IV.13 : Diagramme de l'œil pour une longueur de ligne de transmission de 80 Km et un débit 160 Gb/s

Pour un nombre de boucle ( $N=1$ ), On a obtenu un facteur  $Q$  égale à : 10.83 est supérieur à 6 donc la qualité de transmission sur une ligne de longueur de 80 Km est reste de bonne malgré les atténuations rencontrées et l'accumulation du bruit lors de la propagation du signal. Le diagramme de l'œil est partiellement fermé en raison de la présence d'énergie au niveau des '0' et une forte fluctuation sur les bits '1'.

➤ **Variation de facteur de qualité en fonction de la longueur**

Figure IV.14 montre la variation de facteur de qualité en fonction de la longueur de la ligne pour un débit de 80 Gb/s. Cette figure montre bien la dégradation de qualité de signal lorsque la longueur de la liaison augmente. Ainsi, pour obtenir un facteur Q supérieur à 6, la longueur de la liaison doit être inférieure à 240 Km.

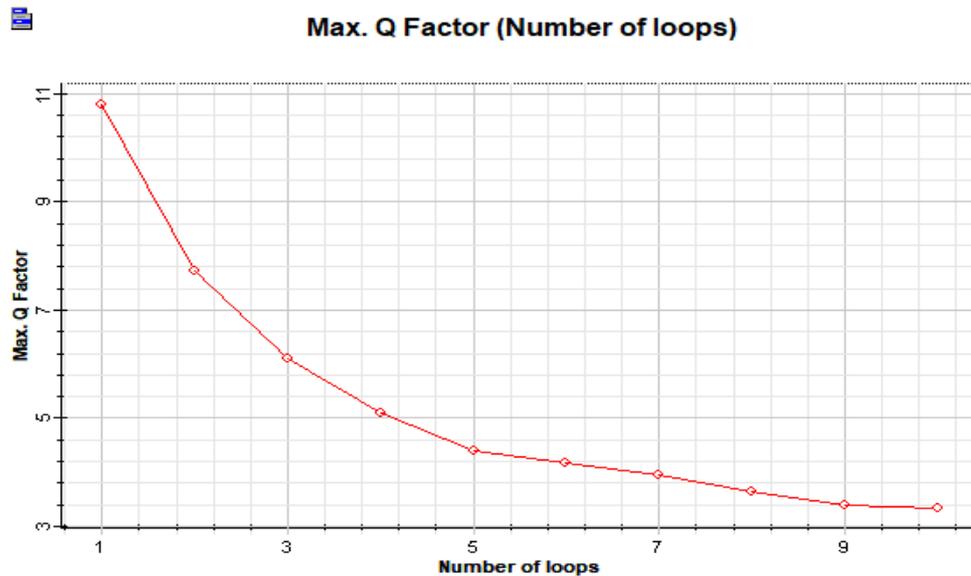


Figure IV.14 : Variation de facteur de qualité en fonction de nombre de boucle pour un débit 160 Gb/s

D'après les trois Figures (IV.8, IV.11 et IV.14) on remarque que les longueurs maximales pour les débits de 40 Gb/s, 80 et 160 sont de 400 Km, 320 Km et 240 Km respectivement. La transmission du signal sur des systèmes de transmission sans régénération (sans 2R et avec 1R) nous permet de compenser un des effets non linéaire de la fibre optique sur des distances courtes (n'allant pas plus loin que 400 Km), lorsque en augmentant la ligne de transmission on aura face au problème de l'accumulation de bruit. Donc la qualité de transmission devient mauvaise.

La transmission sans régénération fait des problèmes dans les hauts débits. La qualité devient très mauvaise et la portée très courte.

#### IV.4.2 Liaison de transmission avec régénération 2R par similariton :

##### IV.4.2.1 Génération des similaritons

La Figure IV.15 montre la configuration d'un montage contrapropagation pour générer les impulsions similariton. La configuration proposée consiste à propager une impulsion

ultracourte dans une fibre fortement non-linéaire et de dispersion normale et sous l'effet de gain Raman permet alors l'amplification à similariton.

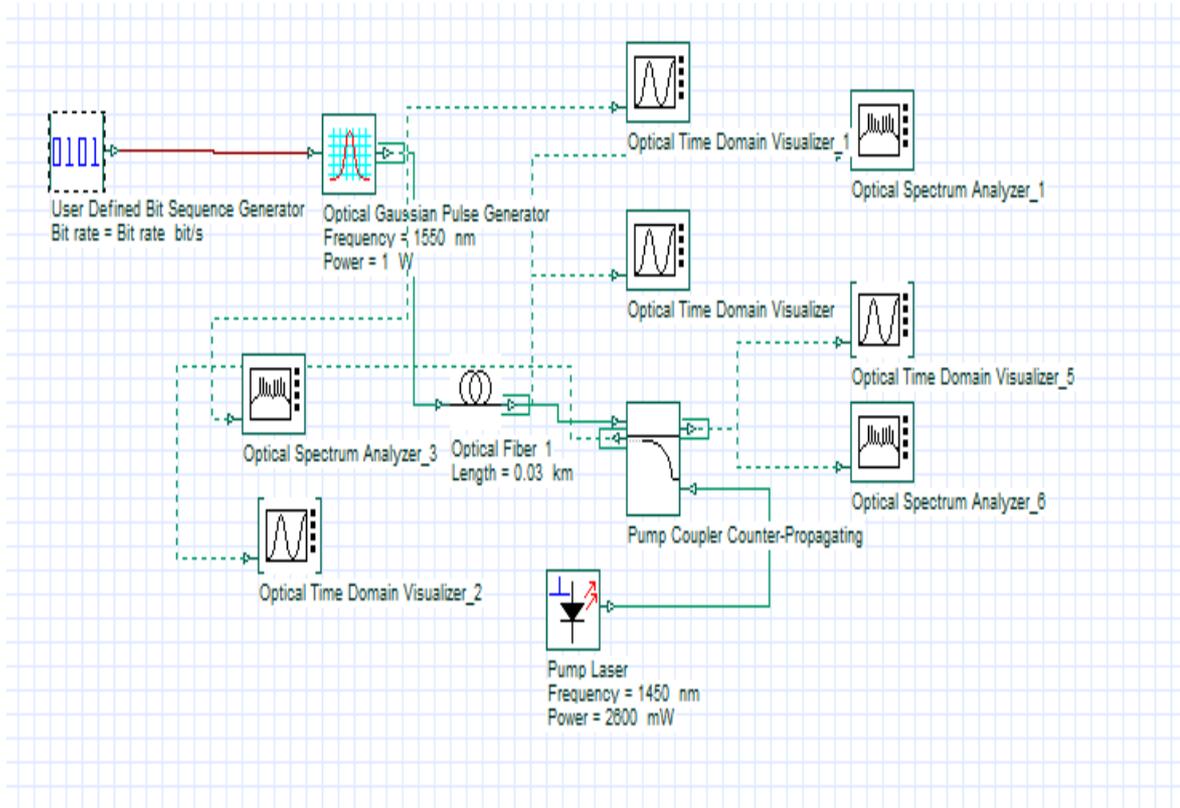


Figure IV.15 : Génération des similaritons par la configuration contra-propagative.

On montre dans la Figure IV.16.(a) la forme temporelle et le spectre d'une impulsion gaussienne d'entrée de puissance de crête  $P_0 = 1 \text{ W}$ , et de durée initiale  $T_0 = 1.5 \text{ ps}$  ( $T_{\text{FWHM}} = 2.4 \text{ ps}$ ). Après l'amplification dans une fibre de dispersion normale et hautement non linéaire (de dispersion  $D = -0.8 \text{ p/snm/Km}$ , et de  $\gamma = 51 \text{ W}^{-1}\text{Km}^{-1}$ ), on voit que la forme temporelle de l'impulsion gaussienne est évoluer vers une impulsion similariton.

Le similariton généré présente une structure parabolique impliquant de ce fait une largeur temporelle de similariton ( $T_{\text{FWHM}} = 5 \text{ ps}$ ) avec une puissance de crête de  $20 \text{ W}$  à la sortie tandis que le spectre présente un élargissement d'environ  $20 \text{ nm}$  avec une bonne platitude au centre (Figure IV.16.(b)). En revanche, le régime SPM est caractérisé par un spectre hautement modulé comme représenté par la Figure IV.17.(a).

Ces résultats montrent l'importance de leurs applications en régénération 2R où le spectre et l'élargissement auto-similaire sont bien exploités.

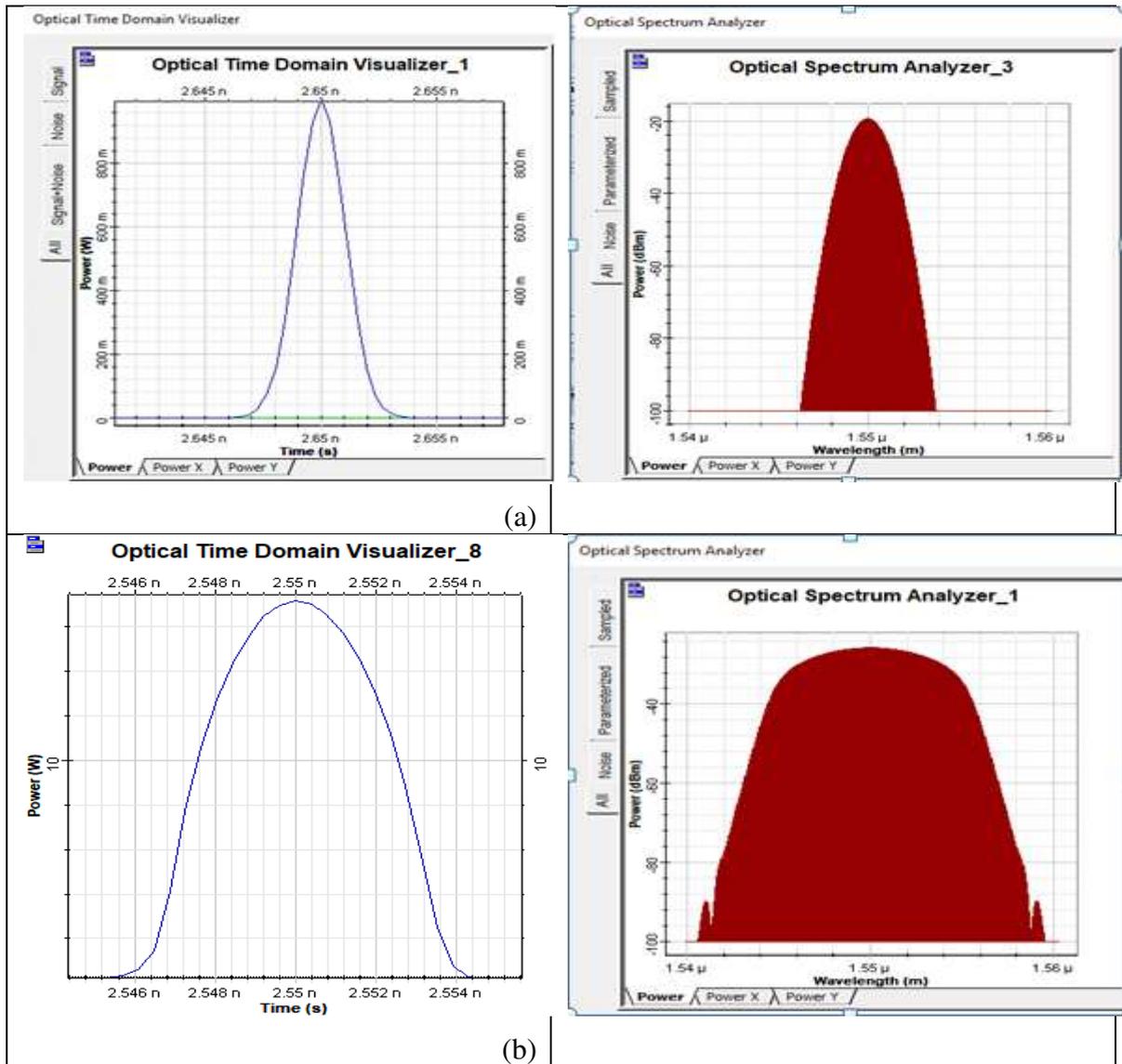


Figure IV.16 : Forme temporelle, et le spectre des impulsions gaussiennes d'entrée (a),  
 Forme temporelle, et le spectre des impulsions des similaritons générés (b)

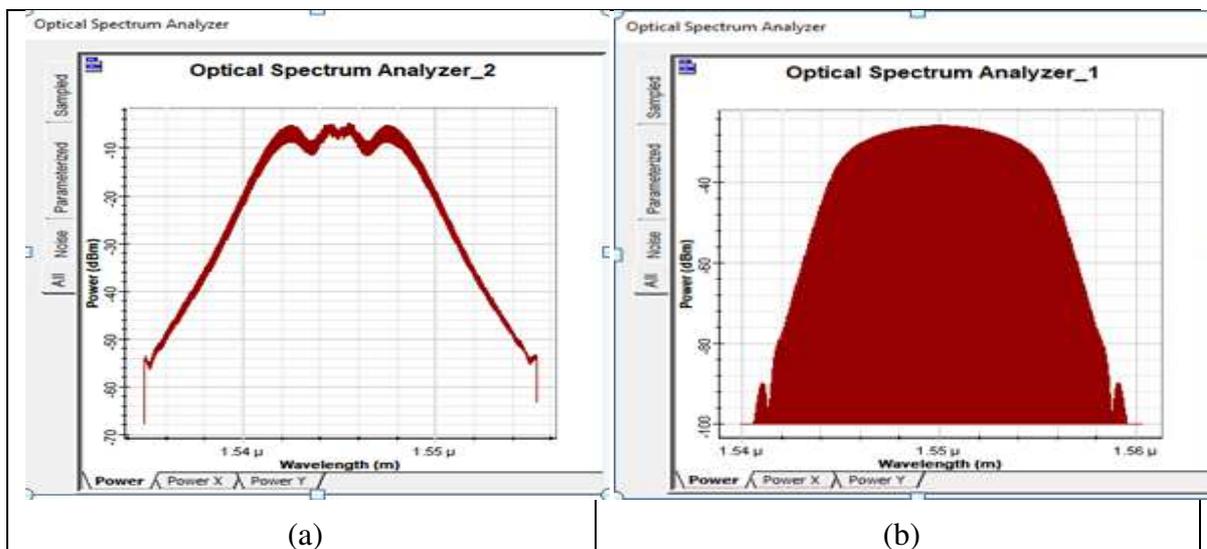


Figure IV.17 : Spectre du signal généré par auto modulation de phase (SPM) (a),  
 et spectre du similariton (b).

### IV.4.2.2 Régénération 2R par similariton

#### IV.4.2.2.1 Configuration back to back

Dans cette partie, nous cherchons à réaliser des simulations permettant de tester la performance de régénérateur par similariton dans une configuration back to back (B2B) ; la configuration B2B consiste à placer le régénérateur entre l'émetteur et le récepteur puis de comparer par des simulations la qualité du signal en entrée et en sortie du régénérateur. La Figure IV.18 présente le schéma explicatif des différentes parties de la liaison B2B utilisée dans cette étude incluant notre régénérateur double étage.

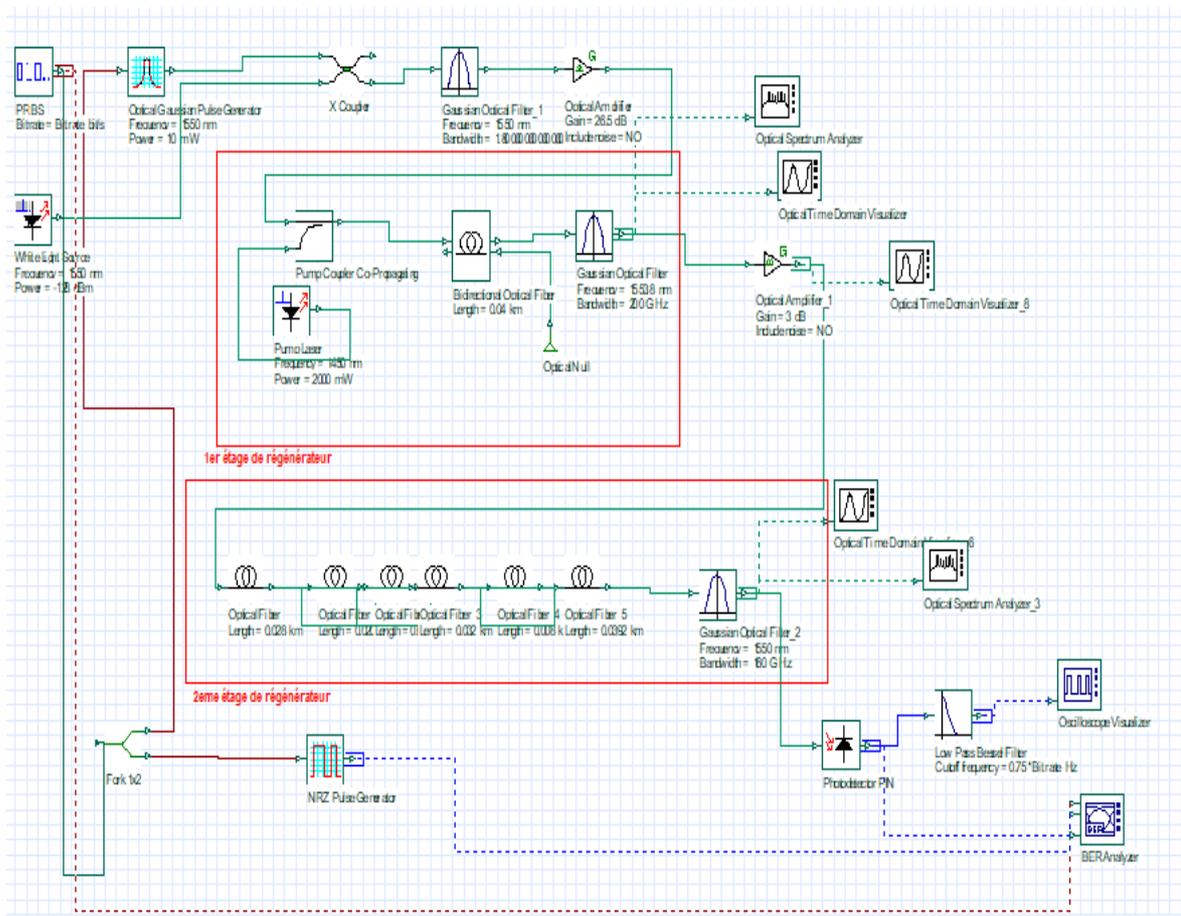


Figure IV.18 : Schéma explicatif d'une liaison B2B avec un régénérateur 2R double étage par similariton.

Le bloc d'émetteur (Tx) est composé de deux parties. La source optique permet de générer le train d'impulsions cadencé de 40 GHz à 160 GHz et caractérisées par une largeur temporelle de  $T_{FWHM} = 2.4$  ps et une puissance de crête initiale  $P_1 = 1$  W.

Dans le but de créer des fluctuations d'amplitude sur les "1", nous insérons une source de bruit d'amplitude, Donc, en plaçant à l'entrée du régénérateur, un filtre optique de forme

gaussienne permet de filtrer le bruit tout en conservant le spectre du signal en entrée. La largeur spectrale du filtre d'entrée qui améliore au mieux les performances du régénérateur est de 180 GHz (1550 nm) dans notre cas.

Le premier étage de régénérateur est composé d'un amplificateur similariton suivi d'un filtre optique décalé de  $\Delta F = 450$  GHz par rapport à la fréquence centrale de l'onde porteuse et de largeur spectrale  $\delta f = 200$  GHz (Figure IV.19).

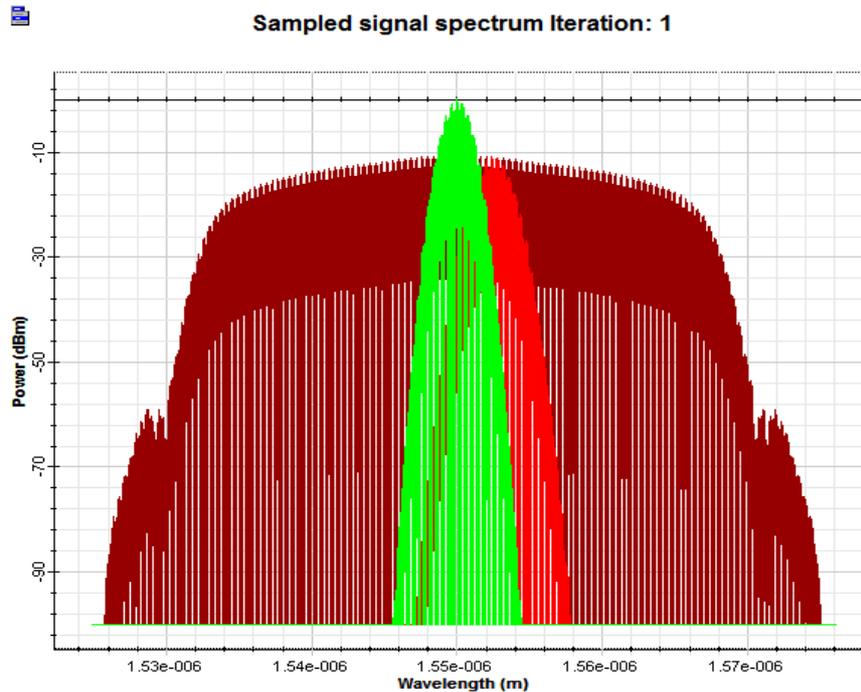


Figure IV.19 : Spectre du signal d'entrée (en vert), spectre après élargissement auto-similaire (en rouge grenat), et à la sortie du filtre décalé (en rouge).

Le deuxième étage du régénérateur composé, quant à lui, d'un générateur passif de similariton suivi d'un filtre optique décalé de  $\Delta F = -450$  GHz et de largeur spectrale  $\delta f = 160$  GHz.

Cette partie est composée de six tronçons de fibre avec dispersion atténuée (Figure IV.20) afin de régénérer le signal qui leurs traverse. Et récupère la longueur d'onde initiale du signal.

Le bloc de réception est composé d'une photodiode PIN conçu pour convertir le signal optique qui porte les informations en impulsions électriques dans le but d'évaluer le signal régénéré qualitativement à travers les diagrammes de l'œil.

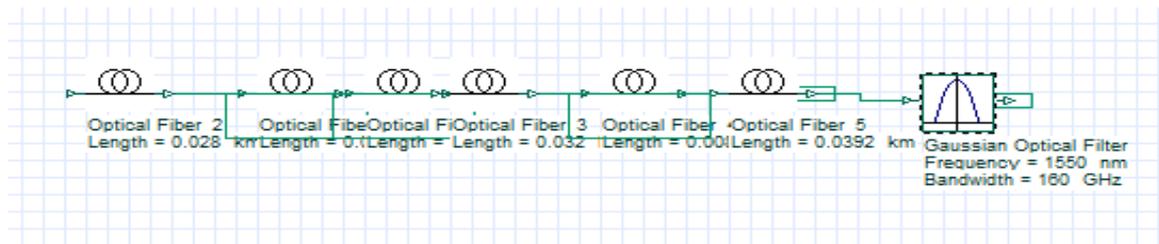


Figure IV.20 : Deuxième étage de régénérateur 2R par similariton.

Pour montrer la capacité du régénérateur à l'élimination des impulsions fantômes et à la remise en forme des impulsions '1', on a tracé les figures ci-dessous à l'entrée et à la sortie de régénérateur avec un débit de 40 Gbit/s.

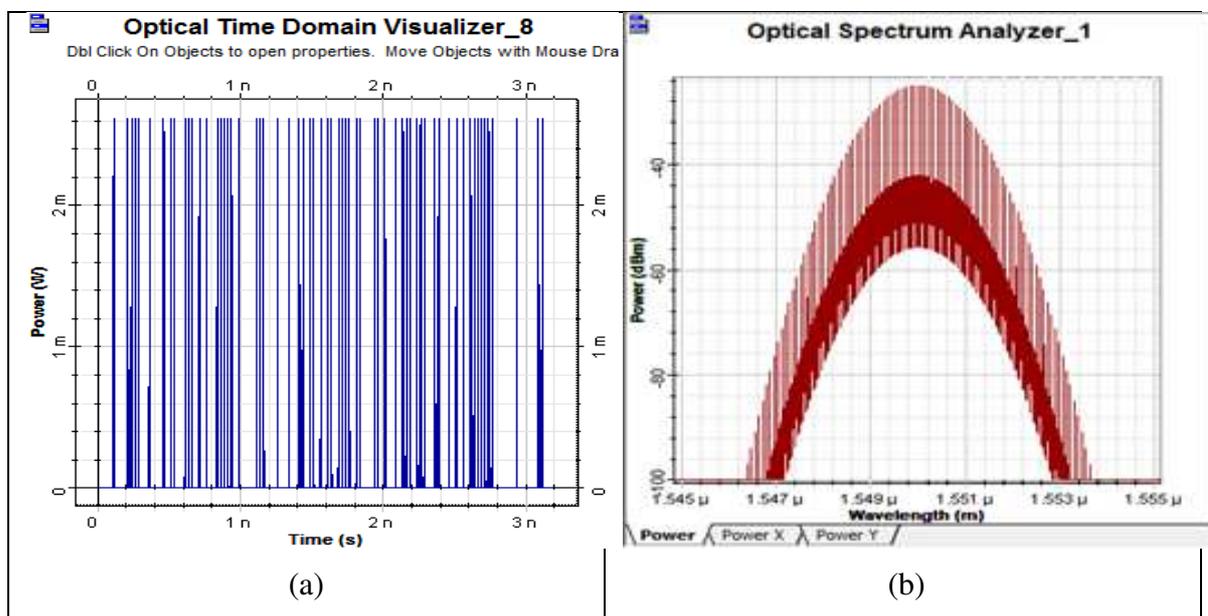


Figure IV.21 : Allure temporelle de signal initial (a), et son spectre (b)

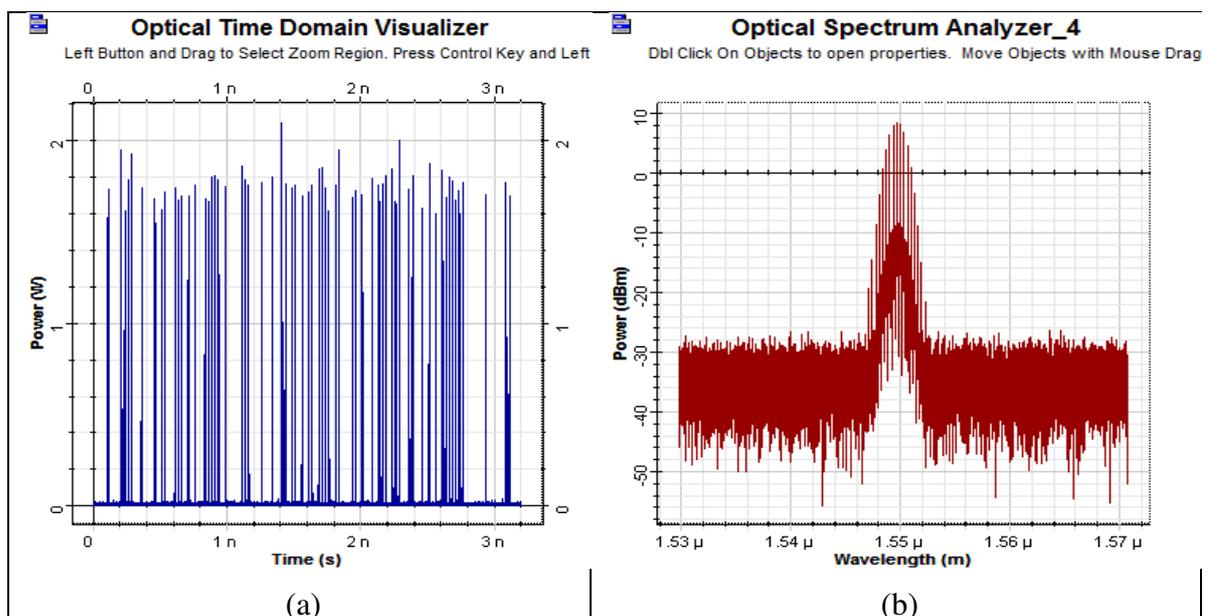


Figure IV.22 : Allure temporelle de signal à l'entrée du régénérateur (a), et son spectre (b)

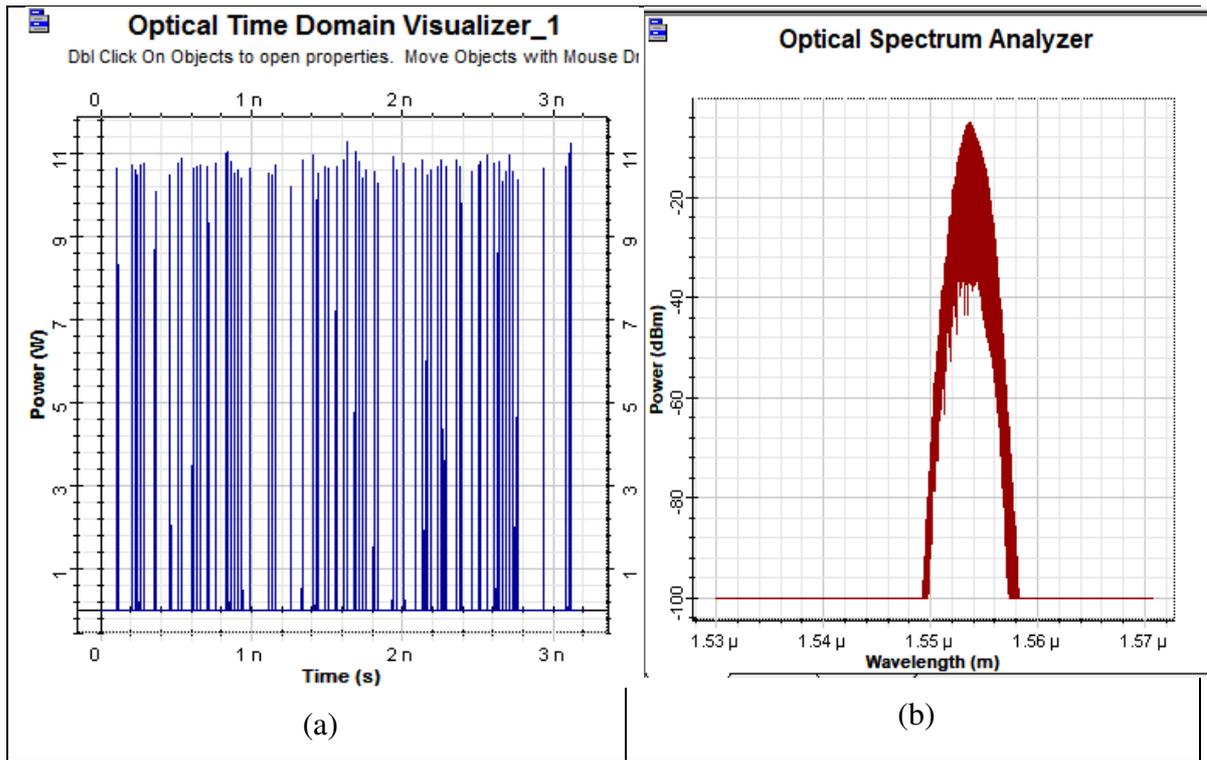


Figure IV.23 : Allure temporelle de signal à la sortie de 1<sup>er</sup> étage de régénérateur (a), et son spectre (b)

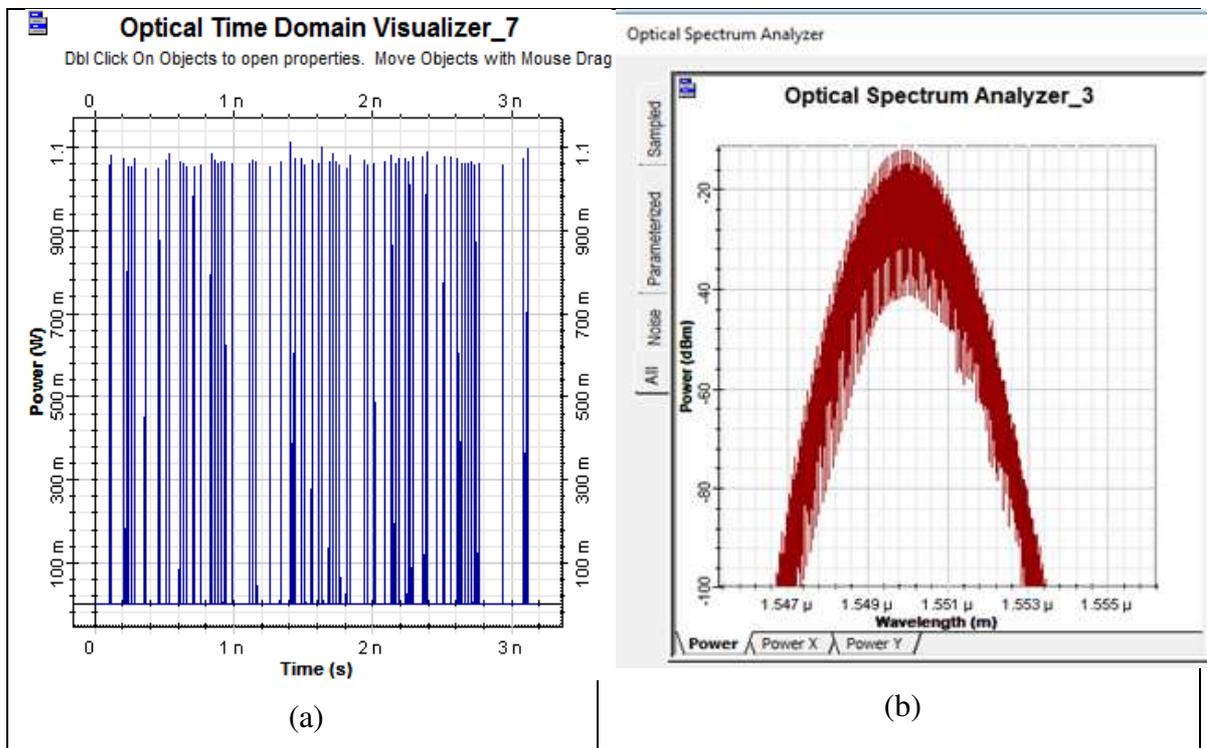


Figure IV.24 : Allure temporelle de signal à la sortie de 2<sup>ime</sup> étage de régénérateur (a), et son spectre (b)

La Figure IV.22 montre la mauvaise qualité du signal d'entrée, de fortes fluctuations des bits " 1 " et des fantômes bit(0) par l'addition du bruit gaussien, ce signal est filtré avec le filtre optique d'entrée avant d'être régénéré. Après passage dans le premier étage du régénérateur, une amélioration significative du signal avec annulation de bruit (figure IV.23). En ce qui concerne la gigue d'amplitude, l'amélioration est également remarquable. On obtient un quasi parfait remise en forme de ce signal après passage dans le deuxième étage du régénérateur (figure IV.24).

A la sortie du régénérateur, nous retrouvons la même largeur temporelle des impulsions d'entrée (2.4 ps) et la même longueur d'onde de la porteuse (1550 nm).

#### ➤ Influence du débit sur l'efficacité de la régénération

Nous avons aussi étudié la capacité de remise en forme du régénérateur en fonction de débit binaire. Le graphe de la Figure IV.25 .montre clairement l'efficacité de régénérateur par similariton à régénérer un signal incident avec un bruit additif de débit va jusqu'à 160 Gb/s avec un facteur de qualité  $Q = 12.28$ .

La dégradation remarquée pour le haut débit sur l'efficacité du régénérateur est due aux interférences entre symbole due à la dispersion (élargissement des impulsions) dans les fibres de régénérateur.

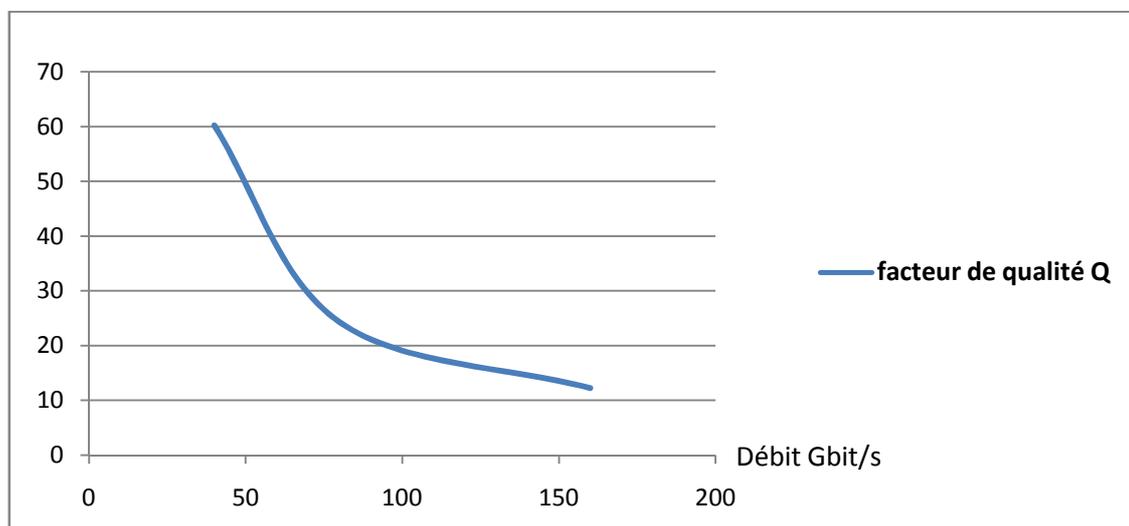


Figure IV.25 : Variation de facteur de qualité en fonction de débit binaire.

La technique BTB est une technique qui permet en effet de donner des informations fondamentales sur l'efficacité du régénérateur en simple passage ne besoin pas d'une ligne de transmission. Cette technique ne peut pas garantir l'efficacité du régénérateur quand il

est inséré dans une ligne de transmission. Pour garantir l'efficacité du régénérateur, nous validerons donc l'ensemble des résultats dans une configuration de transmission longue distance.

#### IV.4.2.2.2 Configuration en ligne de transmission longue distance

Dans cette partie de la simulation on analysera la transmission avec régénération en utilisant un régénérateur 2R pour voir si on peut dépasser les limites de la régénération 1R. On réalise le schéma de transmission de la 1ère partie (B2B) mais en implémentant une ligne de transmission comme représenté dans la figure ci-dessous :

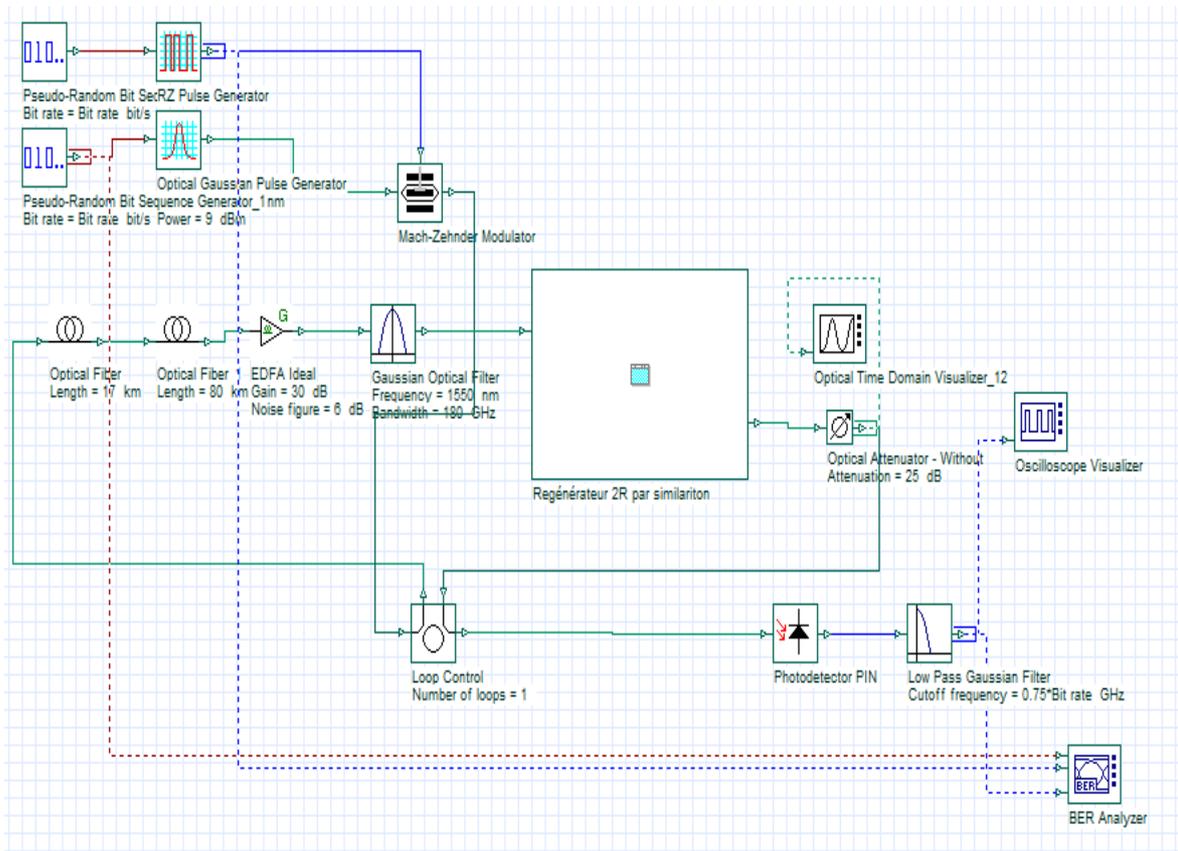


Figure IV.26 : Liaison de transmission avec un régénérateur 2R double étage

Cette transmission consiste à régénérer le signal après sa distorsion et elle se divise en 4 parties :

- Partie génératrice de signal optique.
- Une ligne de transmission basée sur une régénération 1R et de longueur minimale de 80 Km, une fibre compensatrice de dispersion, et amplificateur EDFA.
- Une partie de régénération représentée par le régénérateur par similariton double étage.

- Un photodétecteur en sortie en sortie pour pouvoir retransformer la séquence de bit portée sur le signal optique en un signal électrique une autre fois pour pouvoir déterminer sa qualité.

➤ **Analyse du signal transmis sur la ligne de transmission :**

Dans cette partie, on fixe le débit injecter à (40, 80 et 160 Gb/s) et on varie la longueur de la ligne (nombre de boucle N).

En utilisant le composant loup Control on augmentera la longueur de la ligne de transmission en jouant sur le nombre de boucle de ce composant. Dans notre application on a une ligne de transmission de longueur minimale  $L_m$  de 80 Km pour un nombre de boucle du Loup Control égale à 1 (donc :  $L=L_m \times N$ ).

- on mesure le facteur de qualité du signal pour chaque longueur de ligne de transmission afin de déterminer la qualité du signal pour chaque longueur de ligne, (on augmente les nombres de boucle jusqu'à obtient la longueur maximal pour chaque débit).

**a. Ligne de transmission régénéré à un débit 40 Gb/s :**

Pour un nombre de boucle égale à 1 ( $L = 80$  Km) on a obtenu les signaux suivants :

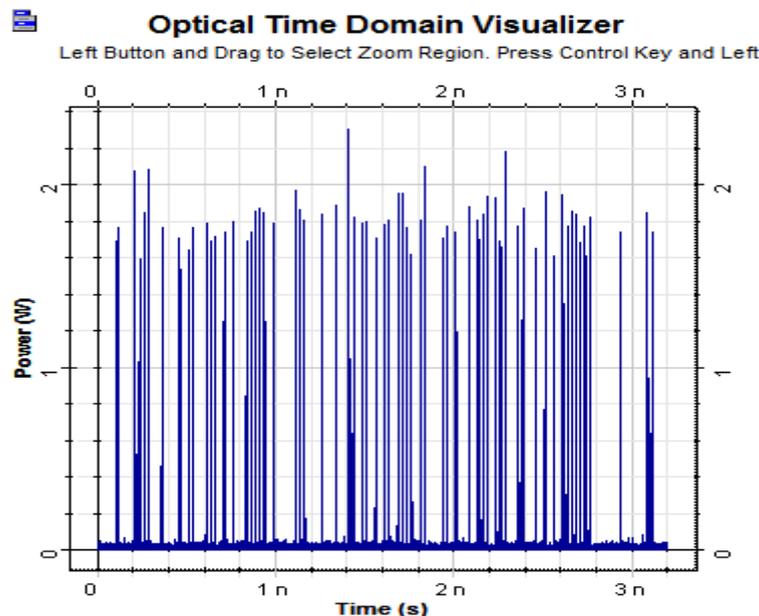


Figure IV.27 : Allure temporelle de signal à l'entrée de régénérateur pour un débit 40 Gb/s.

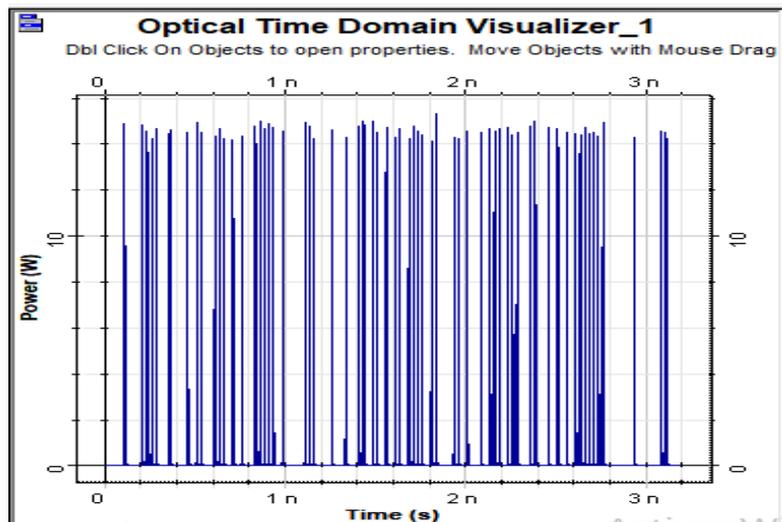


Figure IV.28 : Allure temporelle de signal à la sortie de 1<sup>er</sup> étage de régénérateur pour un débit 40 Gb/s.

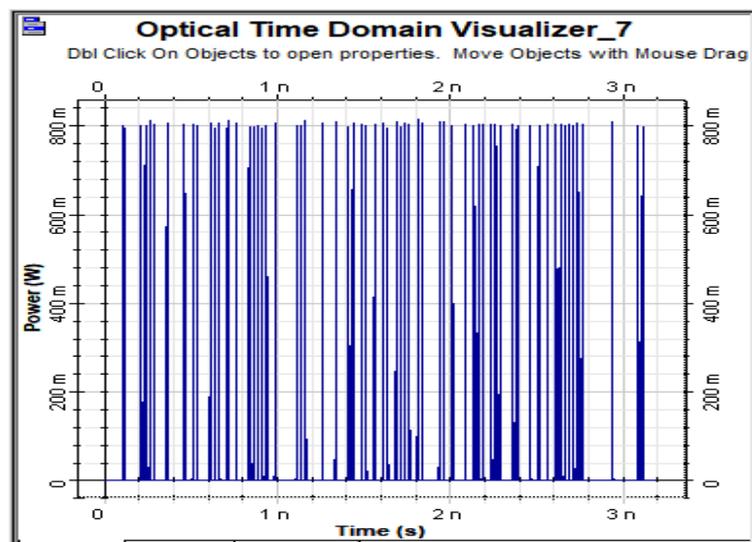


Figure IV.29 : Allure de signal à la sortie de 2<sup>eme</sup> étage de régénérateur pour un débit 40 Gb/s.

D'après les figures précédentes, on remarque que le signal d'entrée présente de fortes fluctuations des bits "1", ce signal est régénéré après passage dans le régénérateur, une amélioration significative du signal avec annulation de bruit et de fluctuations des amplitudes des bits "1".

-le diagramme de l'œil associé pour 40 Gb/s est présenté par la Figure IV.30.

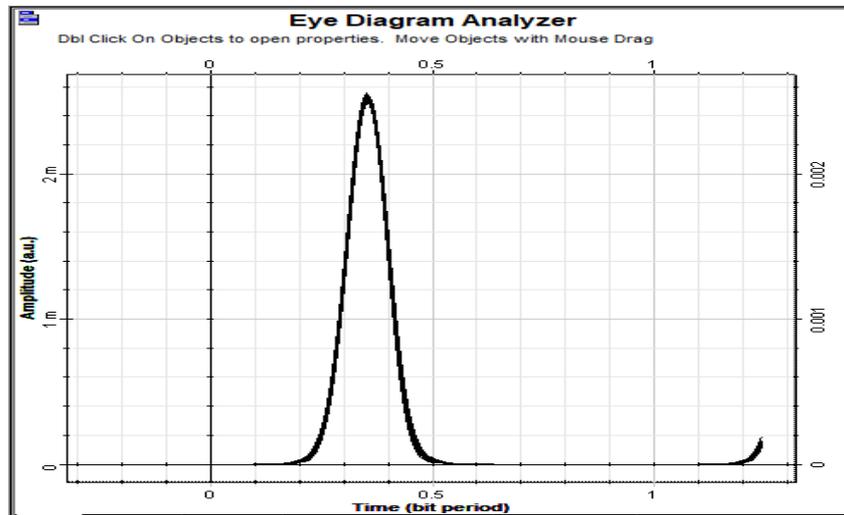


Figure IV.30: Diagramme de l'œil pour une longueur 80 Km de ligne de transmission avec régénération et un débit 40 Gb/s

- pour un débit de 40 Gb/s, le diagramme de l'œil obtenue est complètement ouvert car l'énergie contenue dans les '0' est annulée, et les fluctuations d'intensité dans les '1' sont fortement diminuées, par conséquent le facteur de qualité du signal optique est amélioré  $Q$  égale à 124 pour une seul boucle, la transmission sur une ligne de longueur de 80 Km avec régénération donne une qualité de transmission très élevée par rapport à sans régénération ( $Q = 15,86$ ), c.-à-d. avec un taux d'amélioration égale à 7.81.

#### b. Ligne de transmission régénéré à un débit 80 Gb/s:

Pour un nombre de boucle égale à 1 ( $L = 80$  Km) on a obtenu les signaux suivants :

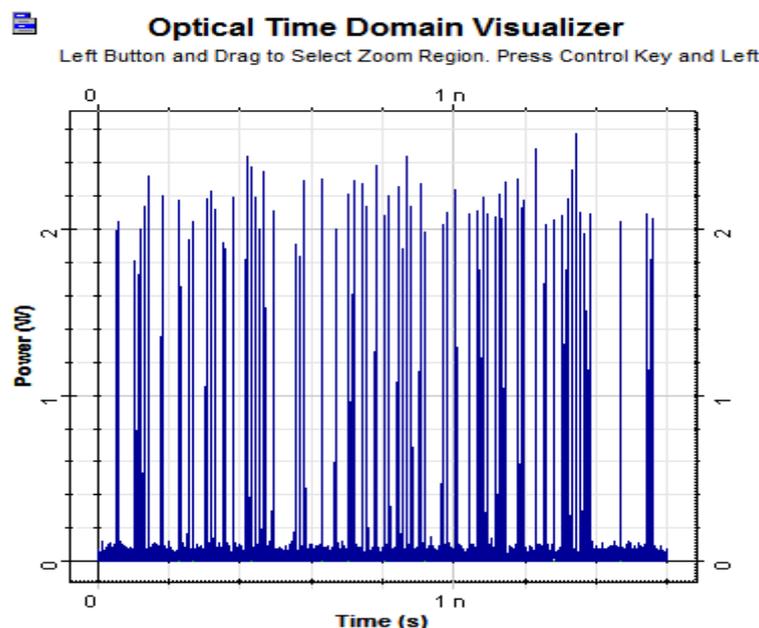


Figure IV.31 : Allure temporelle de signal à l'entrée de régénérateur pour un débit 80 Gb/s

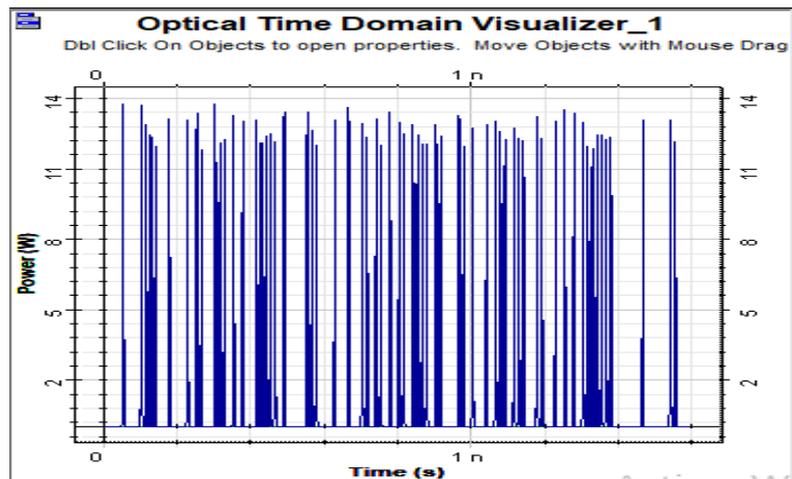


Figure IV.32 : Allure temporelle de signal à la sortie de 1<sup>er</sup> étage de régénérateur pour un débit 80 Gb/s.

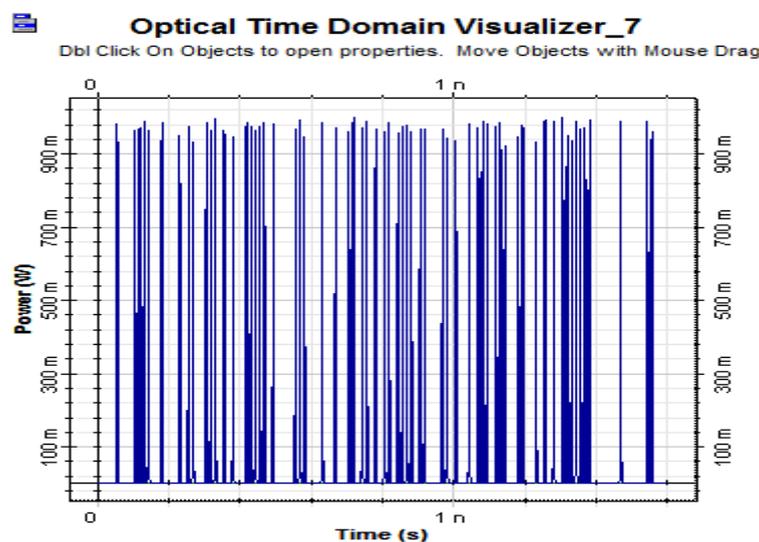


Figure IV.33 : Allure de signal à la sortie de 2<sup>eme</sup> étage de régénérateur pour un débit 80 Gb/s.

-le diagramme de l'œil associé pour 80 Gb/s :

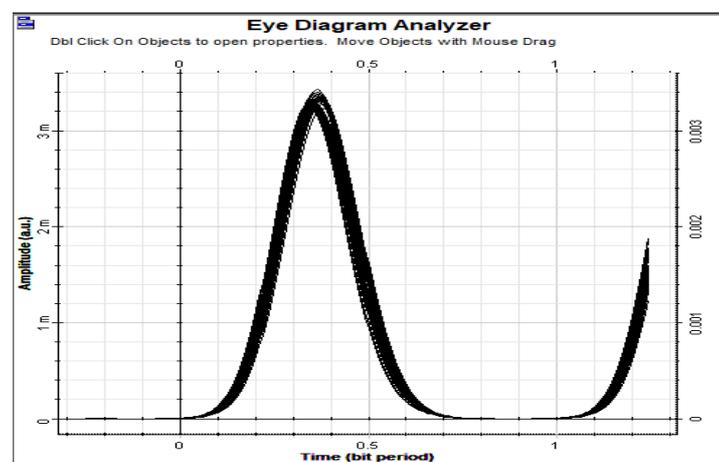


Figure IV.34: Diagramme de l'œil pour une longueur 80 Km de ligne de transmission avec régénération et un débit 80 Gb/s

Les figures précédentes, montre que le signal d'entrée avec de fortes fluctuations des bits "1" est régénéré après passage dans le régénérateur, avec diminution de fluctuations des amplitudes des bits "1", et annulation d'énergie des "0". Pour un débit de 80 Gb/s. On a obtenu un facteur Q égale à 64.4 pour une seul boucle, la qualité du signal est supérieur à 6 donc la transmission sur une ligne de longueur de 80 Km avec régénération donne une qualité de transmission très élevée par rapport a sans régénération ( $Q = 13.35$ ), c.-à-d. avec un taux d'amélioration égale à 4.82.

**c. Ligne de transmission régénéré à un débit 160 Gb/s :**

Pour un nombre de boucle égale à 1 ( $L = 80$  Km) on a obtenu les signaux suivants :

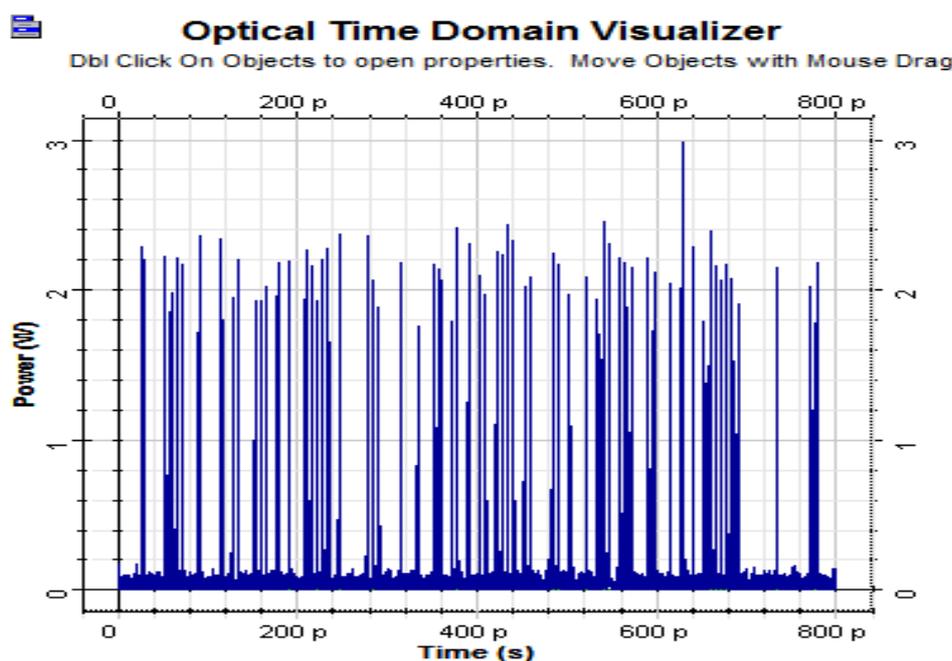


Figure IV.35: Allure temporelle de signal à l'entrée de régénérateur pour un débit 160 Gb/s

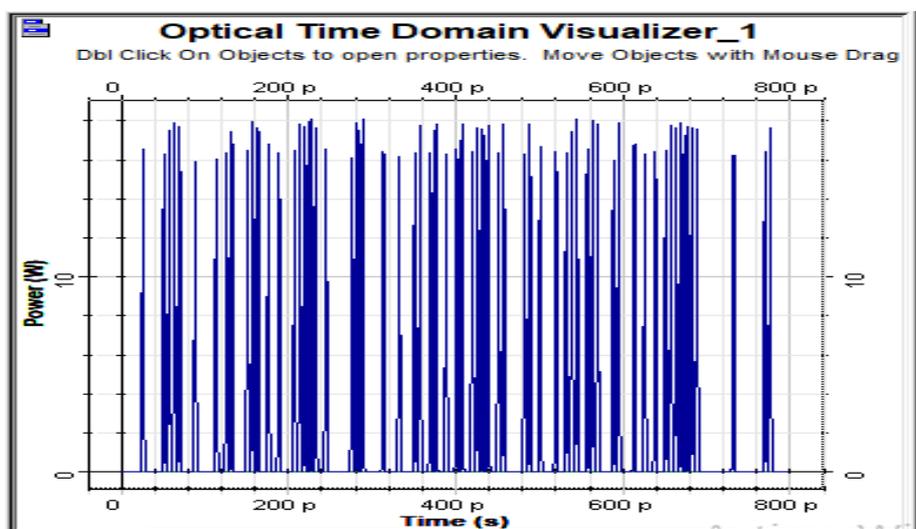


Figure IV.36 : Allure temporelle de signal à la sortie de 1<sup>er</sup> étage de régénérateur

pour un débit 160 Gb/s.

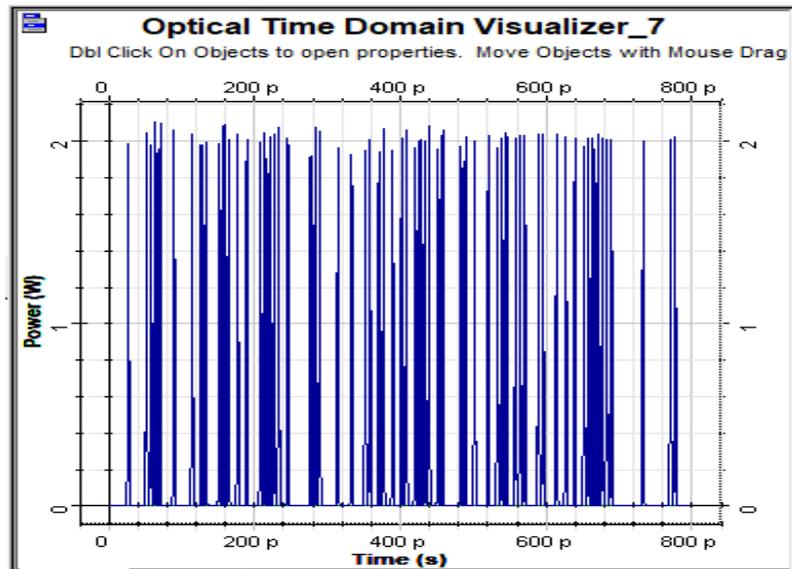


Figure IV.37 : Allure de signal à la sortie de 2<sup>ème</sup> étage de régénérateur pour un débit 160 Gb/s.

-le diagramme de l'œil associé pour 160 Gb/s :

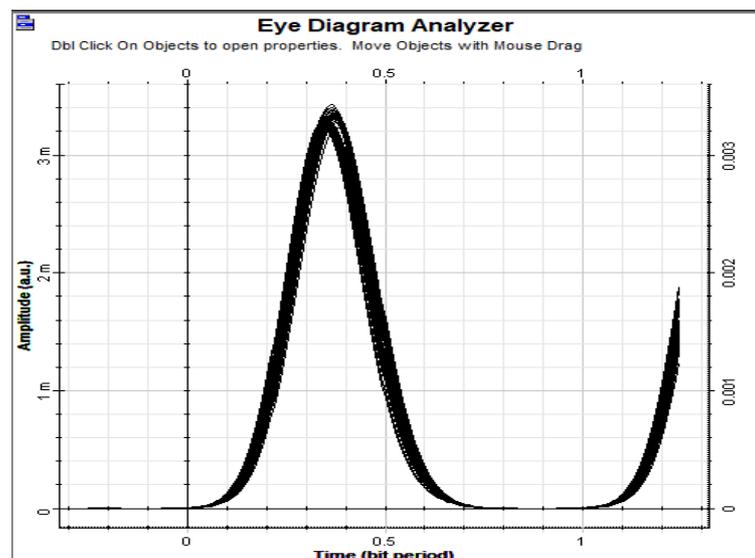


Figure IV.38: Diagramme de l'œil pour une longueur 80 Km de ligne de transmission avec régénération et un débit 160 Gb/s

Les figures précédentes montrent que le signal d'entrée dégradé est bien régénéré après passage dans le régénérateur. Le bruit des niveaux "0" est rejeté, et le bruit des "1" est également réduit. Néanmoins, une fluctuation d'intensité est encore présente sur les niveaux hauts, mais elle est significativement inférieure par rapport au cas sans régénération. Nous notons par contre la présence d'une gigue temporelle liée au fait que

nous effectuons uniquement une régénération de type 2R. La gigue temporelle est due au bruit qui déforme la forme temporelle lorsque le débit est élevé conduisant à des fluctuations de la position du pic d'impulsions. Pour un débit de 160 Gb/s. On a obtenu un facteur Q égale à 51.67 pour une seul boucle, la qualité du signal est supérieur à 6 donc la transmission sur une ligne de longueur de 80 Km avec régénération donne une qualité de transmission très élevée par rapport a sans régénération ( $Q = 10.83$ ), c.-à-d. avec un taux d'amélioration égale à 4.7.

➤ **Influence du débit et la longueur de la ligne sur la qualité de transmission avec régénération 2R :**

La figure IV. 39 représente la variation du facteur de qualité Q en fonction de la longueur de la ligne de transmission avec régénération pour les différents débits (40 Gb/s, 80 Gb/s et 160 Gb/s).

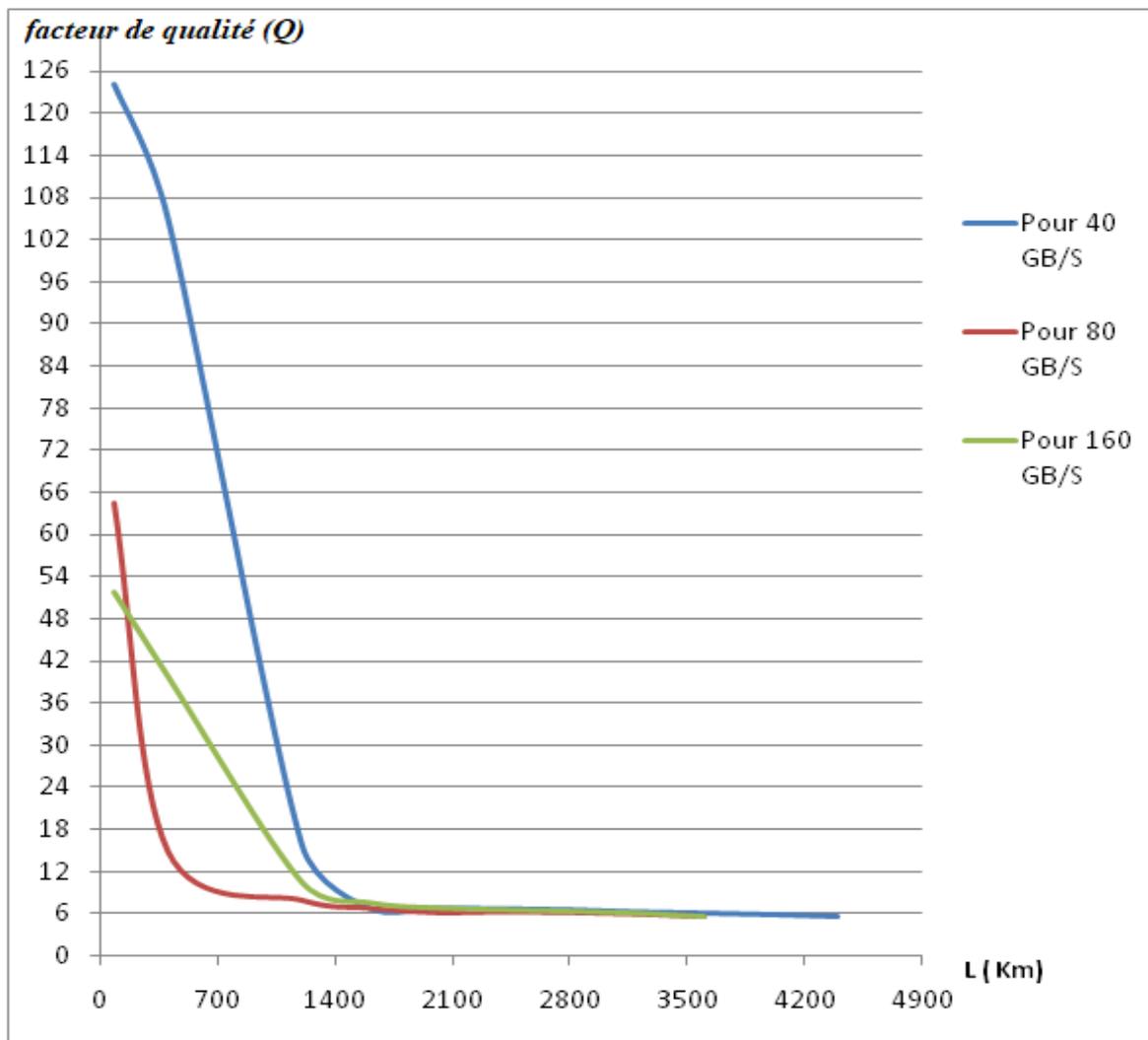


Figure IV. 39 : Evolutions du facteur de qualité d'un signal optique régénéré en fonction de la distance de transmission pour différents débits (40 GB/S, 80 GB/S, 160 GB/S)

La figure IV.39 montre l'évolution du facteur de qualité avec régénérateur, en fonction de la distance de transmission. Nous observons une dégradation au fur et à mesure de la distance de transmission, mais moins rapidement que le cas sans régénération. Avec l'introduction du régénérateur 2R, nous obtenons une amélioration considérable de la distance de transmission, on peut atteindre une distance d'environ 4000 Km pour un  $Q = 6$ , soit une amélioration d'un facteur de 10 par rapport à une propagation dans ligne équivalente mais sans régénérateur (400 Km), pour un débit de 40 Gb/s. et une distance égale à 2800 Km, 1120 Km pour un débit de 80 Gb/s, et 160 Gb/s respectivement, soit une amélioration d'un facteur de 8,75 et 5,6 respectivement par rapport à une propagation dans ligne équivalente mais sans régénérateur (320, et 240 Km, respectivement).

On constate également, que l'efficacité de la remise en forme est clairement dépendante de débit de liaison, Peut être expliqué que lorsque le débit augmente les effets non linéaires et l'accumulation de dispersion chromatique devient plus pénalisons ce qui diminuer la distance de propagation.

#### **IV.5 Conclusion :**

L'étude numérique mise en œuvre dans ce chapitre, révèle le similariton optique très efficace pour la régénération 2R tout optique. On a vu que l'utilisation du régénérateur 2R par similariton augmente la distance de propagation, démontrant ainsi de façon évidente l'intérêt de la remise en forme même pour des très hauts débits. Cependant, l'efficacité de la remise en forme est clairement dépendante de débit de liaison, montré par l'écart entre les résultats obtenus avec un débit de 40 Gb/s, un débit de 80 Gb/s et 160 Gb/s.

# Conclusion générale

---

## CONCLUSION GENERALE

La fonction de régénération optique du signal suscite depuis quelques années un intérêt croissant. Cette fonction vise à limiter la dégradation de la qualité du signal optique. Parmi les techniques de régénération optique, celles basées sur l'utilisation de l'effet Kerr dans des fibres optiques sont séduisantes par leur simplicité et leur temps de réponse instantané.

Dans ce mémoire, nous avons présenté un régénérateur 2R tout optique basé sur celui de Mamyshev en collaboration avec les apports des similaritons optiques du signal pour les transmissions optiques OTDM à longues distances et à très hauts débits (40 Gbit/s et plus). Cette impulsion a des propriétés remarquables, comme la forme parabolique, auto-similarité, résistance au wavebreaking, sa dérive de fréquence (chirp) linéaire et son large spectre. L'objectif de ce travail a été de montrer la capacité et les avantages des similaritons optiques ainsi que leur performance dans la régénération tout optique.

Dans une première partie de ce travail, On a exposé dans le premier chapitre une présentation générale des systèmes de transmission par fibre optique, et leurs différentes parties constituées par les émetteurs lasers, la propagation dans la fibre optique et les récepteurs ainsi que les sources de dégradation subies par le signal au cours de sa propagation dans la ligne de transmission, et les deux principales techniques (TDM, WDM) employées pour augmenter la capacité des liaisons. Dans une seconde partie de ce travail, on a bien précisé et orienter vers la régénération tout optique, on a basé sur la régénération 2R tout optique qui est l'objectif de notre travail. On a expliqué les techniques de régénération 2R tout optique proposées dans la littérature, afin d'appuis sur les régénérateurs 2R tout optique à base de fibres optique hautement non-linéaire dite la technique de Mamyshev dans le deuxième chapitre. On a présenté les types de fonction de transfert (FTD) associés, ainsi que les limites et les paramètres influant sur la performance de celui-ci.

Le troisième chapitre présente l'étude de régénérateur 2R tout optique par similariton. Nous avons cherché dans un premier temps à élaborer un dispositif simple étage de régénération 2R tout optique basé sur l'étude du régénérateur de Mamyshev combiné les apports des similaritons, ce régénérateur basé sur celle de Mamyshev est dit actif. Le dispositif qui compose le deuxième étage de régénérateur est basé également sur l'élargissement auto-similaire de manière passive. On a montré le principe et la

modélisation de similariton, ses caractéristiques et, ces deux types de génération active et passive. Ensuite, on a montré les deux configurations simple et double étage dans le but d'éliminer la gigue d'amplitude et temporelle, et de restaurer la longueur d'onde d'origine du signal.

Le dernier chapitre consacré à la simulation par logiciel de simulation OptiSystem de deux liaisons: sans régénération et avec régénération 2R de Mamyshev utilisant la technique de similariton dans le but d'améliorer la qualité de signal. Ce régénérateur sera évalué dans une configuration back to back, puis dans une ligne de transmission pour tester sa performance, et sa capacité de diminuer le bruit dans les '0' et les fluctuations d'intensité dans les '1' d'un signal optique OTDM monocanal. Puis on a comparé la portée (distance maximale de propagation) dans les très hauts débits (40 Gb/s et plus) dans la configuration sans régénération et avec régénération. On a montré que avec la technique de similariton la qualité de transmission est très performante dans les hauts débits on peut passer jusqu'à 160Gb/s. L'étude numérique a montré un facteur d'amélioration de la distance de transmission de 10 pour un facteur de qualité  $Q = 6$  et correspondant à une distance de transmission de 4000 km.

Le travail qu'on a réalisé est basé sur une régénération d'une source monocanale dans un système de transmission OTDM utilisant le format de modulation RZ-OOK a été montrée. La réalisation attendue dans une perspective d'avenir est la mise au point d'un régénérateur de signaux à multiples formats de modulation et compatible avec les systèmes multiplexés en longueur d'onde (WDM).

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- **Bibliographie du chapitre I**

[01]: I. Kaminow, T. Li, 'Optical Fiber Telecommunications IV B, Systems and impairments', Academic press, 2002.

[02] : Younes Zouine « Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant technique CDMA » Thèse de doctorat Université de LIMOGES 2005.

[03]: Stéphane Dellier « Contributions à la conception des circuits micro-ondes » Thèse de doctorat Université de LIMOGES 2005.

[04]: Silfvast, W. T. 2008. Laser fundamentals. Cambridge University Press. 666p.

[05]: Hincelin, G. 2009. "Notes de cours de Laser et diode laser – Les bases (ELE 107)". Paris : Conservatoire National des Arts et Métiers. 21p.

[06] G. Duan, P. Gallion, and G. Debarge « Analysis of frequency chirping of semiconductor lasers in the presence of optical feedback », Opt Lett , 12 (10), 1987.

[07] CARENCO A., "Composants actifs, Systèmes optiques", Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse, Ecole d'été, Juillet 1991, pp. 93-143.

[08] T. Fauconnier, « Etude d'un nouveau format de modulation: la DQPSK 'Differential Quaternary Phase Shift Keying' », Stage de Fin d'Etude, Unité de Transmissions WDM d'Alcatel a Marcoussis, 2005

[09] D. Berkan, « Etude de la Propagation Optique dans une Structure de Fibre Optique en présence de Microdéformations Périodique », Thèse de Magister, Université de Batna

[10] : I. et M. Joindot et douze co-auteurs, 'Les télécommunications par fibres optiques' Dunod, 1996.

[11] : G. Charlet, P. Tran, H. Maroyan, M. Lefrançois, T. Fauconnier, S. Bigo, '151×43 Gbit/s transmission over 4080 km based on return-to-zero Differential quadrature phase-shift keying', European Conference on optical communication, PD 1.3, 2005.

[12]: A.H. Gnauck, G. Raybon, S. Chandrasekhar, J. Leuthold, C. Doerr, L. Stulz, E. Burrows, '25×40 Gbit/s copolarised DPSK transmission over 12 ×100km NZDSF with 50 GHz channel spacing', IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, no. 3, 2000.

- [13]: H. Sunnerud, M. Karlsson, P. A. Andrekson, «A comparison between NRZ and RZ dataformats with respect to PMD-induced system degradation», *Photon.Technol.Lett.*, Vol.13,N° 5,pp.448 -450, May2001.
- [14]:D.Breuer, K. Petermann, «Comparison of NRZ and RZ modulation format for 40Gb/s TDM standard-fiber systems», *Photon.Technol.Lett.*,5 ,Vol.9,N°3,pp.398-400,March 1997.
- [15]: R. Ludwig, U. Feiste, E. Dietrich, H. G. Weber, D. Breuer, M. Martin, F. Kuppers,« Experimental comparison of 40Gbit/s RZ and NRZ transmission over standard single mode fibre »,*Electron.Lett.* , Vol. 35, N° 25, pp. 2216- 2218, December 1999.
- [16] : Nassima Boudrioua « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD » Thèse de doctorat. Université Paul Verlaine – Metz 2007.
- [17]: Mukherjee, B. 2006. "Optical WDM Networks".New York : Springer. 953p.
- [18] : Elodie Le Cren« Etude de composants absorbants saturables à semi-conducteurs à multi-puits quantiques dopés au fer pour la régénération de signaux optiques à très hautsdébit d'information » Thèse de doctorat Université de Rennes I 2004.
- [19] : Mathieu Lefrançois « Etude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmesde transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s » Thèse dedoctorat. Université Paris-Sud.2007.
- [20]: K. Inada, «A new graphical method relating to optical fiber attenuation », "Optic Comm. ,Vol. 19, N° 3, pp. 437-439, December 1976.
- [21] P-G. Fontolliet, « Systèmes de Télécommunications », Vol XVIII, Dunod, 1996.
- [22] G. P. Agrawal, "Fibre-optic communication system," 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [23] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics," 2nd Ed., Academic Press, Inc.,, 1995.
- [24] G.P, Agrawal, «applications of nonlinear fiber Optics» Academic Press, San Diego, 200 1.
- [25] J.P. Gordon, H. A. Haus, 'Random walk of coherently amplified solitons in optical fibertransmission' , *Optics Letters.* vol .11, no. 10, p. 665, 1986.
- [26] O. Leclerc, B. Lavigne, E. Balmeffre, P. Brindel, L. Pierre, D. Rouvillain, F.Seguineau, 'All-optical signal regeneration : from first principles to a 40 Gbit/s system demonstration', *Optical telecommunications*, pp. 163-173, 2003.
- [27] : M. Nissov, "Ultra-long haulfiber transmission technologies and techniques," OFC, p.OMH4, 2008.

[28] : CASSAN E., Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, EDP Sciences, 2002, Vol. 3.

[29] : BOYOGUENO BENDE A., DUGUAY A. et FORTIER P., Etude sur l'amplification en ligne des systèmes de communication optique, "IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering", Montréal, Septembre 1995, pp. 93-96

[30] : J. Simon, L. Bramerie, F. Ginovart, V. Roncin, M. Gay, S. Fève, E. L. Cren, M.Charès, «All-optical regeneration techniques», Annales des télécommunications, 58(11-12), p 1708- 1724, 2003.

[31] : N. M. SAAD, «Contribution à l'étude de l'application de la technique CDMA aux systèmes de transmission optique», thèse de doctorat en Electronique des hautes fréquences et optoelectroniques, université de Limoges, 2005.

[32]: Paul Vaugel, «Technology for next generation core and metro networks», Telscom version1, octobre 31th 2002.

[33]: S. Song, W. Laurier, «An overview of DWDM networks IEEE Canadian Review-Spring», pp 15-18. Printemps 2001.

- **Bibliographie du chapitre II**

[01] : Quang Trung Le. 'Contribution à l'étude de fonctions optiques pour la régénération du signal dans les systèmes de transmission à haut débit'. Thèse de doctorat, Université Rennes 1, 2010.

[02]: L. B. Fu, M. Rochette, V. G. Ta'eed, D. J. Moss, and B. J. Eggleton, "Investigation of self-phase modulation based optical regeneration in single mode As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> chalcogenide glass fiber," Opt. Express, vol. 13, pp. 7637–7644, 2005.

[03]: K. Tajima, K. Nakajima, and K. Kurokawa, «Low-loss photonic crystal fibers», ECOC, 2002.

[04] : O. Leclerc, «Transmissions optiques non-linéaires : Application aux transmissions longue distance», Séminaire Enssat, Mar 2004

[05]: L.Provost,C.Finot,K.Mukasa,P.Petropoulos,andD.J.Richardson,“Designscaling rules for 2R-Optical Self-Phase Modulation-based regenerators 2R regeneration,” Opt. Express, vol. 15, pp. 5100–5113, 2007.

[06] : L. Provost, C. Finot, P. Petropoulos, and D. Richardson, «Regles de conception pour les régénérateurs optique 2-r exploitant l'auto-modulation de phase, » JNOG, 2006.

- [07]: Vincent Roncin « Contribution à l'étude de fonctions optiques à base d'amplificateurs optiques à semi-conducteurs pour la régénération des signaux de télécommunication à très haut débit », thèse de doctorat, Université de Rennes I, 2004.
- [08]: Mathilde GAY, « étude théorique et expérimentale de l'impacte de la régénération 2R dans un système de transmission optique haut débit », thèse de doctorat, Université de Rennes I, 2006.
- [09]: P. V. Mamyshev, "All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect", Proceedings European Conference on Optical Communication, ECOC'98, Madrid, Spain, p. 475, september. 1998.
- [10]: P. A. Andersen, P. Jeppesen, C.B. Peucheret and A. Clausen, «All-Optical signal processing using highly nonlinear photonic crystal fiber». Technical,p102,2006.
- [11]: S. X. Xu, Zhou, L., & Xiao, J., "40 Gb/s Optical 3R-Regeneration Based on XPM and SPM in PCF", In Advanced Materials Research, vol. 571, p.180-184. Trans Tech Publications, 2012.
- [12]. G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 3rd ed., John Wiley Sons, Inc., New York, NY, 2002.
- [13]: Thanh Nam Nguyen « étude de composants optiques a base de fibres optiques non-linéaires », thèse de doctorat, Université de Rennes I, 2008

- **Bibliographie du chapitre III**

- [1]: P.V. Mamyshev, S.V. Chernikov, and E.M. Dianov, Generation of fundamental soliton trains for high-bit rate optical fiber communication lines. IEEE J. Quantum Electron., 1991, vol 27(10), p. 2347-2355.
- [2]. E.M. Dianov, P.V. Mamyshev, A.M. Prokhorov, and S.V. Chernikov, Generation of a train of fundamental solitons at a high repetition rate in optical fibers. Opt. Lett., 1989, vol 14(18), p. 1008-1010.
- [3]. D.J. Richardson, A.B. Grudinin, and D.N. Payne, Passive, all-fibre source of 30 fs pulses. Electron.Lett., 1992, vol 28(8), p. 778-779.
- [4]: Christophe FINOT « Similaritons dans les amplificateurs Raman à fibre optique », thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2005.
- [5] W.J. Tomlinson, R.H. Stolen, and C.V. Shank. Compression of optical pulses chirped by self-phase modulation in fibers. Journal of the Optical Society of America B, 1(2):139–149, 1984.

- [6] W.J. Tomlinson, R.H. Stolen, and A.M. Johnson. Optical wavebreaking of pulses in nonlinear optical fibers. *Optics Letters*, 10(9):457–459, 1985.
- [7] Cyril BILLET, «Génération de similaritons optiques dans des amplificateurs à fibres dopées erbium», thèse de doctorat, université de franche-comté, 2006.
- [8] K. Tamura and M. Nakazawa, Pulse compression by nonlinear pulse evolution with reduced optical wave breaking in erbium-doped fiber amplifiers. *Opt. Lett.*, 1996, vol 21, p. 68-70.
- [9] C. Finot, G. Millot, C. Billet, and J.M. Dudley, Experimental generation of parabolic pulses via Raman amplification in optical fiber. *Opt. Express*, 2003, vol 11, p. 1547-1552.
- [10] Hirooka T. and M. Nakazawa, «Parabolic pulse generation by use of a dispersion decreasing fiber with normal group-velocity dispersion», *Optics Letters* 29, p 498500, 2004.
- [11] J.W. Nicholson, A.D. Yablon, P.S. Westbrook, K.S. Feder, and M.F. Yan. High power, single mode, all-fiber source of femtosecond pulses at 1550 nm and its use in supercontinuum generation. *Optics Express*, 12(13):3025–3034, 2004.
- [12] C. Finot and G. Millot. Synthesis of optical pulses by use of similaritons. *Optics Express*, 12(21):5104–5109, 2004.
- [13] C. Finot, S. Pitois, and G. Millot. Regenerative 40 Gbit/s wavelength converter based on similariton generation. *Optics Letters*, 30(14):1776–1778, 2005.
- [14] Y. Ozeki, Y. Takushima, K. Aiso, K. Taira, and K. Kikuchi. Generation of 10 GHz similariton pulse trains from 1.2 km-long erbium-doped fiber amplifier for application to multi-wavelength pulse sources. *Electronics Letters*, 40(18):1103–1104, 2004.
- [15] M.E. Fermann, V.I. Kruglov, B.C. Thomsen, J.M. Dudley, and J.D. Harvey. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers. *Physical Review Letters*, 84(26):6010–6013, 2000.
- [16] D.B.S. Soh, J. Nilsson, and A.B. Grudinin. “Efficient femtosecond pulse generation using a parabolic amplifier combined with a pulse compressor. II. Finite gain-bandwidth effect”. *Journal of the Optical Society of America B*, 23(1):10–19, 2006.
- [17] : Leila Graini., All-Optical Function Based on Self-Similar Spectral Broadening for 2R Regeneration in High-Bit-Rate Optical Transmission Systems, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Physical and Mathematical Sciences Vol:12, No:12, 2018.
- [18] : GRAINI Leila « Applications des similaritons dans les systèmes de télécommunications par fibre optique à très haut débit », thèse de doctorat, badji mokhtar annaba, 2017.

- **Bibliographie du chapitre IV**

[1] : [www.optiwave.com](http://www.optiwave.com)

[02]: KAHLOUCHE Ahmed «Initiation à l'utilisation du logiciel OptiSystem» ,TP, Université de Mohamed Boudiaf – M'sila ,2018

[03] : Mathilde GAY « étude théorique et expérimentale de l'impact de la régénération 2R dans un system de transmission optique haut débit », thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Renne, 2006

[04] : Thanh Nam Nguyen « étude de composants optiques a base de fibres optiques non-linéaires », thèse de doctorat, Université de Rennes I, 2008.

---

## GLOSSAIRE DES SYMBOLES

**LASER** : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - Amplification de lumière par radiation d'émission stimulée

**MZM** : Mach-Zehnder.

**MEA** : modulateur à électro-absorption

**SPM** : Self-Phase Modulation - Auto-modulation de phase

**XPM** : Cross (X) Phase Modulation - Modulation de la phase croisée

**SSF** : Split-StepFourier .

**SMF** : Single Mode Fiber - Fibre monomode

**SOA** : Semiconductor Optical Amplifier - Amplificateur optique à semiconducteurs

**RZ** : Return-to-Zero - Retour à zéro..

**PRBS** : Pseudo-Random Bit Sequence - Séquence pseudo-aléatoire.

**NRZ** : Non-Return-to-Zero - Non retour à zéro.

**DCF** : Dispersion Compensation Fiber - Fibre à compensation de dispersion..

**TEB** :Tauxd'ErreurBinaire

**ASK** : Amplitude Shifted Keying - Modulation d'amplitude.

**DPSK** :Differential Phase Shift Keying.

**PMD** : Polarization Mode Dispersion - Dispersion modale de polarisation .

**TDM** : Time Division Multiplexage

**ETDM** : Electrical TDM

**OTDM** : Optical Time Division Multiplexing.

**WDM** :Wavelength Division Multiplexage

**OE** : optoélectronique

**1R** : La ré-amplification

**2R** : La remise en forme

**3R** : La re-synchronisation

**RA** : Raman Amplifier - Amplificateur Raman

**EDFA** : Erbium-Doped Fiber Amplifier.

**RA** : Raman Amplifier.

**NOLM** : Boucle optique non-linéaire

**ND-DDF** : fibre à dispersion normale décroissante

**D-FF** : Decision-Flip Flop

**FdT** : fonction de transfert