



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche  
Scientifique



Université Amar Telidji - Laghouat  
Faculté de Technologie  
Département D'électronique

**Mémoire de fin d'étude**

En vue d'obtenir le Diplôme de Master

Domaine : Science et technologie  
Filière : Télécommunication

Option : Réseaux et Télécommunications

**Thème**

*Effet de la dispersion sur le débit transmis par  
les fibres optiques*

Présenté par :

Gasmi Halima

Dahmani Hadjer

Soutenu en : 26 juin 2022 devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Dr. REGUIGUE Mourad	MCB	Président.
Dr. SONNE Abdelkader	MCA	Rapporteur.
Dr. ROUGAB Mourad	MAA	Examineur.

Année universitaire 2021 /2022

# *Remerciement*

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier mon encadreur : Mr Sonne Abdelkaderpour son aide, ses conseils et son encouragement.

Je remercie également les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Mes remerciements vont à l'ensemble des enseignants du département d'électronique d'université de Laghouat.



# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

*A mon cher père, Gasmi Ahmed, tu as toujours été un père idéal pour moi.*

*A ma mère qui m'a entourée d'amour et d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que Dieu la protège*

*A ma sœur, Aicha, qui a une présence distinguée dans la maison, que Dieu la protège et prolonge sa vie*

*A toute ma famille, en particulier mes sœurs qui m'ont soutenue de leurs conseils et leurs encouragements.*

*A tous mes amis surtout Khadija, Zohour, Aya, Amel, Houda, je vous dédie ce travail et vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.*

*A mon binôme Hadjer je te remercie pour tout, je te souhaite une vie pleine de succès et de bonheur.*

*À l'ami et frère, l'être humain bon et généreux qui est décédé Chaib Ahmed, que Dieu ait pitié de lui.*

*A Rokia Merci pour votre aide et votre gentillesse. Je vous souhaite une vie pleine de succès et de bonheur.*

*Halima GASMI*



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études, grâce à eux que je suis arrivée jusqu'à aujourd'hui, j'espère qu'un jour je serai capable de leur donner au moins le minimum car quoi qu'il arrive on arrivera jamais à leur rendre tout.*

*A mon frère, Oussama*

*A mes sœurs, Rahil et Hiba*

*A mon chère amie Aya*

*A mes amis pour tous les bons moments passés et à venir inshallah.*

*Merci d'être toujours à mes côtés.*

*Hadjer DAHMANI*

## ملخص:

يتأثر انتشار الضوء في الألياف الضوئية بالعديد من الظواهر الفيزيائية. التشتت اللوني هو الظاهرة الفيزيائية الرئيسية الضارة بالانتشار البصري في الشبكات عالية السرعة. بالإضافة إلى ذلك، يساهم نوع تعديل المصدر البصري لجهاز الإرسال في زيادة تأثير التشتت اللوني. الغرض من هذه المذكرة هو معرفة تأثير التشتت اللوني على جودة الإرسال من أجل التمكن من زيادة الإنتاجية المنقولة في الشبكات الضوئية. يستخدم جزء المحاكاة في هذه المذكرة برنامج OptiSystem الذي يمنحنا إمكانية تصميم سلاسل مماثلة لتلك الموجودة في الواقع، مع تصور الأداء باستخدام عامل الجودة ومعدل خطأ البت. الكلمات المفتاحية: الشبكات الضوئية، الألياف الضوئية، التشتت اللوني، معدل النقل، مخطط العين، عامل الجودة، معدل خطأ البت.

## Résumé :

La propagation de la lumière dans la fibre optique est influencée par de nombreux phénomènes physiques. La dispersion chromatique constitue le principal phénomène physique néfaste pour la propagation optique dans les réseaux à haut débit. De surcroît, le type de la modulation de la source optique du transmetteur contribue à augmenter l'impact de la dispersion chromatique. Le but de ce mémoire est de voir l'effet de la dispersion chromatique sur la qualité de la transmission afin de pouvoir augmenter le débit transmis dans les réseaux optiques. La partie simulation de ce mémoire fait appel au logiciel OptiSystem qui nous donne la possibilité de concevoir des chaînes comparables à ceux existantes dans la réalité, avec visualisation des performances à l'aide du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire.

**Les mots clés :** les réseaux optique, fibre optique, la dispersion chromatique, débit, diagramme de l'œil, facteur de qualité, taux d'erreur binaire.

## Abstract:

The propagation of light in the optical fibre is influenced by many physical phenomena. Chromatic dispersion is the main physical phenomenon which damages optical propagation in broadband networks. In addition, the type of modulation of the optical source of the transmitter contributes to increase the impact of chromatic dispersion. The purpose of this dissertation is to see the effect of chromatic dispersion on the quality of transmission in order to increase the amount transmitted in optical networks. The simulation part of this dissertation uses the OptiSystem software which gives us the possibility to design chains comparable to those existing in reality, with visualization of performance using the quality factor and the binary error rate.

**The keywords:** optical networks, optic fiber, chromatic dispersion, flow rate, eye diagram, quality factor, binary error rate.

# Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1.2</b>
-----------------------------------	------------

## *Chapitre I : Généralité sur les liaisons par fibres optiques*

<b>I.</b>	Introduction.....	<b>3</b>
<b>II.</b>	Structure des réseaux optiques .....	<b>3</b>
II.1.	Les réseaux grand distance .....	<b>3</b>
II.2.	Les réseaux métropolitains .....	<b>4</b>
II.3.	Les réseaux locaux .....	<b>5</b>
<b>III.</b>	Description d'une liaison par fibre optique.....	<b>5</b>
<b>IV.</b>	Modules et composants d'émission/réception.....	<b>6</b>
IV.1.	Modules et composants d'émission.....	<b>6</b>
IV.1.1	Diodes électroluminescentes (LED, Light Emission Diode) .....	<b>6</b>
IV.1.2	Laser .....	<b>7</b>
IV.1.3	Diagramme de rayonnement .....	<b>9</b>
IV.2	Modules et Composants de réception .....	<b>10</b>
IV.2.1	Les Photodétecteur .....	<b>11</b>
IV.2.1.1	Photodiodes PIN .....	<b>12</b>
IV.2.1.2	Photodiode APD (Avalanche Photodiode) .....	<b>13</b>
IV.2.2	Les amplificateurs optiques .....	<b>13</b>
IV.2.3	Le filtrage .....	<b>14</b>
IV.2.4	Circuit de décision .....	<b>14</b>
IV.2.5	Module de transmission .....	<b>15</b>
<b>IV.</b>	Avantages et inconvénients .....	<b>16</b>
<b>V.</b>	Conclusion.....	<b>17</b>

## *Chapitre II : Les fibres optiques*

<b>I.</b>	Introduction.....	<b>18</b>
-----------	-------------------	-----------

<b>II.</b>	Principe de fonctionnement d'une fibre optique.....	<b>18</b>
II.1.	Principe de la réflexion.....	<b>18</b>
II.2.	Principe de de guidage .....	<b>19</b>
II.3.	Ouverture numérique .....	<b>19</b>
III.	Evolution de la fibre optique .....	<b>20</b>
IV.	Structure de la fibre optique.....	<b>21</b>
V.	Principaux types de fibre optique.....	<b>22</b>
V.1.	Fibre optique multimode.....	<b>22</b>
V.2.	Fibre optique monomode.....	<b>23</b>
VI.	Caractéristiques de la fibre optique.....	<b>24</b>
VI.1.	L'atténuation.....	<b>24</b>
VI. 2.	Pertes extrinsèques .....	<b>26</b>
VI. 3.	Dispersion.....	<b>27</b>
VI.3.1.	Dispersion intermodal.....	<b>28</b>
VI.3.2.	La dispersion chromatique.....	<b>30</b>
VI.3.2.1.	Paramètre de la dispersion chromatique.....	<b>30</b>
VI.3.3.	La dispersion du matériau.....	<b>34</b>
VI.3.4.	Dispersion de guide.....	<b>34</b>
VII.	L'effet de la dispersion intermodale et chromatique sur la transmission optique .....	<b>36</b>
VIII.	Les fenêtres utilisées dans les télécommunications optiques.....	<b>38</b>
IX.	La biréfringence.....	<b>39</b>
X.	Multiplexage optique .....	<b>42</b>
X.1.	Multiplexage temporel (TDM).....	<b>42</b>
X.2.	Multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	<b>43</b>
X.3.	Comparaison entre TDM et WDM .....	<b>44</b>
XI.	Conclusion.....	<b>45</b>

***Chapitre III : L'effet de la dispersion sur le débit transmis par fibres optiques***

<b>I.</b>	Introduction.....	<b>46</b>
<b>II.</b>	Présentation des logiciels.....	<b>46</b>

II.1 Présentation du logiciel OptiFiber.....	46
II.2. Présentation du logiciel OptiSystem .....	47
<b>III.</b> Effets de la dispersion chromatique sur la transmission .....	48
<b>IV.</b> Critères de qualité .....	53
IV.1. Taux d'erreur binaire.....	53
IV.2. Le diagramme de l'œil.....	54
IV.3. Le facteur Q.....	55
<b>V.</b> Effet de la dispersion chromatique sur le débit transmis par fibre optique.....	56
V.1. Modulation directe.....	56
V.1.1. Décalage du zéro de la dispersion chromatique vers $1.55\mu\text{m}$ par l'utilisation de fibres à profil d'indice particulier .....	60
V.2. Modulation externe.....	64
Conclusion .....	67
<b>Conclusion générale</b> .....	68
<b>Références bibliographiques</b> .....	70

## *Liste des figures*

<i>Figure I.1. Réseau grand distance.....</i>	<b>4</b>
<i>Figure I.2. Réseau Métropolitain.....</i>	<b>4</b>
<i>Figure I.3. Réseau Local .....</i>	<b>5</b>
<i>Figure I.4. Schéma d'une liaison par fibre optique.....</i>	<b>5</b>
<i>Figure I.5. Diode électroluminescentes LED.....</i>	<b>7</b>
<i>Figure I.6. Largeur spectrale d'une LED .....</i>	<b>7</b>
<i>Figure I.7. Largeur spectrale d'un laser .....</i>	<b>8</b>
<i>Figure I.8. Modulation directe d'une diode laser.....</i>	<b>8</b>
<i>Figure I.9 Principe de la modulation externe.....</i>	<b>9</b>
<i>Figure I.10. Diagramme de rayonnement .....</i>	<b>10</b>
<i>Figure I.11. Schéma d'un récepteur de données à détection directe .....</i>	<b>11</b>
<i>Figure I.12. Structure d'une photodiode PIN.....</i>	<b>13</b>
<i>Figure I.13. Structure d'une photodiode à avalanche .....</i>	<b>13</b>
<i>Figure I.14. Réponses fréquentielles du filtre de Nyquist .....</i>	<b>14</b>
<i>Figure I.15. Présentation temporelle de la régénération des données d'entrée .....</i>	<b>15</b>
<i>Figure II.1. Guidage de la lumière dans la fibre optique.....</i>	<b>18</b>
<i>Figure II.2. Phénomène de réflexion totale .....</i>	<b>19</b>
<i>Figure II.3. Cône d'acceptance .....</i>	<b>20</b>
<i>Figure II.4. Structure d'une fibre optique .....</i>	<b>21</b>
<i>Figure II.5. Classification des fibres optiques selon le matériau, le mode de propagation et le profil d'indice.....</i>	<b>22</b>
<i>Figure II.6. Profile d'une fibre optique multimode à saut d'indice .....</i>	<b>23</b>
<i>Figure II.7. Profile d'une fibre optique multimode gradient d'indice .....</i>	<b>23</b>
<i>Figure II.8. Profile d'une fibre optique monomode .....</i>	<b>24</b>
<i>Figure II.9. Pertes optiques dans une fibre standard .....</i>	<b>25</b>
<i>Figure II.10. Perte par courbure .....</i>	<b>27</b>
<i>Figure II.11. Perte par micro-courbure .....</i>	<b>27</b>
<i>Figure II.12. Propagation d'une impulsion le long d'une fibre optique .....</i>	<b>28</b>
<i>FigureII.13. Le phénomène de dispersion intermodale .....</i>	<b>28</b>

<i>Figure II.14. Impact de la dispersion chromatique sur un signal optique .....</i>	<b>30</b>
<i>Figure II.15. Variation de l'indice effectif <math>n_{eff}</math>, l'indice de gaine et l'indice de cœur avec la longueur d'onde .....</i>	<b>31</b>
<i>Figure II.16. Variation de l'indice effectif <math>n_{eff}</math> et de l'indice de groupe <math>N_g</math> avec la longueur d'onde pour la silice .....</i>	<b>32</b>
<i>Figure II.17. La dispersion du matériau .....</i>	<b>34</b>
<i>Figure II.18. La dispersion de guide.....</i>	<b>35</b>
<i>Figure II.19. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique D'une fibre monomode .....</i>	<b>36</b>
<i>Figure II.20. Dispersion intermodale.....</i>	<b>36</b>
<i>Figure II.21. Dispersion chromatique.....</i>	<b>36</b>
<i>Figure II.22. L'effets de l'atténuation et la dispersion chromatique Sur la transmission.....</i>	<b>37</b>
<i>Figure II.23. Fenêtres de transmission des fibres en silice .....</i>	<b>38</b>
<i>Figure II.24. La division de l'impulsion due à la biréfringence.....</i>	<b>39</b>
<i>Figure II.25. Evolution de la biréfringence du mode fondamental .....</i>	<b>40</b>
<i>Figure II.26. Le changement de l'état de polarisation de la lumière provoqué par la biréfringence dans une fibre optique.....</i>	<b>41</b>
<i>Figure II.27. Multiplexage temporel TDM.....</i>	<b>42</b>
<i>Figure II.28. Multiplexage en longueur d'onde WDM.....</i>	<b>43</b>
<i>Figure III.1. L'interface de travail sur OptiFiber .....</i>	<b>47</b>
<i>Figure III.2. L'interface de travail sur OptiSystem.....</i>	<b>48</b>
<i>Figure III.3. Profil d'indice de la fibre monomode standard.....</i>	<b>49</b>
<i>Figure III.4. Variation de l'indice de la gaine et l'indice de cœur de la G-652 avec la longueur d'onde.....</i>	<b>50</b>
<i>Figure III.5 Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique De la fibre G-652.....</i>	<b>50</b>
<i>Figure III.6. Bloc d'une chaine de transmission optique pour tester l'effet de la dispersion sur une impulsion gaussienne avec la fibre G-652.....</i>	<b>51</b>
<i>Figure III.7. L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une séquence d'impulsions gaussien (00010100) sur la fibre optique G-652 à 1550 nm.....</i>	<b>52</b>
<i>Figure III.8. Diagramme de l'œil.....</i>	<b>54</b>
<i>Figure III.9. Taux d'erreur TEB en fonction du facteur Q.....</i>	<b>55</b>

<i>Figure III.10. Bloc d'une chaîne de transmission optique pour tester l'effet de la dispersion sur une séquences binaire avec modulation direct.....</i>	<b>57</b>
<i>Figure III.11. Allure des signaux en chaque point de la liaison de référence.....</i>	<b>58</b>
<i>Figure III.12. Les diagrammes de l'œil du signal transmis avec la modulation direct pour différents valeur de débits.....</i>	<b>59</b>
<i>Figure III.13. Profil d'indice de la fibre à dispersion décalée la G-653.....</i>	<b>60</b>
<i>Figure III.14. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique de la fibre G-653.....</i>	<b>60</b>
<i>Figure III.15. Diagramme de l'œil avec une fibre à dispersion décalée pour un débit de 5 GB/s.....</i>	<b>61</b>
<i>Figure III.16. Diagramme de l'œil avec une fibre à dispersion décalée pour un débit de 9 GB/s.....</i>	<b>62</b>
<i>Figure III.17. Diagramme de l'œil avec une atténuation de 1dB/Km pour différents débits .....</i>	<b>63</b>
<i>Figure III.18. Bloc d'une chaîne de transmission optique pour tester l'effet de la dispersion sur une séquence binaire avec modulation externe.....</i>	<b>64</b>
<i>Figure III.19. Les diagrammes de l'œil du signal transmis avec la modulation externe pour différents valeur de débits.....</i>	<b>65</b>
<i>Figure III.20. Diagramme de l'œil avec une fibre à dispersion décalée et une modulation externe pour un débit de 20 GB/s.....</i>	<b>66</b>
<i>Figure III.21. Diagramme de l'œil avec une fibre à dispersion décalée et une modulation externe pour un débit de 80 GB/s.....</i>	<b>66</b>

## ***Liste des tableaux***

*Tableau I.1 : Comparatif des caractéristiques de différents supports de propagation.* **16**

*Tableau III.1: Les coefficients de multiples matériaux de verre à base de silice.* **49**

## *Introduction générale*

## **Introduction générale :**

Le concept de communications optiques remonte loin dans l'histoire. L'envoi de messages par la lumière est certainement aussi vieux que les signaux de feu ou de fumée et a continué dans notre ère moderne si on tient compte de l'utilisation de lampes dans les communications entre bateaux en mer. Cependant, ces méthodes de transmission dépendent de l'état de l'atmosphère comme milieu de transmission [1].

Un guide d'onde fabriqué à partir d'un matériau non conducteur qui transmet la lumière (diélectrique), tel que le verre ou le plastique pourrait être un milieu de transmission idéal, parce qu'il n'est pas sujet aux variations atmosphériques. Les recherches entreprises dans ce sens aboutissent aux fibres optiques actuelles avec des pertes de puissance de lumière relativement faibles sur de longues distances [2].

Le développement des réseaux Internet est en pleine croissance et le moyen le plus rapide pour transmettre une information est bien sur la lumière. La transmission sans perturbation d'une information d'un point A à un point B s'effectue à l'aide d'un guide de lumière (fibre optique).

Les fibres optiques ont pour rôle principal de propager la lumière avec un affaiblissement aussi faible que possible d'un module émetteur à un module récepteur. L'augmentation du débit d'une ligne de transmission optique peut se réaliser par l'augmentation du débit par canal, ce qui oblige à raccourcir la durée d'un bit de signal et tend à augmenter la largeur spectrale occupée par le signal. Atteindre ce débit maximal ne serait théoriquement possible que dans une liaison parfaite où le signal ne subirait aucun élargissement dans le domaine temporel [3].

Dans une fibre, le premier phénomène néfaste limitant les débits de transmission est la dispersion chromatique qui traduit le fait que la vitesse de l'énergie (vitesse de groupe) dans le guide est une fonction de la longueur d'onde. Elle est due à la nature dispersive de la silice (dispersion du matériau) d'une part, et au fait que l'onde lumineuse doit obéir à certaines conditions aux limites du cœur de la fibre pour être guidée d'autre part. La dispersion chromatique provoque un élargissement temporel des impulsions qui composent le signal, proportionnel à leur largeur spectrale (d'autant plus grande que ces impulsions sont plus courtes) et proportionnel à la longueur de propagation. Le recouvrement entre impulsions successives, qui résulte de cet élargissement, est évidemment la cause d'une dégradation rédhibitoire de la qualité de la transmission [2].

Le projet de ce mémoire consiste à comprendre l'effet de la dispersion chromatique sur le débit d'une liaison optique en se basant sur la simulation système de cette dernière à l'aide du logiciel OptiSystem qui simplifier la tâche en donnant des critères permettant de quantifier la qualité de transmission d'une telle chaîne.

Le premier chapitre de ce mémoire présentera une étude détaillée des différents composants constituant la liaison optique tout en expliquant leur rôle. Le deuxième chapitre détaillera les propriétés et les caractéristiques des fibres optiques. Enfin, le dernier chapitre sera consacré à la présentation du logiciel de simulation utilisé, à la description des différents critères de qualité, puis sera venu le temps de présenter l'ensemble des résultats de simulations obtenus pour l'effet de la dispersion chromatique sur le débit.

## ***Chapitre I***

### ***Généralité sur les liaisons par fibres optiques***

## **I. Introduction :**

La fibre optique, mince cheveu de verre transparent, a révolutionné les télécommunications depuis sa découverte dans les années soixante. L'information n'est plus transmise sous forme électrique mais sous forme d'un signal lumineux, en raison de sa faible atténuation, son faible poids, sa très petite taille et sa résistance mécanique, elle s'est imposée au fil des années comme le média par excellence pour la transmission des données sur des longues distances.

La conception des systèmes de transmission à très grande capacité était désormais possible, de plus les échanges à travers ces systèmes allaient être de plus en plus nombreux, et la demande développement de nouveaux composants optiques, de services de plus en plus élevée. Son apparition a nécessité la conception et le développement de nouveaux composants optiques.

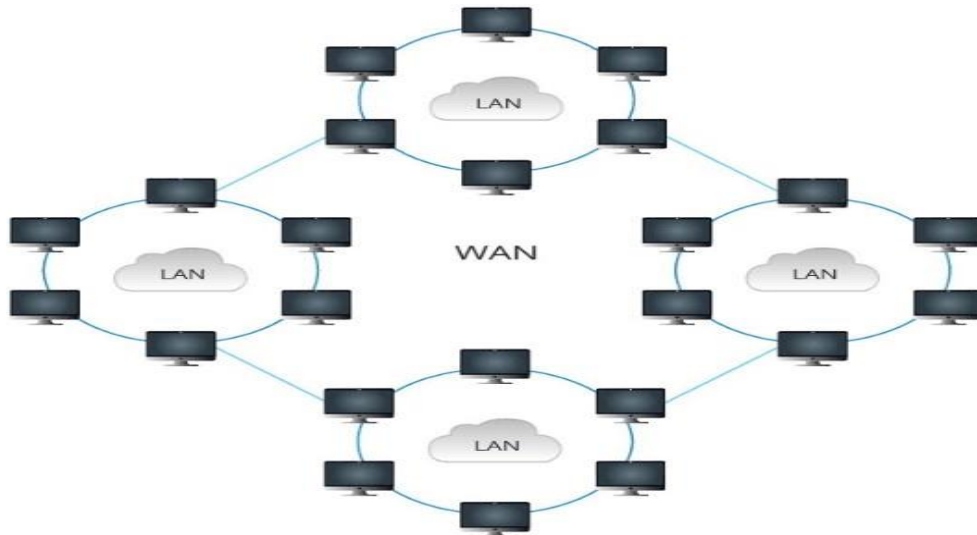
## **II. Structure des réseaux optiques :**

Du point de vue couverture on peut classer les réseaux de télécommunications en fibre optique en trois catégories [1] :

- Le réseau local - couvrant des dimensions de l'ordre de quelques kilomètres à quelques dizaines, aussi appelé réseau local (Local Area Network: LAN).
- Le réseau métropolitain (Metro Area Network : MAN), ayant des dimensions de l'ordre de la centaine de kilomètres.
- Le réseau grand distance (Wide Area Network : WAN), s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres.

### **II.1 Les réseaux grand distance :**

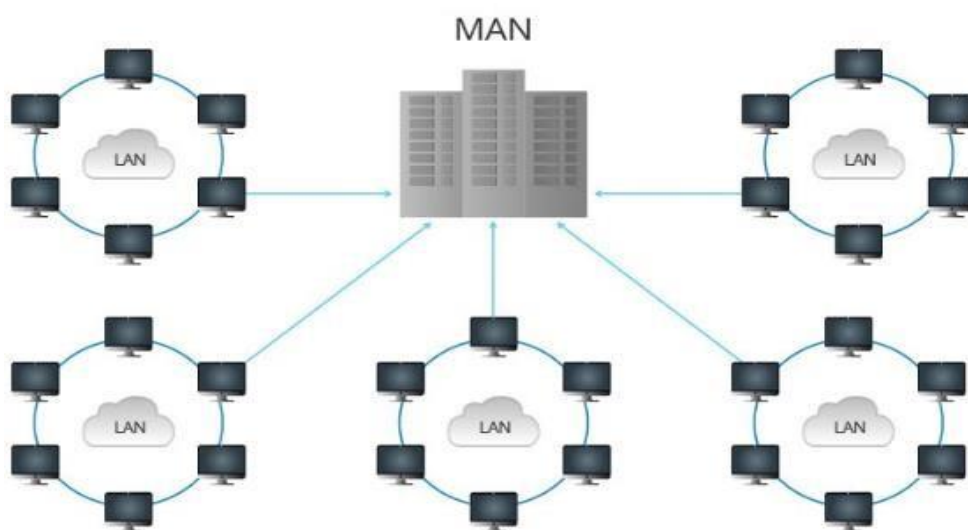
Ce sont généralement des réseaux dotés d'une structure maillée ou en anneaux où les débits de transmission de données sont supérieurs à 100 Gbit/s. Les distances d'interconnexions varient entre la centaine de kilomètres et plus de mille kilomètres. Couvrant ainsi des zones géographiques à l'échelle des continents. Ils sont constitués par toutes les artères majeures de transmission au niveau mondial et supportent donc les échanges internationaux [1,2].



*Figure I.1. Réseau grand distance.*

## II.2 Les réseaux métropolitains :

Les réseaux métropolitains permettent l'interconnexion de plusieurs réseaux locaux répartis sur différents sites dans une zone urbaine dont l'étendue géographique n'excède pas 200 km. Ces réseaux peuvent être privés ou publics. Ils se distinguent aussi par leurs taux d'erreurs de communication. Le taux d'erreurs pour les réseaux MAN reste faible bien que plus élevé que pour les réseaux locaux. Le débit est élevé car supérieur à 100 Mbps (sur liens de fibre optique) [1-3].



*Figure I.2. Réseau Métropolitain.*

### II.3 Les réseaux locaux :

Le réseau local comprend tout ce qui est situé entre le réseau métropolitain et le terminal de l'abonné, Sa longueur varie de 2 à 50 km et sa capacité est au plus du même ordre de grandeur que celle du réseau métropolitain. Le réseau local optique est souvent constitué par une partie en fibre Optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. [2,3].

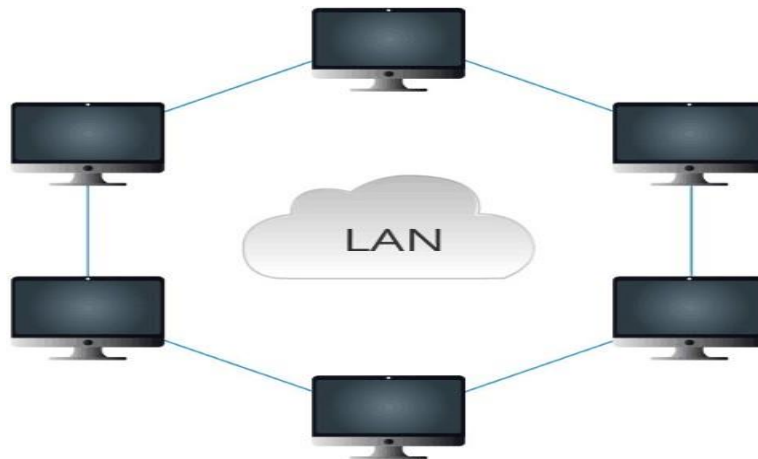


Figure I.3. Réseau Local.

### III. Description d'une liaison par fibre optique :

Le principe d'une liaison par fibre optique repose sur le principe de faire circuler une information entre un émetteur et un récepteur en réduisant au maximum les risques de déformation du signal réceptionné, afin d'assurer le bon transfert de l'information. La Figure I.4 montre le schéma de principe d'une liaison par fibres optiques, ou système de transmission optique « point à point ».

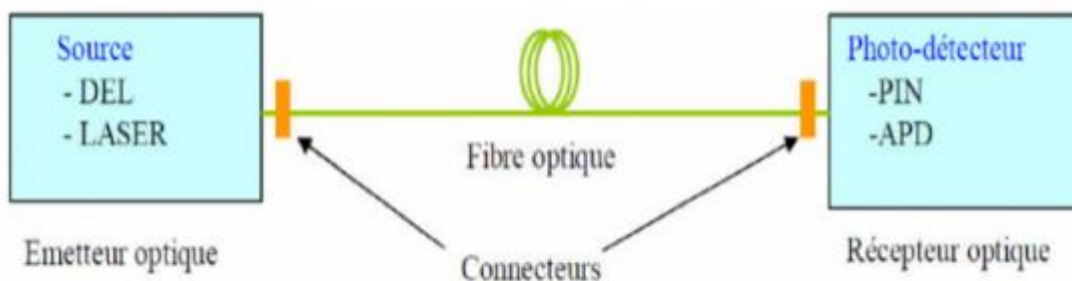


Figure I.4. Schéma d'une liaison par fibre optique.

Tous les systèmes se composent d'un bloc émetteur, d'une série de tronçons de fibres optiques séparés par des régénérateurs, et d'un bloc récepteur [5]. Le rôle d'un tel système est tout d'abord, au niveau de l'émetteur, d'émettre un signal optique et de le moduler en fonction des données binaires et du format choisi. Ensuite, il a bien sûr pour autre objectif de faire propager ce signal optique sur une distance donnée, par le biais d'une ligne optique formée de fibres optiques et des régénérateurs, de telle sorte que le signal soit le moins affecté possible par les différents effets de propagation auxquels il est confronté. Enfin, au niveau du récepteur, ce signal optique est détecté après la transmission pour être reconverti en signal binaire électrique [4].

#### **IV. Modules et composants d'émission /réception :**

Toute chaîne de transmission est constituée d'un émetteur (source), support de transmission et d'un récepteur pour la transmission optique, le principe de fonctionnement repose sur l'interaction de la lumière dans les matériaux semi-conducteurs dont la fibre est fabriquée, ainsi que sur les composants électriques utilisés et un amplificateur (répéteur) pour de grandes distances.

##### **IV.1 Modules et composants d'émission :**

Depuis le début des télécommunications par fibres optiques, le choix des sources s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteurs à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, des longueurs d'onde disponibles compatibles avec les fenêtres spectrales des fibres optiques et de leur faible consommation énergétique.

Pour une transmission optique, on utilise des diodes électroluminescentes (LED) et des diodes laser (DL), La source optique la plus utilisée dans les systèmes de communications optiques est la diode laser.

##### **IV.1.1 Diodes électroluminescentes (LED, Light Emission Diode) :**

Une LED est une jonction PN polarisée en direct. Les électrons ou les trous, qui constituent les porteurs majoritaires sont injectés dans le voisinage de la jonction. Leurs recombinaisons donnent lieu à une émission de la lumière [6,7].

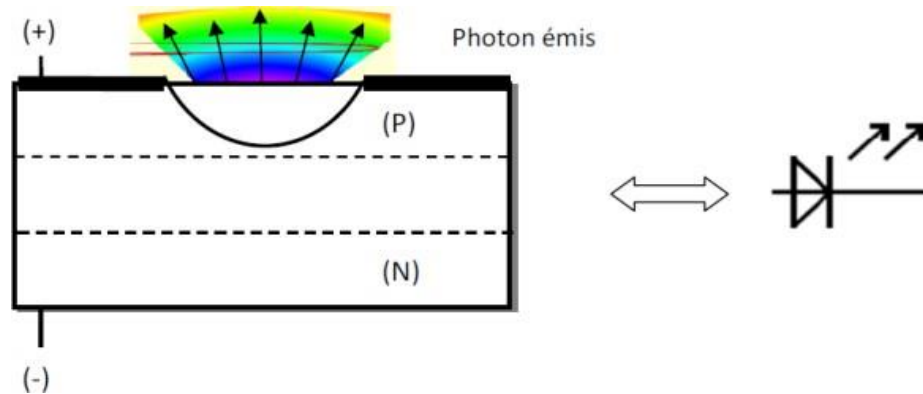


Figure I.5. Diode électroluminescentes LED.

Le spectre d'une LED est continu est relativement large, de l'ordre de 40 à 100nm à mi-hauteur, la lumière émise est incohérente [8].

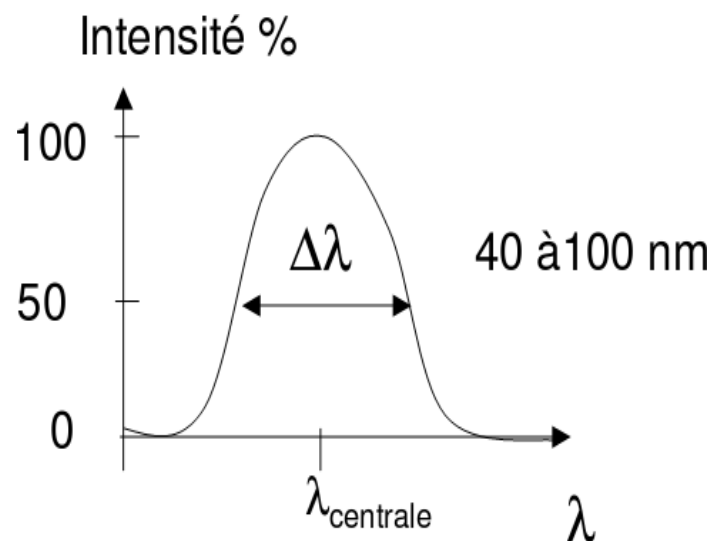


Figure I.6. Largeur spectrale d'une LED.

#### IV.1.2 Laser :

Le terme "laser" est un acronyme qui signifie amplification de lumière par émission Stimulée (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Les lasers sont des émetteurs de rayonnement cohérent, c'est-à-dire monochromatique (très faible largeur spectrale).

Les diodes laser caractérisent par l'étroitesse de la longueur d'onde qu'elles émettent, le spectre émis se compose de plusieurs raies centrées autour de la longueur d'onde principale (figure I.7).

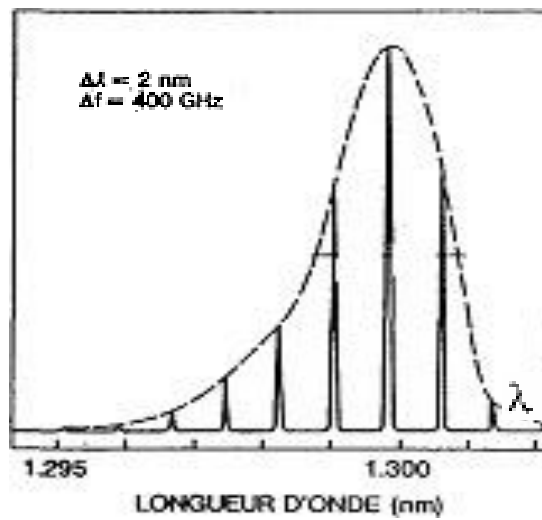


Figure I.7. Largeur spectrale d'un laser.

- **La modulation directe :**

La méthode consiste à faire varier le courant de la source. Il en résulte une variation proportionnelle de la puissance émise qui suit le signal modulateur.

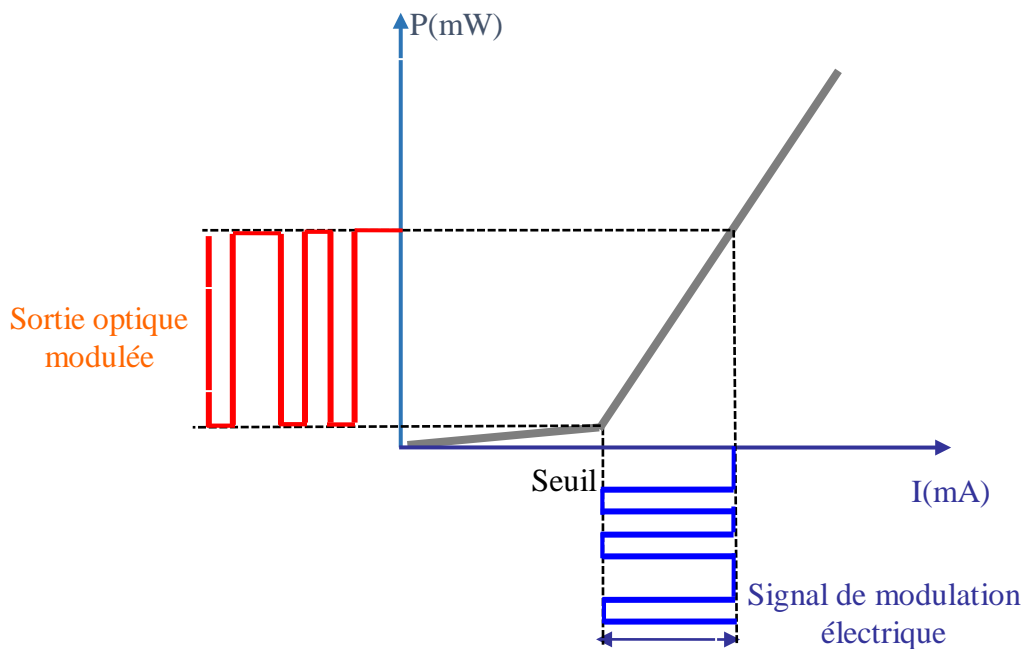


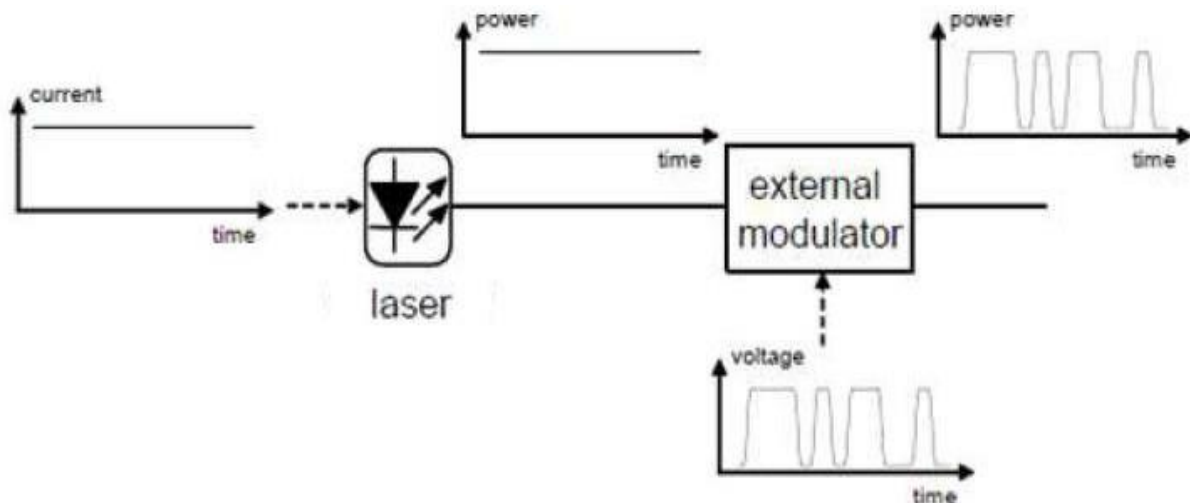
Figure I.8. Modulation directe d'une diode laser.

Pour les communications optiques à moindre coût, ce type de modulateur est privilégié, car il utilise peu de composants [6-7].

- **La modulation externe :**

La modulation externe consiste à graver les données électriques sur un signal optique continu en utilisant un modulateur. Ainsi, les défauts de la modulation directe qui sont liés au LASER, ne seront plus présents sur le signal optique. Le modulateur est commandé par une tension externe  $v(t)$ . Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en sortie.

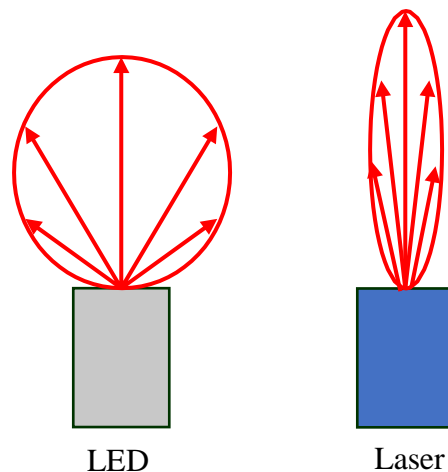
En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon  $v(t)$ . Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de  $v(t)$  et choisir les modifications du facteur de transmission [6-7].



*Figure I.9. Principe de la modulation externe.*

#### IV.1.3. Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement donne une image du flux lumineux tel qu'il se présente en sortie du composant. De par sa nature, le diagramme de la diode laser sera plus étroite que celui de la LED (figure I.10).



*Figure I.10. Diagramme de rayonnement.*

L'angle formé entre les rayons extrêmes et l'axe permet de déterminer l'ouverture numérique du composant. Si cette ouverture numérique est supérieure à celle de la fibre optique, une part du flux ne pourra être injectée [8].

#### **IV.2 Modules et Composants de réception :**

Le système de réception est composé d'une photodiode qui convertit le signal optique reçu en signal électrique suivie d'un amplificateur, dont la réalisation doit être soignée car c'est en général le bruit de celui-ci qui limite la puissance optique minimale détectable, et donc la portée du système. Suivant les applications, on trouve ensuite des circuits de filtrage ou de remise à niveau logique (convertisseur) [8].

Les principaux paramètres qui interviennent pour caractériser la détection sont :

- ✓ La longueur d'onde de coupure.
- ✓ La sensibilité du détecteur.

De même que pour les modules d'émission, les modules de réception ont connu des avancées technologiques importantes. Le rôle du récepteur est de capter et convertir au principalement le signal optique en signal électrique (la réception est basée sur la technique de détection directe). Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels. On y trouve trois parties indiquées sur la figure I.11 [7-9].

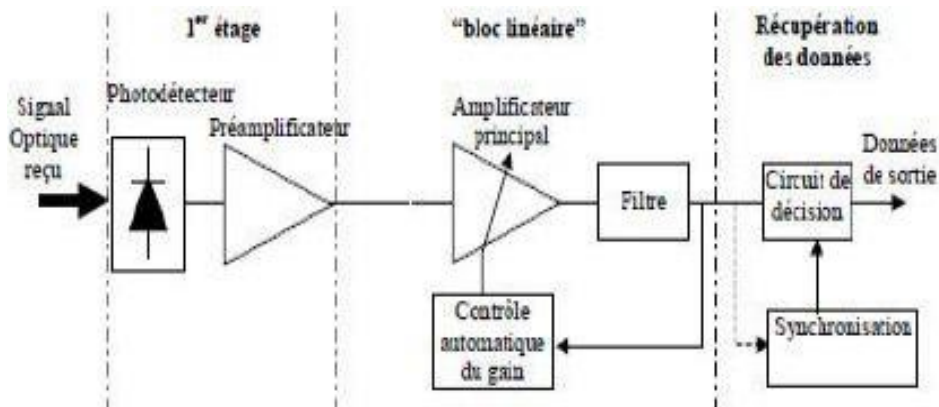


Figure I.11. Schéma d'un récepteur de données à détection directe.

- Le bloc « premier étage » est composé du photodétecteur. Il peut être accompagné d'un préamplificateur, qui a pour but de rendre le photocourant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photodétecteur.
- Le bloc « linéaire », est composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre réducteur de bruit.
- Le bloc « récupération des données » correspond au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme (circuit de synchronisation).

#### IV.2.1. Les Photodétecteur :

Les photodétecteur sont des composants à semi-conducteurs qui détectent les signaux optiques par des processus électroniques. Ces processus sont conditionnés par la transition optique des porteurs de charges d'un état liée à un état de conduction. Ce qui se traduit par l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur due à l'augmentation de la densité de porteurs de charge libres et par conséquent la génération d'un courant électrique d'où la conversion des variations optiques en électriques [10,11].

La sensibilité à une gamme de longueurs d'ondes est imposée principalement par la bande d'absorption du matériau, notons que les effets thermiques ont un effet notable sur la performance du détecteur. Sur le marché il existe plusieurs types de photo détecteur on va s'intéressé a deux types de photodiodes utilisées en télécoms optiques :

- Photodiode PIN.
- Photodiode a avalanche APD.

- **Principe de la photodétection :**

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé une place à une paire électron-trou. Une différence de potentiel est appliquée dans le but d'empêcher l'électron de retomber dans son plus stable état. Sous l'effet du champ électrique, 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 [12].

- **Caractéristiques d'un photodétecteur :**

Lorsqu'on considère le bilan d'une liaison par fibre optiques, les performances du système dépendent en partie de celles du photodétecteur. Ce composant intervient grâce à la puissance seuil qu'il peut détecter et au bruit qu'il introduit [12].

Lorsqu'on veut augmenter l'espacement entre répéteurs (régénérateurs) afin de réduire le coût total d'une liaison, il est nécessaire de choisir un détecteur de grande qualité. Pour cela on demande au photodétecteur :

- D'avoir une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement (1,3  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ ).
- De posséder une bande passante convenable.
- D'introduire un bruit minimum (courant d'obscurité le plus faible).
- De reconstituer le signal original avec la plus grande fidélité.
- D'offrir un bon couplage avec la fibre.
- D'avoir une bonne stabilité en température.
- 

#### **IV.2.1.1 Photodiodes PIN :**

Cette photodiode, polarisée en inverse, est réalisée de trois couches Semi-conductrices : deux fortement dopées P<sup>+</sup> et N<sup>+</sup>, entre lesquelles existe une couche de grande résistivité (presque intrinsèque), où il existe très peu de charges mobiles. Parce qu'elles sont peu coûteuses, simples à utiliser et de performance satisfaisante, les photodiodes PIN sont les plus utilisées [13].

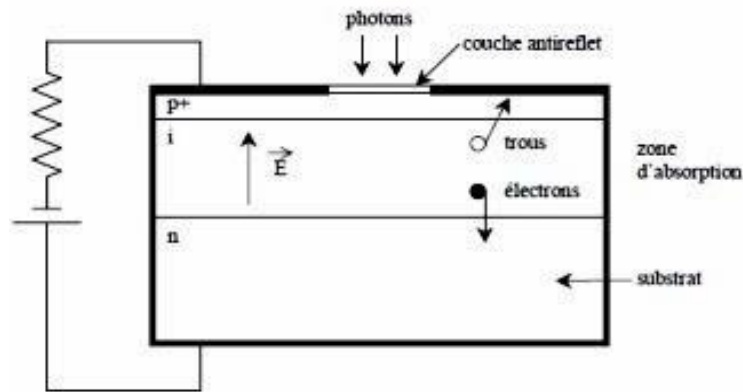


Figure I.12: Structure d'une photodiode PIN.

#### IV.2.1.2 Photodiode APD (Avalanche Photodiode)

Lorsque la puissance lumineuse reçue est très faible, les courants détectés sont peu élevés et se superposent au courant d'obscurité, conduisant à un mauvais rapport signal à bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire que le courant détecté soit plus important en utilisant d'autres types de photodiodes, comme celles à gain interne de type avalanche (APD). La photodiode d'avalanche est une PIN dans laquelle est réalisée une amplification de puissance ; cela permet d'extraire un signal électrique fort même pour une puissance lumineuse affaiblie. Les APD sont aussi utilisées grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide, mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte [14].

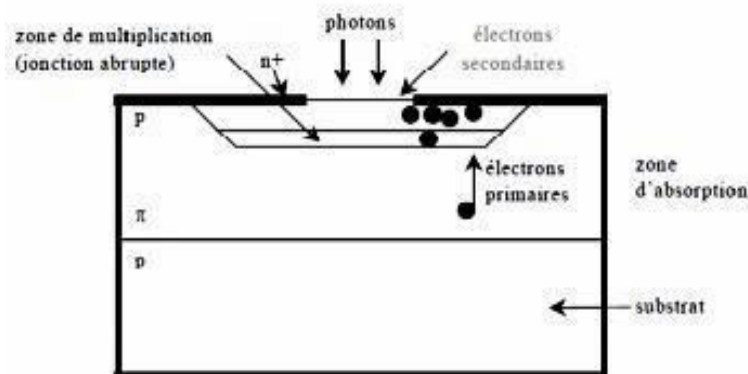


Figure I.13 : Structure d'une photodiode à avalanche.

#### IV.2.2 Les amplificateurs optiques :

Malgré la présence d'un préamplificateur, Le courant émis par la photodiode reste souvent assez faible. Il est donc nécessaire d'utiliser un amplificateur électrique ayant une grande bande passante en sortie de photorécepteur.

### IV.2.3 Le filtrage :

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

Afin de minimiser le bruit en sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande la plus petite possible, tout en ne créant pas d'interférences inter symboles. On utilise le filtre de Nyquist dont le largeur de bande de bruit, dans les conditions habituelles, vaut approximativement  $\Delta F = 0.8 \times F_r$ , avec  $F_r$ , la fréquence rythme du signal [15].

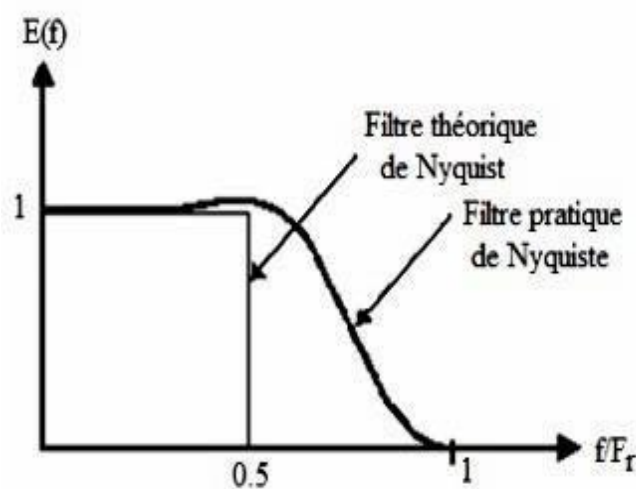
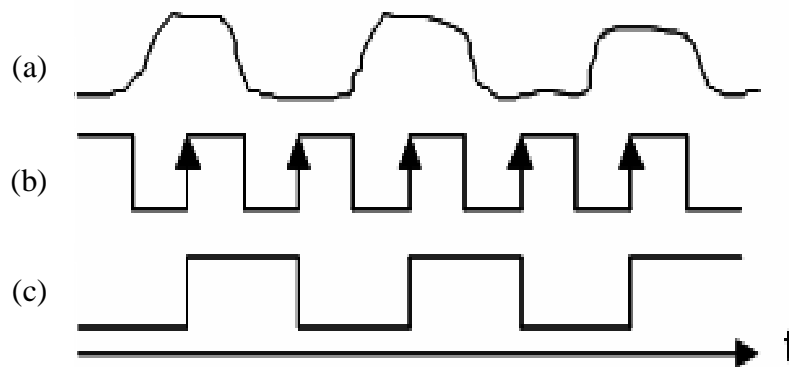


Figure I.14. Réponses fréquentielles du filtre de Nyquist.

### IV.2.4 Circuit de décision :

Pour une récupération parfaite des données transmises, une remise en forme du signal détecté est donc nécessaire en utilisant un bloc de décision composé d'un détecteur à seuil et d'un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation. Leur tâche est de comparer le signal de données à un certain seuil d'amplitude, puis de décider le niveau correspondant du signal (« bit 1 » ou « bit 0 »), et ceci à chaque front d'horloge. Ainsi, le signal d'entrée de la bascule, qui est en réalité le signal de sortie après la détection par le photodétecteur, doit avoir une amplitude assez élevée pour la fonction de « décision » [15].

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



(a) *Donnée d'entrée*  
 (b) *Signal d'horloge*  
 (c) *Donnée de sortie*

*Figure I.15. Présentation temporelle de la régénération des données d'entrée .*

#### IV.2.5 Module de transmission :

Avec l'invention du laser en 1960 et l'énorme potentiel qui en résultait pour les télécommunications (débit plus élevé, bande passante plus large), il est vite devenu important de développer des guides d'onde optiques insensibles aux fluctuations atmosphériques et à la topologie. C'est en 1966 qu'est évoquée pour la première fois la possibilité d'utiliser des guides d'onde cylindriques à base de diélectrique, aussi appelé fibres optiques.

Dans le domaine des télécommunications, la fibre optique peut être considérée comme un vecteur physique pouvant transporter, via un signal optique, des données numériques d'un point à un autre de la planète [16].

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans la transmission de données et de lumière. Elle offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et peut servir de support à un réseau « large bande » par lequel transitent aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques.

La fibre optique s'est révélée être un support capable de concurrencer le câble en cuivre ainsi que les ondes radio aussi bien en terme de performances au niveau de la transmission (très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible), d'avantages liés à la mise en œuvre (très petite taille, grande souplesse, faible poids), de sécurité électrique, électromagnétique et industrielle [16].

Le tableau I.1, résume ces divers avantages par rapport aux autres supports de transmission :

**Tableau I.1 : Comparatif des caractéristiques de différents supports de propagation.**

Support	Câble coaxial	Ondes radio	Fibre Optique
<b>Propagation</b>	Guidée	Libre/dirigée	Guidée
<b>Matériau</b>	Cuivre	/	Silice
<b>Bande passante</b>	MHz	GHz	THz
<b>Atténuation</b>	Forte avec fréquence	Variable	Très faible
<b>Sensibilité aux perturbations EM</b>	Faible	Forte	Nulle
<b>Confidentialité</b>	Correcte	Nulle	Elevée
<b>Applications</b>	Réseaux locaux haut débit, vidéo	Mobiles, satellites, hertzien	Haut débit longue distance, réseaux locaux.
<b>Compatibilité avec les nouveaux équipements</b>	Dépassé	Nécessite des améliorations	Compatible

## V. Avantages et inconvénients:

### ▪ Avantages :

Par comparaison aux autres supports de transmission existants, la fibre optique présente de nombreux avantages qui justifient son introduction dans les systèmes de transmission.

- Ces avantages sont, tout d'abord, des avantages en termes de performances de transmission, multiplexage (en longueur d'onde) possible avec une bande passante optique très grande, et donc une grande capacité (débit de plusieurs Tbit/s) n'ayant

aucune commune mesure avec les bandes passantes des supports électriques ou radio classiques.

- De plus, l'atténuation due au support de communication s'avère très faible, ce qui permet de couvrir des distances plus grandes sans nécessité d'installer des répéteurs.
- La fibre optique présente également des avantages de sécurité électrique (isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive et sous forte tension) et électromagnétique. Elle est donc insensible aux parasites électromagnétiques, et n'en créant pas elle-même, elle assure ainsi une inviolabilité presque totale, ce qui permet son utilisation dans les applications militaires, bancaires et en transmission de données.
- Enfin, les facilités de mise en œuvre qu'elle présente, à la fois par sa petite taille, sa grande souplesse et son faible poids, combinés à un coût raisonnable, lui confère un avantage économique sur les autres supports de transmission.
- **Inconvénients :**
  - ✓ Des pertes peuvent être causées par des courbures du câblage, des connecteurs mal positionnés ou sales, des inhomogénéités dans le verre de la fibre.
  - ✓ Difficultés d'adaptation avec les transducteurs optoélectroniques.
  - ✓ Exigences micromécaniques importantes (connexions, alignement).

## VI. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement le système de télécommunication par fibre optique. Tous d'abord nous avons commencé par les différents types de réseaux puis on a expliqué le principe de l'émetteur et celui du récepteur optique.

Après nous avons présenté module de transmission et raison d'être des fibres optiques, la différence entre les supports de transmissions. Enfin, nous avons évoqué les avantages et les inconvénients d'une fibre optique. Au prochain chapitre nous abordons en détaille les fibres optiques sa structure, le principe de propagation dans la fibre et les différents types de fibres optiques.

## *Chapitre II*

### *Les fibres optiques*

## I. Introduction :

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans la transmission de données et de lumière. Elle offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et peut servir de support à un réseau « large bande » par lequel transitent aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. Le principe de la fibre optique a été développé au cours des années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works (actuelle Corning Incorporated).

## II. Principe de fonctionnement d'une fibre optique :

Afin d'assurer une propagation du signal lumineux dans la fibre optique et réduire les pertes certaines conditions s'imposent. Vu que lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à travers l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre sans perte, en empruntant un parcours en zigzag [16].

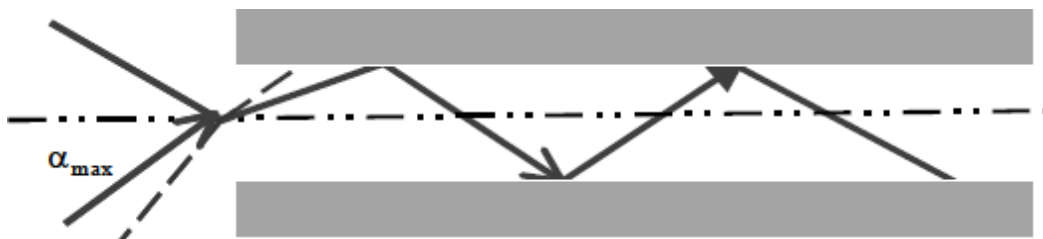


Figure II.1. Guidage de la lumière dans la fibre optique.

### II.1. Principe de la réflexion:

Le principe de la réflexion totale interne est à la base de la propagation des ondes lumineuses dans une fibre optique ; d'après ce principe, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est plus faible, il peut subir une réflexion. De plus, lorsque l'angle d'incidence du rayon lumineux est plus grand que l'angle limite, la lumière est réfléchie totalement et il n'y a aucune perte de lumière.

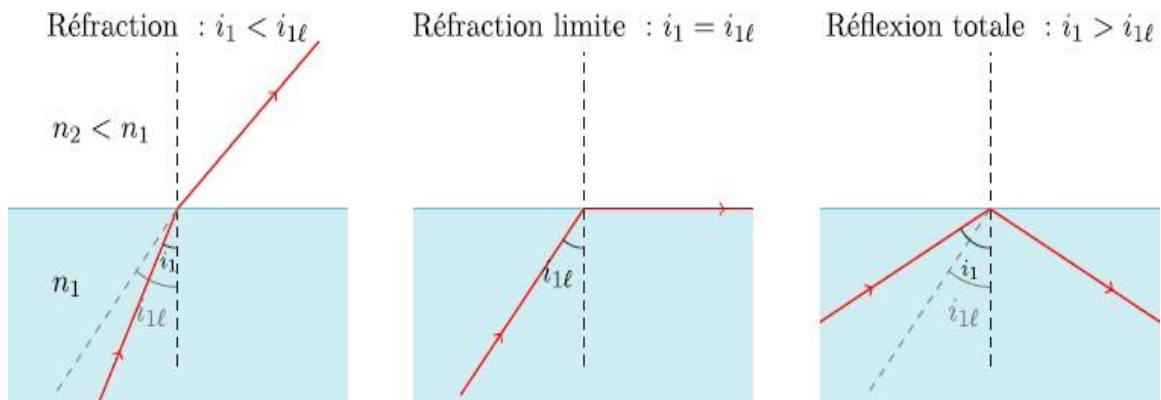


Figure II.2. Phénomène de réflexion totale.

La réflexion totale interne est régie par les indices de réfraction des deux milieux et l'angle limite. Ces paramètres sont reliés par l'équation suivante :

$$\sin i_1 = \frac{n_2}{n_1} \text{ où } n_1 > n_2 \quad \text{II.1}$$

## II.2. Principe de de guidage:

Le principe de guidage de la lumière dans une fibre optique repose sur une suite de réflexions entre deux milieux d'indices de réfraction différents : le cœur central d'indice  $n_{\text{cœur}}$  et la gaine optique d'indice  $n_{\text{gaine}}$ , avec  $n_{\text{cœur}} > n_{\text{gaine}}$ . Cet écart d'indice entre le cœur et la gaine est réalisé en injectant des dopants, tels que [17] :

- ✓ Le germanium et le phosphore qui accroissent l'indice dans le cœur.
- ✓ Le bore et le fluor qui le font décroître dans la gaine.

Or il est connu que lorsqu'un rayon lumineux d'incidence  $\theta_i$  passe d'un milieu d'indice  $n_{\text{cœur}}$  à un milieu d'indice  $n_{\text{gaine}}$ , il est réfracté avec un angle  $\theta_r$  tel que :

$$n_{\text{cœur}} \sin \theta_i = n_{\text{gaine}} \sin \theta_r \quad \text{II.2}$$

## II.3. Ouverture numérique :

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

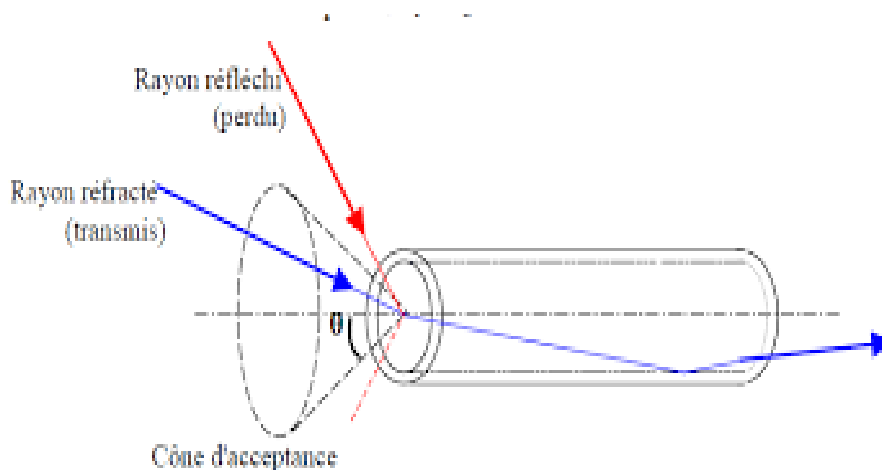
$$\eta_0 \cdot \sin \theta_{0max} = \eta_1 \cdot \sin \theta = \eta_1 \cdot \cos \phi_{min} = \eta_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2} \quad \text{II.3}$$

Une caractéristique très importante des fibres optiques est l'ouverture numérique ON défini par [18]:

$$ON = \sin \theta_{0max} = \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2} = \eta_1 \sqrt{2\Delta} \quad \text{II.4}$$

$$\Delta = \frac{y_1^2 - y_2^2}{2y_1^2} = \frac{y_1 - y_2}{y_1} \quad \text{II.5}$$

Avec  $\Delta$  est la différence d'indice relative.



**Figure II.3. Cône d'acceptance.**

### III. Evolution de la fibre optique :

Graham Bell avait envisagé dès 1880 un système de transmission des sons par rayons lumineux. Pour concrétiser une telle idée, une source de lumière cohérente et un conducteur adapté devaient être conçus.

À la même époque, le géant du verre américain Corning Glass Works voyait ses efforts récompensés en réalisant une fibre optique composée en son cœur de silice « dopée » puis de silice extrêmement pure. L'atténuation limitée à 20 dB/km ouvrait la voie aux transmissions

optiques. À la fin des années 1970, elle atteint même 0,2 dB/km. L'évolution s'accélère avec une nouvelle génération de fibres dites « monomodes » mise en œuvre pour la première fois en France sur la liaison Lannion-Perros en 1983. Dès 1985, le remplacement des anciens câbles coaxiaux par des câbles à fibre optique pour le réseau interurbain français est décidé.

Plus d'un siècle fut nécessaire, le premier laser fonctionnant à température ambiante étant construit par les Bell Labs en 1970. La même année, l'invention de la diode électroluminescente (Light Emitting Diode, LED) par C. A. Burrus offrait une autre solution pour produire une source de lumière utilisable en télécommunications [19].

#### IV. Structure de la fibre optique :

Une fibre optique est un cylindre en verre, qui est constitué d'une partie centrale, le cœur, d'indice de réfraction  $n_{cœur}$ , qui est entourée par une seconde partie, la gaine optique, d'indice de réfraction  $n_{gaine}$  plus faible ( $n_{cœur} > n_{gaine}$ ). Ces deux régions essentielles pour le guidage de la lumière sont réalisées avec deux matériaux différents. La fibre optique est souvent recouverte d'un revêtement protecteur qui n'a aucun rôle dans le guidage de la lumière et le transport de l'information [20].

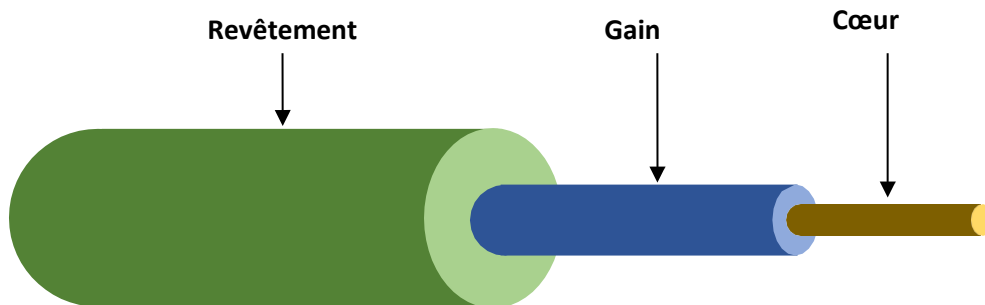


Figure II.4. Structure d'une fibre optique.

Généralement, on fabrique la fibre optique avec 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  $\text{SiO}_2$  [11].

L'indice de réfraction d'un milieu change selon les composants du milieu et il est défini comme étant :

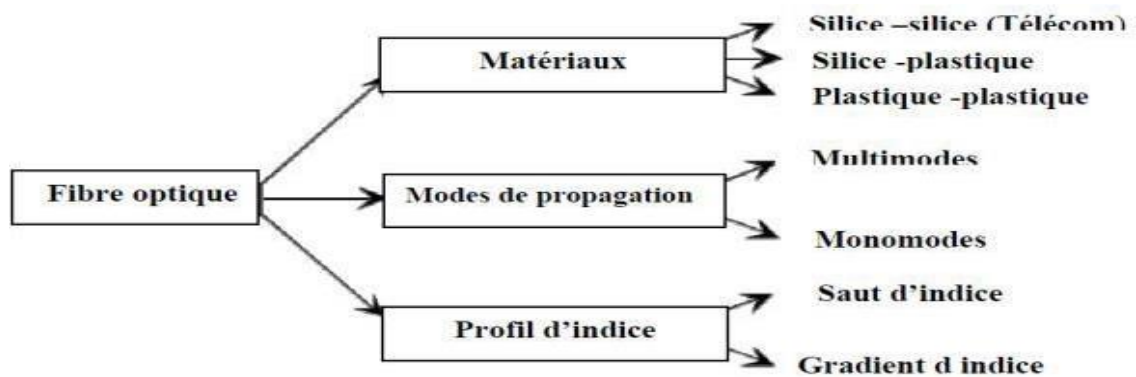
$$\eta = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad \text{II.6}$$

Où

$\epsilon_r$ : La permittivité relative du milieu.

$\mu_r$ : La perméabilité relative du milieu.

Les fibres optiques utilisées en télécommunication sont fabriquées en SiO<sub>2</sub> du fait de son faible coût et de la variation de son indice de réfraction [12].



*Figure II.5. Classification des fibres optiques selon le matériau, le mode de propagation et le profil d'indice.*

## V. Principaux types de fibre optique :

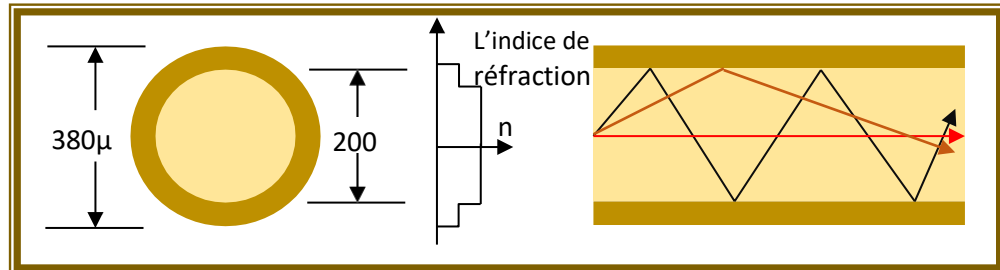
Dans une fibre optique ; un mode correspond à l'un des multiples chemins possibles dans lequel une onde va se propager le long de cette fibre. En fonction du nombre de modes guidés on distingue deux types de fibres : monomodes et multimodes [18].

### V.1. Fibre optique multimode:

Une fibre est dite multimode lorsque plusieurs modes peuvent se propager le long de son axe, cette fibre a été la première utilisée. Elle est limitée en bande passante. Elle existe sous deux formes :

➤ *Saut d'Indice :*

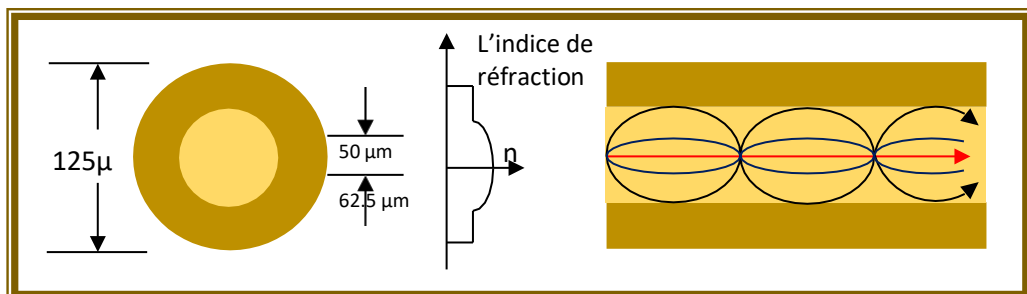
Dans ce type de fibre l'indice de réfraction reste constant dans tout le cœur de la fibre, et à l'interface gaine cœur il décroît brusquement en effectuant un saut d'indice dans gaine [18].



*Figure II.6. Profile d'une fibre optique multimode à saut d'indice.*

➤ *Gradient d'indice :*

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction n'est pas constant dans le cœur ; bien au contraire il décroît graduellement du centre du cœur jusqu'à la limite de la surface qui sépare le cœur et la gaine [18].



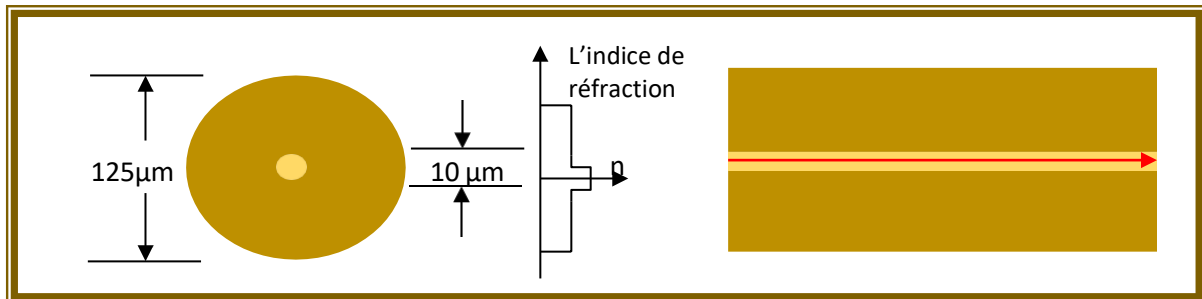
*Figure II.7. Profile d'une fibre optique multimode gradient d'indice.*

## V.2. Fibre optique monomode :

Le but recherché dans cette fibre est que le trajet du faisceau doit être le plus direct possible. Pour cela le diamètre du cœur est réduit fortement qui est dans la plupart des cas inférieur à  $10\mu\text{m}$ . Comme le faisceau lumineux ne casse pas la bande passante est donc augmentée.

La fibre monomode classique est à saut d'indice. Son diamètre permet la propagation d'un seul mode, le fondamental ; comme un seul mode se propage il n'y a pas de différence de vitesse

contrairement aux fibres multimodes. Du fait de ces précieux avantages, elle a pris une ampleur considérable dans les transmissions sur de grandes distances [18].



*Figure II.8. Profil d'une fibre optique monomode.*

## VI. Caractéristiques de la fibre optique :

Les principales caractéristiques des fibres optiques sont l'atténuation, la dispersion chromatique, dispersion intermodal et la biréfringence que nous allons présenter.

### VI.1. L'atténuation :

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. Dans le cas de la silice pure, le minimum théorique d'atténuation devrait descendre à 0.14 dB/km vers  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ . De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les micro courbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour la fibre standard des télécommunications dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement. La figure (II.9) montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications.

Au cours de la propagation dans la fibre, la puissance décroît selon la loi :

$$P(L) = P_{in} \cdot e^{-\alpha L/10}$$

II.7

$P_{in}$  est la puissance qui a été couplée à l'entrée de la fibre

$\alpha$  est le coefficient d'atténuation en Neper/m, cette atténuation  $\alpha$  dépend du matériau et de la longueur d'onde  $\lambda$ .

La mesure d'atténuation spectrale consiste à mesurer l'affaiblissement de la fibre sur une plage de longueurs d'onde.

On a intérêt à transmettre des radiations dont la longueur d'onde est choisie pour obtenir une faible atténuation.

On obtient des valeurs minimales de  $\alpha$  de l'ordre de 0.2 dB.km, alors que pour les premières fibres réalisées dans les années soixante,  $\alpha$  avait des valeurs de 100 dB/km à 1000 dB/km [21].

En comparant avec des autres supports de transmission comme le cuivre, l'atténuation de la fibre optique est faible, elle dépend en particulier de la longueur d'onde des impulsions lumineuses.

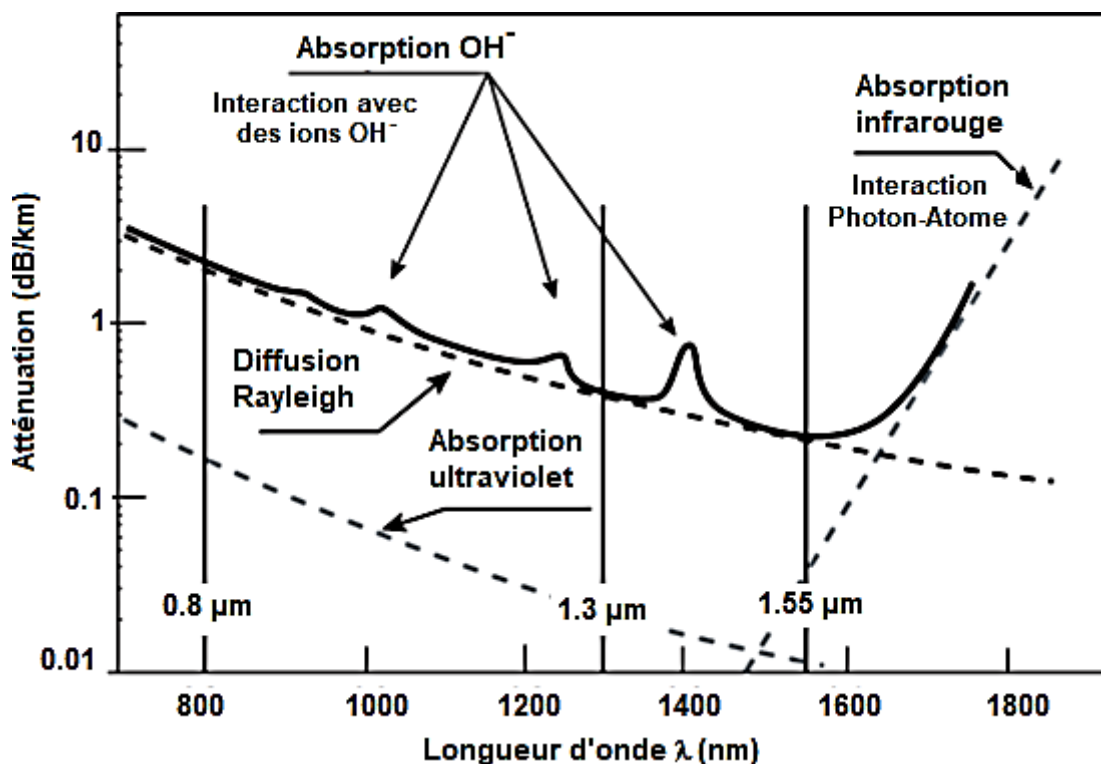


Figure II.9. Pertes optiques dans une fibre standard.

L'atténuation spectrale consiste à mesurer l'affaiblissement de la fibre sur une plage de longueurs d'ondes.

- Diffusion de Rayleigh : Ce sont des pertes inévitables que l'on retrouve dans toutes les fibres. Dans les fibres dites de bonne qualité, la diffusion de Rayleigh est proportionnelle à  $1/\lambda^4$  [16].
- L'absorption par les ions OH<sup>-</sup> : principalement présents dans les fibres optiques, les ions hydroxyles peuvent, en fonction de leur concentration, créer une absorption supplémentaire significative autour de la longueur d'onde de 1,38  $\mu\text{m}$ .

On remarque un pic d'absorption autour de 1,37  $\mu\text{m}$  lié à la présence d'ions OH<sup>-</sup> et le minimum d'atténuation autour de 1,55  $\mu\text{m}$ . 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. Pour compenser les pertes de propagation, des amplificateurs optiques sont implantés régulièrement dans les liaisons optiques. L'espacement entre amplificateurs optiques est typiquement compris entre 40 et 100 km selon le type de liaison. L'introduction d'amplificateurs optiques dans la liaison ajoute du bruit aussi bien qu'il amplifié le signal [16].

## **VI. 2. Pertes extrinsèques :**

Les pertes extrinsèques sont des pertes dues aux conditions d'utilisation et de fabrication des fibres. Il y a principalement deux types de pertes : celles qui sont dues à la pose de la fibre (courbures et micro courbures) et celles qui sont dues à la nécessité de raccorder plusieurs fibres pour couvrir de longues distances [18].

- **Les pertes par courbure :**

Lorsqu'on courbe la fibre, une partie de l'énergie lumineuse peut échapper au se perdre dans la gaine. Ce phénomène s'appelle pertes par courbure [18].

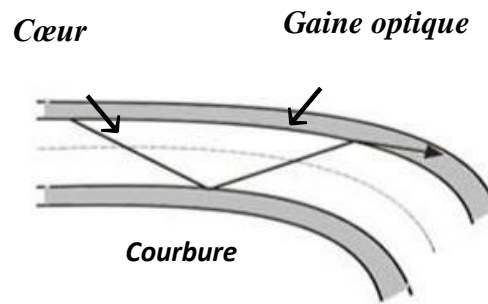


Figure II.10. Perte par courbure.

- **Les pertes par micro-courbure :**

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

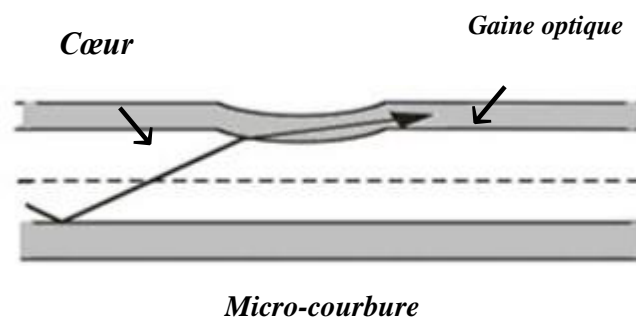


Figure II.11. Perte par micro-courbure.

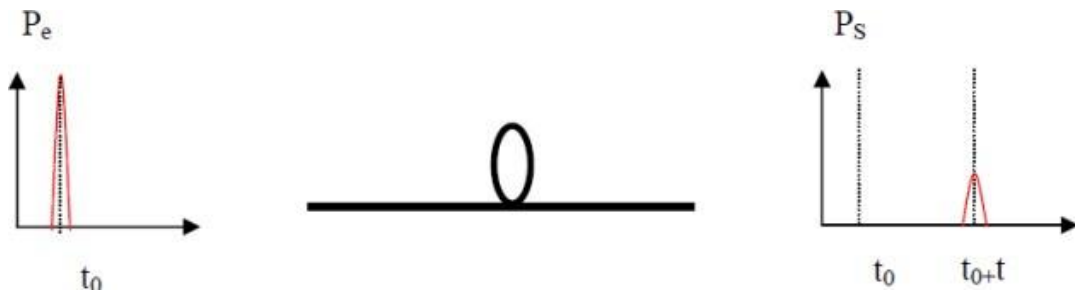
Elles Apparaissent lors de la fabrication des câbles lorsque des contraintes mécaniques provoquent des microdéformations de la fibre, entraînant des pertes de lumière. Elles sont à peu près indépendantes de la longueur d'onde. Ces pertes dépendent aussi bien de la fibre elle-même que du revêtement. Elles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

L'atténuation dans une fibre optique peut donc avoir plusieurs origines.

- ✓ L'hétérogénéité de la silice.
- ✓ L'absorption moléculaire.
- ✓ Le rayonnement des courbures.
- ✓ Les pertes dues au raccordement des épissures et aux connecteurs.
- ✓ Les pertes de couplage entre la fibre et les équipements connectés.
- ✓ La diffusion due aux irrégularités de l'interface cœur-gaine [18].

**VI. 3. Dispersion :**

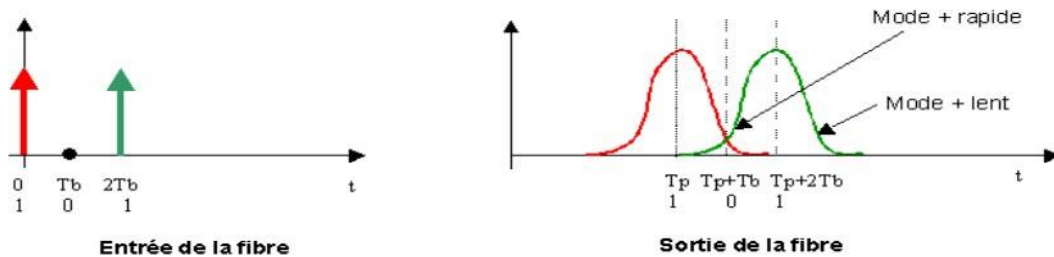
La dispersion d'un signal optique se manifeste par une distorsion du signal, causant ainsi un élargissement d'impulsions au cours de leurs propagations dans la fibre optique [22].



*Figure II.12. Propagation d'une impulsion le long d'une fibre optique.*

**VI.3. 1. Dispersion intermodale :**

A l'entrée de la fibre optique, on envoie une impulsion lumineuse infiniment étroite. Cette impulsion excite tous les modes de propagation de la fibre ( $0 < \theta_n < \theta_L$ ). A la sortie de la fibre, on constate que l'impulsion s'est élargie dans le domaine temporel (Figure II.13).



*Figure II.13. Le phénomène de dispersion intermodale.*

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

$$D_i = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{\tau}{L} \text{ (ps/km)} \tag{II.8}$$

Avec  $t_{max}$  et  $t_{min}$  respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide. Dans une fibre à saut d'indice, le rayon le plus rapide est celui dont le trajet est parallèle à l'axe de la fibre. Ce rayon est associé à l'angle  $\theta$  égale à 0 et au mode appelé (mode fondamental). De même, le rayon le plus lent fait un angle  $\theta_{max}$  par rapport à l'axe de la fibre avec  $\theta_{max}$  défini par :

$$\theta_{max} = \arcsin \left( \frac{\sqrt{y_1^2 - y^2}}{y_1} \right) \quad \text{II.9}$$

$$r = t_{max} - t_{min} = \eta_1 \cdot t_{min} \Delta \quad \text{II.10}$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad \text{II.11}$$

Le plus court chemin est sur l'axe optique:

$$\Delta r = r_{max} - r_{min} = \frac{n_1 L}{C} \left[ \frac{n_1}{n_2} - 1 \right] \quad \text{II.12}$$

Ainsi:

$$\Delta r = \frac{\Delta n \cdot L \cdot n_1}{C \cdot n_2} \Rightarrow \Delta r \approx \frac{\Delta n \cdot L}{C} \text{ Avec } \frac{n_c}{n_g} \approx 1 \quad \text{II.13}$$

Différence relative d'indice. Finalement on exprime la dispersion intermodale par :

$$D_i = \frac{\eta_1 \cdot \Delta}{c} \quad \text{II.14}$$

L'obtention d'une dispersion intermodale réduite se fait en minimisant  $\Delta$  ou en utilisant une fibre à gradient d'indice. En effet, dans ce cas-là, l'indice de réfraction  $\eta_1$  du cœur décroît avec le rayon de celui-ci de sorte que les rayons axiaux (à trajet court) voient un indice élevé (leur vitesse  $c/\eta$  est alors réduite) tandis que les rayons périphériques (à trajet long) voient un indice plus bas.

Dans le cas d'une fibre optique monomode, cette dispersion est nulle et ne sera donc pas prise en compte [23].

### VI.3.2. La dispersion chromatique :

La dispersion chromatique est un phénomène qui entraîne l'élargissement temporel de ces impulsions du fait des différentes vitesses de propagation dans la fibre. Les impulsions risquent alors de se mélanger avec leurs voisines et provoquer ainsi des erreurs à la détection. La dispersion chromatique devient donc rapidement un facteur limitant pour les transmissions haut débit.

En fait, la dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme du au guidage de l'onde (dispersion modale) [24].

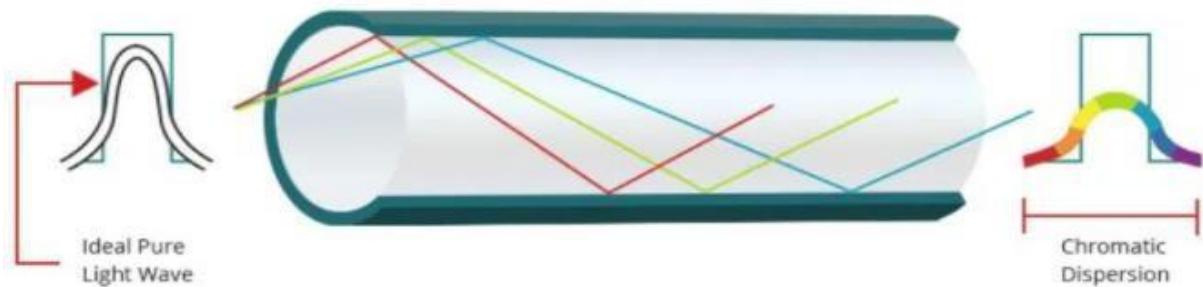


Figure II.14. Impact de la dispersion chromatique sur un signal optique.

#### VI.3.2.1. Paramètre de la dispersion chromatique :

La dispersion du matériau peut se calculer à l'aide de la loi d'évolution d'indice par exemple la loi de Sellmeier (Eq. II.15). Dans cette relation,  $\lambda$  est exprimé en micromètres.

$$\eta^2(\lambda) = 1 + \frac{G_1\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{G_2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{G_3\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} \quad \text{II.15}$$

Avec les coefficients de sellmeier:

$G$  : forces d'oscillateur des transitions.

$\lambda_k^2$  : places des énergies respectives de transition.

$\lambda$  : la longueur d'onde incident.

$\eta$  : L'indice de réfraction.

Lorsque l'onde est bien confinée dans le cœur (courtes longueurs d'onde), sa constante de propagation est proche de celle correspondant à l'indice de réfraction du cœur. Quand l'onde

est peu confinée (grandes longueurs d'onde), une part importante de l'énergie se propage dans la gaine et la constante de propagation du mode diminue en se rapprochant de celle correspondant à l'indice de la gaine (Figure II.15).

De par la définition de l'indice de réfraction, ceci signifie que la source lumineuse utilisée n'est jamais parfaitement monochromatique, chaque composante de fréquence différente se propage à une vitesse différente. Dès lors les impulsions lumineuses constituant l'information à transmettre se déforment en cours de propagation [18].

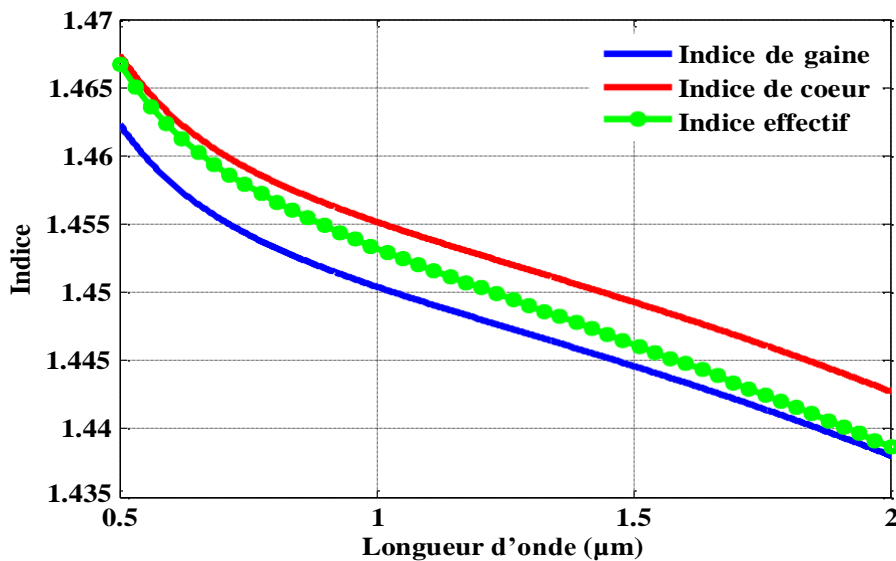


Figure II.15. Variation de l'indice effectif  $\eta_{eff}$ , l'indice de gaine et l'indice de cœur avec la longueur d'onde.

On peut alors définir la vitesse de phase (Eq. II.16), qui est la vitesse à laquelle se propagent les fronts d'onde.

$$v_{\phi}(\lambda) = \frac{c}{\eta_{eff}(\lambda)} = \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad \text{II.16}$$

Avec  $\omega = 2\pi c/\lambda$ , la pulsation de l'onde, et  $\lambda$  la longueur d'onde dans le vide.  $\eta_{eff}(\lambda)$  désigne l'indice effectif du mode à la longueur d'onde  $\lambda$ , et  $\beta(\omega)$  désigne la constante de propagation associé par :

$$\beta = 2\pi\eta_{eff}/\lambda \tag{II.17}$$

On peut également définir la vitesse de groupe (Eq. II.18) qui désigne la vitesse à laquelle se propage l'enveloppe de l'onde.

$$v_g(\lambda) = \frac{c}{N_g(\lambda)} = \frac{d\omega}{d\beta} \tag{II.18}$$

Avec  $N_g(\lambda)$  l'indice de groupe défini par :

$$N_g(\lambda) = \eta_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{d\eta_{eff}}{d\lambda} \tag{II.19}$$

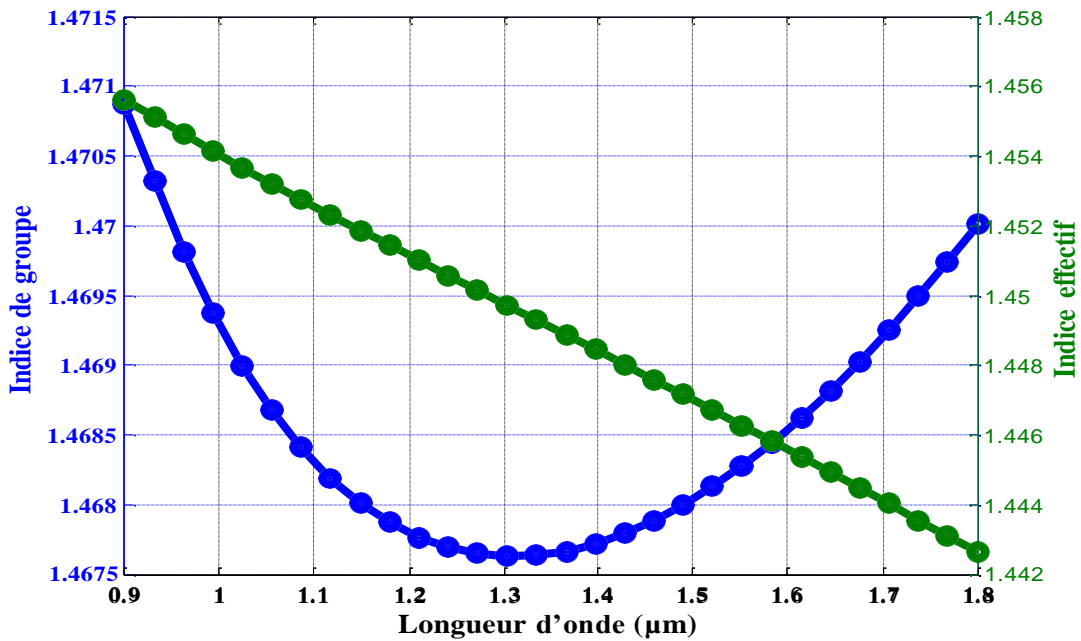


Figure II.16. Variation de l'indice effectif  $\eta_{eff}$  et de l'indice de groupe  $N_g$  avec la longueur d'onde pour la silice.

Il peut être utile également de définir la notion de temps de groupe (Eq. II.20). Le temps de groupe représente le temps de propagation de l'enveloppe d'une impulsion lumineuse.

$$r(\lambda) = \frac{L}{v_g(\lambda)} = L \frac{d\beta}{d\omega} \quad \text{II.20}$$

La dispersion chromatique n'est autre que la variation du temps de groupe en fonction de la longueur d'onde rapportée à la longueur L de fibre parcourue.

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \frac{dr(\lambda)}{d\lambda} \quad \text{II.21}$$

Lorsque  $D > 0$ , les longueurs d'ondes les plus courtes se propagent plus rapidement que les longueurs d'ondes les plus grandes. On parle de régime de propagation anomal, en opposition au régime normal (ou  $D < 0$ ).

On obtient l'expression de la dispersion chromatique qui est déterminée par la variation de l'indice effectif de groupe en fonction de la longueur d'onde (Figure II.16) :

$$D(\lambda) = \frac{1}{c} \frac{dN_g(\lambda)}{d\lambda} = \frac{1}{c} \frac{d}{d\lambda} \left( n_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{eff}}{d\lambda} \right) \quad \text{II.22}$$

Il vient immédiatement

$$D(\lambda) = \frac{-\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \quad \text{II.23}$$

En réécrivant l'indice effectif en fonction des indices de cœur et de gaine, et du paramètre de guidage normalisé :

$$n_{eff} = (n_{cœur} - n_{gaine})b + n_{gaine} \quad \text{II.24}$$

Dans le cas d'une fibre optique standard la dispersion chromatique peut s'écrire sous la forme suivante :

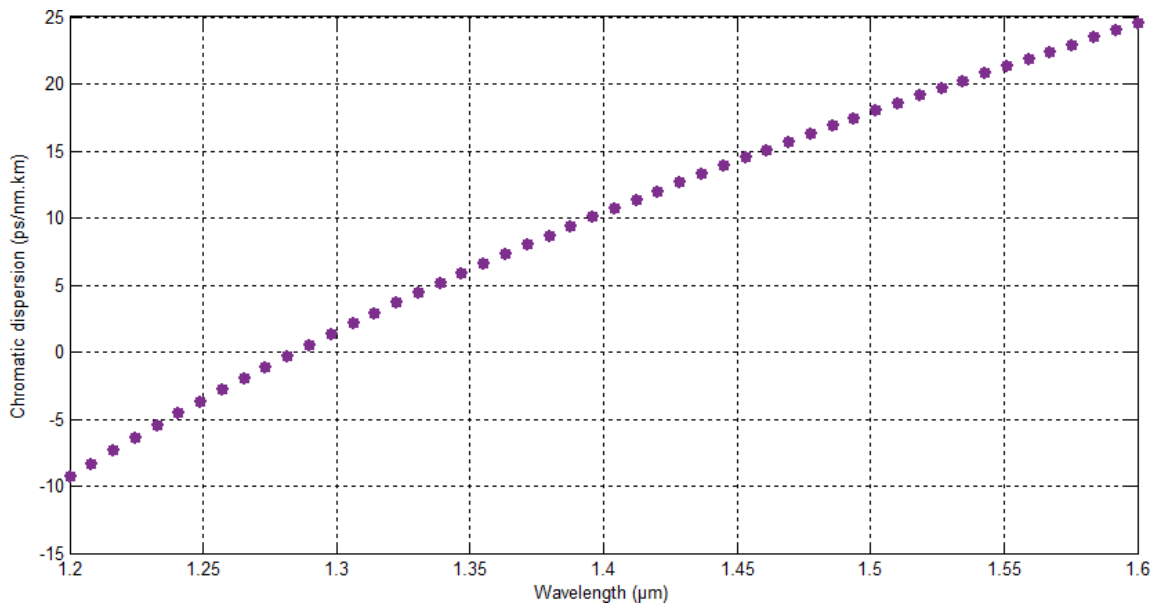
$$D(\lambda) = \frac{-\lambda}{c} \frac{d^2 n_{gaine}}{d\lambda^2} - \frac{\Delta n}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad \text{II.25}$$

$\Delta n = n_{cœur} - n_{gaine}$  Désigne la différence d'indice de cœur et de la gaine [18].

**VI.3.3. La dispersion du matériau :**

Le premier terme de dispersion (Eq. II.26) vient de la dépendance en longueur d'onde (en fréquence) de l'indice de réfraction. Cette dispersion se traduit par une variation de  $\eta_{eff}$  et  $N_g$  avec la longueur d'onde [25].

$$D_m(\lambda) = \frac{-\lambda}{c} \frac{d^2 \eta_{gain}}{d\lambda^2} \tag{II.26}$$



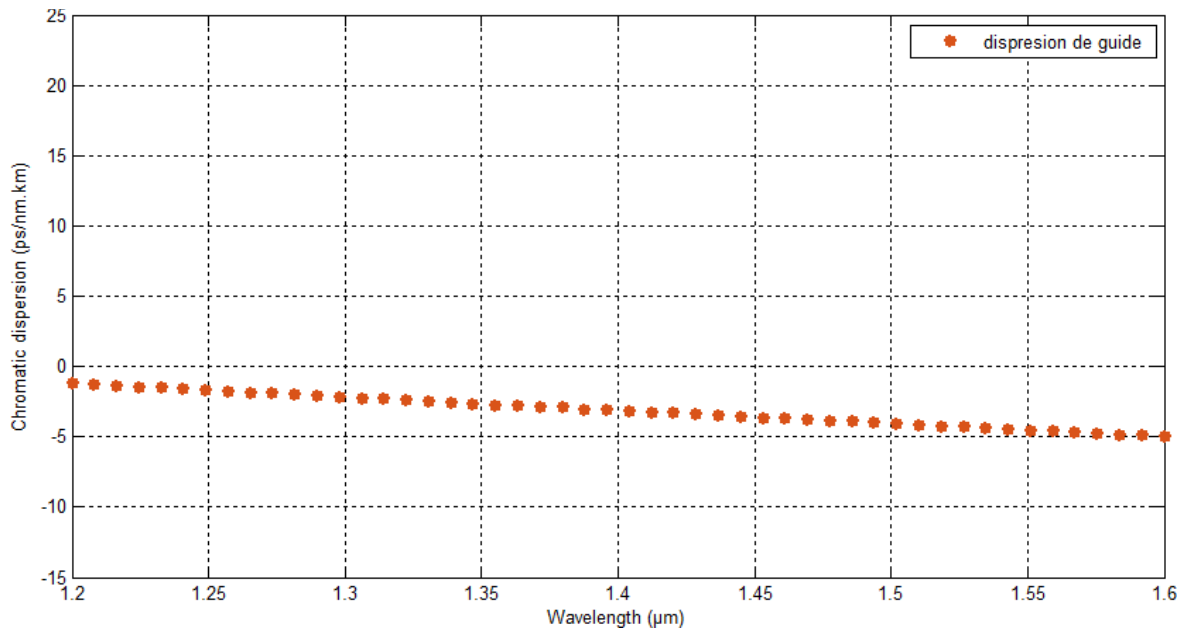
**Figure II.17. La dispersion du matériau.**

La dispersion du matériau correspondant est représentée sur la figure II.17. La dispersion de la silice est une fonction continûment croissante. Elle est fortement négative aux courtes longueurs d'onde car la courbure de l'indice est significative dans cette zone spectrale. Elle s'annule pour  $\lambda = 1,27\mu m$ . A  $1,55\mu m$ , elle vaut  $22 ps/(Km.nm)$ .

**VI.3.4. Dispersion de guide :**

Le deuxième terme de dispersion (Eq. II .27) provient de la dispersion de guide. Son origine s'explique par la dépendance de V en fonction de la longueur d'onde [25].

$$D_g(\lambda) = -\frac{\Delta \eta}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \tag{II.27}$$

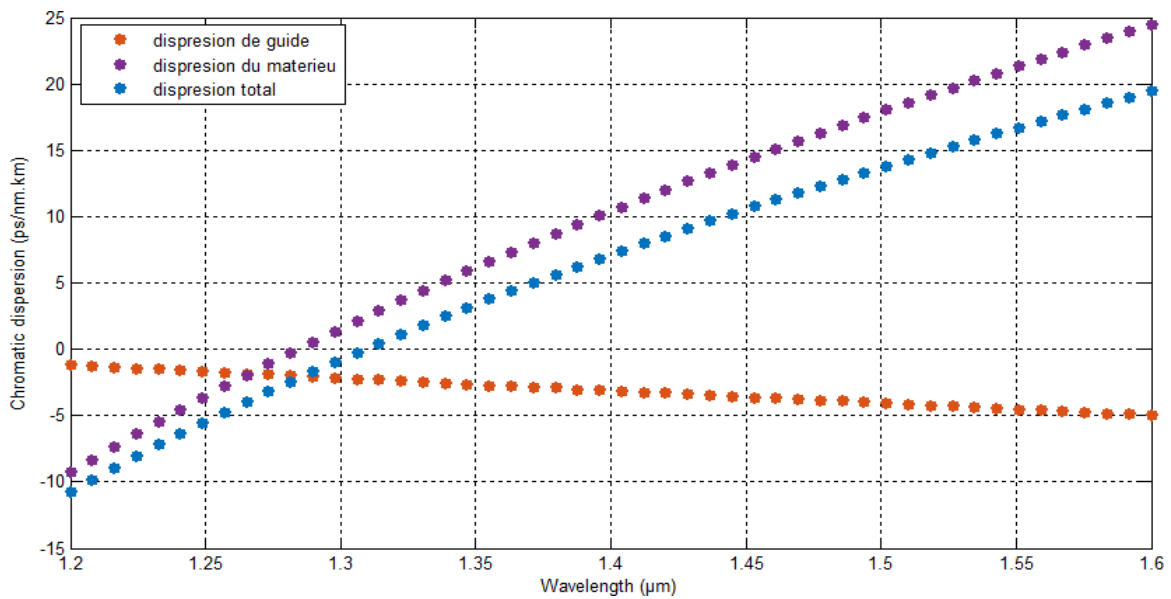


**Figure II.18. La dispersion de guide.**

Ont représenté sur la figure II.19 la dispersion de la silice (déjà présentée) ( $D_m$ ), la dispersion du guide pour le mode fondamental d'une fibre standard monomode G.652 ( $D_g$ ), et la dispersion chromatique ( $D$ ) de ce mode correspondant à la somme des deux premières.

La dispersion du guide légèrement négative fait que la longueur d'onde d'annulation de la dispersion chromatique ( $1,3\mu m$ ) est légèrement supérieure à la longueur d'annulation de la dispersion du matériau ( $1,27\mu m$ ), donc la capacité de transmission est la plus grande possible pour cette longueur d'onde.

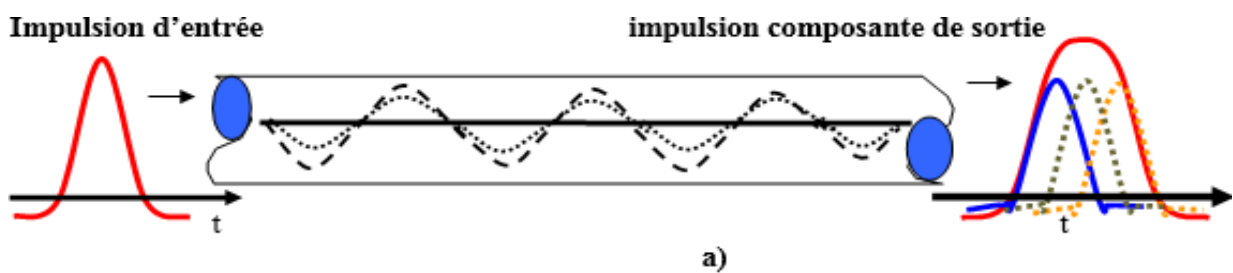
Elle est donc idéale pour cette fenêtre spectrale et permet de transporter de très hauts débits. Malheureusement, ce n'est pas là que l'atténuation est la plus faible. Dans la fenêtre de plus faible atténuation des fibres, à  $1,55\mu m$ , la dispersion chromatique du mode fondamentale d'une fibre en régime monomode est typiquement de  $17 ps/Km.nm$ .



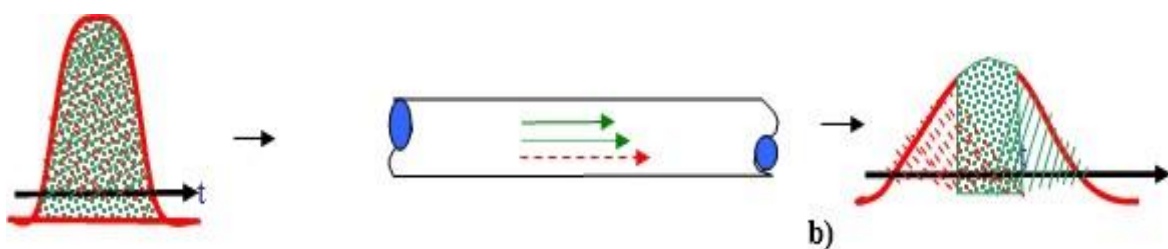
*Figure II.19. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique  
D'une fibre monomode.*

**VII. L'effet de la dispersion intermodale et chromatique sur la transmission optique :**

Cet effet est illustré par les figures II.20 et II.21 mettant en évidence, comment les différents comportements des composantes de l'impulsion déterminent la distorsion de celle-ci en réception.

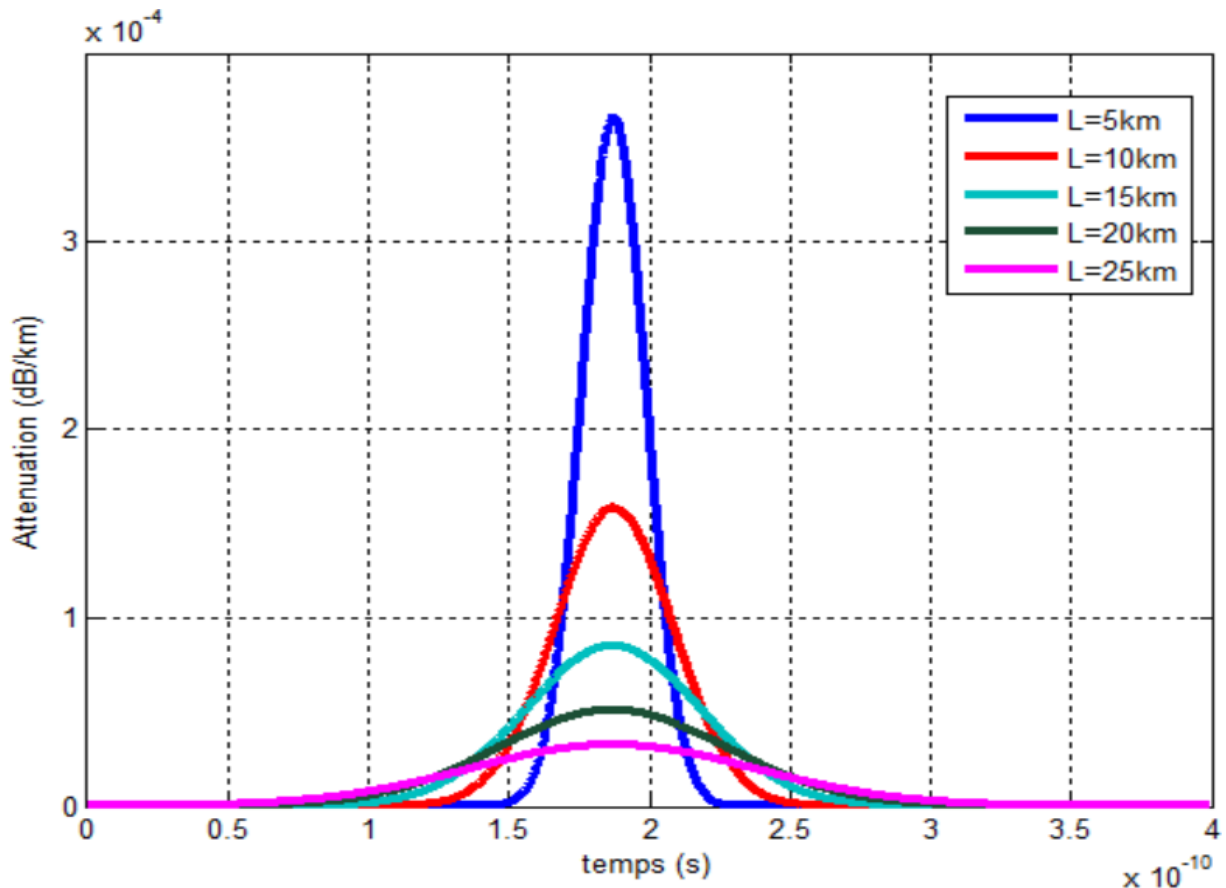


*Figure II.20. Dispersion intermodale.*



*Figure II.21. Dispersion chromatique.*

- a) L'impulsion en réception est la somme des impulsions composantes qui se propagent en temps différents (parcours différents).
- b) Propagation avec des vitesses différentes, des différentes composantes du signal de longueurs d'ondes diverses [23].



**Figure II.22. L'effets de l'atténuation et la dispersion sur la transmission.**

La figure II.22 illustre l'étalement et l'atténuation d'une impulsion gaussienne pour de différente longueur de fibre. Le calcul de l'étalement est effectué pour une fibre optique travaillant à la longueur d'onde de 1550 nm, pour laquelle l'atténuation et la dispersion chromatique vaut respectivement 0.2 dB/km et 17 ps/km.nm.

Sur la figure II.22, nous vérifions que plus la longueur de la fibre et long plus l'atténuation et l'étalement subi lors de la propagation est important.

### VIII. Les fenêtres utilisées dans les télécommunications optiques :

La fibre en silice (Si), actuellement utilisée pour les télécommunications optiques, présentes trois bandes d'intérêts appelées fenêtres optiques :

- **0.85  $\mu\text{m}$  (première fenêtre optique) :**
  - Composants électro-optiques bon marché.
  - Transport d'informations sur de courtes distances (5 Km pour une perte par absorption de 90% du signal et grande dispersion  $>25 \text{ ps}^2/\text{Km}$ ).
- **1.31  $\mu\text{m}$  (deuxième fenêtre optique) :**
  - Réseau de communication standard (80 Km).
  - Dispersion nulle dans la fibre.
  - WDM (multiplexage en longueur d'onde).
- **1.55  $\mu\text{m}$  (troisième fenêtre optique) :**
  - Réseau de communication longue distance (105 km avec une dispersion de  $(-20 \text{ ps}^2/\text{km})$ ).
  - Amplificateur optique à fibre dopée en erbium.
  - DWDM (WDM dense).

Les fenêtres 1 et 2 résultent d'un compromis technico-économique entre l'atténuation apportée par la fibre et les composants optoélectroniques utilisés en fonction des applications.

La fenêtre 3 correspond à l'atténuation minimale mais exige des composants optoélectronique très performants, elle est réservée aux applications à haut débit et longues distances[22].

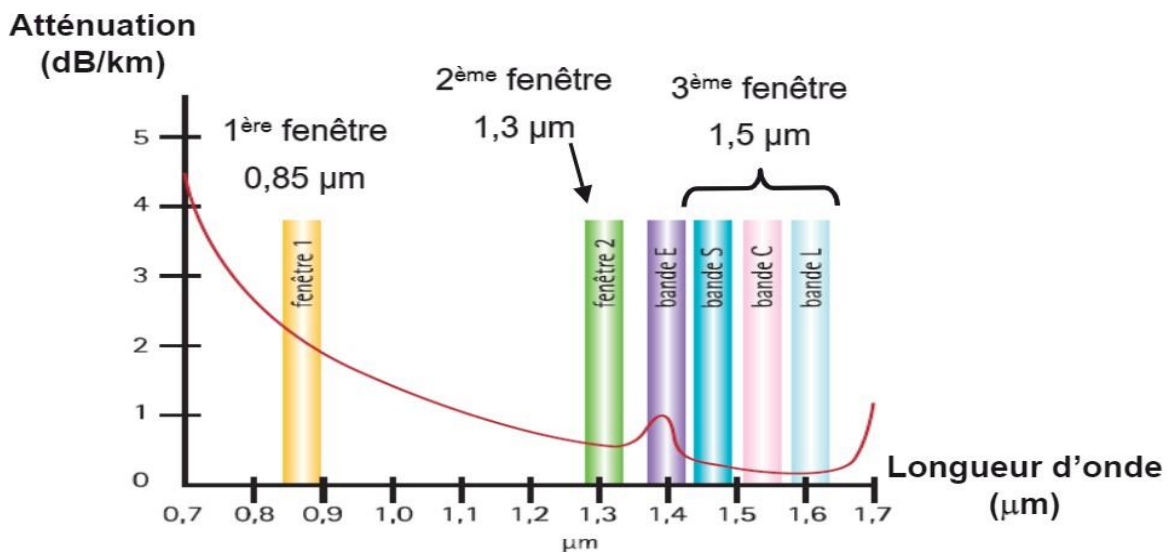


Figure II.23. Fenêtres de transmission des fibres en silice.

### IX. La biréfringence :

Une fibre non biréfringente est dite isotrope et présente un profil d'indice à symétrie de révolution. Dans une telle fibre, le mode fondamental se propage à la même vitesse quel que soit son état de polarisation. Il n'existe donc qu'une seule valeur d'indice effectif pour tous les modes ayant une répartition énergétique transverse donnée. Dans une fibre biréfringente il est possible de diviser la coupe transverse du guide en deux directions principales synthétisant les axes propres du guide (axe ordinaire et extraordinaire).

L'indice effectif des modes dépend alors de leur état de polarisation. Un mode possédant une répartition énergétique transverse donnée peut alors se décomposer en deux autres, appelés modes propres de la fibre. Les directions de polarisation sont alors orientées suivant les axes propres de la fibre. L'axe rapide est caractérisé par une vitesse de phase du mode la plus élevée. L'autre axe est dit lent (figure II.24).

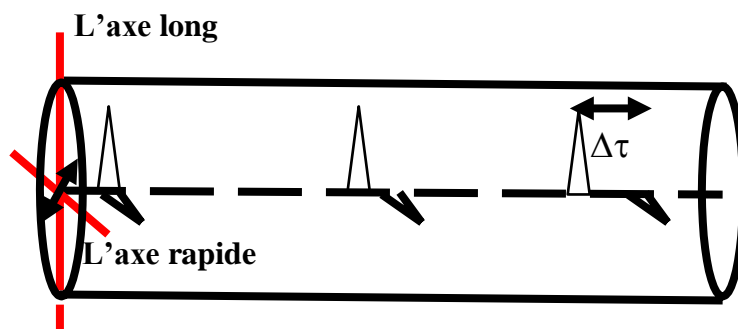


Figure II.24. La division de l'impulsion due à la biréfringence.

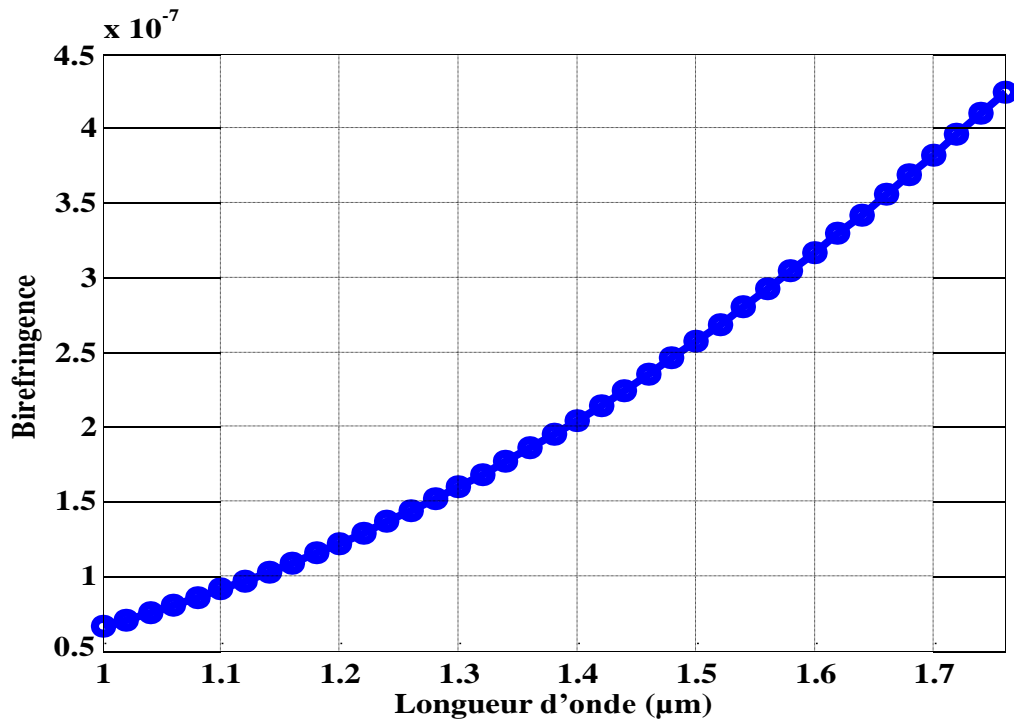
La biréfringence de phase est définie comme la différence entre les constantes de propagation des deux états de polarisation  $\beta_y$  et  $\beta_x$ , elle est traditionnellement notée  $B_\phi$ . Elle peut s'exprimer en fonction des indices effectifs,  $n_{eff,y}$  et  $n_{eff,x}$ , vus par les champs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

$$B_\phi = \frac{|\beta_y - \beta_x|}{k_0} = |n_{eff,y} - n_{eff,x}| \quad \text{II.28}$$

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

La figure II.25 représente l'évolution de la biréfringence de phase d'une fibre monomode standard pour une plage de longueurs d'onde allant de 1000 à 1750 nm. Cette courbe indique la différence entre les indices effectifs des deux états de polarisation du mode fondamental.

Nous constatons que  $B_\varphi$  varie de  $6.64 \cdot 10^{-8}$  à  $4.24 \cdot 10^{-7}$ , en passant par une valeur de  $2,92 \cdot 10^{-7}$  à 1550 nm.

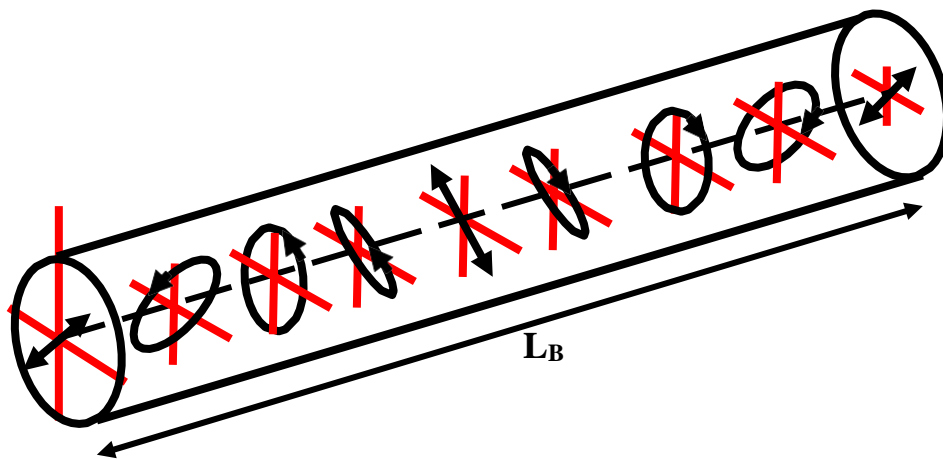


*Figure II.25. Evolution de la biréfringence du mode fondamental.*

Dans une fibre, la longueur de propagation nécessaire pour qu'une onde retrouve son état de polarisation initial est la longueur de battement (Figure II.25) qui vaut :

$$L_B = \frac{\lambda}{B_\varphi} \quad \text{II.29}$$

L'anisotropie d'une fibre qui induit la levée de la dégénérescence des deux modes de polarisation et l'apparition de la biréfringence peut avoir deux causes intrinsèques. La première réside dans la rupture, volontaire ou non, de la symétrie radiale de la fibre. La deuxième est l'existence éventuelle de contraintes anisotropes au sein du matériau constitutif de la fibre. Ces contraintes ont pu apparaître contre la volonté des fabricants lors des étapes de fabrication ou, au contraire, être introduites délibérément en vue d'augmenter la biréfringence pour des raisons que nous allons rappeler maintenant.



*Figure II.26. Le changement de l'état de polarisation de la lumière provoqué par la biréfringence dans une fibre optique.*

Lorsque la longueur de battement  $L_B$  est de l'ordre de grandeur de la période spatiale  $l_B$  des perturbations subies par la fibre, l'état de polarisation du signal injecté change au cours de sa propagation le long de la fibre. Pour maintenir un état de polarisation donné, il faut choisir une fibre avec  $L_B$  très différente de  $l_B$  qui est de l'ordre d'une dizaine de centimètres. C'est la raison pour laquelle ont été conçues des fibres avec une très courte longueur de battement (moins de 1 cm), c'est-à-dire des fibres hautement biréfringentes, dans une telle fibre, la lumière polarisée rectilignement injectée suivant un axe neutre de la fibre conserve son état de polarisation au cours de la propagation.

La biréfringence renseigne donc sur la capacité d'une fibre à maintenir un état de polarisation injecté mais elle est aussi à l'origine de la dispersion modale de polarisation appelée communément PMD (Polarisation Mode Dispersion) [26].

## X. Multiplexage optique :

Multiplexage optique Cette partie répond à la question de savoir comment exploiter les dizaines de Téra hertz de bande passante spectrale disponibles dans la fibre optique.

La technique générale utilisée est le multiplexage dans le domaine optique, ce qui signifie que la capacité de la fibre est divisée par des moyens optiques en plusieurs canaux accessibles individuellement et indépendamment. La division de la bande passante en canaux peut être réalisée, comme en électronique, dans la dimension temporelle ou dans la dimension des fréquences (ou longueurs d'onde). Dans le premier cas, on parle de multiplexage temporel (Time-Division Multiplexing, TDM) et dans le second de multiplexage en longueur d'onde (Wavelength-Division Multiplexing, WDM) [26].

### X.1. Multiplexage temporel (TDM) :

Le multiplexage TDM consiste à imbriquer temporellement différents canaux de communication en trames successives. Si l'on se représente un flot d'information par les dents d'un peigne, le multiplexage temporel revient à superposer les peignes des différents canaux en les décalant les uns par rapport aux autres. Cela nécessite une synchronisation précise. À la réception, chaque canal temporel est démultiplexé puis acheminé vers sa destination. On peut réaliser électroniquement les fonctions de multiplexage/démultiplexage temporels avec des circuits intégrés ultra-rapides (40 Gbits/s en laboratoire). Toutefois, le coût prohibitif de ces circuits pour les très hauts débits suggère d'effectuer le multiplexage temporel par des moyens purement optiques, une voie actuellement explorée [27].

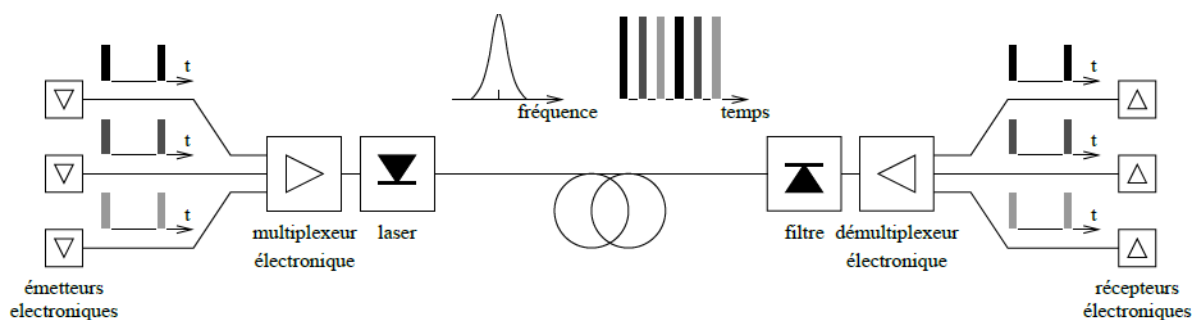


Figure II.27. Multiplexage temporel TDM.

## X.2. Multiplexage en longueur d'onde (WDM) :

Le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength-Division Multiplexing, WDM) est une technique de multiplexage qui peut se superposer à la précédente. Le principe est le même que celui du multiplexage en fréquences (Frequency-Division Multiplexing, FDM) dans les transmissions électriques. Plusieurs signaux sont générés simultanément sur des fréquences optiques (ou longueurs d'onde) différentes et peuvent être modulés individuellement. Le multiplexage WDM est une approche qui permet de gérer l'importante discordance optoélectronique en termes de bande passante. Le spectre optique d'une fibre est découpé en un certain nombre d'intervalles de longueurs d'onde (ou fréquences) distincts, dans les régions de faible atténuation, de telle sorte que chaque intervalle supporte un canal de communication transmettant au débit désiré, par exemple celui de l'électronique. Ainsi, en autorisant la coexistence de plusieurs canaux WDM sur une même fibre, l'énorme bande passante optique peut être exploitée, en permettant aux équipements d'accéder au réseau haut débit de l'électronique seulement. Les canaux WDM sont accessibles par des émetteurs laser réglés sur des longueurs d'onde spécifiques. Le multiplexage et le démultiplexage en longueur d'onde sont effectués par des composants optiques passifs, de façon similaire à la décomposition et recombinaison des couleurs de l'arc-en-ciel par un prisme [27].

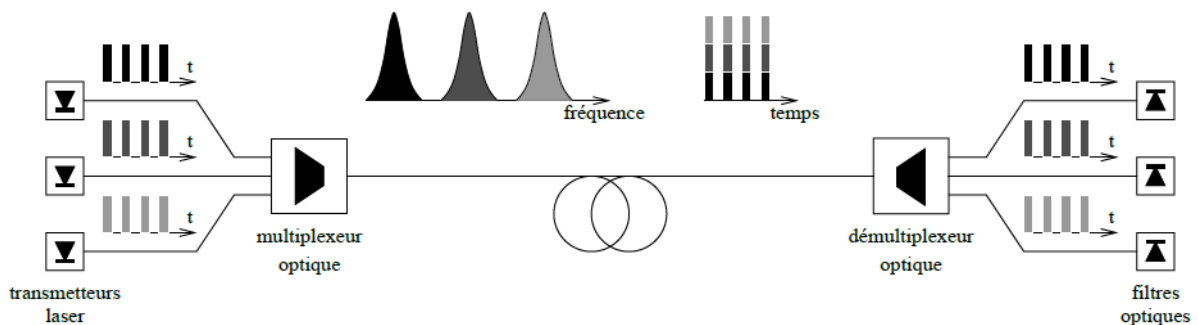


Figure II.28. Multiplexage en longueur d'onde WDM.

### **X.3. Comparaison entre TDM et WDM :**

Au premier abord, on pourrait penser que les deux approches de multiplexage optique TDM et WDM sont semblables. Elles le sont au niveau formel puisqu'elles permettent la superposition sur le même support physique de transmission de plusieurs canaux de communication, identifiables selon leur décalage temporel pour TDM et selon leur longueur d'onde pour WDM.

Cependant, au niveau technologique l'approche TDM présente des inconvénients significatifs par rapport à l'approche WDM.

En premier lieu, les canaux TDM ne sont pas transparents pour le débit de modulation ni pour le type de modulation. Ils sont uniquement modulables numériquement en amplitude et leur débit est imposé par le multiplexeur temporel. A l'inverse, chaque canal WDM peut être modulé individuellement, numériquement ou analogiquement, en amplitude ou en phase. Le débit de chaque canal WDM peut en outre être choisi arbitrairement, du moment que les signaux ne se recouvrent pas spectralement. Il en résulte une plus grande flexibilité.

Une autre caractéristique désavantageuse du multiplexage optique TDM provient du très haut débit du signal multiplexé, qui résulte de l'agrégation des canaux entrelacés temporellement. Cette conséquence inhérente au multiplexage temporel constitue un inconvénient majeur pour les systèmes de transmission optiques, lorsque le signal multiplexé se met à couvrir des dizaines de gigahertz. Le traitement électronique constitue alors un frein aux opérations de multiplexage et démultiplexage temporels, alors que l'approche WDM effectue celles-ci optiquement et passivement.

De plus, le phénomène de dispersion limite d'autant plus la propagation du signal TDM multiplexé que son débit est important. Les débits moindres de chaque canal WDM permettent d'éviter ce problème.

Enfin, l'approche TDM souffre d'un manque d'extensibilité. L'addition d'un nouveau canal TDM nécessite une modification des décalages temporels et une resynchronisation de tous les canaux déjà existants. Inversement, l'indépendance des canaux WDM autorise la création d'un nouveau canal simplement par l'ajout d'un émetteur laser et d'un filtre optique appropriés, sans affecter les autres canaux.

En conclusion, l'approche WDM s'avère la technique de multiplexage préférentielle pour les systèmes de transmission optiques, en raison de la transparence, de la flexibilité et de l'extensibilité des canaux WDM [27].

## **XI. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous essayons de montrer que l'élément essentiel d'une liaison optique est la fibre qui est constituée de matériaux isotropes (verres), disposés en plusieurs couches avec des indices de réfraction différents. Le cœur de la fibre, qui a un indice de réfraction plus fort que la gaine, piège la lumière ou un rayon lumineux lancé dans ce milieu subit une réflexion totale chaque fois qu'il touche l'interface cœur-gaine.

Tout d'abord Nous avons présenté le principe de fonctionnement de la fibre, et les différents types de fibres optiques et ses caractéristiques représenté par l'atténuation et la dispersion et ses types et la biréfringence. Comme nous en avons abordé les Techniques de Multiplexage.

La fibre optique considéré comme des qualités non négligeables comme support de transmission de l'information, qui lui ont permis de s'imposer dans les réseaux de télécommunication.

### ***Chapitre III***

#### ***L'effet de la dispersion sur le débit transmis par fibres optiques***

## I. Introduction

Comme le résumant les deux chapitres précédents, le développement des télécommunications par fibre optique a multiplié les architectures des réseaux, les techniques de codage et les composants disponibles. La conception des systèmes associés est de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance de plus en plus utilisée pour aider à trouver rapidement des solutions, aussi bien au niveau du composant que du système.

Comme nous l'avons présenté dans les chapitres précédents, le phénomène de la dispersion chromatique pose des problèmes dans les transmissions à haut débit via la fibre optique. Ces problèmes sont liés à l'atténuation du signal et à la perte d'information.

Notre objectif dans ce chapitre consiste à cerner et étudier les limitations inhérentes de la modulation directe et la modulation externe en termes de débit de transmission dues à la dispersion chromatique pour une liaison de transmission par fibre optique à l'aide des logiciels de simulation OptiFiber et OptiSystem.

## II. Présentation des logiciels

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

### II.1. Présentation du logiciel OptiFiber :

La conception optimale d'un système de communication optique dépend directement du choix des paramètres de la fibre. Les dimensions de la section transversale de la fibre, la composition du matériau et le profil de l'indice de réfraction influencent tous les phénomènes importants linéaires et non linéaires. OptiFiber utilise des solveurs en mode

numérique et d'autres modèles spécialisés dans les fibres pour calculer la dispersion, les pertes, la biréfringence et la PMD [28].

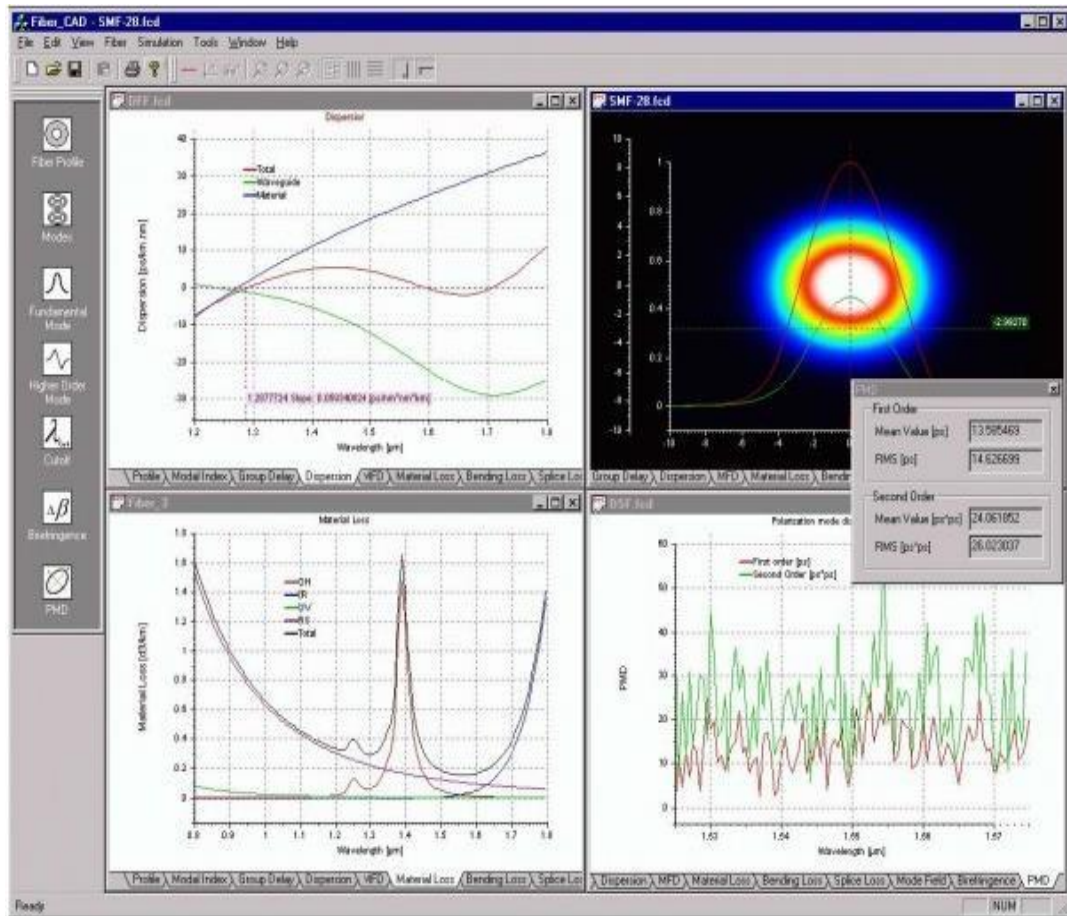


Figure III.1. L'interface de travail sur OptiFiber.

## II.2. Présentation du logiciel OptiSystem :

Dans une industrie où la rentabilité et la productivité sont essentielles au succès, OptiSystem permet de minimiser les contraintes de temps et de réduire les coûts liés à la conception des systèmes optiques, des liaisons et des composants. OptiSystem est un outil de conception de logiciels innovant, évolutif et puissant.

Il permet aux utilisateurs de planifier, de vérifier et de simuler presque tous les types de liaisons optiques dans la couche de transmission d'un large éventail de réseaux optiques : LAN, SAN, MAN aux portées ultra-longues.

Il offre une conception des couches de transmission de communication optique et une planification des composants jusqu'au niveau du système, et présente visuellement l'analyse et les scénarios [28].

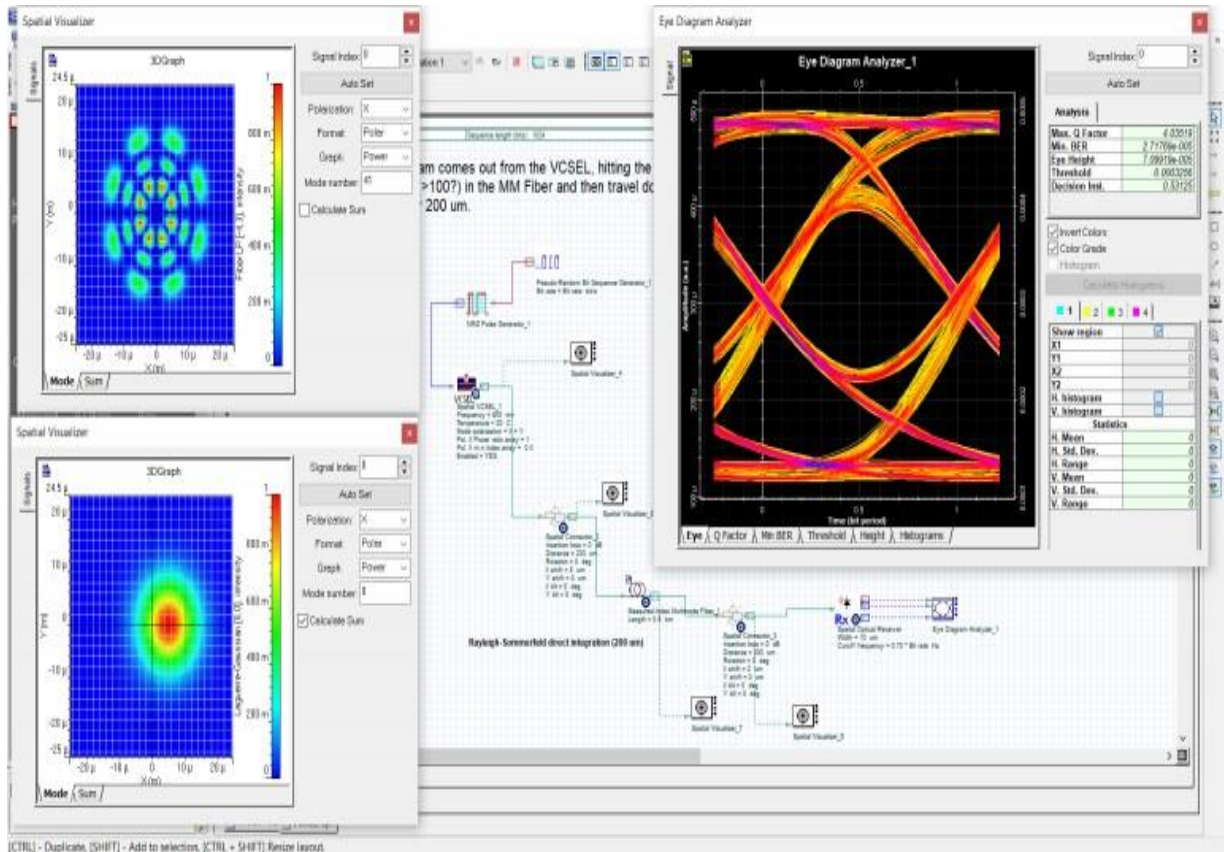


Figure III.2. L'interface de travail sur OptiSystem.

### III. Effets de la dispersion chromatique sur la transmission :

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

$$\tau = D(ps/(nm.Km)).L(Km).\Delta\lambda(nm) \tag{III.1}$$

Avec  $D$  le coefficient de dispersion chromatique de la fibre optique,  $L$  la longueur de la fibre et  $\Delta\lambda$  la largeur spectrale de la source [29].

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

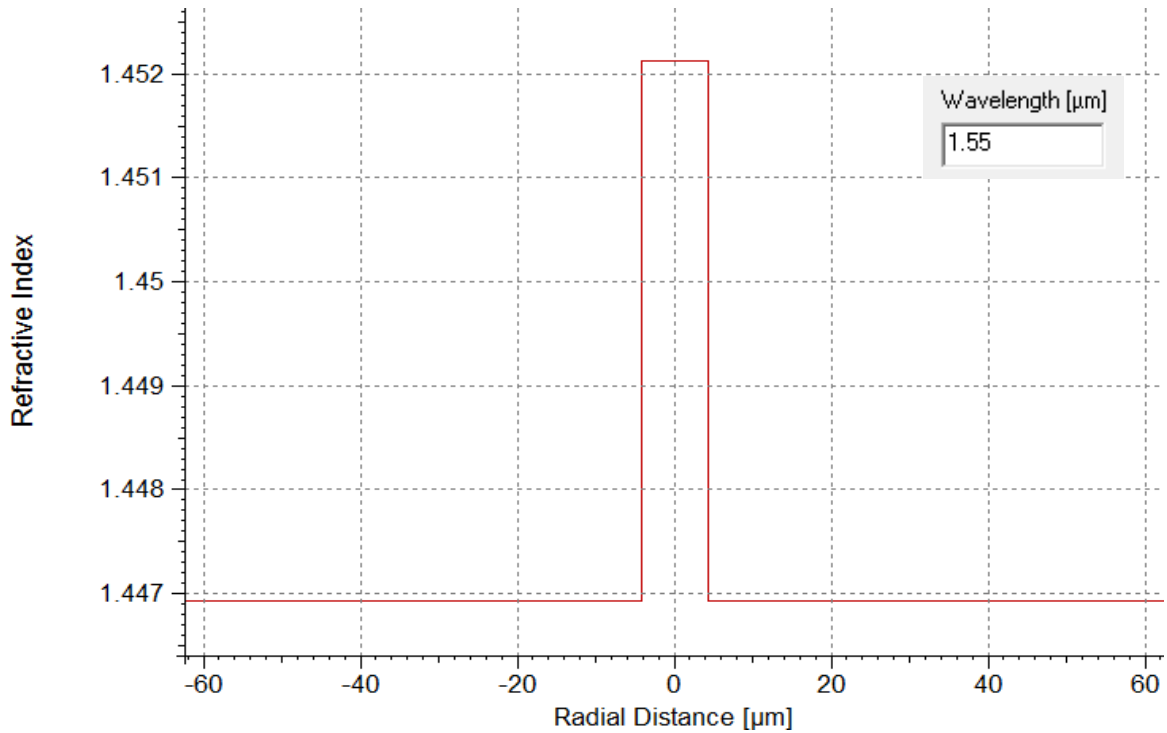


Figure III.3. Profil d'indice de la fibre monomode standard .

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

Tableau III.1: Les coefficients de multiples matériaux de verre à base de silice.

Constantes de Sellmeier	Concentration de germanium, C (% mole)			
	0 (silice pure)	3.1	5.8	7.9
A1	0.6961663	0.7028554	0.7088876	0.7136824
A2	0.4079426	0.4146307	0.4206803	0.4254807
A3	0.8974794	0.8974540	0.8956551	0.8964226
$\lambda_1$	0.0684043	0.0727723	0.0609053	0.0617167
$\lambda_2$	0.1162414	0.1143085	0.1254514	0.1270814
$\lambda_3$	9.896161	9.896161	9.896162	9.896161

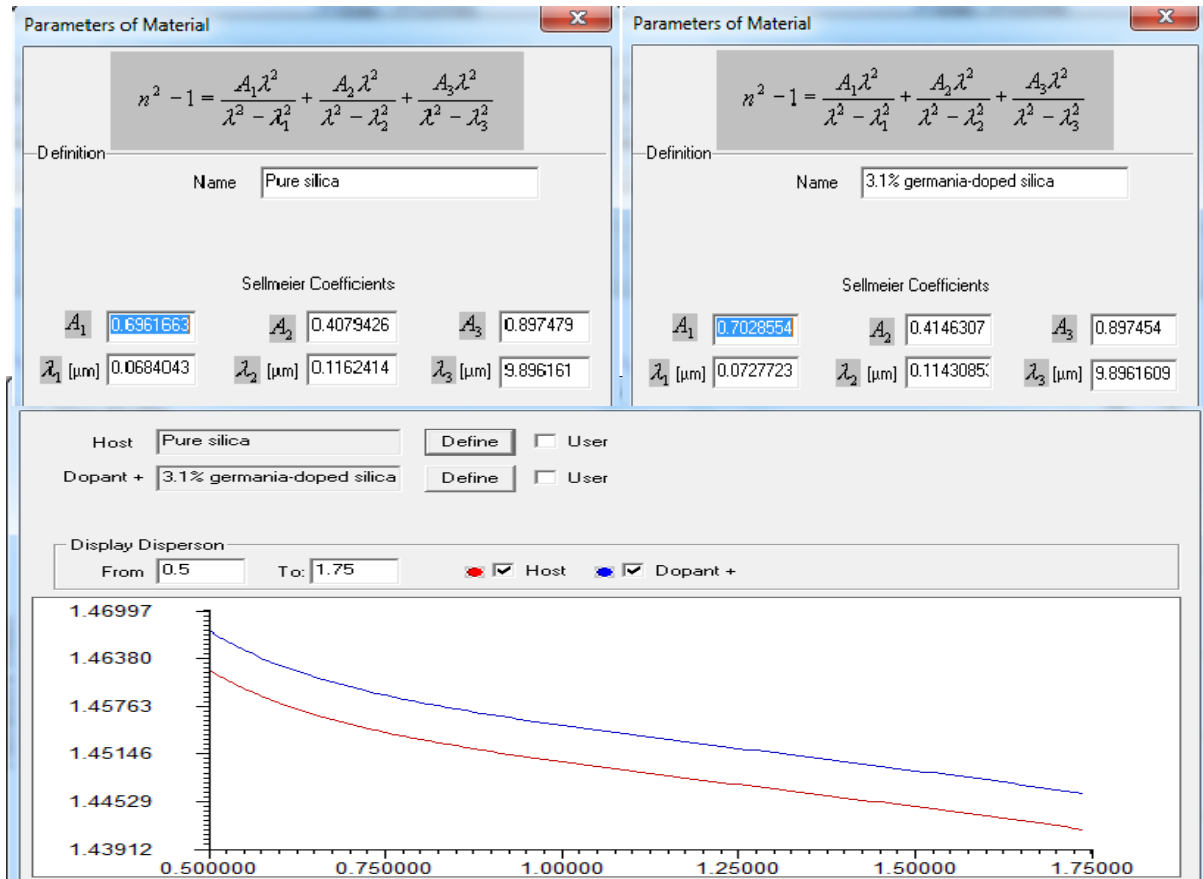


Figure III.4. Variation de l'indice de la gaine et l'indice de cœur de la G-652 avec la longueur d'onde.

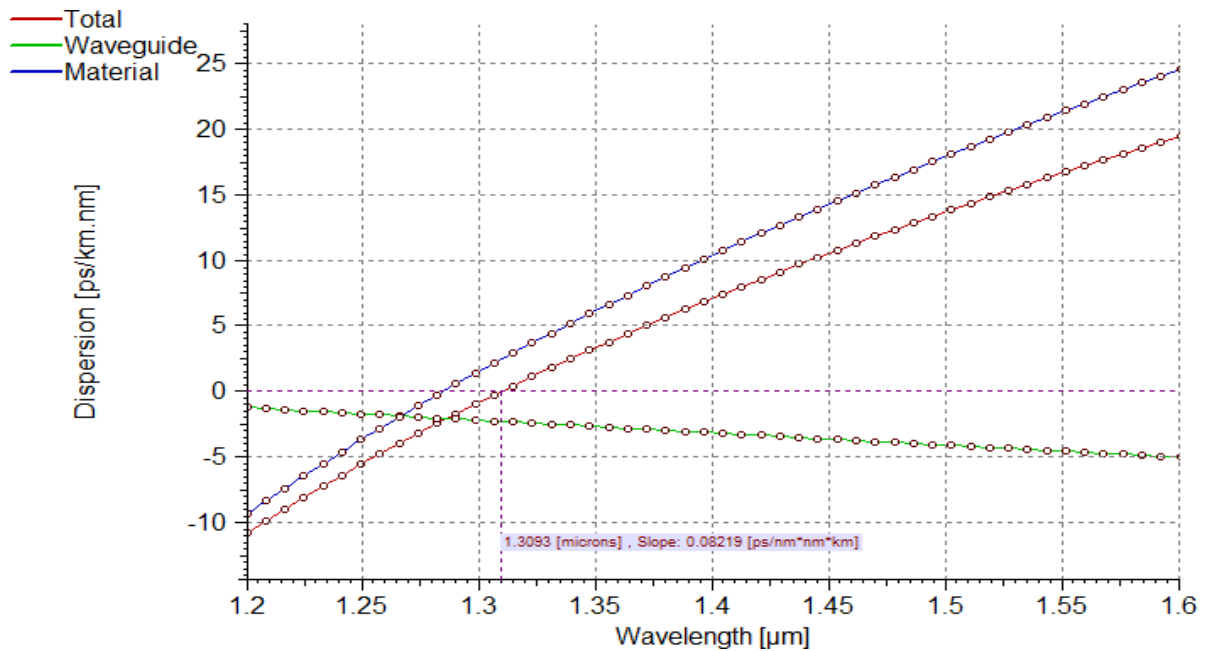
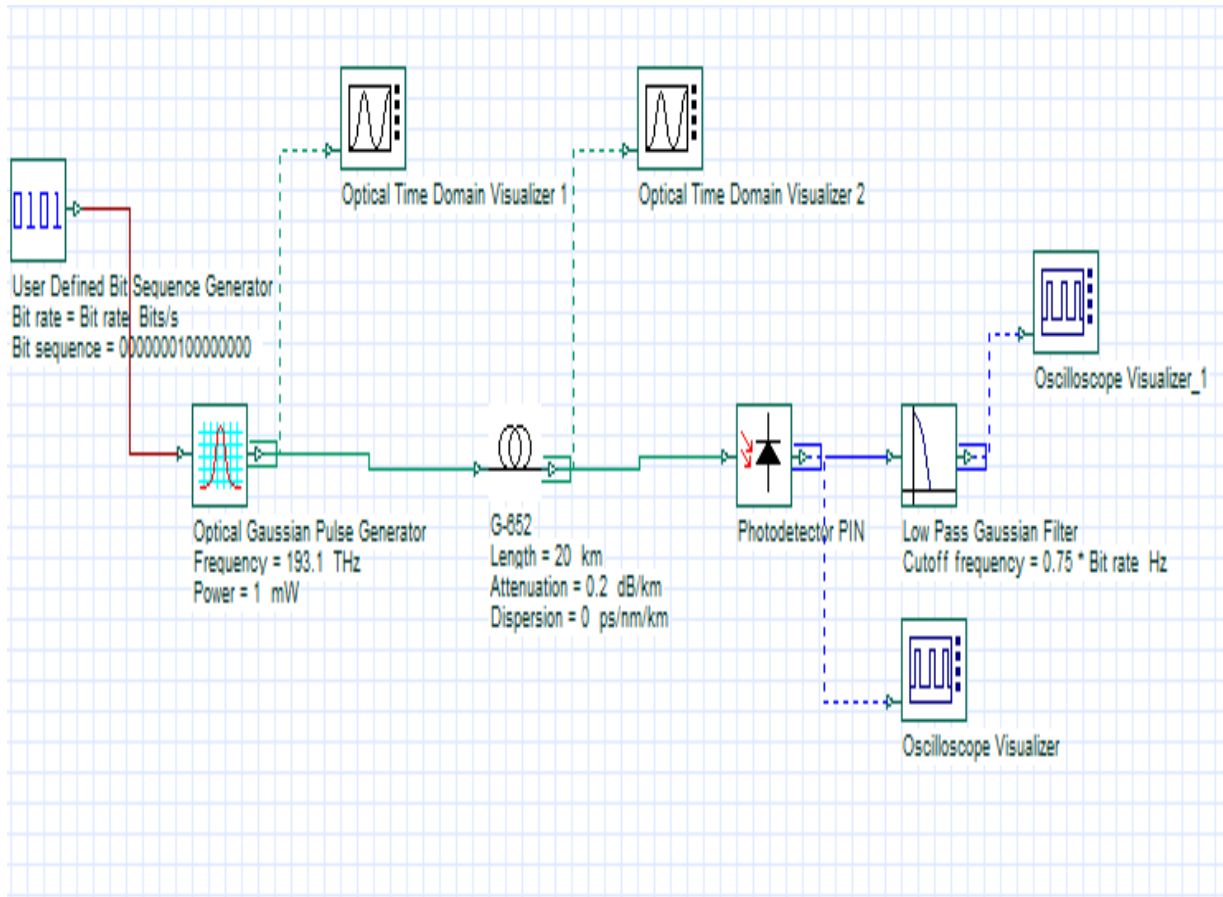


Figure III.5. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique De la fibre G-652.

D'après la figure III.5, on remarque que la dispersion chromatique est nulle pour une longueur d'onde de 1310 nm et de 17 ps/nm.km pour la longueur d'onde 1550 nm.

Pour étudier l'effet de la dispersion sur la propagation d'une impulsion dans la fibre optique G-652, nous faisons appel aux blocs ci-dessous et nous devons régler certains paramètres tels que la fréquence optique et la largeur d'intensité des impulsions (10 Gbit/s), la longueur de fibre et la valeur de la dispersion chromatique (figure III.6).



**Figure III.6. Bloc d'une chaîne de transmission optique pour tester l'effet de la dispersion sur une impulsion gaussienne avec la fibre G-652.**

Nous avons injecté à l'entrée de la fibre une séquence d'impulsions gaussiennes (00010100).

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

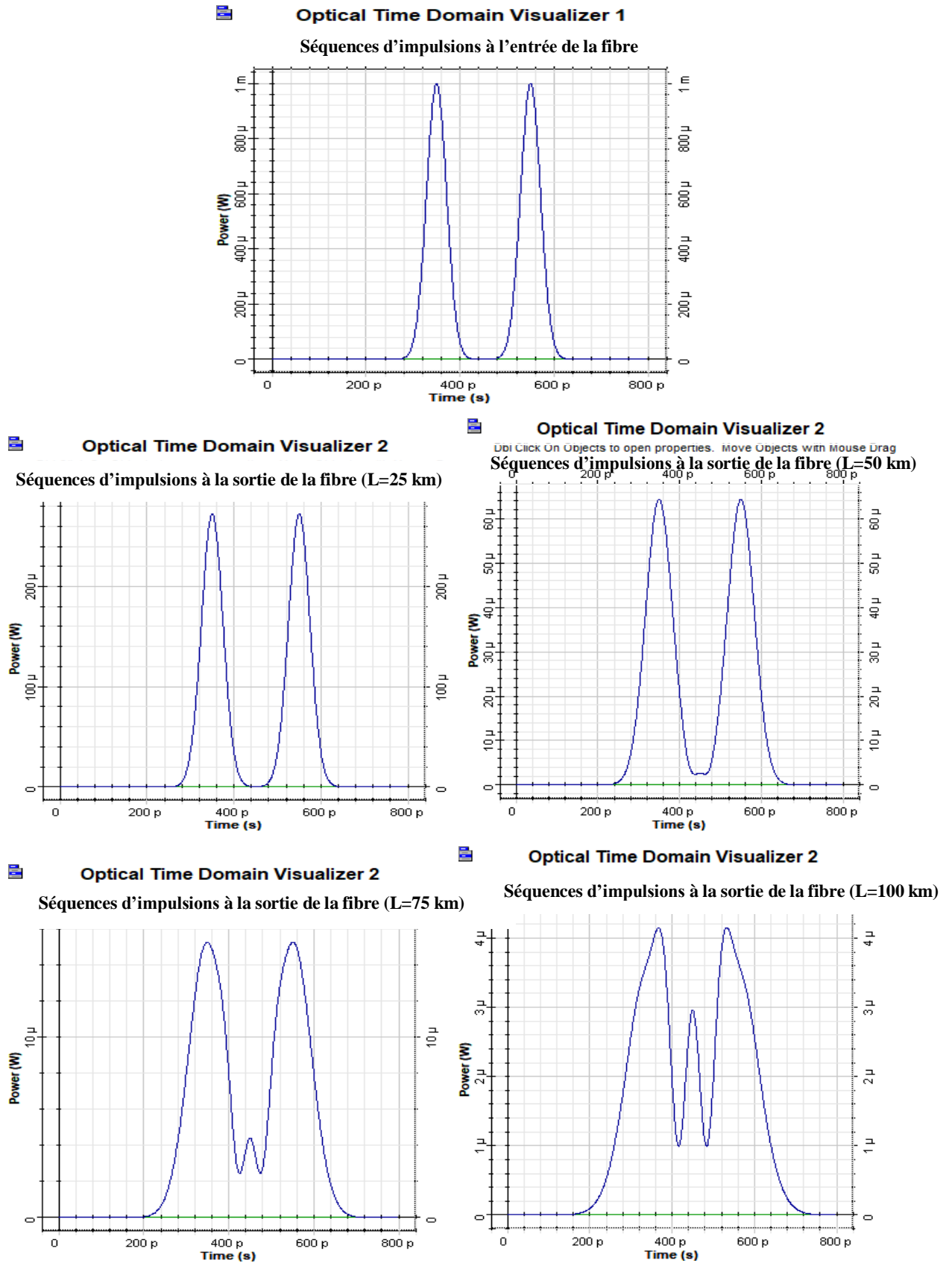


Figure III.7. L'effets de l'atténuation (0.2 dB/km) et la dispersion chromatique (17ps/km.nm) sur la transmission d'une séquence d'impulsions gaussien (00010100) sur la fibre optique G-652 à 1550 nm.

#### IV. Critères de qualité :

La transmission réelle d'un message diffère de la transmission idéale, du fait des défauts des modules d'extrémités (émetteur et récepteur) et des perturbations introduites par le canal de propagation. Généralement, le signal est déformé et du bruit s'est progressivement superposé au message. Dans le cas d'une information numérique (cas de cette étude), le bloc de réception prend des décisions, à partir du signal reçu, pour reconstituer une suite de données qui soit aussi similaire que possible à celle émise. Pour cela, l'organe de décision, composé entre autres d'un comparateur à seuil, assigne à chaque pulse un bit 0 si le niveau du pulse est en dessous du seuil ou un bit 1 si ce niveau est au-dessus du seuil. Cependant, l'atténuation, la dispersion et les différents bruits que subit le signal entraînent des erreurs. L'important n'est plus vraiment la qualité du signal reçu mais le nombre d'erreurs existant dans le signal régénéré. Le critère de qualité le plus communément utilisé est le taux d'erreur binaire. Cependant, il est possible aussi de mesurer les performances des transmissions avec le facteur Q. Une autre approche, plus qualitative, consiste à tracer le diagramme de l'oeil du signal [30].

##### IV.1. Taux d'erreur binaire :

Le Taux d'erreur binaire est défini comme le rapport du nombre d'erreurs au nombre total N d'éléments binaires transmis. C'est une grandeur aléatoire qui constitue une estimation de la probabilité d'erreur.

Lorsque N est suffisamment grand, on peut considérer, d'après le théorème de la limite centrale, que le TEB est une variable aléatoire gaussienne. Pour obtenir une estimation de la probabilité d'erreur avec un intervalle de confiance donné, il suffit de calculer le nombre N nécessaire de bits à envoyer ou à simuler. Plus la probabilité d'erreur est faible, plus le nombre N doit être grand. La mesure devient donc impossible pour des probabilités d'erreur trop faibles et la limite est d'autant plus grande que le débit est faible. Les mêmes limites sont imposées aux méthodes de simulation. Il existe, néanmoins, pour la simulation comme pour la mesure, des techniques d'approximation qui permettent de réduire le nombre N, mais il existe toujours une limite.

Si les symboles sont émis avec la même probabilité, le taux d'erreur peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$TEB = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \frac{D - \mu_0}{\sqrt{2} \cdot \sigma_0} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\mu_1 - D}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \right] \quad \text{III.2}$$

Où  $\operatorname{erfc}$  est la fonction d'erreur corrigée

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt \quad \text{III.3}$$

$\mu_i$  est la moyenne sur les niveaux  $i$  et  $\sigma_i$  est l'écart type.

D est le seuil de décision du récepteur, c'est-à-dire le niveau en dessous duquel on considérera qu'il s'agit d'un 0 et au-dessus d'un 1. D est compris entre  $\mu_1$  et  $\mu_0$  [30].

#### IV.2. Le diagramme de l'œil :

L'évaluation des performances d'une liaison optique peut également se faire au travers de l'observation du diagramme de l'œil. Cette manière assez simple d'apprécier la qualité des signaux numériques reçus avant qu'ils atteignent le dispositif de démodulation est considérée comme une des mesures de base en transmission numérique.

L'émission d'une suite aléatoire d'éléments binaires, dont les bits ont une durée  $T_b$ , conduit à la réception à un signal  $x(t)$  qui est la somme des réponses du système à chacun de ces symboles. Or, par suite du caractère passe-bas des canaux usuels, ces différentes réponses se perturbent mutuellement. La superposition graphique de tous les intervalles  $T_b$  associés au signal  $x(t)$  permet d'apprécier ces perturbations. Elle fait apparaître des ouvertures en forme de losanges arrondis qui lui ont valu son nom de diagramme de l'œil.

La Figure III.8. Représente un exemple de diagramme de l'œil regroupant sur une durée de 3 bits les changements d'amplitudes des "1 vers 0" et des "0 vers 1" pour une très longue suite (aléatoire) de symboles '1' et '0'.

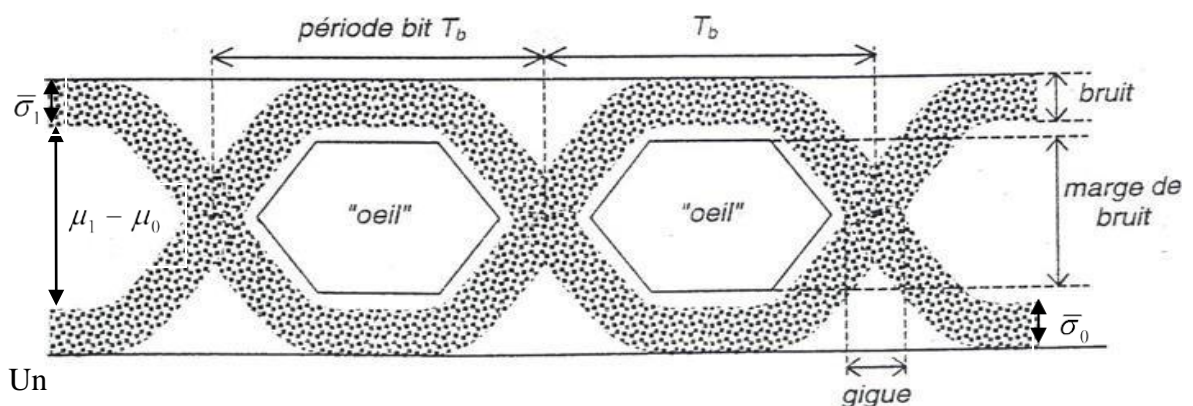


Figure III.8. Diagramme de l'œil.

(et fournit, par conséquent, de bons renseignements sur l'immunité aux erreurs de la liaison. Ces rebondissements d'amplitudes sont la conséquence de la réponse impulsionnelle du canal de transmission (les spécialistes parlent 'd'interférences inter-symboles').

Il permet, d'une part, d'apprécier l'interférence entre symboles (IES) et, d'autre part, d'ajuster l'instant d'échantillonnage dans le régénérateur au moment précis d'interférence minimale.

Une approche du facteur de qualité peut facilement être obtenue à partir d'un diagramme de l'oeil. Pour cela, il suffit de calculer, dans un intervalle encadrant les niveaux extrêmes, les valeurs moyennes  $\mu_i$  et les écarts types  $\sigma_i$  des niveaux '1' et '0' [31].

#### IV.3. Le facteur Q :

Considérons que le bruit apporté par la transmission des données binaires est gaussien. On définit alors un facteur Q pour les niveaux hauts et un pour les niveaux bas

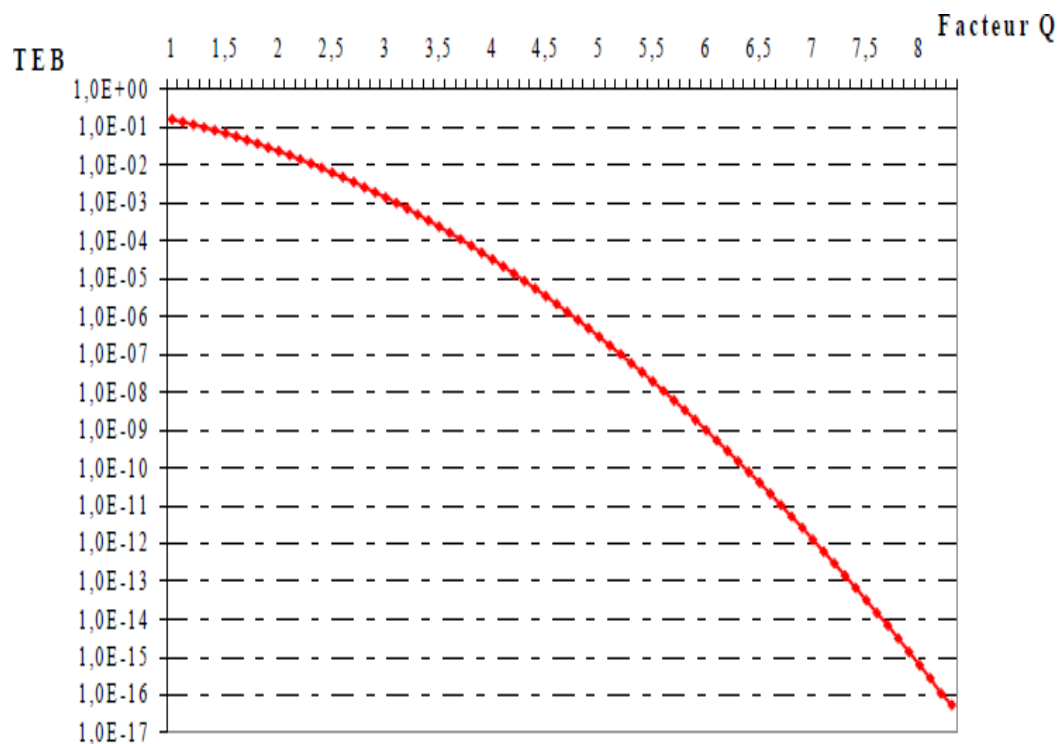


Figure III.9. Taux d'erreur TEB en fonction du facteur Q.

Le facteur  $Q$  et le taux d'erreur deviennent alors :

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad \text{III.7}$$

$$TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \quad \text{III.8}$$

Le TEB varie très vite en fonction de  $Q$ . La Figure III.9 représente bien cette forte évolution du TEB en fonction du facteur de qualité.

Cette courbe peut être utilisée d'une manière générale,  $TEB = 10^{-9}$  correspond à  $Q = 6$  et  $TEB = 10^{-12}$  correspond à  $Q = 7$  [30] [31].

La qualité de transmission numérique est évaluée en mesurant le taux d'erreur par bit le TEB. Le TEB habituellement accepté pour une transmission de bonne qualité est inférieur à  $10^{-9}$  voir à  $10^{-12}$ . On peut calculer ce taux à partir de diagramme de l'œil [6].

## V. Effet de la dispersion chromatique sur le débit transmis par fibre optique

Nous allons tout d'abord commencer par une chaîne de transmission en utilisant la modulation directe.

### V.1. Modulation directe :

La figure III.10 ci-dessous représente une chaîne de transmission optique simple. Ce schéma décrit les composants utilisés pour l'analyse de l'effet de la dispersion.

Cette chaîne de base est composée essentiellement de trois sections : un émetteur, fibre optique et un récepteur.

La performance de la liaison optique est estimée via deux critères, le facteur de qualité  $Q$  et le taux d'erreur binaire TEB. Sachant que, pour maintenir une bonne qualité de transmission dans le domaine des télécommunications on doit avoir un facteur  $Q$  supérieur à 6 ce qui correspond à un taux d'erreurs binaire BER inférieur à  $10^{-9}$ .

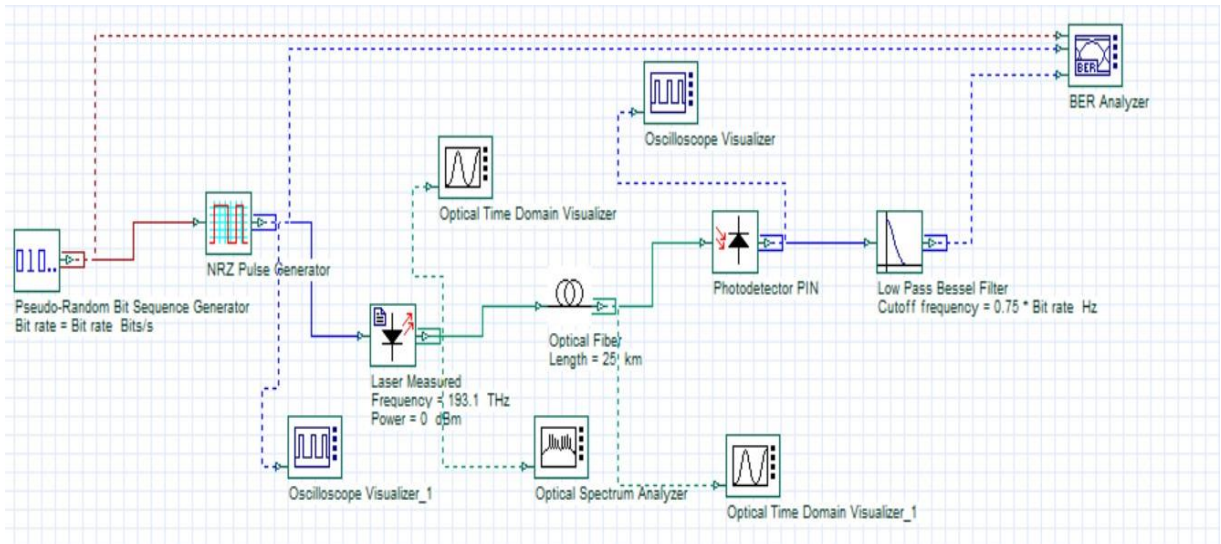
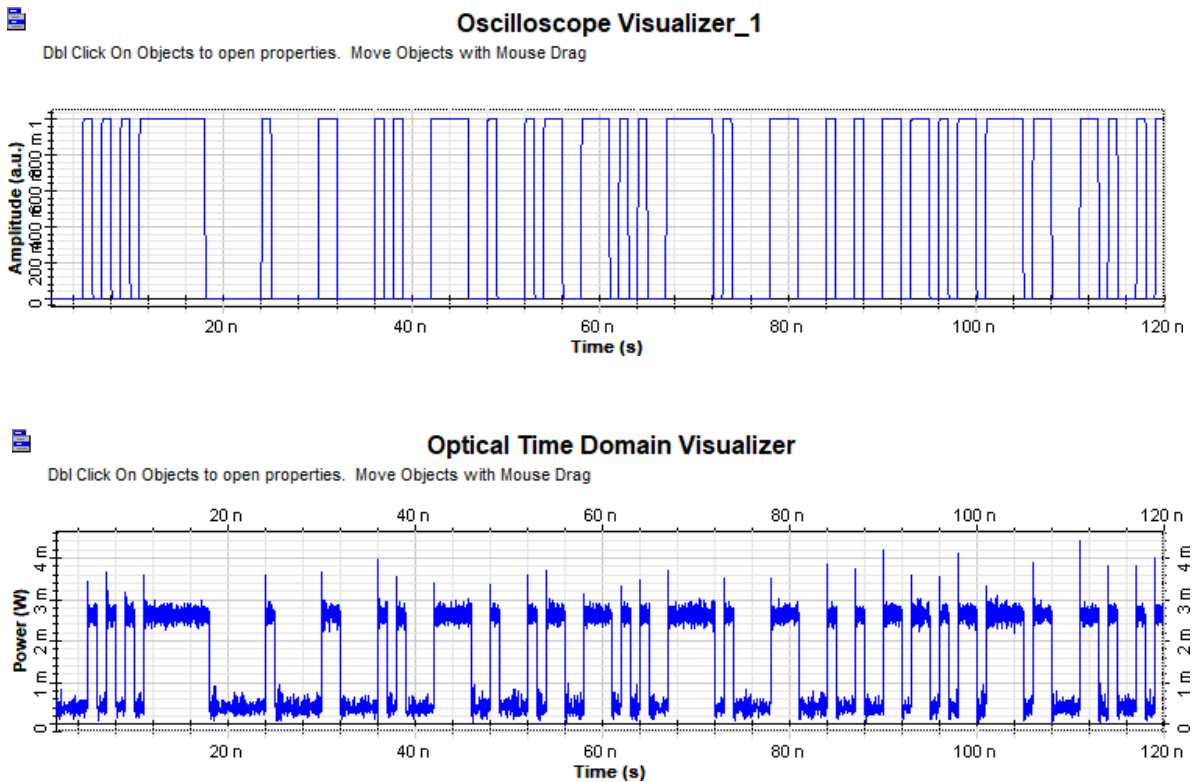
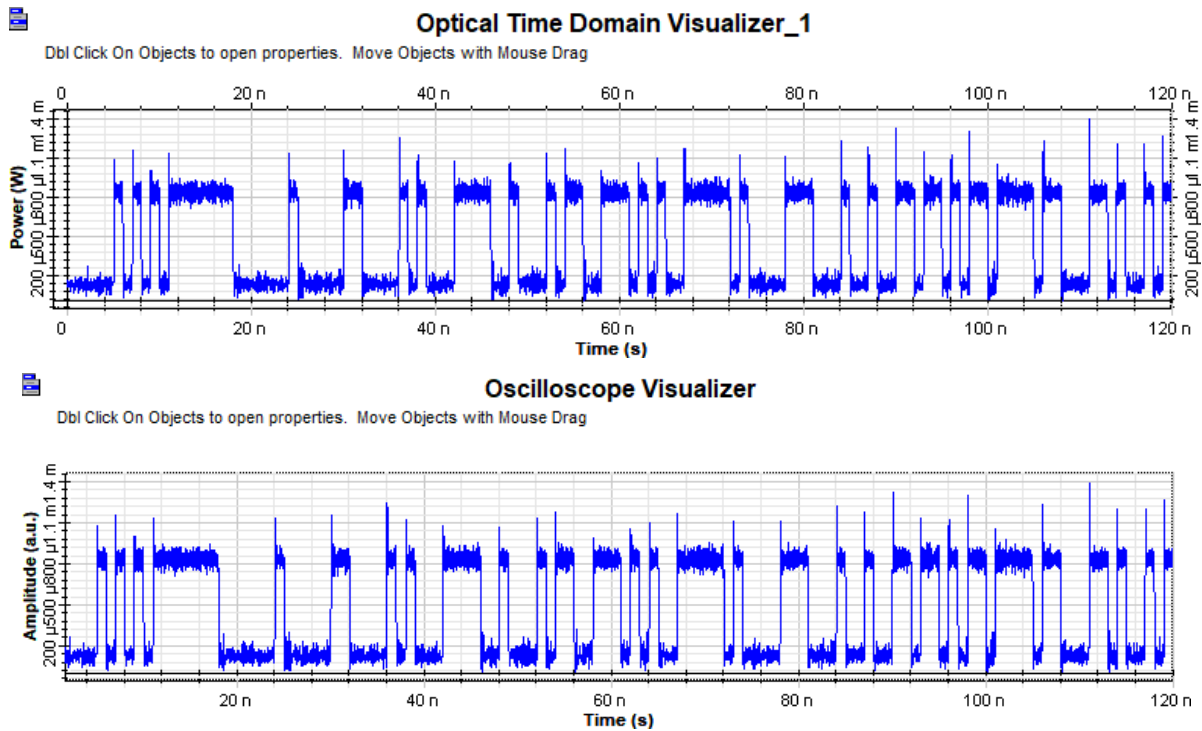


Figure III.10. Bloc d'une chaîne de transmission optique pour tester l'effet de la dispersion sur une séquences binaire avec modulation direct.

La simulation est effectuée en prenant un débit de 1 Gbit/s et une séquence binaire comprend 128 bits avec longueur de fibre 25 Km. Les résultats sont représentés sur la Figure III- 11.





**Figure III.11.** Allure des signaux en chaque point de la liaison.

Suivant les courbes de la séquence de bits (figure III.11) représentés par la puissance en fonction de temps à l'entrée et sortie de la chaîne, nous remarquons qu'il y a une même allure avec quelques déformations sur la séquence reçue à cause des effets inévitables produisant le long de la fibre telle que l'atténuation et la dispersion chromatique.

Il est important également de déterminer le seuil de la limitation du débit en utilisant la modulation directe. Pour cela, les diagrammes de l'œil du signal de sortie de la liaison correspondant à différents débits (1, 2, 3, 4 et 5 Gb/s) pour une distance de 25 Km sont représentés sur la figure III.12.

D'après les résultats trouvés nous remarquons que la qualité du signal reçu est d'autant plus faible que le débit est plus grand.

L'analyse des résultats montre après mesure du facteur de qualité que la modulation directe est satisfaisante jusqu'à 5 Gigahertz environ mais qu'au-delà, cette méthode n'est plus applicable.

L'arrivée non simultanée des différentes composantes du signal va déformer la forme du signal initialement envoyé. Cela entraîne des interférences inter-symboles et l'impossibilité de récupérer les données transmises de manière fiable. Cette dégradation est d'autant plus importante que le débit transporté est grand, c'est-à-dire que les impulsions lumineuses sont courtes et rapprochées.

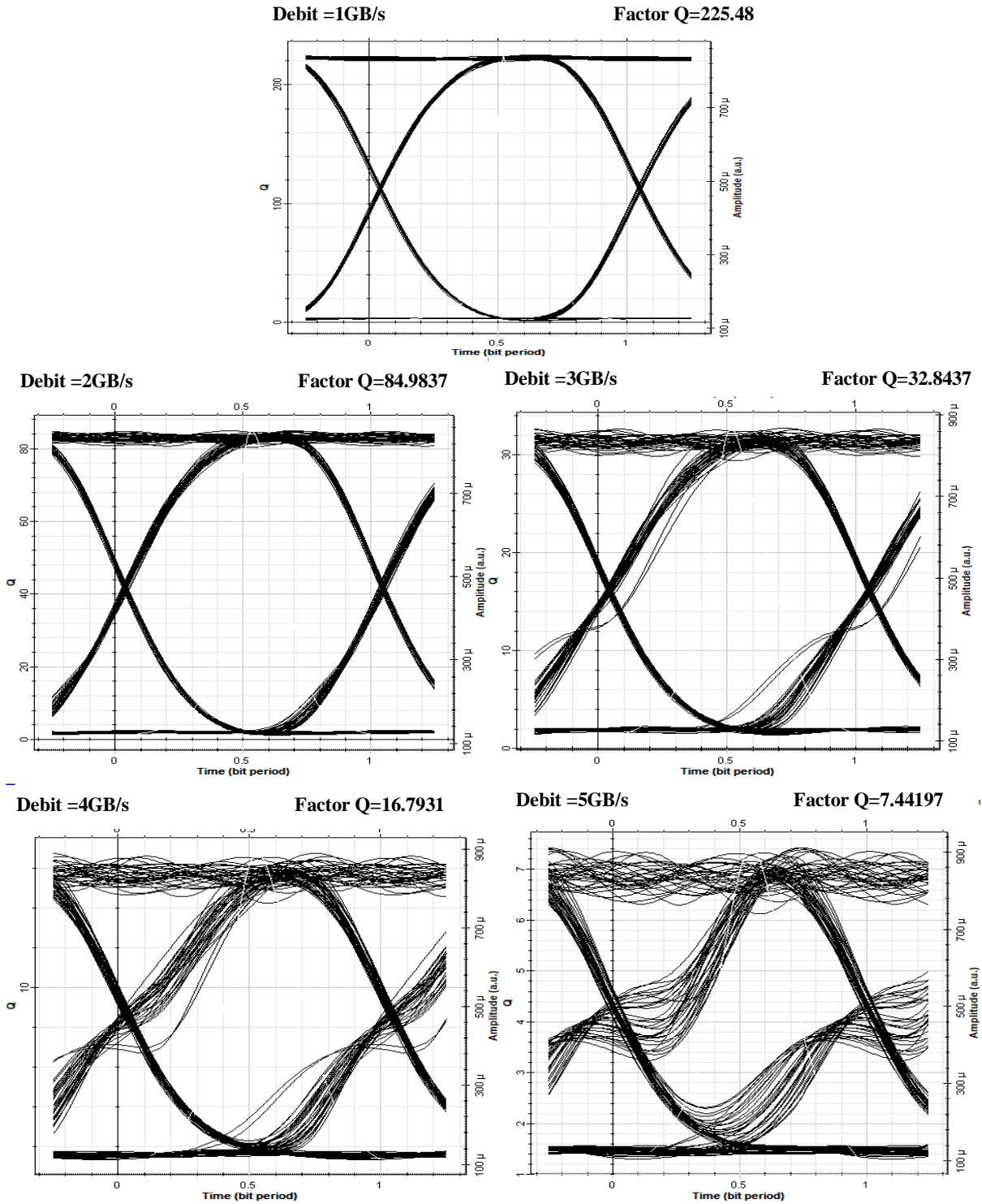


Figure III.12. Les diagrammes de l'œil du signal transmis avec la modulation directe pour différentes valeurs de débits.

Afin d'évaluer l'influence de la dispersion chromatique sur la limitation du débit pour la modulation directe, nous allons utiliser des fibres ayant une dispersion chromatique modifiée quasiment nulle pour la longueur d'onde 1550 nm.

### V.1.1. Décalage du zéro de la dispersion chromatique vers $1.55\mu\text{m}$ par l'utilisation de fibres à profil d'indice particulier :

Dans un premier temps, une des idées proposées est de remplacer la fibre G-652 par d'autres fibres dont les performances en termes de dispersion chromatique sont plus intéressantes que celles de la G-652 afin de pouvoir concevoir des réseaux plus longs.

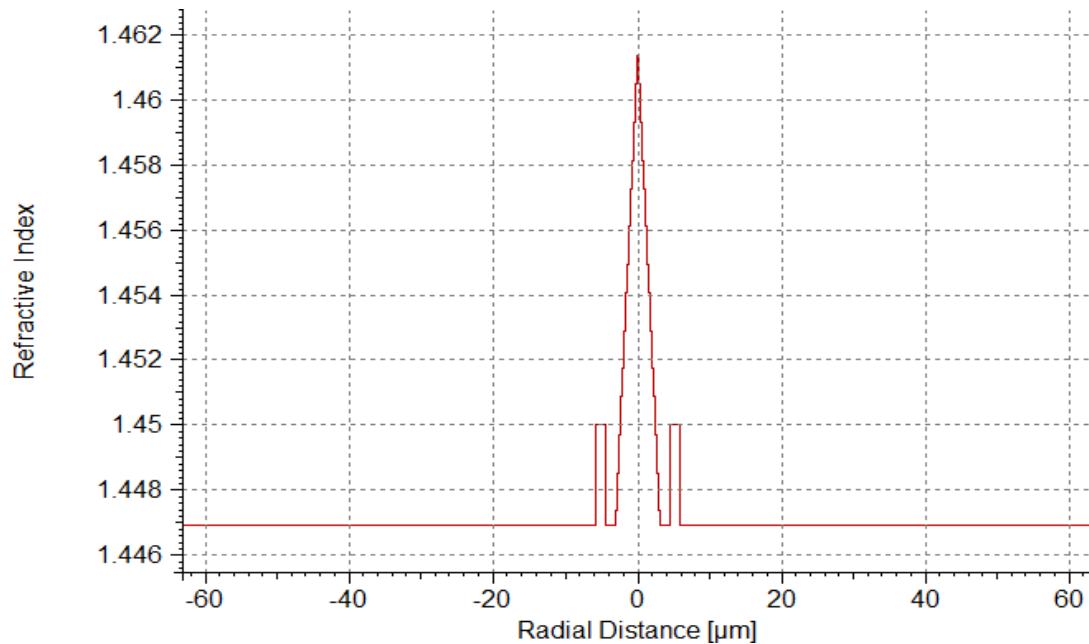


Figure III.13. Profil d'indice de la fibre à dispersion décalée la G-653.

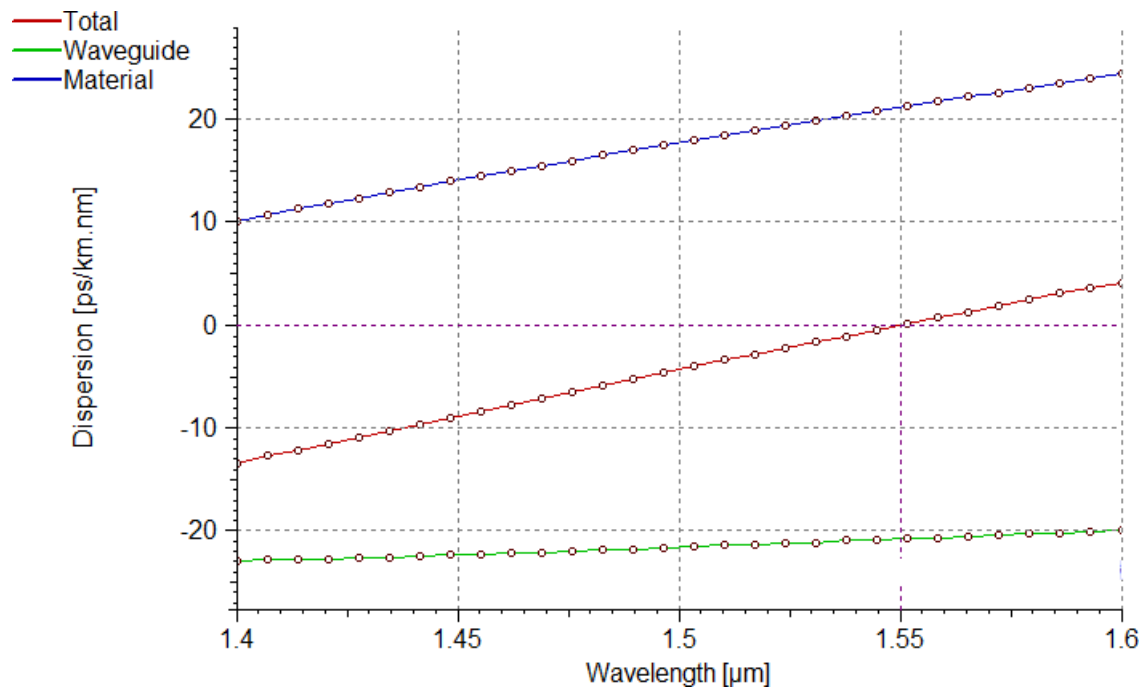
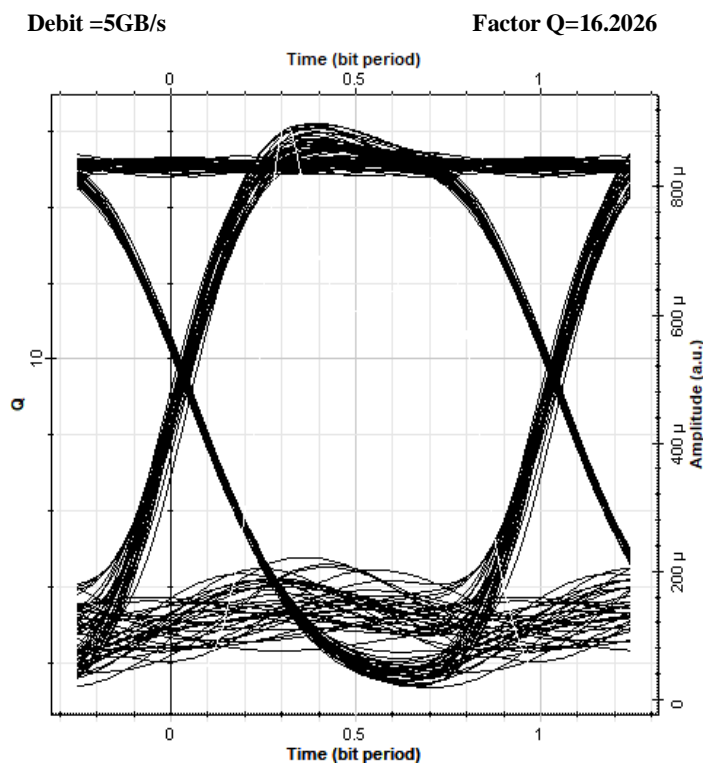


Figure III.14. Dispersion de guide, du matériau et dispersion chromatique de la fibre G-653.

C'est la fibre à dispersion décalée, ces fibres, communément appelées DSF (Dispersion Shifted Fibre), sont normalisées sous le nom de fibre G-653. C'est une fibre qui présente une valeur d'indice non constante dans la gaine optique (figure III.13), permet, si les paramètres optogéométrique sont convenablement déterminés, de décaler la longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est nulle à 1550nm (figure III.14).

Comme on peut l'observer d'après le résultat obtenu par la figure III.15, l'utilisation de la fibre à dispersion nulle, améliore le facteur de qualité Q pour la même valeur du débit (5 GB/s). Un TEB faible (Un facteur de qualité élevé (16.2026)) et une hauteur de l'œil élevé indique que le signal reçu est de meilleure qualité et sera lisible par rapport à la fibre standard ( $Q = 7.44197$ ) pour un débit de 5 GB/s.



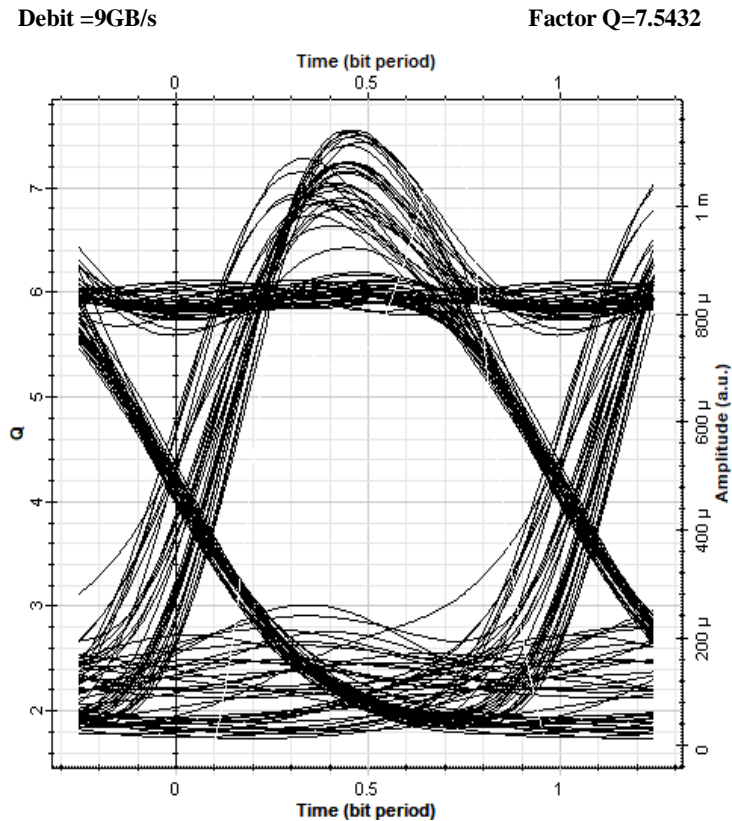
**Figure III.15. Diagramme de l'œil avec une fibre à dispersion décalée et une modulation directe pour un débit de 5 GB/s.**

Il est important également de déterminer le maximum de débit qu'on peut injecter dans le modulateur direct en utilisant une fibre à dispersion nulle à 1550 nm. Pour cela, le diagramme de l'œil et la valeur de facteur de qualité Q sont reportés sur la figure III.16.

D'après la figure III.16 on voit clairement que le maximum de débit qu'on peut injecter dans le laser directement avec l'utilisation d'une fibre à dispersion nulle est d'environ 9 GB/s.

Donc on peut conclure que la dispersion chromatique est un handicap considérable pour la modulation directe et elle peut provoquer un effondrement du débit d'environ 45% (Nous

avons déterminé que la modulation directe à un débit maximal d'environ 5 GB/s pour une fibre monomode standard (17 ps/nm.km à 1550 nm) et un maximum de débit d'environ 9 GB/s pour une fibre décalée (0 ps/nm.km à 1550 nm)).



**Figure III.16. Diagramme de l'œil avec une fibre à dispersion décalée et une modulation direct pour un débit de 9 GB/s.**

Afin de comparait l'effet de la dispersion chromatique à celle de l'atténuation sur la qualité de transmission, tous les valeurs précédentes sont conservées (longueur de fibre 25 km, dispersion chromatique 17 ps/nm.km) avec l'augmentation de l'atténuation de 0.2 dB/km à 1 dB/km et à chaque fois on change le débit binaire entre 1 et 5 GB/s. Les diagrammes de l'œil sont tracés et la mesure des facteurs de qualité sont relevée dans la figure III. 17.

L'analyse des résultats montre, après mesure de facteur de qualité, que l'augmentation de la valeur de l'atténuation fait diminuer l'égermant les performances de la liaison.

L'impact de l'atténuation est donc négligeable para port à la dispersion chromatique sur le débit.

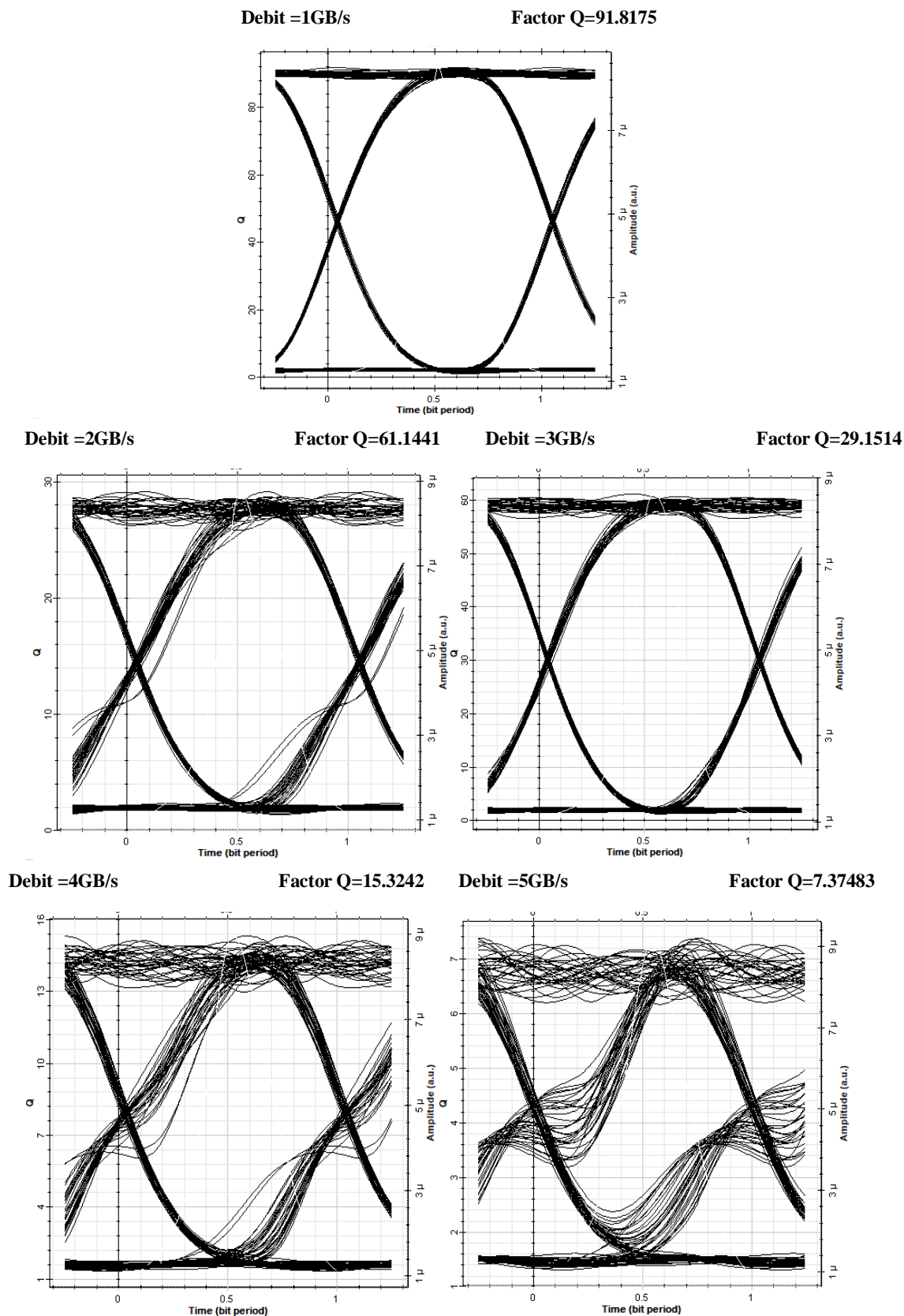


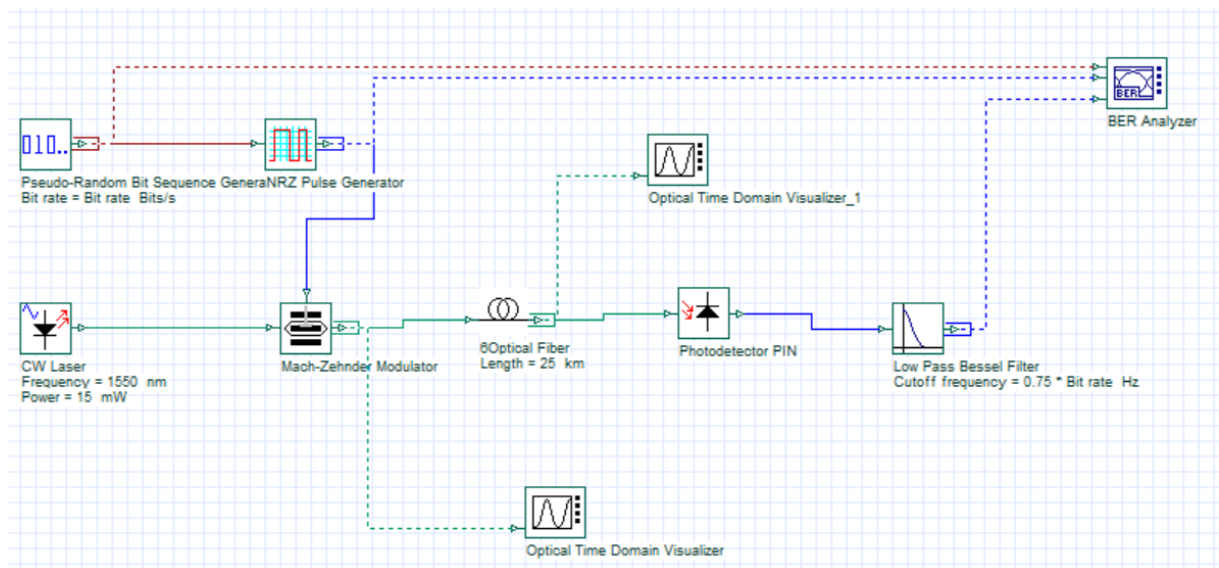
Figure III.17. Diagramme de l'œil avec une atténuation de 1dB/Km pour différents débits .

La chaîne précédente (figure III.10) était réservée à la simulation d'une liaison basée sur la modulation directe. Cette technique a beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en œuvre. Mais elle comporte aussi des limites. Les lasers sont souvent la cause. Leur temps de réaction, les oscillations, le bruit créé font que la modulation directe engendre pour les hauts et très hauts débits certaines dégradations sur le signal optique modulé. A cela, la modulation externe constitue un remède.

## V.2. Modulation externe :

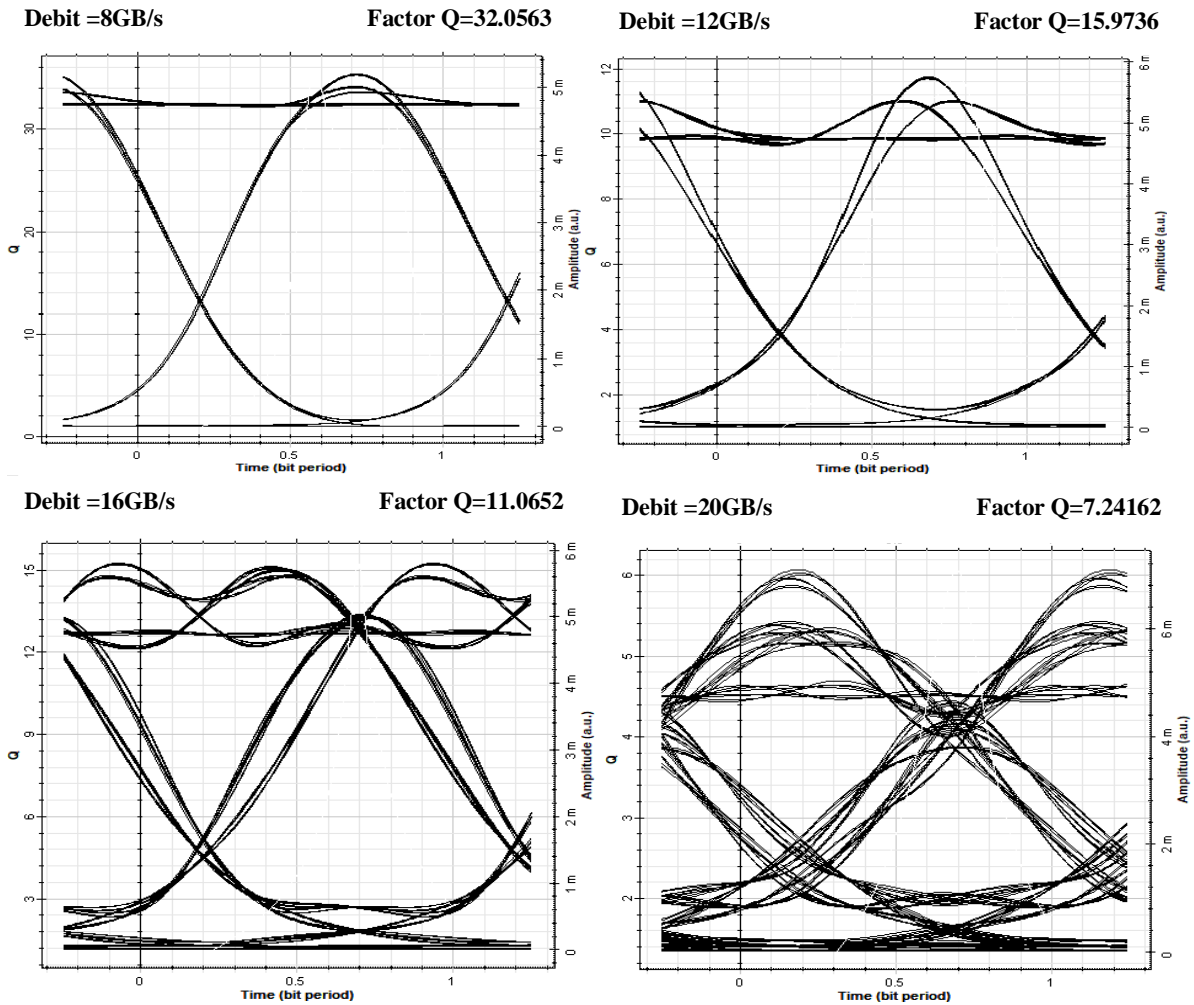
La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents sur le signal optique.

Pour cela nous avons insérer le modulateur externe aux niveaux du bloc d'émission comme le montre le schéma de la liaison suivant :



**Figure III.18. Bloc d'une chaîne de transmission optique pour tester l'effet de la dispersion sur une séquence binaire avec modulation externe.**

Afin de connaître l'effet de la dispersion chromatique ( $17 \text{ ps/nm.km}$ ) sur le débit d'une liaison basé sur un modulateur externe, les diagrammes de l'œil et les mesures des facteurs de qualité du signal de sortie de la liaison correspondant à différents débits (8, 12, 16 et 20 Gb/s) pour une distance de 25 Km sont représentés sur la figure III.19.



**Figure III.19.** Les diagrammes de l'œil du signal transmis avec la modulation externe pour différentes valeur de débits.

D'après les résultats obtenus par la figure III.19, on voit clairement que la modulation externe peut délivrer un débit maximal d'environ 20 GB/s avec une dispersion chromatique de 17 ps/nm.km.

Afin d'estimer l'influence de la dispersion chromatique sur la limitation du débit pour la modulation externe, nous allons utiliser des fibres ayant une dispersion chromatique nulle pour la longueur d'onde 1550 nm.

Comme on peut l'observer d'après le résultat obtenu par la figure III. 20, l'utilisation de la fibre à dispersion nulle, améliore le facteur de qualité Q pour la même valeur du débit (20 GB/s). Un TEB faible (Un facteur de qualité élevé (445.397)) et une hauteur de l'œil très élevée indique que le signal reçu est d'une qualité excellente par rapport à la fibre standard (Q = 7.24162) pour un débit de 20 GB/s.

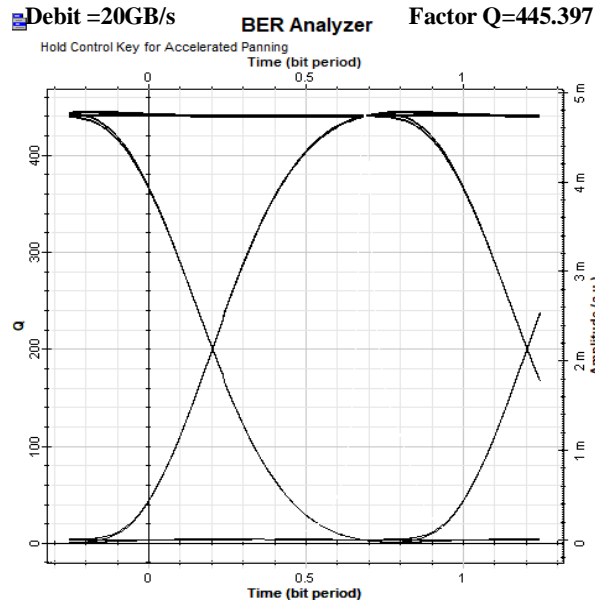


Figure III.20. Diagramme de l'œil avec une fibre à dispersion décalée et une modulation externe pour un débit de 20 GB/s.

Comme précédemment, Il est important de déterminer le débit maximal qu'on peut injecter dans le modulateur externe en utilisant une fibre à dispersion nulle à 1550 nm.

D'après la figure III.21 on voit clairement que le maximum de débit qu'on peut injecter à travers le modulateur externe avec l'utilisation d'une fibre à dispersion nulle est d'environ 80 GB/s.

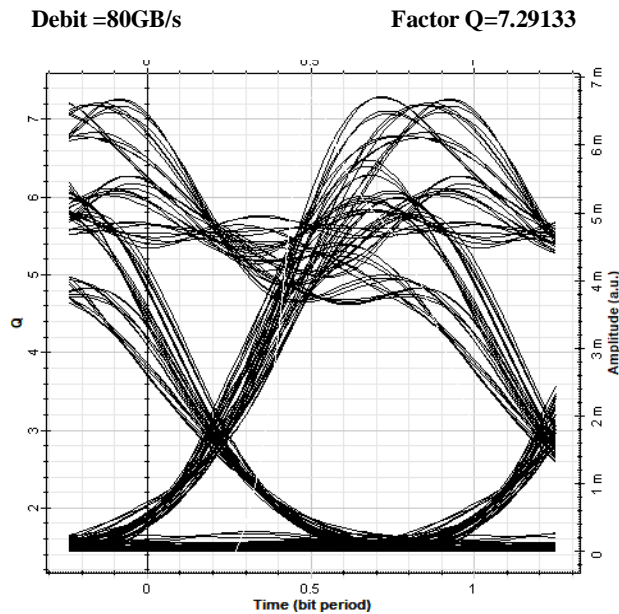


Figure III.21. Diagramme de l'œil avec une fibre à dispersion décalée et une modulation externe pour un débit de 80 GB/s.

Donc on peut conclure que la dispersion chromatique influe énormément sur la qualité du signal l'or ce que on utilise la modulation externe.

## **VI. Conclusion :**

Le développement de la transmission par fibre optique nécessite la maîtrise de ses aspects théoriques d'un côté et des méthodes de mesures d'un autre côté.

Ce chapitre a présenté les logiciels de simulation utilisé OptiFiber et Optisystem suivi de la simulation d'une liaison par fibre optique dont le but était de visualiser les signaux aux divers points de la chaine. Cette simulation nous a permis de voir l'effet de la dispersion chromatique sur la transmission d'une gaussienne. Ensuite, nous nous sommes intéressés à déterminer l'influence de la dispersion chromatique sur la limitation du débit dans les deux configurations (modulation direct et externe).

Après analyse et évaluation des résultats, on 'a pu conclure que le problème majeur de la transmission est la dispersion chromatique et que l'augmentation du débit engendre une dégradation de la qualité de transmission.

On 'a aussi pu évaluer que la modulation directe est très utile si les données sont transmises à un débit de quelques gigabits/s, selon la qualité du laser. Mais au-delà de 5 GB/s, la modulation externe est indispensable pour maintenir une qualité de transmission correcte. Cependant, les modulateurs ne sont pas parfaits et peuvent engendrer des défauts mais leur impact est moins important.

## *Conclusion Générale*

## **Conclusion générale :**

L'évolution des liaisons par fibre optique a permis aux réseaux de télécommunications d'atteindre un niveau de performances extraordinaires, Les capacités offertes par ces liaisons optiques n'ont cessé d'augmenter jusqu'à nos jours. L'un des problèmes majeurs apparu avec la montée en débit réside dans la valeur de la dispersion chromatique des fibres de ligne dont la plupart qui n'ont pas été optimisées pour fonctionner dans les fenêtres actuelles de transmission situées autour des 1.55  $\mu\text{m}$ . l'étalement temporel est estimé à 17 ps/nm.km pour une fibre de ligne du type G-652, et de ce fait les débits de transmission se retrouvent naturellement limités.

Cependant, la conception de nouveaux systèmes, toujours plus performants, est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances d'une liaison est important. Aussi, les outils de simulation sont de plus en plus utilisés. Ils permettent des gains de temps et d'argent en évitant les expérimentations itératives sur des démonstrateurs de systèmes.

L'objectif de nos travaux était d'étudier l'effet de la dispersion chromatique sur le débit transmis sur les liaisons par fibre optique en utilisant les logiciels Optifiber et Optisysteme. C'est pourquoi il nous a paru important de commencer ce mémoire par une description approfondie des différents modules de la chaîne, ainsi que les diverses limitations rencontrées au cours de la propagation du signal. Cette description nous permet de maîtriser le concept théorique d'un tel système et simplifier sa conception qui devient de plus en plus complexe avec l'apparition de nouveaux composants et donc de nouveaux paramètres influant sur les performances de transmission.

Cette simulation nous a permis de voir l'effet de la dispersion chromatique sur la limitation du débit dans les liaisons par fibres optiques. Nous avons pu confirmer, que l'augmentation du débit fait de la dispersion chromatique le problème majeur sur la qualité de la transmission.

Nous avons pu aussi conclure, que la dispersion chromatique est un handicap considérable pour les deux types de modulations.

## *Références bibliographiques*

**Références :**

- [1] J-L. Verneuil, “Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s”, thèse doctorat, université de Limoges, France, (2003).
- [2] S. Guizani, H. Hamam, Y. Bouslimani and A.Cheriti, ’’High bit rate optical communications. Limitations and perspectives ’’, IEEE Canadian Review. N°50, pp. 11-15, (2005).
- [3] C le Brun, Er Guillard, and Jacques Citerne. ‘’Communication systems interactive Software, COMSIS: modeling of components and its application to the simulation of optical communication systems’’, Applied Optic S Vol. 37, N°26. pp. 6059-6065, (1998).
- [4] R. Parfait : "Les réseaux de télécommunications", Lavoisier, Paris ,Hermes Science Publications, 2002.
- [5] P. Lorenz, “Architectures des réseaux et télécommunications”, chap.1 : Support et modèle de communication, Paris : Ellipses, pp. 188–189, 2001.
- [6] J-L. Verneuil, “Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique a 40 Gbits/s”, thèse doctorat, université de Limoges, France, (2003).
- [7] J.Laurent, “Communications optiques a très haut débit”, Conservatoire National des Arts
- [8] M. Rouha, S.Bouncer, “Etude et simulation des pertes dans une liaison fibre optique avec application”, Master, Université de Bejaia, Algérie, (2016).
- [9] N. Boudrioua, “Etude et optimisation d’une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD”, Thèse de doctorat, université Paul
- [10] C.Servin, ‘ Réseaux et Télécoms ’, Edition Dunod, (2008).
- [11] Dossier technique ‘’Les Fibres optiques’’, AT, (1999).
- [12] J. Sewter, ‘’Electronic equalization of polarization mode dispersion in 40 Gb/s optical systems’’, thèse de doctorat, université de Toronto, (2005).
- [13] K. Beldjilali, M. Khelladi, ‘’Étude pratique sur la maintenance des fibres optiques monomodes’’, Master, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, (2018).
- [14] L.Cherbi ‘’Propagation et caractérisation des fibres optiques ’’Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger, (2007).
- [15] Z. Toffano, “Optoélectronique composants photoniques et fibres optiques ”, Ellipses, 2001
- [16] F. Farhaoui, F. Zaidi ‘’Etude et Simulation d'une Chaîne de Transmission Numérique sur Fibre Optique Haut Débit’’, Master, Université Dr. Tahar Moulay, Saida, Algérie, (2017).

[17] P. Ivan, L. Thomas, “Optical fiber telecommunications IIIA”, Academic press, 1997.

[18] I. Soufari “Contrôle de la dispersion chromatique sur la transmission par fibre optique“, Mastre, Université Amar Telidji – Laghouat, Algérie

[19] <https://www.cite-telecoms.com/blog/histoire/200-ans-de-telecoms/le-re-des-convergences/fibres-optiques-haut-debit/> consulté le 19mai2022

[20] J.P. Laude. DWDM: “fundamentals, components and applications”, Artech House, Norwood, MA, ISBN 1- 58053- 177- 6, 2002.

[21] k. Lazregue “ Etude et réalisation d'une liaison optique à sortie variable pour multiplexage en puissance”

[22] N. Boubrik, S. Chamek, S. Ferhani “ Etude et Application de la transmission SDH via fibre optique. ” Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou (2009)

[23] H. Boudemagh “Impact de la Dispersion Chromatique sur la transmission sur fibre optique simulation par Comsis” Master, Université Larbi Ben M’hidi D’oum El Bouagui (2016)

[24] S, Djilani “ Etude Des Effets non Linéaires Elastiques dans les fibres optiques” Université Echahid Hamma Lakhdar -El-Oued (2016)

[25] D. Breuer, F.Kuppers, A. Mattheus, E. Shapiro, I.Gabitov, S.Turitsyn, “Symmetrical dispersion compensation for standard monomode fiber- based communication systems with large amplifier spacing”, Optics Letters, Vol.22, n°13, pp.982-984, 1997.

[26] Jean-Louis ‘ ‘Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s’ ’ Université de LIMOGES 21 novembre 2003

[27] B. Beauquier “ Communication dans les réseaux optiques par multiplexage en longueur d’onde” L’université de Nice \_ Sophia Antipolis (2000)

[28] [www.Optisysteme.com](http://www.Optisysteme.com) consulté le 25 Mai 2022

[29] D. Breuer, F.Kuppers, A. Mattheus, E. Shapiro, I.Gabitov, S.Turitsyn, “Symmetrical dispersion compensation for standard monomode fiber- based communication systems with large amplifier spacing”, Optics Letters, Vol.22, n°13, pp.982-984, 1997.

[30] <http://www.foservice.com/SOFTWARE/optsim.htm> consulté le 27 Mai 2022

[31] I. Kaminow, L. Tingye, “Optical fiber télécommunications IVB Systems and impairments”, Academic press, pp.169-179, 2002.