

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electronique

**Projet de Fin d'Etudes**  
pour l'obtention du diplôme  
**d'Ingénieur d'Etat en Electronique**

Thème :

**ETUDE ET SIMULATION DES EFFETS DE LA DISPERSION  
CHROMATIQUE ET DE LA DISPERSION DE MODE DE  
POLARISATION DANS LES TRANSMISSIONS  
NUMERIQUES ET OPTIQUES A HAUT DEBIT**

Dirigé par :

Pr. MEHHENI Mohamed

Présenté par :

MADANI Soumeya

Septembre 2006

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire optoélectronique du département d'électronique de l'Ecole Nationale Polytechnique, sous la direction du Pr M.MEHENNI

Je tiens à lui exprimer mes plus sincères remerciements pour ses conseils, son aide et sa patience tout au long de ce travail.

J'exprime ma plus sincère gratitude à mes Professeurs. Leurs conseils et leurs rigueurs scientifiques ont énormément contribué à ma formation tout au long de ces trois années.

Je tiens à exprimer ma plus grande estime, et ma profonde affection à mes chers parents pour leur encouragement, leur patience et leur grand soutien, durant toutes ces années d'études.

Je tiens également à remercier tous mes amis et camarades, pour leur sincère amitié et leur précieux soutien.

Enfin, j'ai une pensée toute particulière pour ma grande sœur, qui a partagé mes soucis, mes joies et qui a toujours su m'encourager.

## Table des matières

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Résumé</b> .....                                                      | <b>i</b>   |
| <b>Glossaire</b> .....                                                   | <b>ii</b>  |
| <b>Liste des figures</b> .....                                           | <b>iii</b> |
| <b>Introduction</b> .....                                                | <b>1</b>   |
| <b>Chapitre 1 : Transmission numérique sur fibre optique</b>             |            |
| I.1 Introduction .....                                                   | 3          |
| I.2 Liaison numérique sur fibre optique.....                             | 3          |
| I.3 Principales caractéristiques d'une liaison numérique .....           | 4          |
| I.4 Codes de transmission .....                                          | 6          |
| I.4.1 Le code NRZ (non retour à zéro) .....                              | 6          |
| I.4.2 Le code bipolaire .....                                            | 7          |
| I.4.3 Le code Manchester.....                                            | 7          |
| I.4.4 Le code de Miller .....                                            | 8          |
| I.5 Les méthodes de d'inscription et de détection de données .....       | 9          |
| I.5.1 Technique de modulation .....                                      | 9          |
| I.5.1.1 La modulation directe .....                                      | 9          |
| I.5.1.2 La modulation externe .....                                      | 10         |
| I.5.2 Les techniques de détection .....                                  | 11         |
| I.5.2.1 La détection direct .....                                        | 11         |
| Conclusion.....                                                          | 12         |
| <b>Chapitre 2 : Présentation des différents composants de la liaison</b> |            |
| II.1 Introduction.....                                                   | 13         |
| II.2 La fibre optique .....                                              | 13         |
| II.2.1 Présentation générale des fibres .....                            | 14         |
| II.2.2 L'atténuation .....                                               | 23         |
| II.2.3 les dispersions dans la fibre .....                               | 24         |
| II.2.3.1 La dispersion chromatique .....                                 | 28         |
| II.2.3.2 La dispersion modale de polarisation.....                       | 30         |
| II.2.4 les effets non linéaires dans la fibre .....                      | 32         |
| II.2.4.1 L'effet Kerr .....                                              | 33         |
| II.2.4.2 Les effets Raman et Brillouin.....                              | 33         |
| II.3 Le module d'émission .....                                          | 34         |
| II.3.1 Le laser .....                                                    | 34         |
| II.3.2 La modulation des données .....                                   | 36         |
| II.3.3 Le circuit de commande .....                                      | 37         |
| II.4 Le module de réception .....                                        | 37         |

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.4.1 Le photodétecteur .....                                                    | 38        |
| II.4.2 L'amplificateur électrique .....                                           | 42        |
| II.4.3 Le filtre .....                                                            | 42        |
| II.4.4 Le bloc de décision .....                                                  | 43        |
| II.5 composants supplémentaires .....                                             | 43        |
| II.5.1 Les amplificateurs optiques .....                                          | 43        |
| II.5.2 Les isolateurs .....                                                       | 44        |
| II.5.3 Les coupleurs .....                                                        | 44        |
| II.5.4 Les filtres optiques .....                                                 | 45        |
| Conclusion.....                                                                   | 45        |
| <b>Chapitre 3 : Simulation et caractérisation de la CD et de la PMD</b>           |           |
| III.1 Introduction.....                                                           | 46        |
| III.2 l'évaluation des performances .....                                         | 47        |
| III.3 Construction et simulation d'une liaison de référence.....                  | 47        |
| III.3.1 Le module d'émission .....                                                | 47        |
| III.3.2 Le module de réception .....                                              | 50        |
| III.3.3 Le support de transmission .....                                          | 53        |
| III.3.4 Visualisation des signaux de la liaison de référence .....                | 54        |
| III.4 Prise en compte de la dispersion chromatique CD .....                       | 58        |
| III.5 Prise en compte de la dispersion de mode de polarisation PMD.....           | 59        |
| III.6 Prise en compte de la CD et de la PMD.....                                  | 60        |
| III.7 Résultats des simulations et évaluation des performances.....               | 60        |
| III.7.1 Visualisation des signaux.....                                            | 60        |
| III.7.2 Evaluation des performances.....                                          | 70        |
| Conclusion.....                                                                   | 73        |
| <b>Chapitre 4 : Interprétation des résultats et amélioration des performances</b> |           |
| IV.1 Introduction.....                                                            | 75        |
| IV.2 Influence de la dispersion chromatique CD .....                              | 75        |
| IV.3 Influence de la dispersion de mode de polarisation PMD .....                 | 77        |
| IV.4 Influence de la CD et de la PMD .....                                        | 78        |
| Conclusion.....                                                                   | 78        |
| <b>Conclusion et perspectives.....</b>                                            | <b>79</b> |
| <b>Annexe A.....</b>                                                              | <b>81</b> |
| <b>Annexe B.....</b>                                                              | <b>85</b> |
| <b>Bibliographie.....</b>                                                         | <b>87</b> |

## Liste des Figures

### Chapitre1 :

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1-1</b> : Schéma simplifié d'un système de transmission numérique sur fibre optique... | 4  |
| <b>Figure 1-2</b> : Schéma synoptique modulation directe d'une diode Laser.....                  | 10 |
| <b>Figure1-3</b> : Schéma synoptique modulation externe.....                                     | 11 |
| <b>Figure1-4</b> : Schéma synoptique d'une détection directe.....                                | 12 |

### Chapitre2 :

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure2-1</b> : Synoptique général d'un système de communication par fibre optique.....                                                    | 13 |
| <b>Figure2-2</b> : Structure d'une fibre optique.....                                                                                         | 14 |
| <b>Figure2-3</b> : Propagation du signal dans une fibre optique.....                                                                          | 15 |
| <b>Figure2-4</b> : Schéma d'une fibre optique multimode à saut d'indice .....                                                                 | 20 |
| <b>Figure2-5</b> : Distorsion d'une impulsion dans une fibre multimode à saut d'indice .....                                                  | 20 |
| <b>Figure2-6</b> : Schéma d'une fibre optique multimode à gradient d'indice.....                                                              | 21 |
| <b>Figure2-7</b> : Propagation de la lumière dans une fibre multimode à gradient d'indice.....                                                | 21 |
| <b>Figure2-8</b> : Propagation de la lumière dans une fibre monomode.....                                                                     | 22 |
| <b>Figure2-9</b> :L'atténuation spectrale d'une fibre en silice.....                                                                          | 24 |
| <b>Figure2-10</b> : Evolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique.....                                                | 25 |
| <b>Figure2-11</b> : Propagation des rayons lumineux dans une fibre à saut d'indice multimode.....                                             | 26 |
| <b>Figure2-12</b> : Dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde.....                                            | 28 |
| <b>Figure2-13</b> : Courbes de dispersion de quelques fibres optiques.....                                                                    | 29 |
| <b>Figure2-14</b> : Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à<br>Une biréfringence aléatoire de la PMD..... | 32 |
| <b>Figure2-15</b> : Schéma des processus d'émission spontanée (a), d'absorption (b) et d'émission<br>Simulée (c).....                         | 35 |
| <b>Figure2-16</b> : Schéma d'un récepteur de données à détection directe.....                                                                 | 38 |
| <b>Figure2-17</b> :Photodiode PIN.....                                                                                                        | 39 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure2-18</b> : Principe de la photodétection avec une photodiode PIN.....                       | 40 |
| <b>Figure2-19</b> : Réponses fréquentielles du filtre théorique et du filtre pratique de Nyquist.... | 43 |

### Chapitre3 :

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure3-1</b> : Synoptique de la liaison de référence.....                                                                                                      | 47 |
| <b>Figure3-2</b> : Modèle de simulation du MEA.....                                                                                                                | 48 |
| <b>Figure3-3</b> : Modèle de simulation du laser.....                                                                                                              | 48 |
| <b>Figure3-4</b> : Caractéristique Puissance-Courant d'un laser.....                                                                                               | 49 |
| <b>Figure3-5</b> : Modèle de simulation des données NRZ pseudoaléatoires.....                                                                                      | 50 |
| <b>Figure3-6</b> : Modèle de simulation de la séquence de données avec les niveaux corrects....                                                                    | 50 |
| <b>Figure3-7</b> : Modèle de simulation de la photodiode PIN.....                                                                                                  | 51 |
| <b>Figure3-8</b> : Modèle de simulation de l'amplificateur électrique.....                                                                                         | 52 |
| <b>Figure3-9</b> : Modèle de simulation du filtre.....                                                                                                             | 52 |
| <b>Figure3-10</b> : Modèle de simulation du régénérateur.....                                                                                                      | 53 |
| <b>Figure3-11</b> : Modèle de simulation de la fibre optique.....                                                                                                  | 53 |
| <b>Figure3-12</b> : Allure des signaux en chaque point de la liaison de référence.....                                                                             | 58 |
| <b>Figure3-13</b> : Prise en compte de la polarisation d'un signal optique avec le modèle<br>Vectorisation-Champ et les doubles entrées et sorties des fibres..... | 59 |
| <b>Figure3-14</b> : Synoptique de la liaison en présence de la PMD.....                                                                                            | 59 |
| <b>Figure3-15</b> : Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 50 km dans la liaison de<br>Référence.....                                         | 61 |
| <b>Figure3-16</b> : Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 100 km dans la liaison<br>de référence.....                                        | 62 |
| <b>Figure3-17</b> : Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 50 km en présence de la<br>CD.....                                                 | 64 |
| <b>Figure3-18</b> : Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 100 km en présence de<br>la CD.....                                                | 65 |
| <b>Figure3-19</b> : Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 50 km en présence de la<br>PMD.....                                                | 66 |
| <b>Figure3-20</b> : Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 100 km en présence de<br>la PMD.....                                               | 68 |

---

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure3-21</b> : Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 300 km en présence de la PMD.....             | 69 |
| <b>Figure3-22</b> : Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 300 km en présence de la CD et de la PMD..... | 69 |
| <b>Figure3-23</b> : Les valeurs du facteur Q de la liaison de référence à 50km et 100 km.....                                 | 70 |
| <b>Figure3-24</b> : Les valeurs du facteur Q lors de la prise en compte de la CD à 50km.....                                  | 71 |
| <b>Figure3-25</b> : Les valeurs du facteur Q lors de la prise en compte de la CD à 100km.....                                 | 71 |
| <b>Figure3-26</b> : Les valeurs du facteur Q lors de la prise en compte de la PMD à 300km.....                                | 72 |
| <b>Figure3-27</b> : Les valeurs du facteur Q lors de la prise en compte de la CD et de la PMD à 300km.....                    | 73 |

#### **Chapitre4 :**

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 4-1:</b> Schéma de la liaison simulée pour la compensation de la CD..... | 76 |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|

---

## **Glossaire**

**BER** : Bit Error Rate

**CD** : Chromatic Dispersion

**DCF** : Dispersion Compensating Fiber

**IUT** : International Union of Telecommunications

**LASER** : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

**MEA** : Modulateur à Electro-Absorption

**NRZ** : Non Retour à Zéro

**O.N** : Ouverture Numérique

**PDA** : PhotoDiode à Avalanche

**PMD** : Polarization Mode Dispersion

**SNR** : Signal Noise Ratio

## Introduction

Il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à un débit de 270 Mbits/s, le câble coaxial remplissait parfaitement son rôle de support de transmission. Mais avec la multiplication des services et des besoins accrus, une nécessité d'un débit de transmission d'information plus élevé est apparue, et une alternative au câble coaxial était à trouver : pertes trop élevées, courtes distances de propagation, performances limitées.

Comparée au câble coaxial, la fibre optique présente une atténuation acceptable sur une énorme plage de fréquences (plusieurs milliers de gigahertz) et offre ainsi l'avantage de bandes passantes gigantesques, permettant d'envisager aujourd'hui la transmission de débits numériques très importants (plusieurs téraoctets/seconde). Après avoir transmis 2,5 Gb/s, puis 10 Gb/s par canal sur des longueurs de transmission qui atteignent des centaines de kilomètres, la nécessité à transmettre un débit plus élevé (aujourd'hui supérieur ou égal à 40 Gb/s) sur une longue distance ne cesse d'augmenter. Malheureusement la sensibilité aux défauts de propagation augmente avec le débit, que ce soit pour les effets linéaires dus à la dispersion chromatique CD (*chromatic dispersion*) et à la dispersion de mode de polarisation PMD (*polarization-mode dispersion*) de la fibre, ou les effets non linéaires essentiellement introduits par l'effet Kerr (l'indice de réfraction de la fibre dépend de l'intensité lumineuse).

Les phénomènes de dispersion ne sont pas faciles à étudier expérimentalement. En revanche, on peut décrire leurs origines et leurs conséquences en faisant appel à la simulation. L'étude et la simulation de ces effets limitatifs du débit définissent le sujet de ce mémoire.

Le premier chapitre de ce mémoire décrit le principe d'une transmission numérique sur fibre optique, ainsi que les diverses techniques de modulation et démodulation du signal numérique. Le second chapitre détaille l'ensemble des composants présents dans nos liaisons qui vont être simulées par la suite et donne des explications sur les origines et les conséquences des effets limitatifs du débits dus aux canal transmission (fibre optique). Le

troisième chapitre traite de la simulation permettant de caractériser les effets de la CD et de la PMD sur le débit et la distance de transmission dans le cas d'un système monocanal à haut débit. L'interprétation des résultats et des solutions pour améliorer le système sont présentées dans un dernier chapitre.

## **I.1. Introduction :**

Les systèmes de transmission numériques véhiculent l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou, encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer le signal de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

La première partie évoquera la structure et les principales caractéristiques d'une liaison numérique sur fibre optique, nous parlerons des différents codes en lignes utilisés dans telle transmission dans une seconde partie.

La transmission par fibre optique des données nécessite des conversions électrique-optique ou optique-électrique du signal. Ce chapitre se terminera donc par la description des différentes méthodes utilisées pour la modulation du signal en émission et celle des diverses techniques de détection envisageables.

## **I.2. Liaison numérique sur fibre optique :**

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique sur fibre optique est donné à la figure 1.1 ou l'on se limite aux fonctions de base. La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires. Le codeur englobe, en général, deux fonctions fondamentalement différentes. La première, appelée codage en ligne, associe un support physique adéquat aux éléments abstraits émis par la source. La seconde, appelée codage correcteur d'erreurs, consiste à introduire de la redondance dans le signal émis en vue de le protéger contre le bruit et les perturbateurs présents sur le canal de transmission [19].

La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal sur lequel il sera émis (fibre optique). Enfin, du côté récepteur, les fonction de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonction de modulation et de codage situées du côté émetteur.



**Figure 1.1** : Schéma simplifié d'un système de transmission numérique sur fibre optique

### I.3. Principales caractéristiques d'une liaison numérique :

La qualité d'un système de transmission dépend [10]:

- **Du code de transmission** : pour lire à la réception les éléments binaires reçus, il faut pouvoir les placer convenablement dans une base de temps ; autrement dit, il faut disposer d'une horloge. Pour ce faire, on transmet le signal numérique sous une forme élaborée, qui permet de récupérer l'horloge. Un code de transmission ou « code en ligne » assure la correspondance, sans ambiguïté.

- **De la régénération des impulsions** : le récepteur détecte et amplifie les impulsions reçues. Il procède à leur remise en forme, en synchronisme avec l'horloge. Le temps d'horloge est extrait de l'information codée au moyen d'un circuit accordé ou une boucle à verrouillage de phase. L'horloge permet de fixer les instants privilégiés et de décider si l'impulsion reçue est un « un » ou un « zéro ».

- **Du taux d'erreur** : l'étalement de l'impulsion reçue, dû au traînage en dehors du créneau de temps affecté à sa réception, d'une part et le bruit parasite aléatoire d'autre part, produisent l'erreur. Sous sa forme la plus élémentaire, l'erreur provient de la confusion entre un signal « lumière » et un signal « obscurité ».

on caractérise la qualité du message restitué par le taux d'erreur ou la probabilité d'erreur, qui est le rapport entre le nombre de bits faux et le nombre total de bits reçus, pour une longue suite d'impulsion. Si la tension du signal est une variable aléatoire gaussienne d'écart type  $\sigma_u$ ,

centrée sur  $u$ , lorsque le symbole émis est « 1 » et sur 0, lorsque le symbole émis est « 0 », la probabilité d'erreur est :

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$$

avec  $Q = \frac{u}{2\sigma_u}$

Où  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-\theta^2) d\theta$

Dans le cas où la probabilité d'erreur est la même pour chaque symbole (0 ou 1) :

$$P_e = P(0/1) = P(1/0)$$

Le seuil est égal à la moitié de l'amplitude de crête :

$$u_s = \frac{1}{2} u$$

Le paramètre  $Q$  est proportionnel au rapport Signal/Bruit (SNR) défini comme le rapport entre tension maximale de signal et la tension efficace de bruit :

$$Q = \frac{u}{2\sigma_u} = \frac{1}{2} \frac{S}{B_r}$$

On peut relever  $P_e(Q)$  dans le tableau de valeurs ci-dessous [12] :

|       |           |             |           |             |             |           |             |             |           |             |             |
|-------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| $P_e$ | $10^{-5}$ | $5.10^{-6}$ | $10^{-6}$ | $5.10^{-7}$ | $2.10^{-7}$ | $10^{-7}$ | $5.10^{-8}$ | $2.10^{-8}$ | $10^{-8}$ | $5.10^{-9}$ | $2.10^{-9}$ |
| $Q$   | 4,3       | 4,5         | 4,8       | 4,9         | 5,1         | 5,2       | 5,3         | 5,5         | 5,6       | 5,75        | 5,9         |

|       |           |              |              |            |              |            |
|-------|-----------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|
| $P_e$ | $10^{-9}$ | $5.10^{-10}$ | $2.10^{-10}$ | $10^{-10}$ | $5.10^{-11}$ | $10^{-11}$ |
| $Q$   | 6,0       | 6,1          | 6,25         | 6,4        | 6,5          | 6,7        |

#### I.4. Les différents codes de transmission :

Il existe un certain nombre de codes en ligne dont la fonction est d'associer une suite d'impulsions physiques à la suite d'éléments binaires à l'entrée du système de transmission. Les principales caractéristiques des codes de transmission numérique sont les suivantes [19] :

- **L'occupation spectrale** : la largeur de la bande de fréquences est fonction du code utilisé. Par ailleurs, le spectre de certains codes n'a pas de composante à la fréquence zéro et ses composantes basses fréquences sont fortement atténués, ce qui est intéressant dans certaines applications.
- **La densité des transitions dans le signal émis** : cette propriété est primordiale pour la récupération du rythme c'est-à-dire du temps d'horloge.
- **L'immunité au bruit** : le milieu de transmission est toujours bruité et le codage utilisé influe sur le taux d'erreur binaire qui constitue la principale mesure de qualité des liaisons numériques.

Les propriétés recherchées sont souvent contradictoires et un code donné privilégie l'une ou l'autre de ces caractéristiques. Dans le paragraphe suivant nous allons décrire les codes binaires les plus usuels.

##### I.4.1. Le code NRZ (non retour à zéro) :

Ce codage associe une impulsion positive au bit « 1 » et une impulsion négative au bit « 0 ». Les deux impulsions ont la même forme rectangulaire de durée  $T_b$  et sont différentes seulement par leurs signes. Le spectre d'un signal aléatoire dont les bits successifs sont non

corrélés est donné par l'expression [19] :

$$S(f) = T_b^2 \left[ \frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b} \right]^2$$

L'occupation spectrale est théoriquement infinie et le premier passage par zéro du spectre a lieu à la fréquence  $1/T_b$  (Hz). Ce spectre est tout de même plus étroit que ceux des autres codes qui sacrifient la bande pour privilégier les transitions dans le signal émis en vue de simplifier l'extraction d'horloge.

#### **I.4.2. Le code bipolaire :**

Les « 1 » successifs sont codés en des impulsions rectangulaires de polarités alternées. Les « 0 », par contre, sont codés en un niveau zéro, ce qui correspond à l'absence d'émission d'énergie. La densité spectrale de puissance d'un signal aléatoire avec codage bipolaire est donnée par l'expression [19] :

$$S(f) = T_b \sin^2(\pi f T_b) \left[ \frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b} \right]^2$$

Le spectre du code bipolaire passe par zéro à la fréquence zéro, ce qui rend ce code attrayant pour les canaux ne pouvant passer les basses fréquences. En revanche, la décroissance est plus lente que le code NRZ, ce qui nécessite une bande plus large pour la transmission du signal.

#### **I.4.3. Le code Manchester :**

Ce code génère des transitions à chaque durée de bit, quelque soit la séquence émise. Un « 1 » dans ce code est codé en une impulsion rectangulaire de durée  $T_b$  avec inversion de polarité au milieu du bit, la première moitié étant de signe positif. Un « 0 » est codé en une impulsion identique, mais de polarité opposée. Les transitions à chaque durée bit rendent

l'extraction d'horloge très facile, mais une suite de « 0 » ou de « 1 » générant des impulsions de largeur  $T_b/2$ , l'occupation spectrale se trouve élargie.

La densité spectrale de puissance du signal est donnée par l'expression [19] :

$$S(f) = T_b \frac{\sin^4(\pi f T_b / 2)}{(\pi f T_b / 2)^2}$$

#### I.4.4. Le code de Miller :

Un « 1 » est codé en utilisant une impulsion Manchester, c'est-à-dire une impulsion rectangulaire de durée  $T_b$  avec une inversion de polarité au milieu du bit et un « 0 » est codé en utilisant une impulsion rectangulaire sans changement de polarité. La polarité des impulsions correspondant à l'émission d'un « 1 » est choisie de façon à garantir une continuité avec l'impulsion précédente. Quant à la polarité des impulsions correspondant à l'émission d'un « 0 », elle assure une continuité (non transition) après un « 1 », mais elle est inversée après un autre « 0 ».

Dans ce code, le signal contient une transition au plus toutes les deux durées bit, ce qui assure suffisamment de transitions pour la récupération du rythme. Par ailleurs, la forme du signal ne contient pas d'impulsion d'une largeur inférieure à  $T_b$ , ce qui réduit notablement l'occupation spectrale par rapport au code Manchester. La densité spectrale de puissance est donnée par [19] :

$$S(f) = T_b [1 - \cos(2\pi f T_b)] * [1 - \cos(\pi f T_b)] / (\pi f T_b)^2$$

Il faut préciser que ces codes trouvent applications notamment en transmission en bande de base où l'occupation spectrale n'est pas d'une importance capitale. Par contre, dans le système de transmission sur onde porteuse (en particulier l'onde lumineuse), l'efficacité spectrale est un critère important, pour cela on a choisi dans le cadre de la simulation le code NRZ pour coder le signal informatif.

## **I.5. Les méthodes de modulation et de détection de données :**

Par la modulation, un signal primaire appelé signal modulant, est transposé en un signal secondaire appelé signal modulé. L'opération inverse est effectuée lors de la démodulation.

### **I.5.1. Les techniques de modulation :**

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques. Il existe principalement deux techniques : la modulation directe et la modulation externe. Le détail de ces deux configurations est donné dans ce paragraphe.

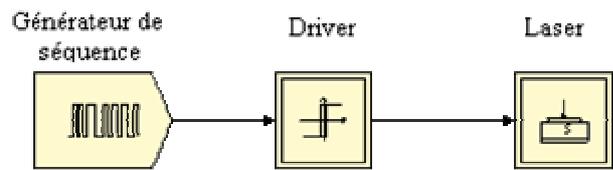
#### **I.5.1.1. La modulation directe [6, 17] :**

##### **a) Principe :**

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement : la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise (c'est une modulation en amplitude). Cette technique est appelée modulation directe. Ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser.

##### **b) Les composants utilisés :**

Cette solution de modulation directe requiert assez peu de composants. En dehors de la source optique, le laser, seuls un générateur de séquences et un driver sont nécessaires (Figure 1.2). Le premier va émettre à un débit fixé une séquence de données, expression de l'information à transmettre. Le rôle du driver est de commander la source optique au niveau des puissances émises (en fixant les valeurs du courant d'alimentation). Pour cela, il modifie les niveaux des séquences issues du générateur.



**Figure 1.2 :** Schéma synoptique modulation directe d'une diode Laser

### c) Les limites de la modulation directe :

La modulation directe connaît beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en oeuvre. Mais elle comporte aussi des limites : Les lasers en 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 du signal optique modulé. A cela, la modulation externe constitue un remède.

### I.5.1.2. La modulation externe [6, 17] :

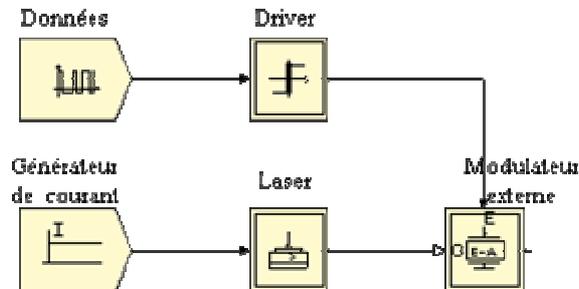
#### a) Principe :

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.

#### b) Les composants utilisés :

La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et à l'aide d'un composant indispensable : le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe  $v(t)$ , représentative de l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie. Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. 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 (Figure 1.3).



**Figure 1.3 :** Schéma synoptique modulation externe

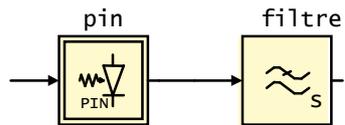
La modulation directe, plus simple et moins coûteuse, est encore très utilisée si les données sont transmises à un débit de quelques gigabits/s, selon la qualité du laser. Mais au-delà de 5 Gbits/s, la modulation externe est indispensable pour maintenir une qualité de transmission correcte. Cependant, les modulateurs ne sont pas parfaits et peuvent engendrer des défauts mais leur impact est moins important.

### **I.5.2. Les techniques de détection :**

Tout comme il existe plusieurs méthodes pour écrire l'information sur le signal lumineux, il existe différentes techniques pour la récupérer, la plus simple de ces techniques est la détection directe. Les études présentées dans ce projet sont basées sur cette technique.

#### **I.5.2.1. La détection direct [19] :**

Pour extraire le signal qui module l'onde, on peut le redresser, ou plus généralement le faire passer dans un dispositif non linéaire, tel qu'une diode. Un signal basse fréquence, le signal modulant et des harmoniques sont alors émis. Les harmoniques peuvent être éliminées par filtrage, dans la mesure où la fréquence de l'onde porteuse est très grande devant la fréquence maximale du spectre du signal modulant. Ce procédé est classiquement appelé détection directe (figure 1.4).



**Figure 1.4 :** Schéma synoptique d'une détection directe.

Le détecteur peut être réalisé soit par une diode PIN, soit une photodiode à avalanche (PDA).

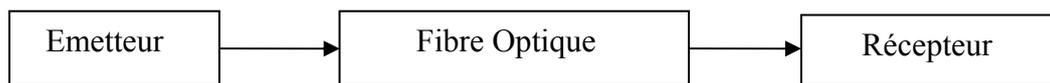
### **Conclusion :**

Ce chapitre a résumé le principe d'une transmission numérique sur fibre optique. Les différents codes utilisés ont été présentés. Les configurations d'inscription des données sur le support optique ont été décrites et la détection a été brièvement abordée.

## II.1. Introduction :

Depuis 25 ans, la fibre optique a supplanté le câble coaxial dans la plupart des réseaux de télécommunication sur support, tout du moins pour les hauts débits. Mais son apparition a nécessité la conception et le développement de nouveaux composants optiques ou optoélectroniques performants. Nous présenterons dans ce chapitre les composants constituant un système de transmission numérique sur fibre optique et expliquerons les origines et les conséquences des effets limitatifs du débits dus aux canal de transmission (fibre optique).

L'architecture d'une liaison est composée de trois blocs de base : un émetteur, un canal de transmission et un récepteur (Figure2.1).



**Figure2.1** : Synoptique général d'un système de communication par fibre optique

Pour chacun de ces éléments constitutifs d'une liaison sur fibre optique, nous tenterons de décrire son rôle et son fonctionnement. Nous débuterons par la fibre optique, élément essentiel puisqu'elle permet le transport de l'information et est à l'origine des effets limitatifs du débit. Nous poursuivrons par la description de l'émetteur (laser, driver, modulateur), pour enchaîner sur les blocs constituant le récepteur (photodiode, amplificateur électrique, filtre électrique, circuit de remise en forme). Enfin, nous terminerons en présentant les éléments susceptibles d'être utilisés en ligne, tels que les amplificateurs, en vue d'améliorer la qualité du signal transmis ou d'augmenter la distance.

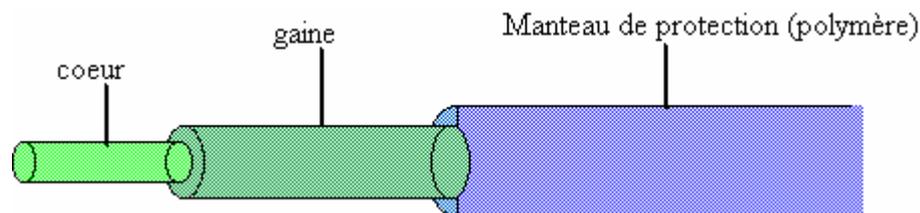
## II.2. La fibre optique :

La fibre optique est vite apparue très intéressante pour le domaine des télécommunications. Elle représente un support de transmission dont les nombreux avantages justifiant son introduction dans les systèmes de transmission sont donnés ci-après [12] :

- **Performances de transmission :** très faible atténuation, très grande bande utilisable, multiplexage possible.
- **Avantage de mise en œuvre :** très petite taille, grande souplesse, faible poids.
- **Sécurité électrique :** isolation total entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous de fortes tensions.
- **Sécurité électromagnétique :** insensible au parasites et n'en crée pas, inviolabilité presque totale.
- **Avantage économique :** moindre coût, en comparaison aux autres supports.

### II.2.1. Présentation générale des fibres :

Une fibre est un guide d'onde cylindrique et diélectrique, elle est constituée de deux diélectriques de même axe, le cœur et la gaine, entourés d'une couche de protection (Figure2.2) [11].



**Figure 2.2 :** Structure d'une fibre optique

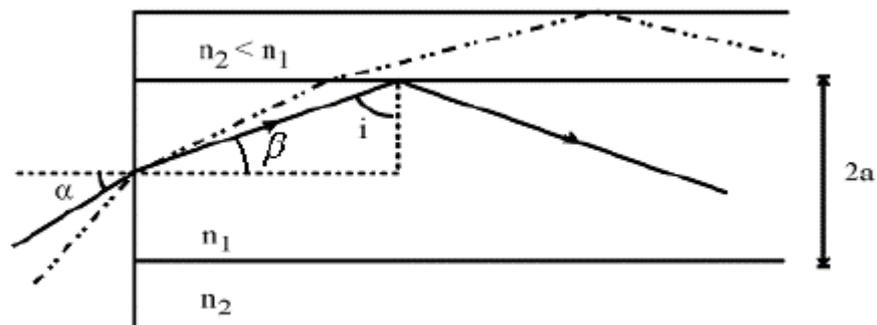
La plupart des fibres sont fabriquées à base de silice, matériau abondant et peu cher. Pour façonner les profils d'indice, la silice est dopée avec du dioxyde de germanium ou du pentoxyde de phosphore pour augmenter l'indice (donc plutôt pour le cœur de la fibre) et avec du fluor ou du trioxyde de bore pour le diminuer (plutôt réservé à la gaine optique).

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine. Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est

inférieur à celui du cœur (une différence de quelque % est suffisante). La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique (O.N.) (c'est dans le cas des fibres à saut d'indice, ces fibres vont être présentées dans la partie « d »).

**a) L'ouverture numérique pour les fibres à saut d'indice [11,13] :**

Pour transmettre à distance, le long de la fibre un signal lumineux, on doit réduire au minimum la dispersion de la lumière, dispersion due à la réfraction, dans la gaine, des rayons émis dans le cœur (Figure 2.3). L'angle  $\alpha$  doit être inférieur à une valeur maximale, telle que  $i$  reste supérieur à un angle appelé angle critique  $i_c$  pour que la réflexion soit totale (rayon en trait plein). Le trait interrompu représente un rayon de gaine, qui peut se propager sur une distance plus courte.



**Figure 2.3 :** Propagation du signal dans une fibre optique

Pour que la réflexion totale se produise à l'interface entre les deux milieux, on sait qu'il faut que l'angle  $i$  soit supérieur à l'angle critique  $i_c$ , cela veut dire :

$$\sin i > \sin i_c$$

$$\text{avec } \sin i_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Par ailleurs, l'angle  $i$  est déterminé par l'angle d'entrée du rayon dans la fibre  $\alpha$ . Supposons que la surface d'entrée de la fibre est perpendiculaire à son axe de symétrie, en passant du milieu extérieur d'indice de réfraction  $n_{ext}$  (généralement de l'air) dans le cœur de la fibre, l'onde est réfractée en accord avec la loi de Snell. On a :

$$n_{ext} \sin \alpha = n_1 \sin \beta$$

L'examen de la figure 2.3 montre que  $\beta$  n'est autre que  $(90^\circ - i)$ . La limite inférieure que nous avons imposée à  $i$  revient donc à fixer une limite supérieure à  $\beta$ , et donc aussi à  $\alpha$ . Cette limite se calcule facilement, en combinant les trois relations précédentes :

$$\frac{n_{ext}}{n_1} \sin \alpha = \sin \beta$$

$$\frac{n_{ext}}{n_1} \sin \alpha_{\max} = \sin(90^\circ - i)$$

$$\frac{n_{ext}}{n_1} \sin \alpha_{\max} = \cos i_c$$

$$\frac{n_{ext}}{n_1} \sin \alpha_{\max} = \sqrt{1 - \sin^2 i_c}$$

$$\frac{n_{ext}}{n_1} \sin \alpha_{\max} = \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}}$$

L'angle d'entrée dans la fibre  $\alpha$ , doit être inférieur à  $\alpha_{\max}$  :

$$\alpha_{\max} = \arcsin \left[ \frac{n_1}{n_{ext}} \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \right]$$

ou encore

$$\alpha_{\max} = \arcsin \left[ \frac{1}{n_{\text{ext}}} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right] \quad (1)$$

Cet angle maximal s'appelle l'angle d'acceptance ou l'angle d'admission de la fibre. On le retrouve dans de nombreux domaines en optique, est habituellement décrit par une quantité appelée l'ouverture numérique du système (O.N.) (numerical aperture). Par définition, l'ouverture numérique est donnée par :

$$O.N. = n_{\text{ext}} \sin \alpha_{\max}$$

En introduisant cette définition dans la formule (1), on obtient immédiatement l'ouverture numérique d'une fibre optique :

$$O.N. = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

L'angle d'acceptance peut alors s'exprimer en fonction de l'ouverture numérique :

$$\alpha_{\max} = \arcsin \frac{O.N.}{n_{\text{ext}}}$$

Dans le cas où le milieu extérieur est de l'air, on a :

$$\alpha_{\max} = \arcsin O.N.$$

Un autre paramètre fréquemment utilisé pour les fibres est défini par :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

L'ouverture numérique peut alors s'écrire en fonction de  $\Delta$  :

$$O.N. = \sqrt{2n_1^2\Delta} = n_1\sqrt{2\Delta}$$

Lorsque  $n_1 \approx n_2$ ,  $\Delta$  représente la différence relative d'indice :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot \frac{n_1 + n_2}{2n_1} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

### **b) Les modes de propagation de la lumière dans la fibre optique [11,13] :**

La transmission de l'information sur fibre optique s'effectue grâce à la propagation de l'énergie lumineuse émise dans la fibre et confinée dans son cœur.

Le traitement rigoureux de la propagation de l'énergie lumineuse dans la fibre optique s'exprime avec un ensemble d'équations différentielles du champ électromagnétique qui tiennent compte de la géométrie de la fibre; les solutions de ces équations sont les modes M de propagation du champ électromagnétique; Il est possible de donner une représentation simple et intuitive des mode de propagation, et en particulier des modes guidés dans la fibre optique représentant l'énergie lumineuse comme un ensemble de rayons.

Dans le paragraphe précédent nous avons vus que seuls les rayons entrant dans le cœur et ayant des angles compris à l'intérieur de l'ouverture numérique sont capables de se propager sans dispersion dans la gaine, pour cela on définit les rayons guidés ceux-ci, vont parcourir le cœur de la fibre selon des chemins différents effectuant des zigzags ou des lignes droites le long de l'axe de la fibre.

En tenant compte de l'approximation de l'optique géométrique ( $d \gg \lambda$ , ou  $d$  est le diamètre du cœur et  $\lambda$  est la longueur d'onde) on peut affirmer, schématiquement, que le nombre de rayons guidés correspondent au modes guidés de propagation du champ électromagnétique EM. Il est possible de déterminer le nombre de modes  $M$  pour une fibre par la relation :

$$M = \left( \frac{\pi^2}{2} \right) \cdot (d^2 \times O.N / \lambda^2)$$

$M$  : nombre de modes de propagation

$d$  : diamètre du cœur

$O.N.$  : ouverture numérique

$\lambda$  : longueur d'onde

### c) les différents types de la fibre :

Il existe deux types de fibres : multimode et monomode. Dans une fibre multimode, les diamètres des diélectriques sont plus importants que ceux d'une fibre monomode (diamètre du cœur  $\approx 50$  microns et diamètre de la gaine  $\approx 125$  microns) et les différents rayons empruntent des trajectoires différentes. Leurs chemins optiques et donc leurs temps de propagation sont différents. Il en résulte donc une dispersion intermodale. Pour diminuer cet effet, le profil d'indice du cœur peut être modifié de telle sorte à créer un " gradient d'indice " et non un saut d'indice (l'indice  $n_1$  n'est pas constant mais possède une symétrie autour de l'axe). Cela permet de réduire les différences de temps de propagation en réduisant les écarts entre chemins optiques.

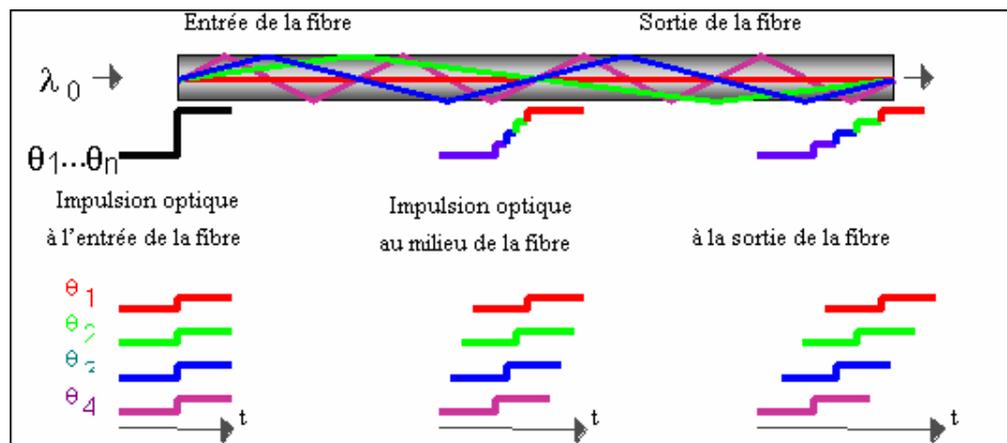
### d) Fibre multimode à saut d'indice :

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction reste constant dans tout le cœur, puis décroît brusquement en effectuant un saut d'indice dans la gaine (Figure 2.4). Elle présente un nombre de modes très grand.



**Figure 2.4 :** Schéma d'une fibre optique multimode à saut d'indice

Les rayons ayant la même longueur d'onde se propagent dans cette fibre en empruntant des chemins différents avec une vitesse de valeur constante  $v = \frac{c}{n_1}$ , il est donc évident que les rayons arrivent à destination avec des temps différents selon les parcours effectués ; ceci provoque une forte dispersion du signal lumineux qui est due à la multiplication des modes de propagation provoquant ainsi la distorsion de l'impulsion à l'extrémité de la fibre (Figure 2.5). Ce type de fibre ne trouve pas d'application dans les télécommunications.



**Figure 2.5 :** Distorsion d'une impulsion dans une fibre multimode à saut d'indice

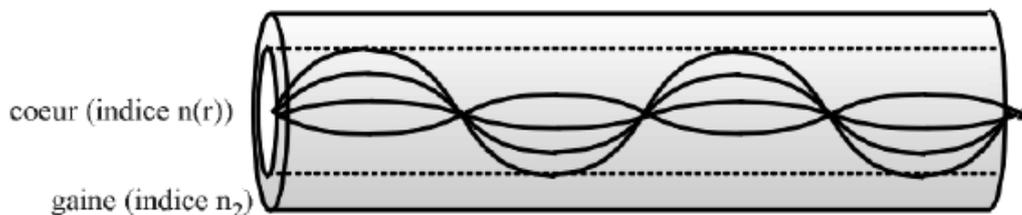
### e) Fibre multimode à gradient d'indice :

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction  $n$  n'est pas constant mais décroît graduellement du centre de la section du cœur jusqu'à la limite de la surface de séparation entre le cœur et la gaine (Figure 2.6).



**Figure 2.6 :** Schéma d'une fibre optique multimode à gradient d'indice

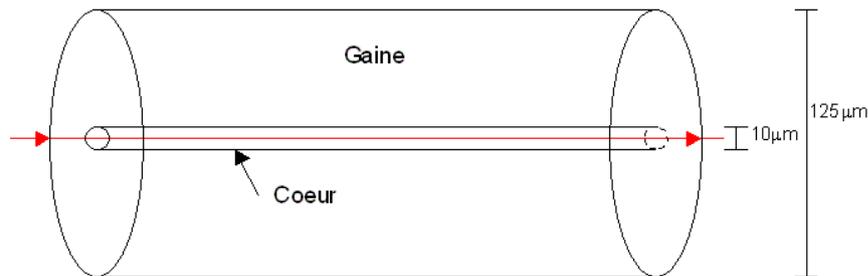
Les rayons se propagent dans la fibre à gradient d'indice d'une manière quasi ellicoïdal à cause des variations de l'indice de réfraction dans le cœur (Figure 2.7). L'avantage du profil à gradient d'indice réside dans le fait que les rayons relatifs aux parcours les plus longs (ceux qui sont à proximité de la gaine) voyagent dans un milieu de faible indice de réfraction donc avec une vitesse élevée, par contre les rayons qui font des parcours plus brefs (ceux qui sont à proximité du centre du cœur) voyagent dans un milieu d'indice de réfraction de valeur plus élevée, donc avec une vitesse faible. Dans ce cas toutes les composantes de l'impulsion effectuant des parcours différents atteignent presque en même temps le récepteur générant ainsi une impulsion peu déformée.



**Figure 2.7 :** Propagation de la lumière dans une fibre multimode à gradient d'indice

**f) Fibre monomode :**

Dans une fibre monomode, on obtient un seul mode grâce à la très faible dimension du cœur. Ainsi le chemin de la lumière est imposé, il n'y en a qu'un seul : celui du cœur (Figure 2.8).



**Figure 2.8 :** Propagation de la lumière dans une fibre monomode

Elle se divise en deux groupes :

- La fibre avec profil à gradient d'indice, qui a un diamètre du cœur de 10 μm environ et un diamètre de la gaine de 125 μm et qui n'est pas beaucoup utilisée en télécommunication.
- C'est la fibre avec profil à saut d'indice, ayant un diamètre de cœur de 8 à 10 μm et un diamètre de gaine 125 μm, qui est utilisée dans les télécommunications.

Dans le cadre de notre projet, nous ne utiliserons uniquement que de fibres monomodes. Elles possèdent un diamètre de cœur petit (8 à 10 microns en général). Compte tenu de ces dimensions, la fibre optique monomode classique est à saut d'indice.

L'UIT-T (Union Internationale des Télécommunications) a instauré des normes internationales pour les fibres optiques déployées dans les réseaux de télécommunications. Les recommandations G.650 à G.655 portent sur les paramètres géométriques,

mécaniques et optiques des fibres et sur les tolérances admissibles (Tableau 2.1) [11].

| Norme UIT-T                                    |                                                        | G. 652               | G. 653               | G. 655<br>(NZDSF)    | G. 655<br>(Téralight) |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Propriétés géométriques                        | Diamètre coeur ( $\mu\text{m}$ )                       | 9                    | 9                    | 9                    | 9                     |
|                                                | Diamètre fibre ( $\mu\text{m}$ )                       | 125                  | 125                  | 125                  | 125                   |
| Propriétés optiques<br>(à 1550 $\mu\text{m}$ ) | Atténuation (dB/km)                                    | 0,25                 | 0,25                 | 0,25                 | 0,22                  |
|                                                | Dispersion Chromatique (ps/nm/km)                      | 17                   | 0                    | 0,07                 | 8                     |
|                                                | Coefficient de non linéarité ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) | $2,7 \cdot 10^{-20}$ | $2,7 \cdot 10^{-20}$ | $2,7 \cdot 10^{-20}$ | $2,7 \cdot 10^{-20}$  |
|                                                | Section effective ( $\mu\text{m}^2$ )                  | 80                   | 57                   | 57                   | 65                    |
|                                                | PMD ps/sqrt (km)                                       | 0,05 à 0,08          | 0,1 max.             | 0,1 max.             | 0,04                  |

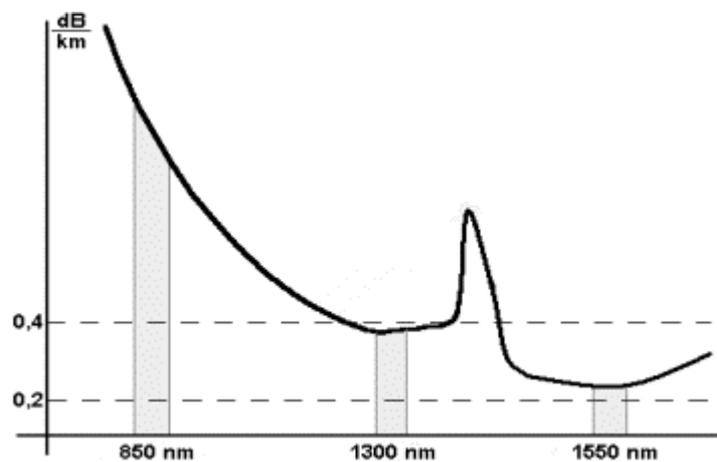
**Tableau 2.1 :** Caractéristiques de quelques fibres optiques de transmission

Les principales caractéristiques des fibres optiques sont l'atténuation, la dispersion chromatique, la dispersion de polarisation et les effets non linéaires, que nous allons présenter.

### II.2.2. L'atténuation [6,10] :

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 microcourbures 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 les fibres standard dédiées aux 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 2.9 montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications.



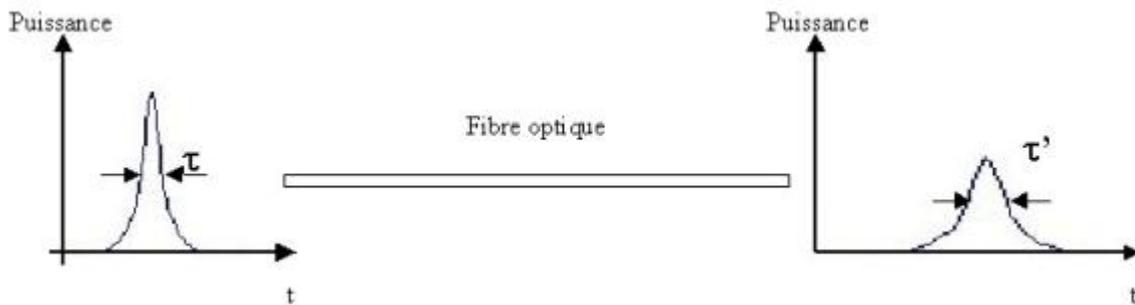
**Figure 2.9 :** L'atténuation spectrale d'une fibre en silice

L'atténuation minimale de 0,22dB/Km n'est pas très loin du minimum théorique pour la silice. La différence s'explique par le fait que l'on ne peut pas utiliser de la silice pure. On doit doper soit le cœur, soit la gaine et cela augmente les fluctuations de composition et donc les pertes par diffusion.

### **II.2.3. les dispersions dans la fibre [16] :**

Comme on s'intéresse aux communications numériques, notre signal informatique est par ce fait constitué d'un train d'impulsions. Lorsqu'une impulsion se propage dans une fibre

optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporel de celle-ci (Figure 2.10).



**Figure 2.10 :** Evolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique

Plusieurs types de dispersion existent, contribuant tous à l'étalement de l'impulsion au cours de sa propagation dans le guide :

- **La dispersion intermodale :** elle n'est présente que dans les fibres multimodes car il s'agit d'une dispersion liée au fait que les modes de la structure ne se propagent pas à la même vitesse.
- **La dispersion de polarisation :** le mode fondamental d'une fibre optique monomode ( $LP_{01}$ ) est une combinaison de deux modes électromagnétiques notés  $LP^x_{01}$  et  $LP^y_{01}$  qui ne se propagent pas à la même vitesse dans la fibre si celle-ci présente une biréfringence parasite, de forme ou de contrainte. Cette variation de vitesse provoque un déphasage entre les deux composantes du mode fondamental et par conséquent, introduit un phénomène de dispersion ; la dispersion de polarisation.
- **La dispersion du matériau :** elle traduit le fait que la silice, qui compose majoritairement la fibre, possède un indice optique, l'indice de réfraction, qui varie en fonction de la longueur d'onde. Cette dépendance de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde induit une modification de la vitesse de groupe propre au milieu et doit être incluse dans les lois de propagation de la lumière dans le guide.

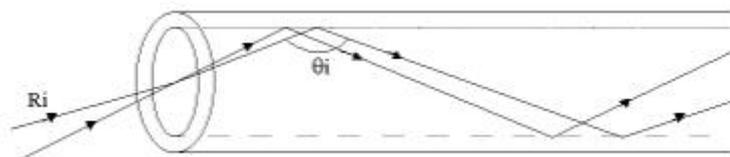
- **La dispersion du guide** : le fait que les ondes se propagent dans un guide et non dans un milieu illimité entraîne une dépendance de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde. Cette influence du guidage correspond à une nouvelle contribution à l'évolution spectrale des temps de groupe.

Moyennant un certain nombre d'approximations comme par exemple les termes croisés intervenant dans la définition de la dispersion du guide, on exprime communément la dispersion chromatique comme étant la somme de la dispersion du matériau et de la dispersion du guide.

Dans les fibres optiques monomodes dont le profil est à symétrie de révolution, la dispersion chromatique est la cause principale de l'élargissement des impulsions. Définissons ce qui est la vitesse de groupe avant de commencer l'étude de cette dispersion.

#### La vitesse de groupe :

Lors de l'excitation d'une fibre à gros cœur par une impulsion, l'énergie lumineuse de celle-ci se répartit sur un grand nombre de rayons qui se propagent suivant des chemins optiques différents le long de la fibre. Pour une fibre à saut d'indice, la longueur de ces trajets dépend des angles d'incidences  $\theta_i$  des rayons à l'interface cœur-gaine comme le montre la figure 2.11.



**Figure 2.11** : Propagation des rayons lumineux dans une fibre à saut d'indice multimode

Chaque rayon  $R_i$  est associé à un angle  $\theta_i$  et à un mode  $M_i$ . Un mode  $M_i$  est une répartition transversale d'énergie, invariante par translation axiale, qui résulte de l'interférence des ondes associées au rayon  $R_i$ .

Le temps de groupe, ou délai de groupe  $t_g$ , est défini comme étant le temps nécessaire pour qu'une impulsion se propage dans une fibre de longueur  $L$ .

$$t_g = \frac{L}{v_g}$$

où  $v_g$ , la vitesse de groupe associée, est définie par :

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$$

avec  $\omega$  la pulsation et  $\beta$  la constante de propagation axiale, projection sur l'axe de propagation du module du vecteur d'onde  $\vec{k}$  dont la définition est la suivante :

$$\|\vec{k}\| = n_1 \|\vec{k}_0\| = \frac{2\pi}{\lambda} n_1$$

avec  $k_0$  vecteur d'onde dans le vide et  $\beta = k_0 n_1 \cos(\theta) = n_1 \frac{\omega}{c} \cos(\theta)$

Si on travaille à une pulsation  $\omega$  autour de  $\omega_0$ , on peut déterminer  $t_g$  par son développement limité :

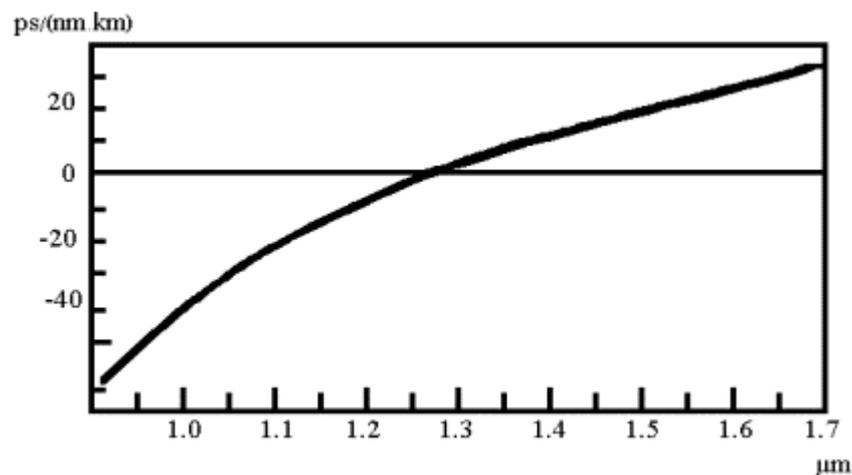
$$t_g = l \left[ \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} + (\omega - \omega_0) \left. \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} \right]$$

### II.2.3.1. La dispersion chromatique [2, 6, 13, 16, 22] :

#### a) Définition :

Le temps de propagation de groupe, défini précédemment, dépend de la longueur d'onde  $\lambda$ . Dans le cas d'un signal issu d'une source émettant sur une raie de largeur  $\Delta\lambda$ , ces temps de propagation vont s'étaler sur une certaine durée. Le paramètre de dispersion chromatique (CD) est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km. On le donne généralement en ps/(nm.km), les picosecondes correspondant à l'élargissement temporel, les nanomètres à la largeur spectrale et les kilomètres à la longueur de fibre.

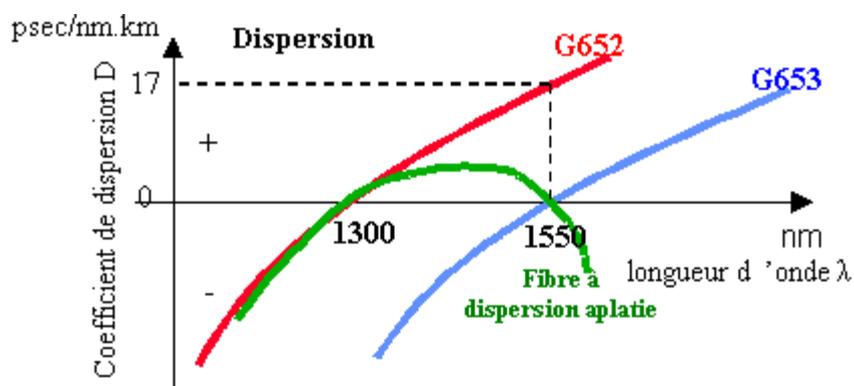
En fait, la dispersion chromatique est la somme d'un terme dû au matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion modale). La figure 2.12 montre l'évolution avec  $\lambda$  du terme matériau pour la silice.



**Figure 2.12 :** Dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde

On voit sur cette courbe, que la fibre monomode standard G.652 présente une dispersion maximale de 20 ps/(nm.km) à 1550 nm. Classiquement, on la considère de 17 ps/(nm.km). Dans la bande 1288 à 1359 nm, elle est de 3,5 ps/(nm.km). Ainsi, la capacité de transmission est la plus grande possible pour une longueur d'onde d'environ 1,3 μm. Elle est donc idéale

pour cette fenêtre spectrale et permet de transporter de très hauts débits. Malheureusement, ce n'est pas à cette longueur d'onde que l'atténuation est la plus faible (Figure 2.9). On a donc cherché à déplacer le point de dispersion nulle vers 1,55  $\mu\text{m}$ . On dit que ce genre de fibre, la G.653, est à dispersion décalée (Figure 2.13). Il existe aussi des fibres à dispersion aplatie pour lesquelles la dispersion totale reste très faible, de l'ordre de quelques ps/(nm.km), sur plus d'une centaine de nanomètres (Figure 2.13).



**Figure 2.13 :** Courbes de dispersion de quelques fibres optiques

On peut également fabriquer une fibre qui aurait une dispersion opposée à la première fibre. Toutes ces fibres spéciales sont obtenues en modifiant leur profil d'indice.

#### **b) Effets sur la transmission :**

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne donc différents temps de propagation et 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 symboles est possible. Cet élargissement  $\tau$  se calcule ainsi :

$$\tau = D(\text{ps} / \text{nm.km}) \times L(\text{km}) \times \Delta\lambda(\text{nm})$$

avec  $D$  le coefficient de dispersion chromatique de la fibre,  $L$  la longueur de la fibre et  $\Delta\lambda$  la largeur spectrale de la source.

La dispersion chromatique est donc un facteur majeur de limitation des performances des systèmes de transmission sur fibre à haut débit. On rappelle qu'en télécommunications, on utilise principalement des longueurs d'onde autour de  $1,55\mu\text{m}$  (en raison de sa faible atténuation dans cette plage spectrale). Aussi, plus les débits à transmettre seront élevés, plus le recouvrement peut se produire rapidement, et plus des techniques de compensation élaborées devront être mises en oeuvre. Il y a principalement deux possibilités : utiliser des fibres ayant la dispersion chromatique modifiée quasiment nulle pour cette longueur d'onde ou ajouter à la première fibre ayant la dispersion chromatique positive une seconde fibre à dispersion négative. On parle de compensation de dispersion. La mise en série de ces fibres permet de compenser et d'annuler les déformations des impulsions dues aux dispersions chromatiques. C'est un procédé souvent usité dans les réseaux de télécommunications.

### **II.2.3.2. La dispersion modale de polarisation [2, 6, 8, 13, 15, 20, 25] :**

#### **a) Définition :**

La dispersion modale de polarisation (Polarisation Mode Dispersion - PMD), due à la biréfringence résiduelle incontournable des fibres optiques, constitue l'un des principaux obstacles à la propagation d'impulsions : elle provoque, comme nous le verrons, un élargissement temporel des impulsions.

Quand on envoie un signal sur une fibre biréfringente, sans se soucier de sa polarisation, on excite les deux modes à la fois. Chacun d'entre eux a sa propre vitesse de propagation. Ce décalage des temps de propagation de groupe a pour effet le dédoublement du signal à la sortie de la fibre, et donc un brouillage de l'information.

#### **b) Origine :**

Une fibre optique de symétrie parfaitement circulaire ne présente pas de biréfringence. Mais une telle fibre n'existe pas en pratique, si bien que le moindre écart à la symétrie de

révolution se traduit immédiatement par l'apparition d'une biréfringence intrinsèque. Cette biréfringence peut également être créée par la présence d'impuretés.

L'application d'une contrainte externe va aussi introduire une biréfringence extrinsèque. Cette contrainte externe peut être une torsion, une flexion, localisées ou non. Il peut également s'agir d'une variation des conditions extérieures (température, pression...).

La biréfringence totale ainsi introduite dans la fibre donne naissance à deux axes orthogonaux : un axe lent et un axe rapide. Nous aurons donc deux directions de propagation privilégiées. La lumière polarisée linéairement suivant un mode propre de la fibre conservera son état de polarisation durant toute sa propagation. Mais, si la lumière n'est pas polarisée suivant un mode propre de la fibre, le champ électrique sera projeté sur les modes propres et l'état de polarisation changera alors périodiquement en raison de la variation de phase entre les deux modes, chaque mode se propageant avec une vitesse de phase différente.

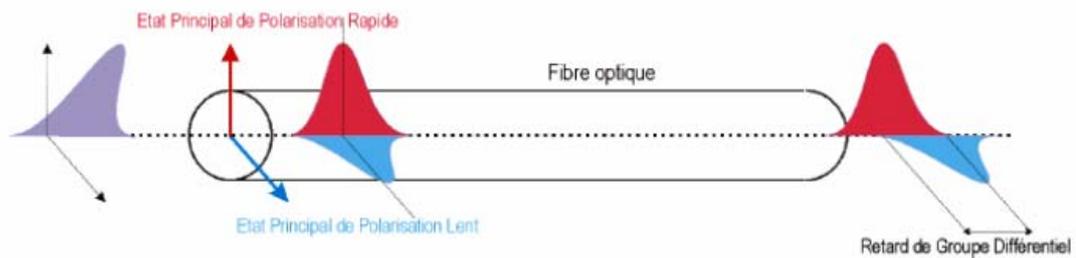
### c) Effets sur la transmission :

Supposons un état de polarisation initial à  $45^\circ$  d'un axe neutre de la fibre. L'impulsion va se décomposer à égalité suivant chaque axe. Le signal se propagera avec une vitesse  $v_s$  suivant l'axe lent et  $v_f$  suivant l'axe rapide (Figure 2.14).

A la sortie de la fibre de longueur  $L$ , nous aurons donc un retard entre les impulsions issues des deux axes qui sera :

$$T = L / (v_f - v_s)$$

Dans le cas d'une fibre de grande longueur, on considère des états principaux de polarisation en lieu et place des axes neutres. On obtient au final un retard de groupe différentiel moyen.



**Figure 2.14 :** Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à une biréfringence aléatoire de la PMD.

Une caractéristique essentielle de ce phénomène réside dans son caractère aléatoire, étant donné qu'il est principalement d'origine extrinsèque. La fibre optique apparaît ainsi comme un milieu fluctuant. La valeur moyenne du retard n'est donc pas suffisante pour le décrire totalement et nous utiliserons donc des données statistiques. La mesure principale est le DGD (Differential Group Delay), retard différentiel entre les deux composantes correspondant aux états principaux de la propagation :

$$\text{DGD} = \text{Biréfringence linéique} \times \sqrt{\text{Longueur de couplage}} \times \sqrt{\text{Longueur de la fibre}}$$

La longueur de couplage est la distance à partir de laquelle il devient indispensable de raisonner sur des bases statistiques.

#### II.2.4. les effets non linéaires dans la fibre :

Les systèmes de télécommunications sur fibre sont conçus dans l'hypothèse d'une transmission linéaire et les effets non linéaires sont alors des effets parasites qui dégradent les performances quand les puissances véhiculées deviennent élevées. Aujourd'hui, les systèmes de transmission à haut débit et grande distance utilisent des amplificateurs de puissance à l'émission, ce qui conduit à des puissances injectées dans la fibre très élevées et des effets non linéaires non négligeables.

### II.2.4.1. L'effet Kerr [6, 12] :

L'effet Kerr, en optique géométrique, est une extension des lois de la réfraction de la lumière lors de la propagation de cette lumière dans des milieux d'indice variable. L'indice de réfraction peut alors s'exprimer sous la forme d'une équation non linéaire, proportionnellement à la puissance optique :

$$n = n_0 + n_2$$

avec  $n_0$  une constante et  $n_2$  une fonction quadratique de la puissance.

Une première conséquence de l'effet Kerr se traduit par un phénomène d'auto-modulation de phase. L'impulsion est affectée d'une modulation de phase parasite qui croît avec la distance. La modulation de phase, combinée à la dispersion chromatique, conduit à un élargissement temporel des signaux se propageant dans la fibre.

Les autres conséquences de l'effet de Kerr sont visibles si plusieurs ondes se propagent dans la fibre. Alors, la non linéarité induit une modulation de phase croisée (cross phase modulation), ainsi que des phénomènes connus sous le nom de mélange à trois ou quatre ondes, sources d'intermodulations entre les différents canaux d'un système de transmission utilisant plusieurs longueurs d'onde.

### II.2.4.2. Les effets Raman et Brillouin [6, 12] :

L'effet Raman est le plus connu des effets non linéaires. Il s'agit d'une interaction photon-phonon, c'est-à-dire d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau.

L'effet Brillouin est de même nature que la diffusion de Raman, mais l'interaction se fait avec des phonons acoustiques, c'est-à-dire avec les vibrations d'ensemble du matériau, se propageant à la vitesse des ondes acoustiques.

La fibre possède des qualités non négligeables comme support de transmission qui lui ont permis de s'imposer dans les réseaux de télécommunications. Et des défauts qui peuvent être corrigés. Nous allons maintenant présenter les autres modules de la ligne de transmission optique.

Comme nous venons de le voir, la fibre optique est essentiellement l'une des plus remarquables technologies de communication du siècle dernier. Et tout porte à croire qu'elle le sera encore au cours du siècle prochain.

La lumière transportée par la fibre ne pouvant pas être exploitée par l'utilisateur sous cette forme, les extrémités des réseaux intègrent des composants optoélectroniques destinés à convertir l'information en signal lumineux et inversement. C'est le rôle des modules d'émission et de réception que nous allons aborder dans la suite.

### **II.3. Le module d'émission :**

La partie émission d'une liaison optique est composée de divers éléments (laser, modulateur, driver). Son rôle est de délivrer au support, de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données à transmettre. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, la technique de modulation externe sera retenue.

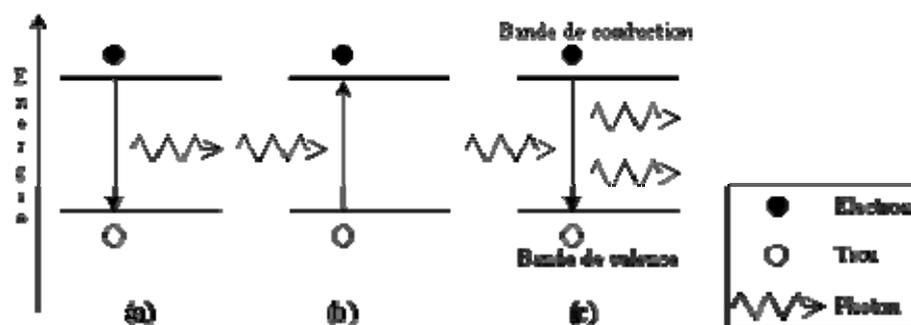
#### **II.3.1. Le laser [3, 21, 24] :**

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur 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, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique. Ainsi la diode laser est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre. C'est pour ces raisons que nous ne parlerons dans la suite que des diodes lasers et que nous n'aborderons pas les diodes électroluminescentes.

Le mot laser, sigle de l'expression anglaise Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement.

Un laser est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée. En effet, dans un semi-conducteur, un électron peut passer d'un état à un autre de trois façons (Figure 2.15) :

- **L'émission spontanée** : De sa propre initiative, l'électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant un photon spontanément.
- **L'absorption** : En absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé (électron dans la bande de conduction et trou dans la bande de valence).
- **L'émission stimulée** : Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident. On parle alors de lumière cohérente. Avec l'émission stimulée s'introduit la notion de gain ou d'amplification du rayonnement incident puisque, à partir d'un photon, on en obtient deux.



**Figure 2.15:** Schéma des processus d'émission spontanée (a), d'absorption (b) et d'émission stimulée (c).

Statistiquement, à l'état naturel, un photon émis peut de nouveau être absorbé par un électron et globalement, l'émission et l'absorption se compensent. Pour obtenir l'effet laser et donc rendre l'émission stimulée prépondérante, deux conditions doivent être réalisées :

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

Il faut qu'il y ait suffisamment de photons excitateurs. Pour cela, on oblige l'énergie lumineuse à s'accumuler sur place en enfermant le semi-conducteur dans une cavité résonante constituée, par exemple, par un résonateur du type Pérot Fabry [Annexe A].

Les photons d'émission spontanée amorçant la réaction, lorsque ces deux conditions sont réunies, l'effet laser peut se produire.

### **II.3.2. La modulation des données :**

Ce passage a été en partie vu dans le premier chapitre. Les lasers à semi-conducteur ont l'avantage pour les systèmes de télécommunication d'être modulés facilement en faisant varier le courant d'alimentation. Par cette méthode, la densité des porteurs évolue et une modulation de la lumière émise est obtenue. Mais malheureusement la diode laser possède des propriétés qui limitent la modulation directe notamment pour les hautes fréquences.

C'est pour cette raison que dans le cadre de notre projet nous avons choisit la modulation externe.

#### **a) La modulation externe :**

Les propriétés des diodes lasers vues font que la modulation directe est satisfaisante jusqu'à 5 Gigahertz environ mais qu'au delà, cette méthode n'est plus applicable. Trop de dégradations apparaissent et limitent les capacités de transmission. La modulation externe est une bonne alternative permettant au laser d'émettre un signal constant. Et tous les défauts dus à la modulation du courant de polarisation seront atténués.

Plusieurs types de modulateurs sont disponibles, en particulier nous nous intéresserons au modulateur électro-absorbant.

### **b) Le modulateur électro-absorbant (MEA) [5] :**

Le principe de fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un semi-conducteur soumis à un champ électrique. Cet effet est connu sous le nom d'effet Franz-Keldysh [Annexe B] dans un matériau massif et d'effet Stark confiné [Annexe B] dans un matériau quantique. C'est au voisinage du seuil d'absorption, là où la dérivée de l'absorption par rapport à la longueur d'onde est la plus grande, que cet effet est le plus efficace et qu'il est par conséquent exploité. Une augmentation du champ électrique translate le seuil d'absorption vers les grandes longueurs d'onde et de ce fait, augmente l'absorption de la lumière traversant le semi-conducteur.

### **II.3.3. Le circuit de commande :**

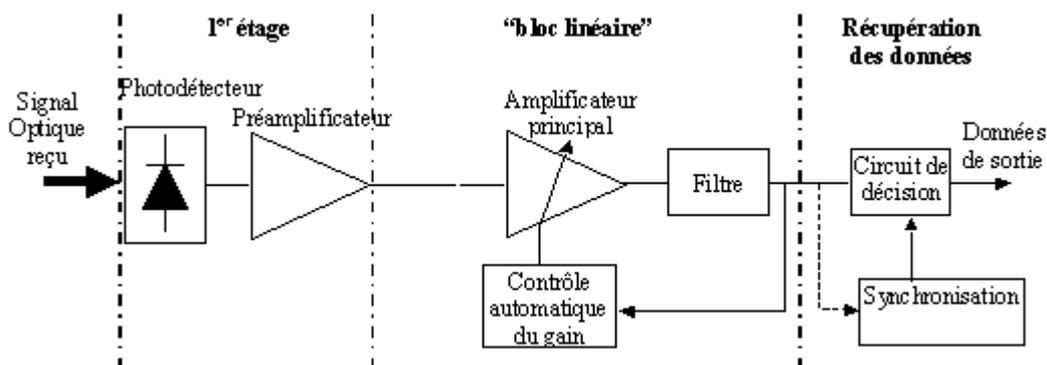
Les niveaux des données électriques émises nécessitent une adaptation pour les rendre compatibles avec ceux acceptables par le modulateur employé. Il est donc nécessaire d'utiliser un driver en amont du modulateur.

Le modulateur électro-absorbant est transparent (c'est-à-dire laisse passer la lumière) lorsqu'il reçoit une tension nulle et absorbant pour une tension négative. Le circuit de commande du modulateur va alors forcer le niveau haut des données à 0 Volt et le niveau bas à une valeur choisie selon l'extinction souhaitée.

### **II.4. Le module de réception :**

Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Il a été convenu au premier chapitre que la réception serait basée sur la technique de détection directe. Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels. On y retrouve trois parties (Figure 2.16) :

- Le bloc de 'premier étage' 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', composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre, réducteur de bruit.
- Le bloc 'récupération des données', correspondant au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation.



**Figure 2.16** : Schéma d'un récepteur de données

Nous allons maintenant présenter chaque bloc afin de reconstituer le module de réception.

#### II.4.1. Le photodétecteur :

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur, qui pour simplifier, se comporte comme un compteur de photons et donc un générateur de courant. La première propriété requise est une bonne sensibilité pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité : il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10 Gbits/s voire même 40 Gbits/s. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit.

Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que

d'autres dispositifs soient plus sensibles. Dans ce paragraphe, nous rappellerons le principe de la photodétection avant d'étudier plus précisément un exemple de photodétecteurs : la photodiode PIN.

### a) 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 généré une paire électron-trou. Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher les électrons de retomber dans son état le plus stable. 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.

### b) Les photodiodes PIN [3, 12, 9, 24] :

Pour effectuer la photodétection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large. D'où l'intérêt de la photodiode PIN (Figure 2.17 et Figure 2.18).

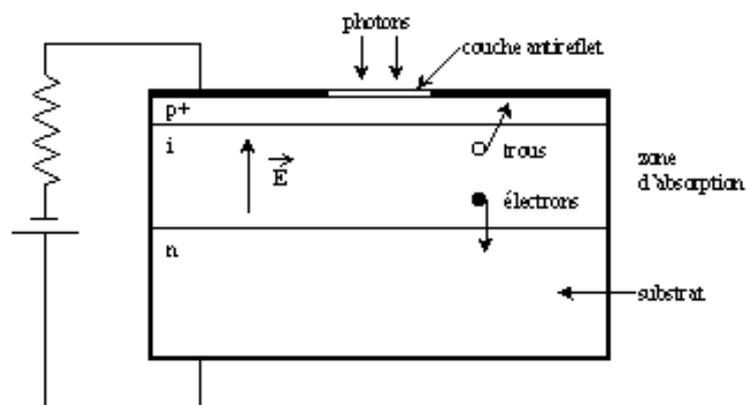
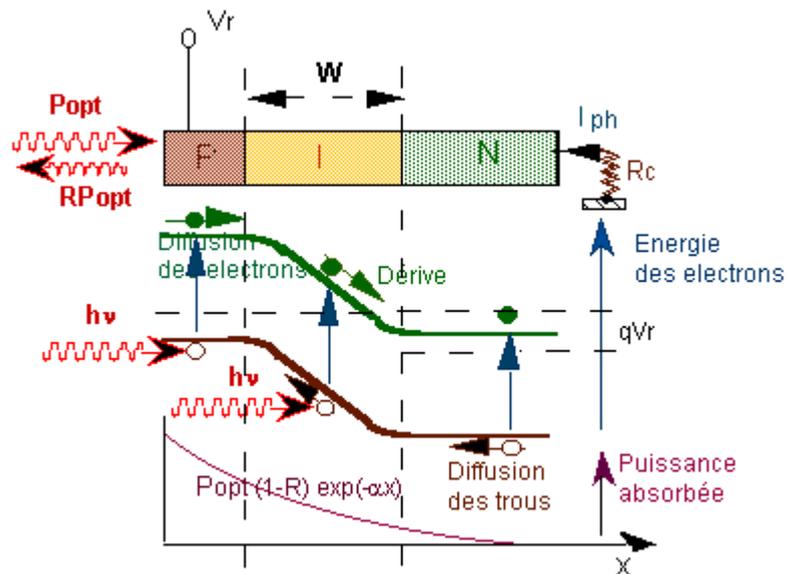


Figure 2.17 : Photodiode PIN



**Figure 2.18 :** Principe de la photodétection avec une photodiode PIN

La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque (I), où règne le champ électrique pratiquement uniforme, qui sépare les porteurs. Une des zones traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau.

Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode PIN sont la sensibilité, le courant d'obscurité, le temps de réponse...

On peut relever un courant d'obscurité,  $I_{obs}$ , qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairage. Ce courant ne provient donc pas des photons transmis par la fibre. Il peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite... L'expression du courant total dans la photodiode est donnée par l'équation suivante:

$$I_{ph} = S \cdot P_{opt} + I_{obs}$$

avec  $S$  la sensibilité et  $P_{opt}$  la puissance optique reçue.

Le temps de réponse de la photodiode doit être très bref. Il est limité par deux facteurs. D'une part, la capacité de jonction est d'autant plus réduite que l'on élargit la zone d'absorption. D'autre part, le temps de transit diminue si on rétrécit cette zone. Un compromis est donc à trouver. On améliore le temps de réponse en augmentant la tension de polarisation inverse, ce qui réduit la capacité et le temps de transit. La longueur de la zone intrinsèque est optimisée afin de maximiser le rendement et le temps de réponse.

Le signal électrique fourni par la photodiode n'est pas parfait, il est bruité. Apparaît entre autres le bruit quantique (encore appelé bruit photonique ou de grenaille ou bruit Schottky). Il provient du caractère aléatoire de la création des paires électron-trou. Ce bruit proportionnel à la puissance optique reçue par la photodiode est inévitable. L'expression de la variance du bruit quantique s'écrit sous la forme :

$$\langle i_q^2 \rangle = 2eSP_{opt}B$$

où  $e$  est la charge de l'électron ;  $S$  la sensibilité de la photodiode ;  $P_{opt}$  la puissance optique reçue par la photodiode et  $B$  la bande passante du signal.

Il est nécessaire de tenir compte aussi du bruit d'obscurité associé au courant d'obscurité. La variance de ce bruit a pour expression :

$$\langle i_{obs}^2 \rangle = 2eI_{obs}B$$

Il est présent également un bruit en  $1/f$  (avec  $f$  la fréquence du signal) et un bruit thermique, provenant des circuits de polarisation du détecteur et notamment du préamplificateur. Le bruit thermique a pour valeur :

$$\langle i_T^2 \rangle = \frac{4kT}{R}B$$

$k$  étant la constante de Boltzmann,  $T$  la température absolue et  $R$  la résistance du schéma équivalent aux circuits du détecteur.

#### **II.4.2. L'amplificateur électrique :**

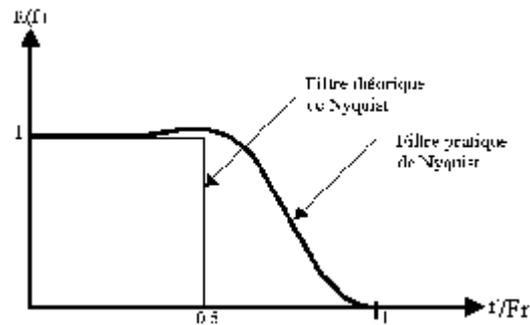
Le courant fourni par la photodiode, malgré la présence d'un préamplificateur, reste souvent assez faible. Il est donc nécessaire d'utiliser un amplificateur en sortie de photorécepteur. Le gain adéquat peut être assez élevé. En effet, du fait de la détection quadratique, il faut 2 dB électriques pour compenser 1 dB optique. Un amplificateur classique sera utilisé dans ce travail [21].

#### **II.4.3. Le filtre :**

Afin de minimiser le bruit en sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande  $0 - \Delta F$  qui soit la plus petite possible, tout en ne créant pas d'interférences intersymboles, c'est-à-dire telle que la réponse du filtre à un symbole s'annule à tous les instants de décision sur les symboles voisins.

Selon le critère de Nyquist, formulé vers 1920 dans le cadre de la transmission télégraphique, on sait que le filtre passe-bas rectangulaire de largeur  $\Delta F = F_r / 2$  possède cette propriété, avec  $F_r$ , la fréquence rythme du signal. Cependant, ce filtre théorique n'est pas réalisable. De plus, le critère s'applique à des impulsions de Dirac, et non à des impulsions au format NRZ.

On utilise donc le "filtre pratique de Nyquist" (Figure 2.19) dont la largeur de bande de bruit, dans les conditions habituelles, vaut approximativement  $\Delta F = 0.8 \times F_r$  [21].



**Figure 2.19 :** Réponses fréquentielles du filtre théorique et du filtre pratique de Nyquist

#### II.4.4. Le bloc de décision :

On doit assurer à l'abonné une qualité d'information parfaite. Pour cela, une remise en forme du signal détecté est réalisée grâce au bloc de décision. Ce dernier est composé d'un détecteur à seuil et d'un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation.

Lors d'un front montant de l'horloge, le signal reçu est comparé au seuil de décision. S'il est supérieur, alors un niveau haut sera détecté et établi, sinon, ce sera un niveau bas. L'horloge doit être synchronisée sur le signal incident.

Nous terminerons ce chapitre en présentant les éléments pouvant être utilisés en ligne, tels que : les amplificateurs, les isolateurs...

#### II.5. Composants supplémentaires :

Dans une liaison numérique sur fibre optique, on peut trouver aussi :

##### II.5.1. Les amplificateurs optiques :

L'évolution des systèmes de transmission optique a connu une révolution avec la mise au point et le développement industriel des amplificateurs optiques à la fin des années 80.

Trouvant désormais des fibres optiques à dispersion chromatique soit faible, soit opposée, la principale contrainte de ce support de transmission était devenue l'atténuation des signaux durant la propagation. Or le photodétecteur émettra un courant de qualité, codant correctement l'information à transmettre, seulement si le photocourant n'est pas noyé dans le bruit, et donc si la puissance optique reçue est suffisamment importante. L'amplification optique devient alors une alternative aux complexes répéteurs-régénérateurs optoélectroniques. Elle permet de compenser ces pertes et de contrôler régulièrement la puissance optique des signaux. Il est désormais possible de transmettre le signal optique sans conversion sur une distance beaucoup plus importante [21].

### **II.5.2. Les isolateurs :**

En optique comme en électricité, un isolateur est un dispositif passif non réciproque qui a une faible atténuation dans un sens et une forte atténuation dans l'autre sens. Il a donc une entrée et une sortie. Dans les systèmes de télécommunications par fibre optique, les isolateurs sont le plus souvent employés pour atténuer la lumière issue des réflexions parasites, qui, par exemple en revenant dans le laser, vient troubler son fonctionnement. Les occasions d'avoir des réflexions tout au long de la ligne sont fréquentes (un connecteur optiquement mal adapté, une extrémité de fibre mal coupée, ...) [21].

### **II.5.3. Les coupleurs :**

Ce sont des éléments passifs, réciproques à « n » entrées et « n » sorties. Dans les réseaux de fibres optiques, les coupleurs permettent de distribuer le signal optique vers plusieurs fibres ou inversement, acheminer le signal venant de plusieurs fibres vers une seule. Le principe de base est celui du couplage par onde évanescente entre deux fibres dont les coeurs sont très proches. Le champ électromagnétique s'étend au delà des coeurs. De ce fait, la lumière qui se propage dans un guide sent la présence de l'autre guide et se transfère progressivement dans l'autre guide. Si les guides sont identiques, la totalité de la lumière passe dans le second guide après une longueur d'interaction  $L_{inter}$ . Si cette région d'interaction est supérieure à  $L_{inter}$ , la lumière repasse dans le premier guide [21].

#### **II.5.4. Les filtres optiques :**

Le filtrage a pour but de limiter l'occupation spectrale d'un signal. La séparation spectrale est réalisée en réfléchissant une certaine gamme de longueurs d'onde et en transmettant les autres.

On caractérise donc le filtre par sa bande passante, c'est-à-dire la gamme de fréquences souhaitée (ou de longueurs d'onde) pour lesquelles il laisse passer la lumière et par sa bande atténuée, c'est-à-dire le domaine de fréquences (ou de longueurs d'onde) pour lesquelles il réfléchit la lumière incidente [21].

#### **Conclusion :**

Une description de tous les composants présents dans un système de transmission sur fibre optique a été réalisée. Cette présentation a permis d'établir le cahier des charges des composants à utiliser dans la simulation qui fera l'objet du prochain chapitre.

Le Laser et son principe de fonctionnement ont été décrits. L'utilisation des modulateurs externes pour l'inscription des données sur le signal optique ayant été retenue.

Les fibres optiques possèdent de nombreuses qualités pour transmettre une grande quantité d'informations sur de longues distances. Plusieurs de leurs défauts ont été énumérés particulièrement la dispersion chromatique et la dispersion modale de polarisation et des solutions sont proposées pour les corriger. Sont apparus sur le marché depuis quelques années des amplificateurs optiques pour remédier à l'atténuation du signal dans les fibres.

Le principe de la photodétection a également été rappelé, avec une description de la photodiode PIN. Les techniques de remise en forme du signal ont été abordées.

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

L'objectif de ce mémoire est l'utilisation de la simulation pour caractériser et étudier les effets de la dispersion chromatique (CD) et de la dispersion de mode de polarisation (PMD) sur le débit et la distance dans les transmissions numériques à haut débit par fibre optique.

Dans un premier temps, la simulation doit permettre de visualiser ces effets sur le signal informatif pour différents débits et distances. Ensuite, elle propose une méthode d'évaluation des performances de la liaison, ce qui nous permettra de mieux voir l'influence de ces deux dispersions.

La première partie de ce chapitre présente la méthode de travail et les critères permettant d'évaluer la qualité de la transmission. La seconde partie illustre les différentes liaisons simulées. Enfin, les principaux résultats sont rassemblés dans la dernière partie.

La procédure de travail repose sur les étapes suivantes :

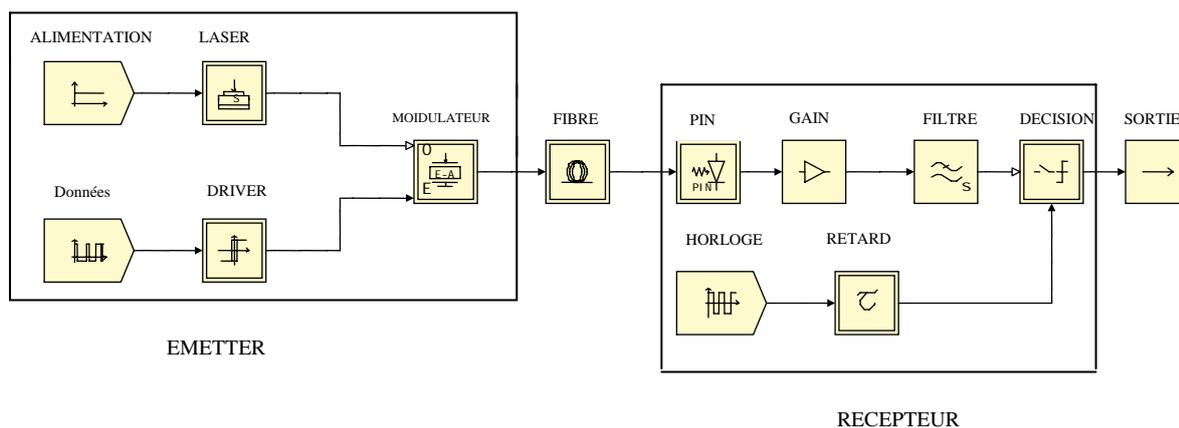
1. Conception et simulation d'une liaison de référence (sans dispersions) pour différents débits (5 Gbits/s, 10 Gbits/s, 15 Gbits/s ...) et longueurs de fibre (50Km et 100Km).
2. Effets de la dispersion chromatique lors de la simulation de la liaison pour les mêmes données qu'en 1.
3. Effets de la dispersion de mode de polarisation lors de la simulation de la liaison pour les mêmes données qu'en 1.
4. simulation de la liaison prenant en compte la contribution des deux dispersions (CD+PMD).

### III.2. l'évaluation des performances :

Le simulateur propose une méthode d'évaluation des performances d'une liaison de télécommunication par fibre optique. Comme cela a été présenté dans le chapitre 1, cette méthode repose sur la détermination du facteur Q, sachant que les normes fixées dans le domaine des télécommunications demandent, pour maintenir la qualité de transmission, qu'il soit supérieur à 6 ce qui équivalent à une probabilité d'erreur inférieure à  $10^{-9}$  [12].

### III.3. Construction et simulation d'une liaison de référence (sans dispersion) :

La figure 3.1 représente le synoptique général de la liaison de que nous allons simuler.



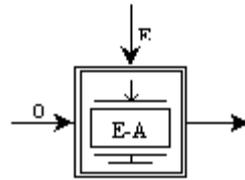
**Figure 3.1 :** Synoptique de la liaison de référence

Cette liaison comporte les composants suivants :

#### III.3.1. Le module d'émission :

##### ❖ Le modulateur externe:

Le modèle que nous choisissons dans la bibliothèque du simulateur est un modulateur externe de type électro-absorbant MEA. Il est représenté par la figure 3.2.



**Figure 3.2 :** Modèle de simulation du MEA

Il faut envoyer au modulateur un signal optique, issu d'un laser, et un signal électrique, représentant l'information à transmettre.

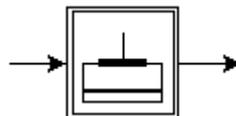
Pour une tension nulle issue du driver, le modulateur laisse passer la lumière qu'il reçoit sur son entrée optique (O). Pour une tension négative, le modulateur absorbe une proportion du signal optique.

Lors d'une modulation externe, la puissance de sortie du laser est constante. Puis ce signal lumineux est modulé par ce modulateur électro-absorbant, mais il est inévitablement atténué. La puissance de sortie de l'émetteur est égale à la puissance délivrée par le laser, diminuée par des pertes d'insertion du modulateur et des pertes d'absorption [6] :

$$P(\text{fibre})_{dBm} = P(\text{laser})_{dBm} - \text{Pertes insertion}_{dB} - \text{Pertes absorption}_{dB} \quad (**)$$

#### ❖ Le laser :

L'entrée optique du MEA doit recevoir une onde optique pure. Nous utilisons donc un modèle de laser (Figure 3.3) dont le courant de commande est constant.



**Figure 3.3 :** Modèle de simulation du laser

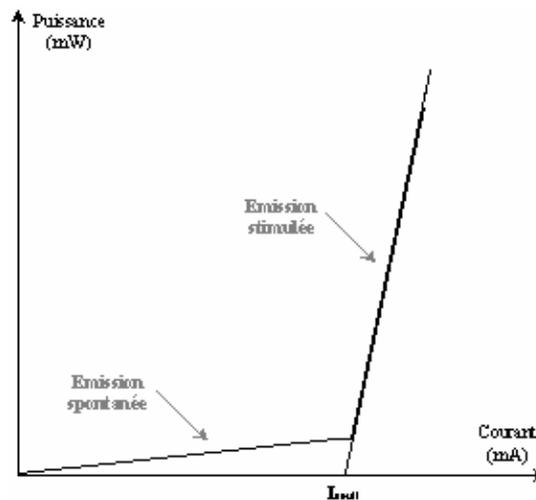
La puissance du signal de sortie du laser dépend du niveau du courant de commande du laser [9]:

$$P(\text{laser}) = \eta(I_a - I_s) \quad \text{pour } I_a \succ I_s$$

$$P(\text{laser}) = 0 \quad \text{pour } I_a \prec I_s$$

où  $I_a$  : courant injecté au laser ;  $I_s$  : courant de seuil du laser ; et  $\eta$  : rendement du laser égal à la pente de la zone émission stimulée (Figure 3.4).

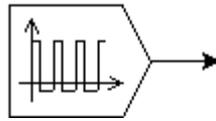
Le courant de seuil marque la séparation entre un fonctionnement dominé par l'émission spontanée et un fonctionnement dominé par l'émission stimulée (Figure 3.4).



**Figure 3.4 :** Caractéristique Puissance-Courant d'un laser

#### ❖ Les données électriques :

Les données électriques au format NRZ sont une succession de tensions de niveau haut et de niveau bas. L'opérateur permettant de les simuler se nomme Séquence-Binaire-Pseudoaléatoire (Figure 3.5).

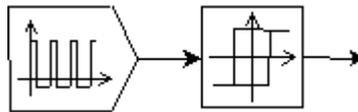


**Figure 3.5 :** Modèle de simulation des données NRZ pseudoaléatoires

Ce modèle délivre une séquence de créneaux d'amplitude  $\pm 1$  de durée égale à l'inverse du débit.

L'information désignant le message à transmettre est désormais modélisée. Cependant, même si le codage est correct, les niveaux électriques en sortie de ce bloc ne conviennent pas au modulateur utilisé. En effet, le MEA ne fonctionne pas pour une tension de + 1 Volt et absorbe très peu pour - 1 Volt. Il convient donc de modifier les valeurs hautes et basses de la séquence binaire. C'est le rôle du driver de modulateur.

Nous considérerons un driver qui fera passer le niveau bas de -1 V à - 4 V, et le niveau haut de + 1 V à 0 V, sans perturber l'allure du signal (Figure 3.6).



**Figure 3.6 :** Modèle de simulation de la séquence de données avec les niveaux corrects

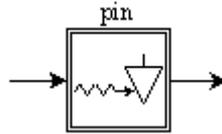
Le module d'émission étant entièrement décrit, il est nécessaire de présenter le module de réception.

### III.3.2. Le module de réception :

Le module de réception a pour objectif de convertir l'information portée par la modulation du signal lumineux en impulsions électriques. Il est composé d'une photodiode, d'un amplificateur électrique, d'un filtre et d'un régénérateur.

### ❖ La photodiode :

Le modèle utilisé dans la simulation est une photodiode PIN (Figure 3.7).



**Figure 3.7 :** Modèle de simulation de la photodiode PIN

A la sortie du modèle, l'expression du photocourant détecté est [3]:

$$I_{ph} = S.P_{opt} + I_{obs} + I_{bruit}$$

avec

$S$  : Sensibilité de la photodiode

$P_{opt}$  : Puissance optique reçue

$I_{obs}$  : Courant d'obscurité

$I_{bruit}$  : Courant de bruit

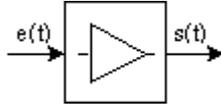
Le courant de bruit est calculé à partir du bruit quantique et du bruit d'obscurité. Le modèle disponible ne prend pas en considération le bruit thermique.

### ❖ L'amplificateur électrique :

Le signal optique a été fortement atténué durant sa propagation dans la fibre optique, et la photodiode PIN ne fournit pas un courant très élevé. Une amplification du signal est donc souhaitable avant la prise de décision.

Le modèle d'amplificateur électrique, disponible dans le simulateur, est un opérateur de gain, nommé Gain (Figure 3.8). Ce modèle permet de multiplier le signal d'entrée par une constante :

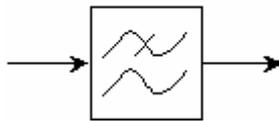
$$s(t) = G.e(t)$$



**Figure 3.8 :** Modèle de simulation de l'amplificateur électrique

#### ❖ Le filtre :

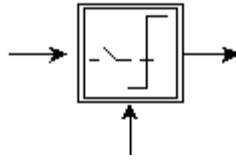
Afin de minimiser le bruit en sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande  $0 - \Delta F$  qui soit la plus petite possible, tout en ne créant pas d'interférences intersymboles. En simulation, nous insérons, en fin de chaîne, un filtre passe-bas de fréquence de coupure égale à 0,8 fois le débit (Figure 3.9).



**Figure 3.9 :** Modèle de simulation du filtre

#### ❖ Le régénérateur :

L'opérateur de décision (Figure 3.10) appartient à la classe des systèmes de régénération. Son schéma de principe fait apparaître une sortie constituée du signal binaire régénéré, une horloge à la fréquence rythme et un signal d'entrée correspondant à la sortie du filtre. Sur chaque front montant de l'horloge, le niveau du signal filtré est comparé au seuil de décision. La sortie est réinitialisée à  $\pm 1$ , suivant le résultat de la comparaison.

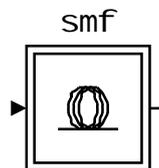


**Figure 3.10 :** Modèle de simulation du régénérateur

La décision doit être prise au centre du bit du signal à régénérer, lieu où les interférences entre symboles sont minimales. Ceci permet de diminuer les probabilités d'erreurs de décision. Il faut donc synchroniser l'horloge pour que les fronts montants tombent au milieu des bits du signal. Nous utilisons donc un opérateur de retard.

### III.3.3. Le support de transmission :

Nous insérerons dans la liaison de référence une fibre standard télécom (Single Mode Fiber, SMF), définie par la norme UIT G.652 (Figure 3.11), sans prendre en considération la CD et la PMD.



**Figure 3.11 :** Modèle de simulation de la fibre optique

Pour un débit donné (Supérieur à 50 Mbits/s) et un taux d'erreur inférieur à  $10^{-9}$  (bonne qualité de transmission), la puissance optique à la sortie de la fibre est calculée comme suit [3] :

$$P_{\text{sortie}} = -53 + 10 \log_{10} f$$

$P_{\text{sortie}}$  est exprimée en dBm et  $f$  en Mbits/s.

Cette puissance nous permet de déterminer la puissance injectée dans la fibre [3] :

$$P_{\text{fibre}} = P_{\text{sortie}} + \alpha.L$$

avec  $\alpha$  : atténuation linéique et  $L$  : longueur de la fibre.

En intégrant l'équation précédente dans l'équation (\*\*), on obtient la puissance laser nécessaire pour une bonne qualité de transmission :

$$P(\text{laser}) = P_{\text{sortie}} + \alpha.L + \text{Pertes insertion} + \text{Pertes absorption}$$

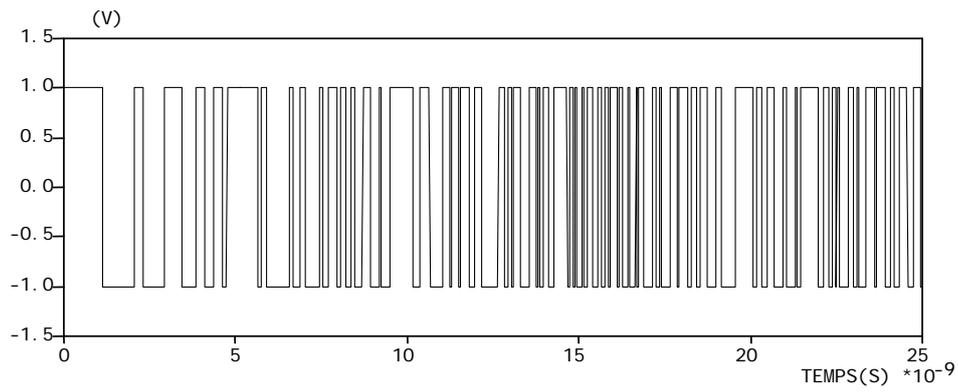
### III.3.4. Visualisation des signaux de la liaison de référence :

Avant de passer à la simulation des effets de la CD et de la PMD, il apparaît intéressant de visualiser l'allure des signaux en divers points de la liaison. Ceci permet de visualiser les transformations successives du signal durant son parcours, le comportement et l'influence de chaque opérateur.

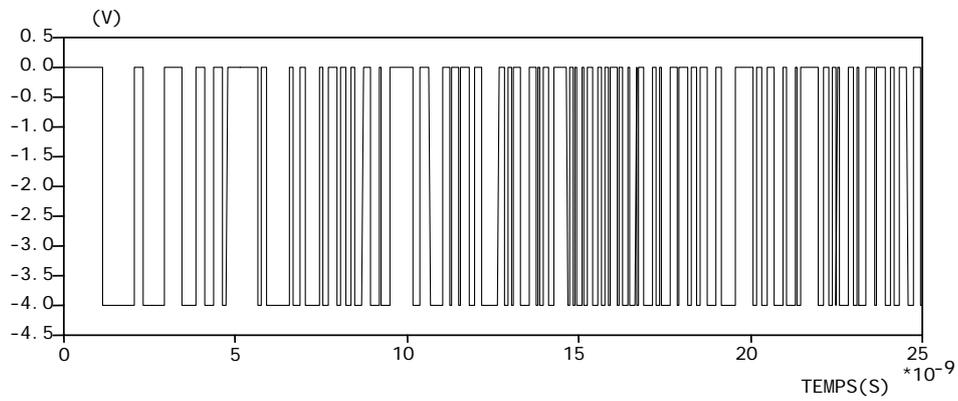
Pour les signaux ayant une porteuse optique, le simulateur utilise une représentation par enveloppe complexe. Il faut donc les observer sous forme de puissance optique. La puissance est calculée comme la somme des carrés de la composante en phase et de la composante en quadrature :

$$P(t) = x_p(t)^2 + x_q(t)^2$$

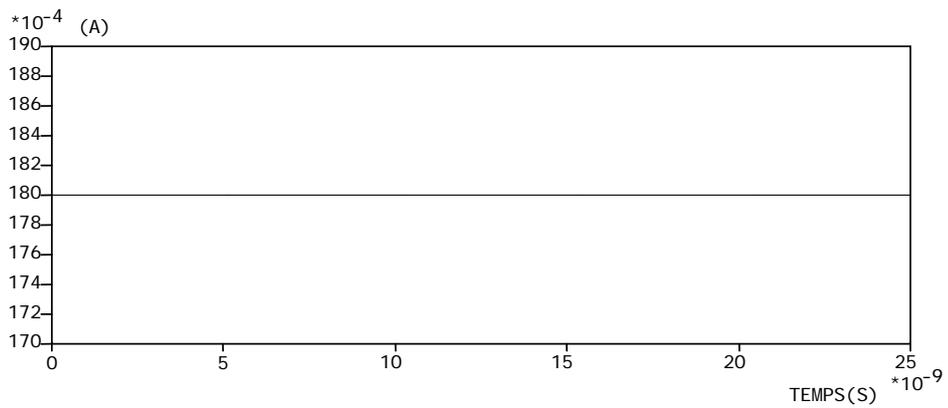
La simulation est effectuée pour un débit égal à 20Gbits/s et une distance de 50km donc une puissance laser égale à 4 mW. Les résultats sont représentés sur la figure 3.12.



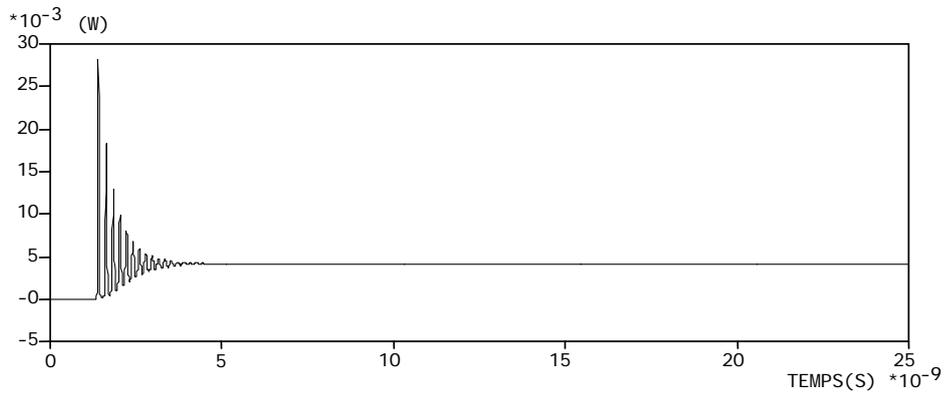
a) Données émises



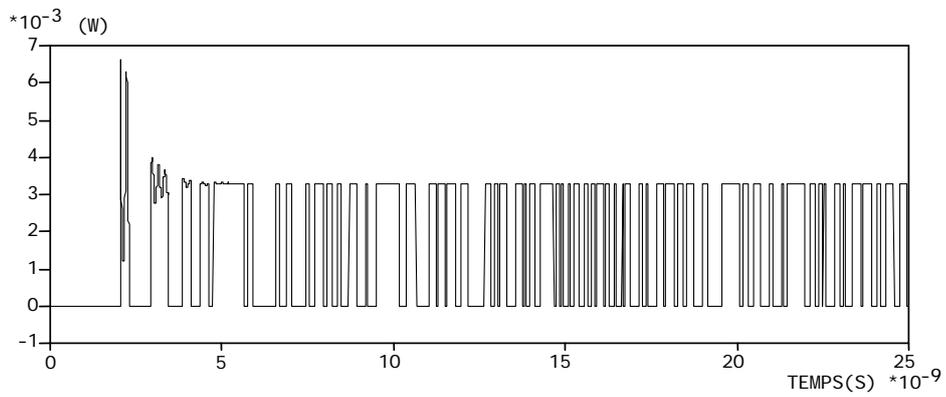
b) Sortie du driver



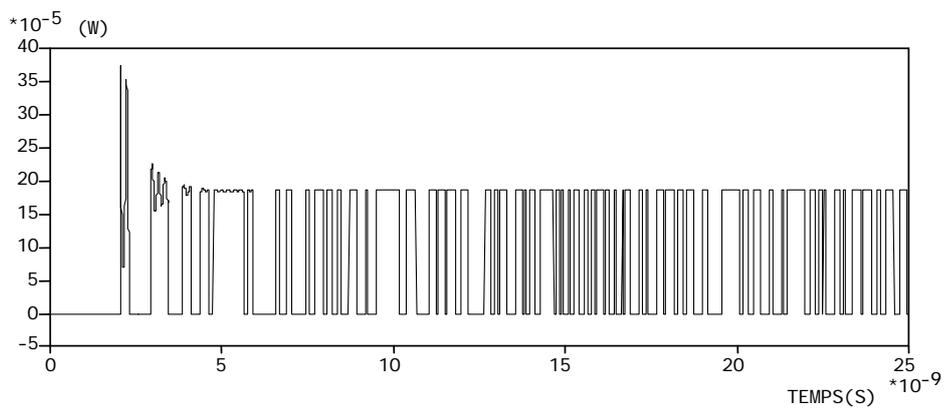
c) Sortie de l'alimentation



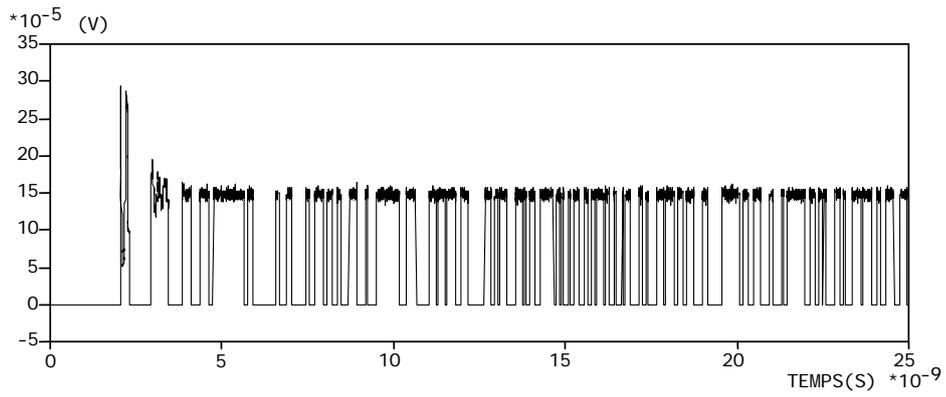
d) Sortie du laser



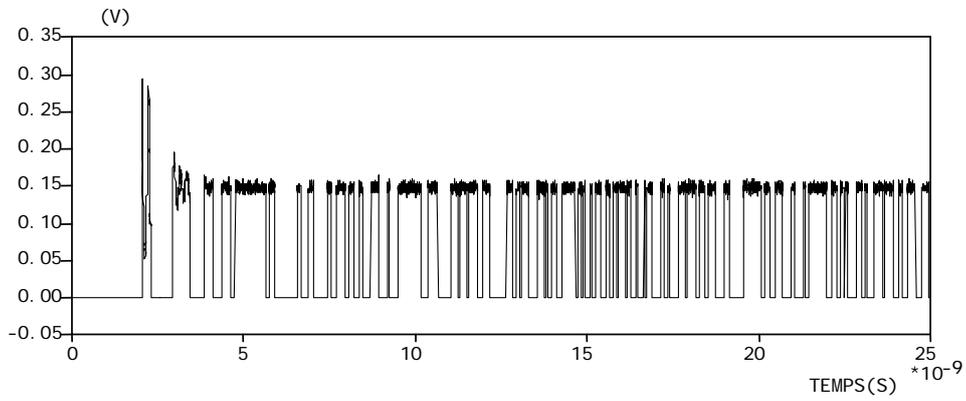
e) Sortie du modulateur



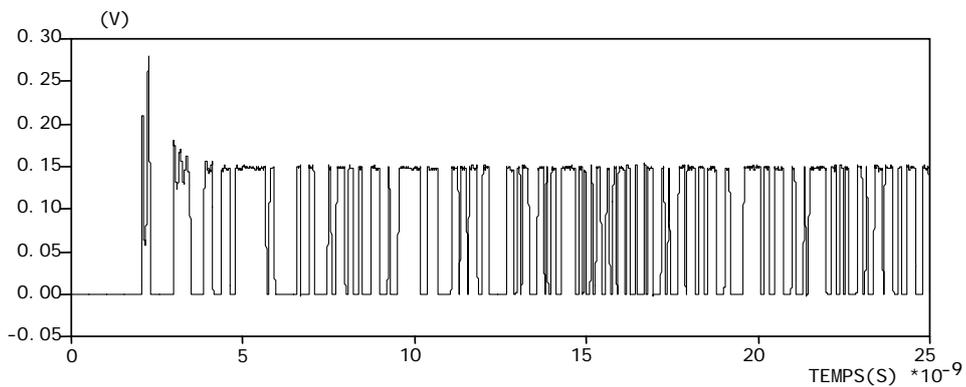
f) Sortie de la fibre



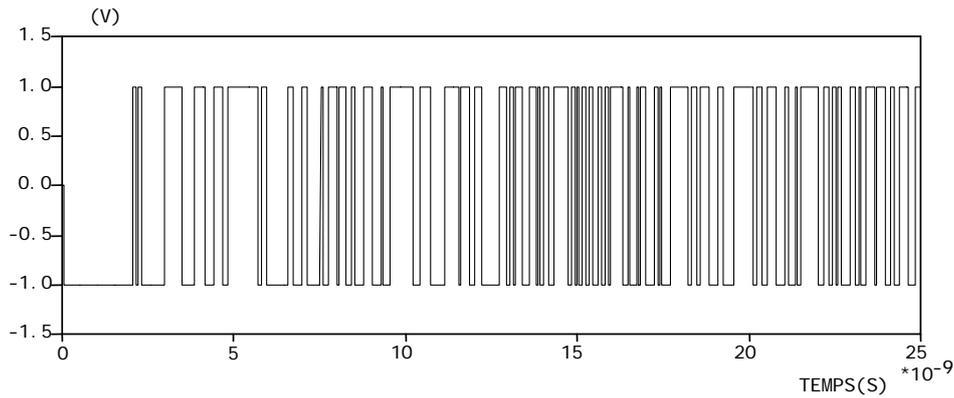
g) Sortie de la PIN



h) Sortie de l'amplificateur



i) Sortie du filtre



j) Donnée transmise

**Figure 3.12 :** Allure des signaux en chaque point de la liaison de référence

Quelques remarques issues de ces représentations graphiques peuvent être faites :

- La puissance de sortie du laser est, comme prévu, de 4mW.
- L'absorption du MEA est prise en compte et l'information retranscrite sur le signal optique.
- Les données électriques au format NRZ sont bien comprises entre  $\pm 1$ .
- Le driver a fait passer le niveau -1 V à -4 V, et le niveau +1 V à 0 V, sans perturber le signal.
- Le signal de sortie de l'amplificateur est normalisé.
- Le bruit est atténué par le filtrage.
- Pas d'erreur apparente sur la transmission des données.

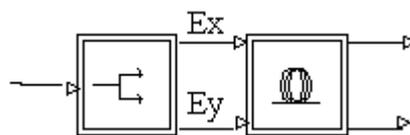
#### III.4. Prise en compte de la dispersion chromatique CD :

Afin de simuler les effets de la dispersion chromatique sur la transmission des données, il suffit de donner une valeur à cette dispersion, au niveau du modèle de simulation de la fibre dans la liaison de référence.

Comme nous utilisons une fibre SMF, la valeur de la CD est fixée à 17 ps/nm/km.

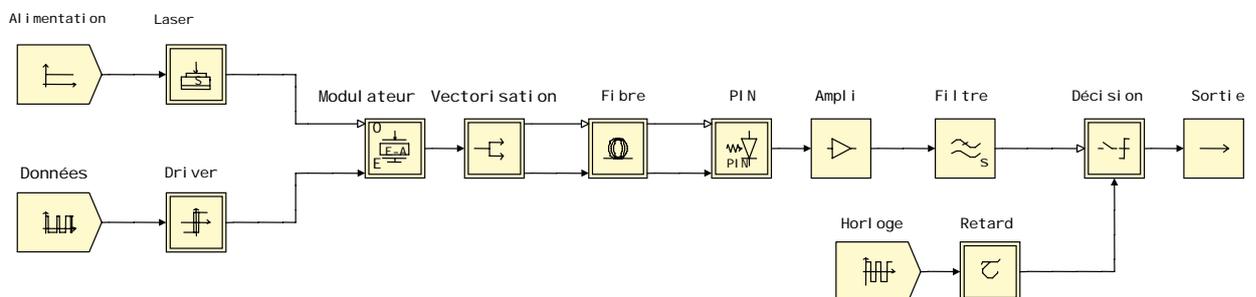
### III.5. Prise en compte de la dispersion de mode de polarisation PMD :

Pour prendre en compte le phénomène de PMD dans la liaison simulée, il est nécessaire de décomposer le signal en deux parties représentant ses polarisations. Ceci est réalisable en utilisant le bloc Vectorisation-Champ du logiciel qui permet d'obtenir le champ optique sous forme vectorielle et aussi de prendre en compte sa polarisation. Ce modèle (Figure 3.13) possède une entrée et deux sorties, représentant respectivement le champ d'entrée (supposé polarisé linéairement suivant l'un des axes principaux de propagation) et les deux composantes (signaux en enveloppe complexe) du vecteur champ obtenu, suivant les axes principaux de propagation. La modélisation de la fibre se fait alors en utilisant le même bloc Fibre-Optique-Monomode du logiciel, mais en l'ayant sélectionné avec deux entrées et deux sorties (Figure 3.13).



**Figure 3.13 :** Prise en compte de la polarisation d'un signal optique avec le modèle Vectorisation-Champ et les doubles entrées et sorties des fibres

Nous remplaçons le modèle de la fibre optique de la liaison de référence par les deux modèles précédents. La figure 3.14 représente la nouvelle liaison :



**Figure 3.14 :** Synoptique de la liaison en présence de la PMD

La biréfringence linéique de la fibre optique est fixée à 0,05 ps/km

### III.6. Prise en compte de la CD et de la PMD :

En utilisant le même schéma que la figure 3.14 et en fixant la CD à 17 ps/nm/km, nous simulons les effets de la CD et de la PMD sur la liaison.

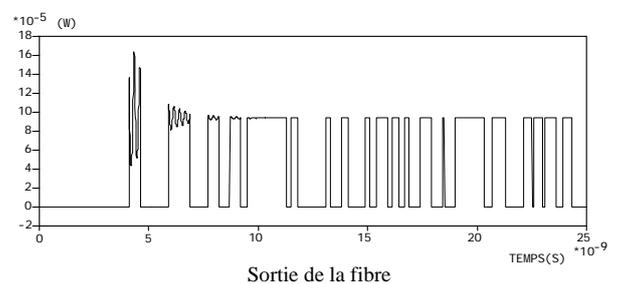
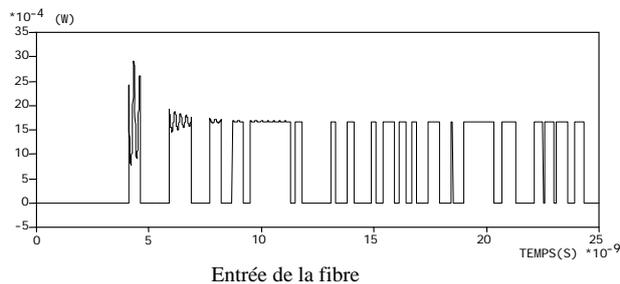
Après avoir illustré les différentes liaisons simulées, nous passons maintenant aux résultats de ces simulations.

### III.7. Résultats des simulations et évaluation des performances :

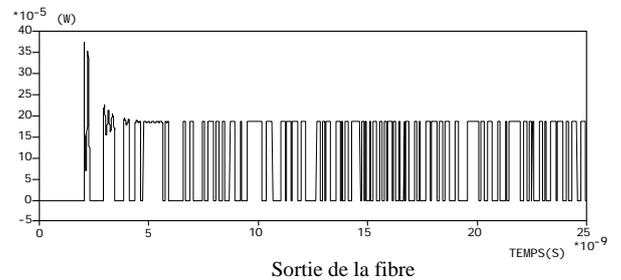
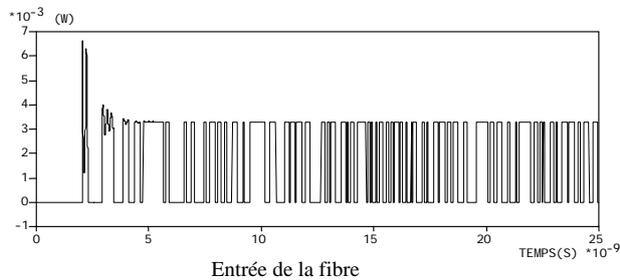
#### III.7.1. Visualisation des signaux :

##### a.1) Liaison de référence (longueur de la fibre=50km) :

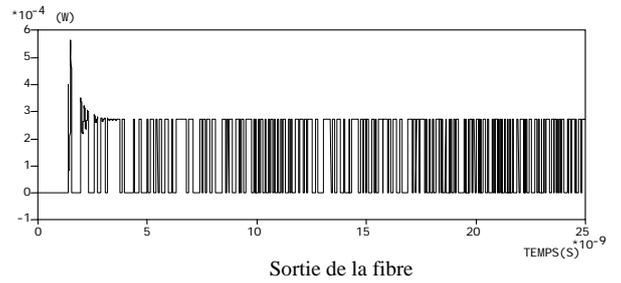
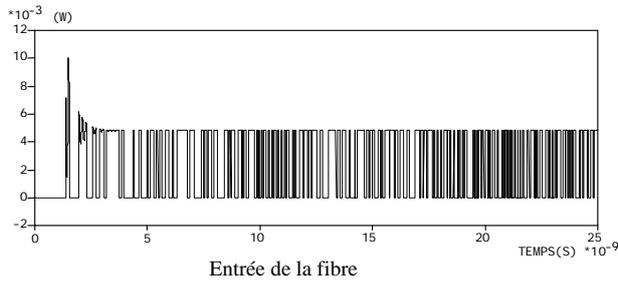
**D= 10Gbits/s :**



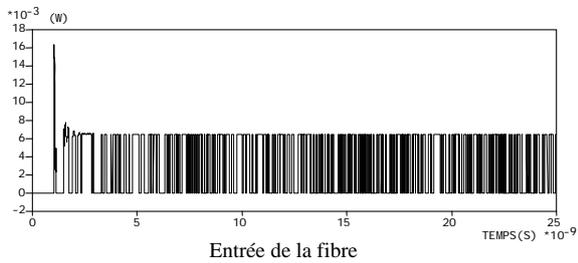
**D= 20Gbits/s :**



**D= 30Gbits/s :**



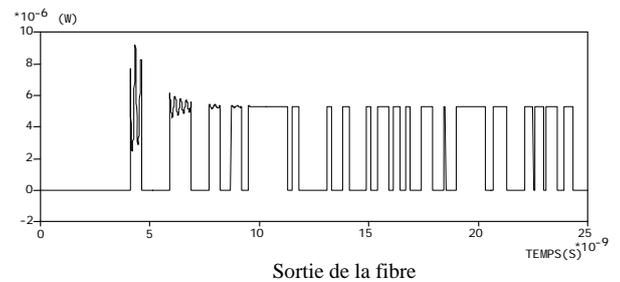
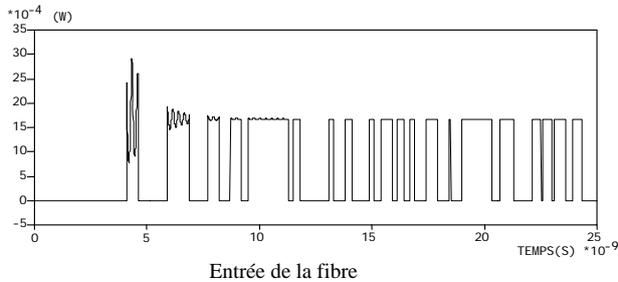
**D= 40Gbits/s :**



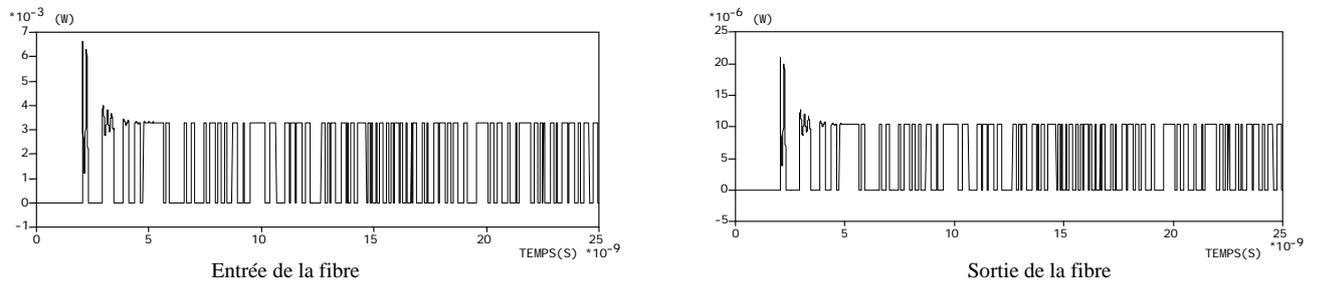
**Figure3.15 :** Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 50 km dans la liaison de référence

**a.2) Liaison de référence (longueur de la fibre=100km) :**

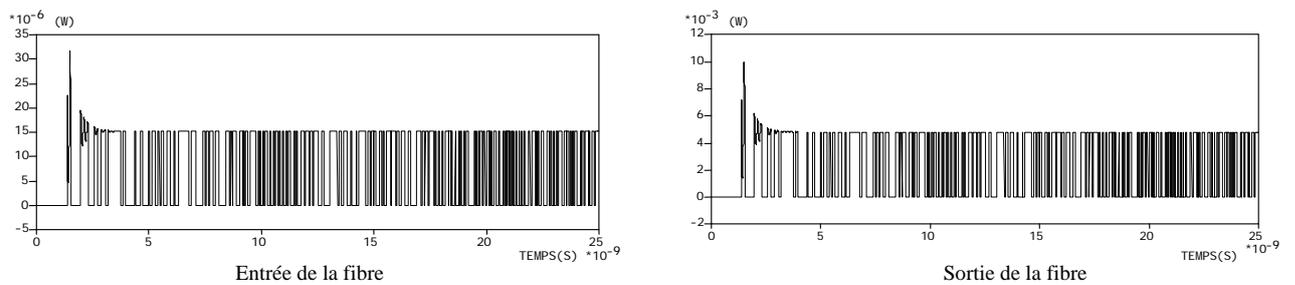
**D= 10Gbits/s :**



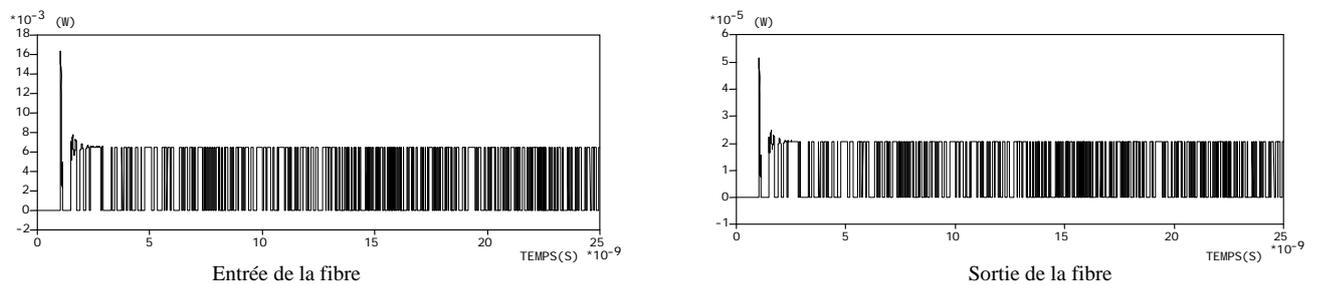
**D= 20Gbits/s :**



**D= 30Gbits/s :**



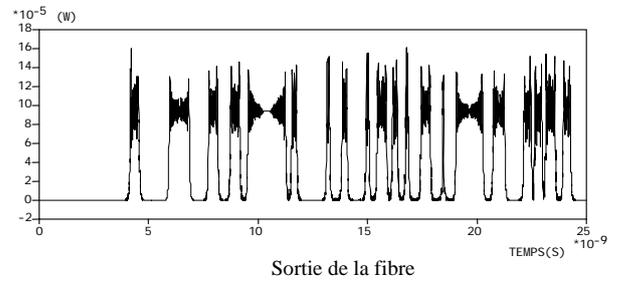
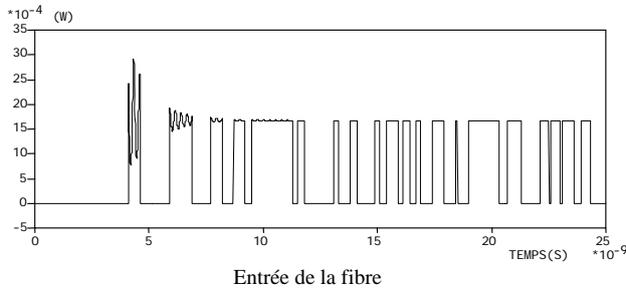
**D= 40Gbits/s :**



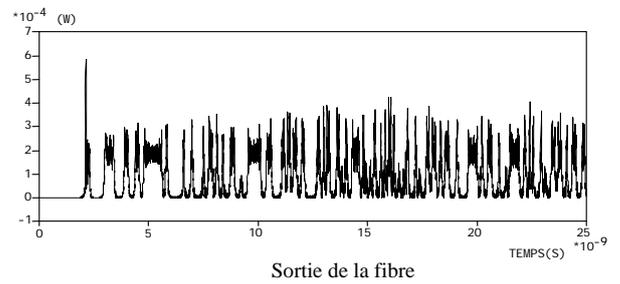
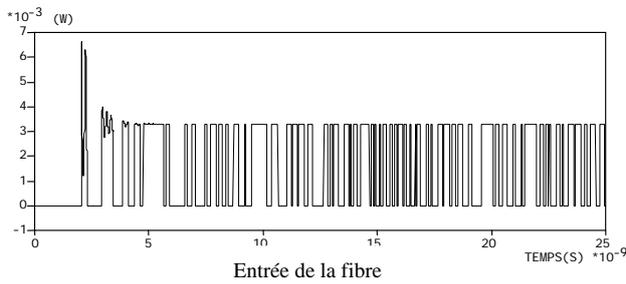
**Figure3.16 :** Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 100 km dans la liaison de référence

**b.1) Prise en compte de la dispersion chromatique (longueur de la fibre=50km) :**

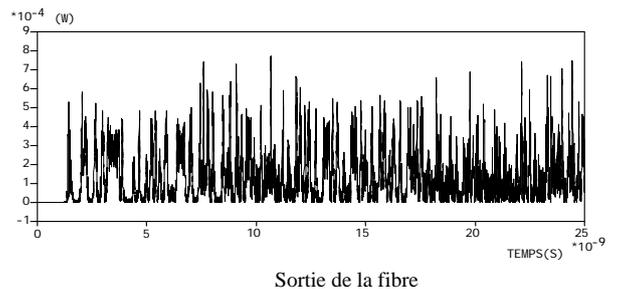
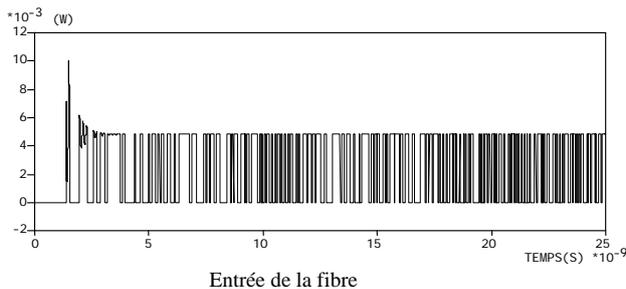
**D= 10Gbits/s :**



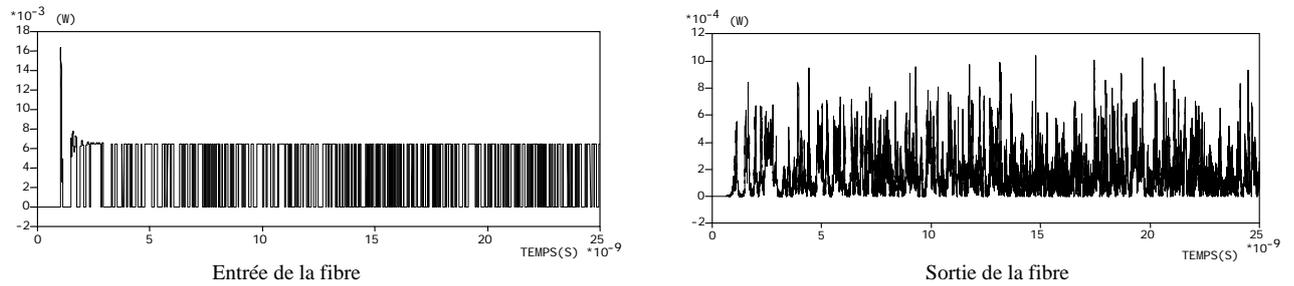
**D= 20Gbits/s :**



**D= 30Gbits/s :**



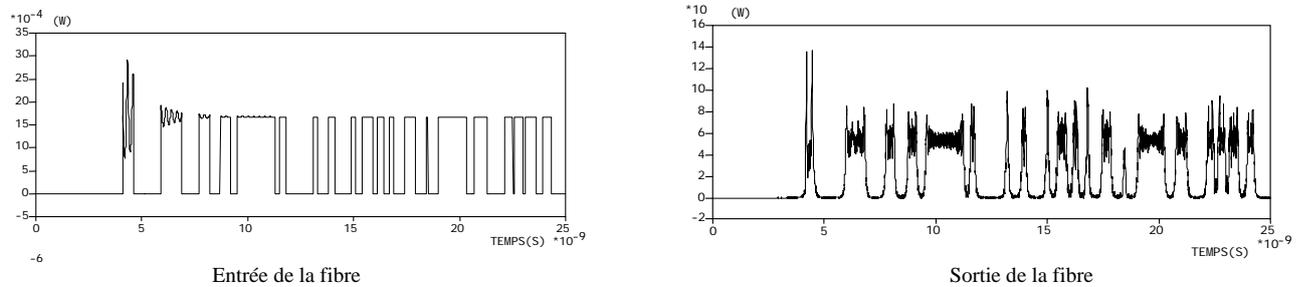
**D= 40Gbits/s :**



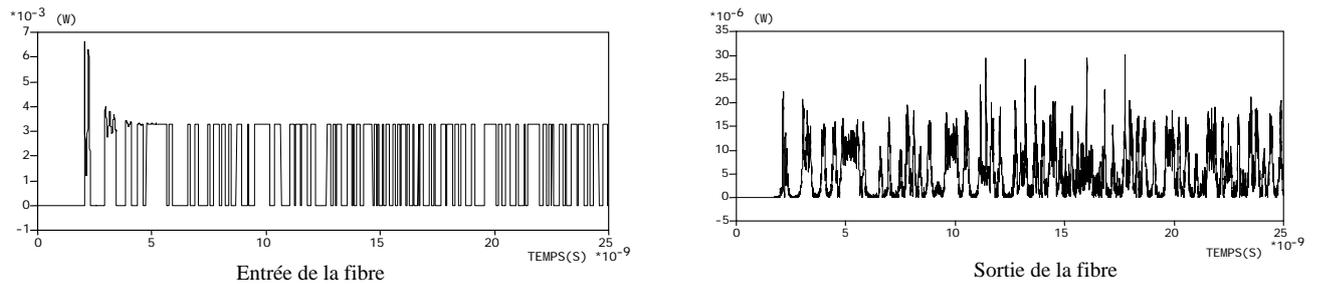
**Figure3.17 :** Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 50 km en présence de la CD

**b.2) Prise en compte de la dispersion chromatique (longueur de la fibre=100km) :**

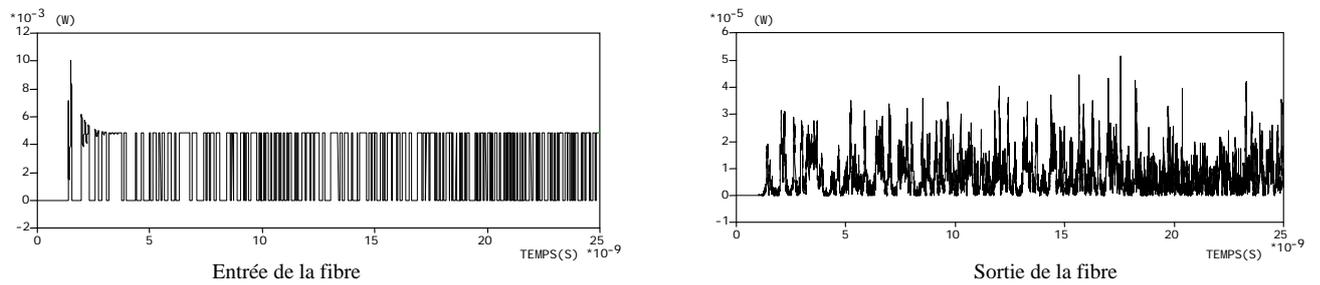
**D= 10Gbits/s :**



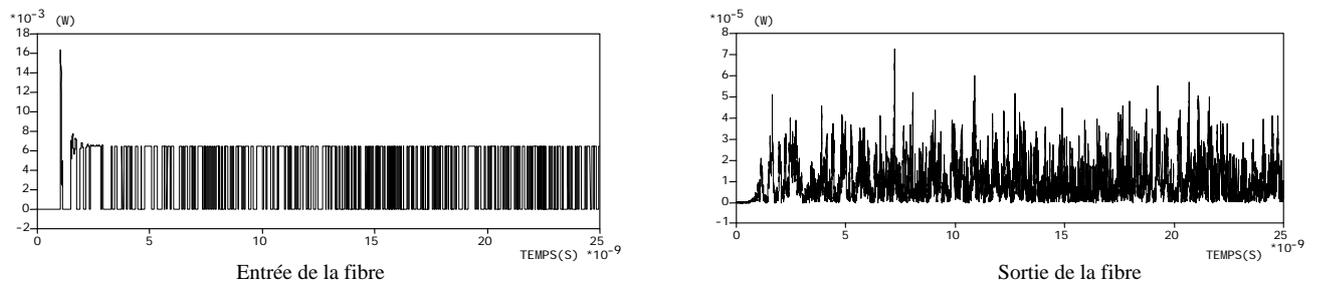
**D= 20Gbits/s :**



**D= 30Gbits/s :**



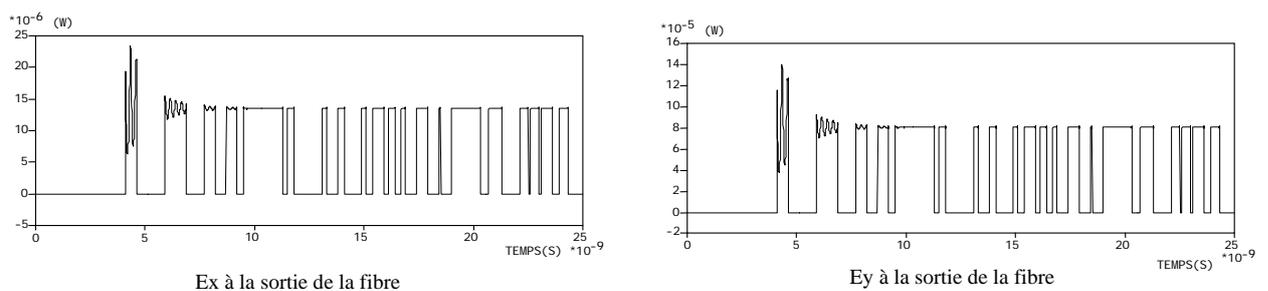
**D= 40Gbits/s :**



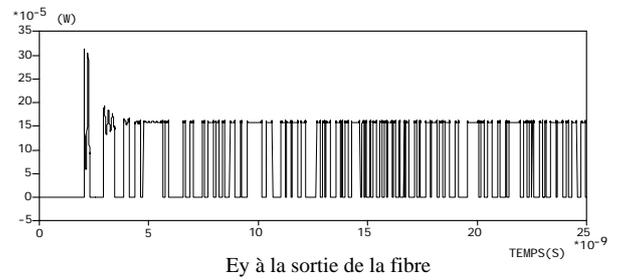
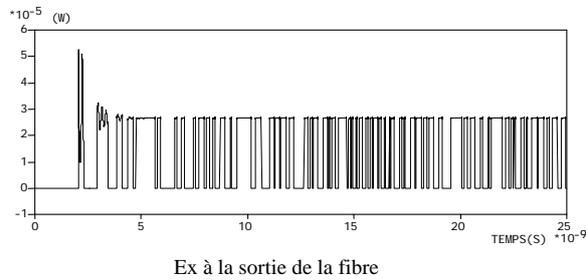
**Figure3.18 :** Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 100 km en présence de la CD

**c.1) Prise en compte de la dispersion de mode de polarisation (longueur de fibre=50km):**

**D= 10Gbits/s :**



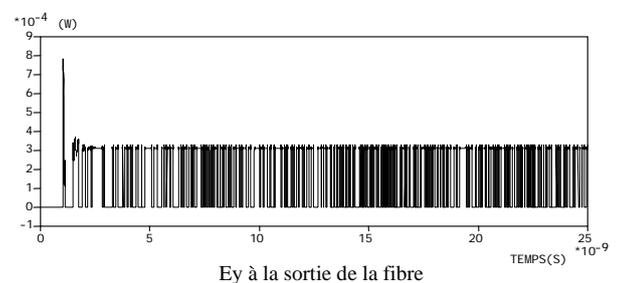
**D= 20Gbits/s :**



**D= 30Gbits/s :**



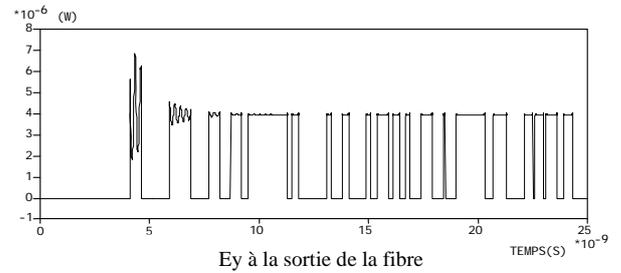
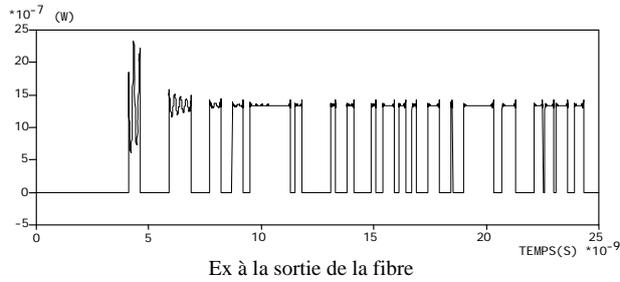
**D= 40Gbits/s :**



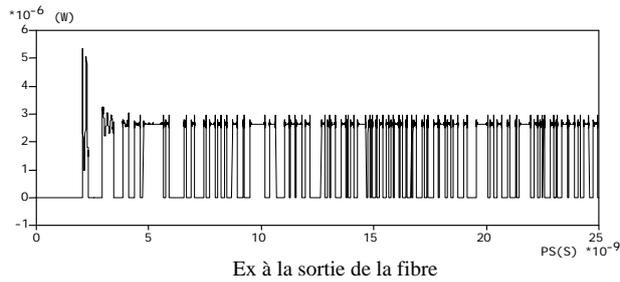
**Figure3.19 :** Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 50 km en présence de la PMD

**c.2) Prise en compte de la dispersion de mode de polarisation (longueur de fibre=100km):**

**D= 10Gbits/s :**



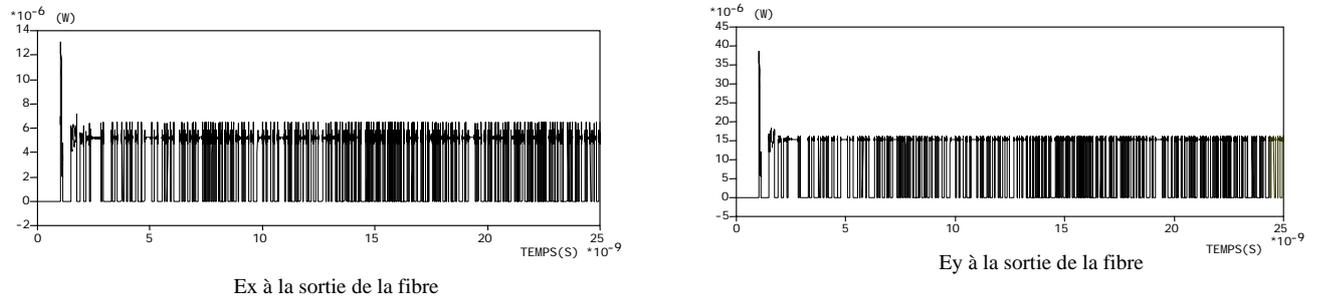
**D= 20Gbits/s :**



**D= 30Gbits/s :**



**D= 40Gbits/s :**

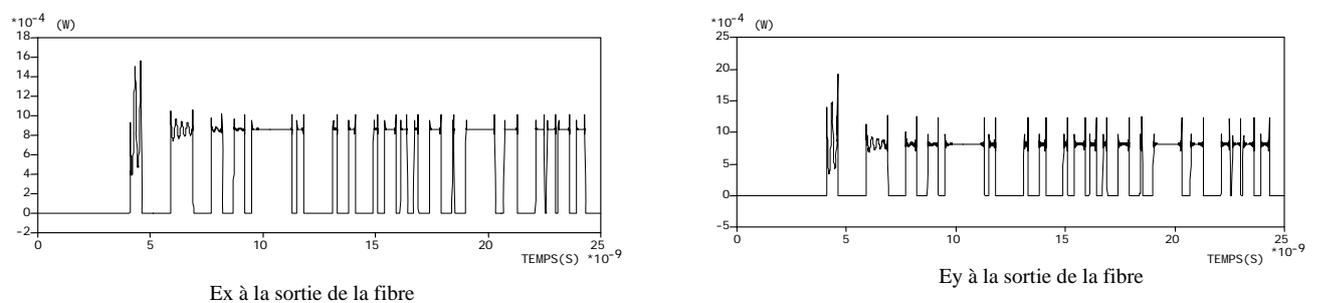


**Figure3.20 :** Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 100 km en présence de la PMD

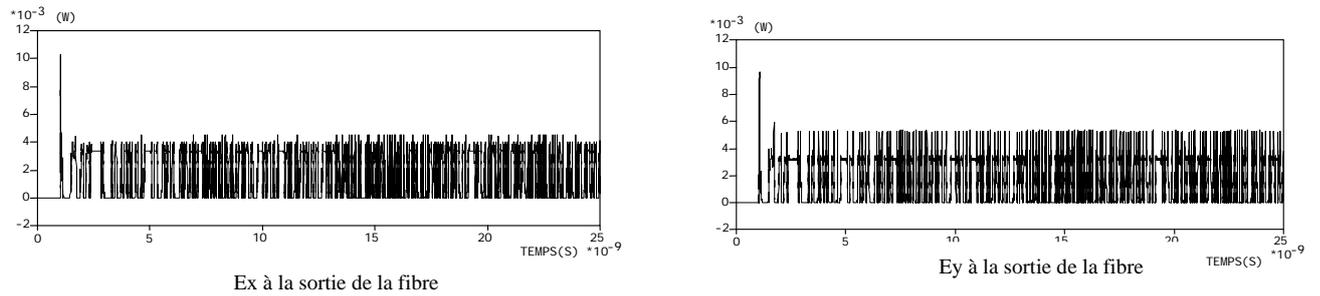
**Remarque :**

Pour les deux longueurs de la fibre (50km et 100km), nous n'observons pas les déformations dues à la PMD, c'est pour cela que nous portons la distance jusqu'à 300km. Les résultats sont les suivants :

**D= 10Gbits/s :**



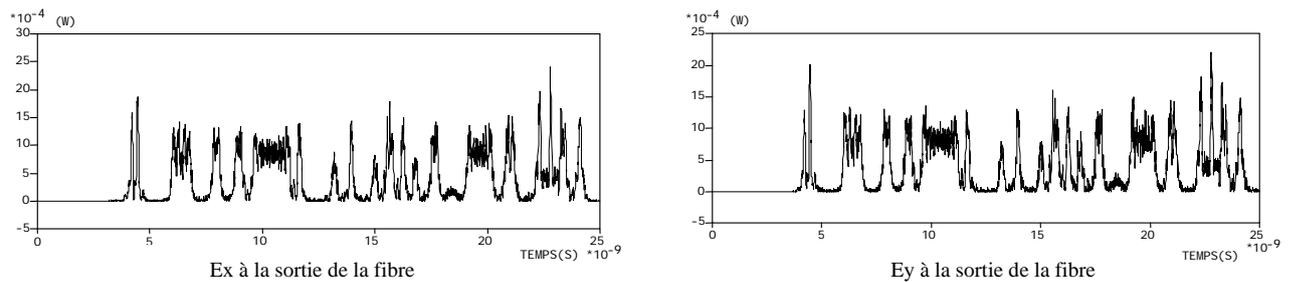
**D= 40Gbits/s :**



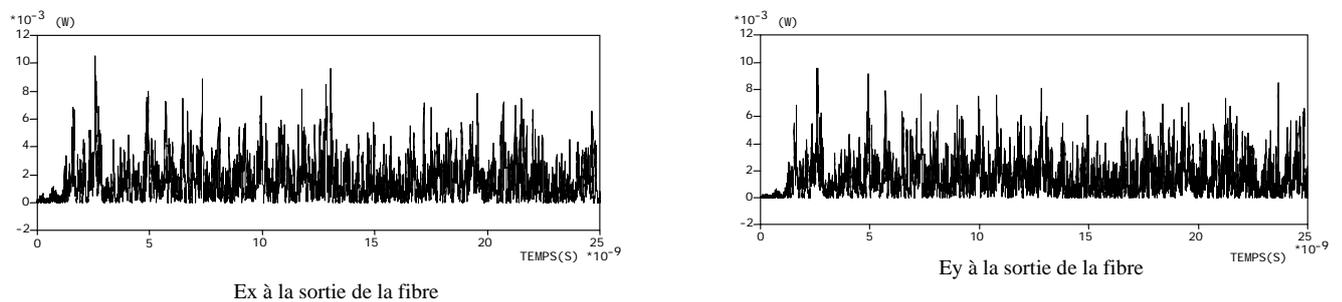
**Figure3.21 :** Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 300 km en présence de la PMD

**d) Prise en compte de la CD et de la PMD (longueur de fibre= 300km) :**

**D= 10Gbits/s :**



**D= 40Cbits/s :**



**Figure3.22 :** Allure des signaux à l'entrée et à la sortie de la fibre de 300 km en présence de la CD et de la PMD

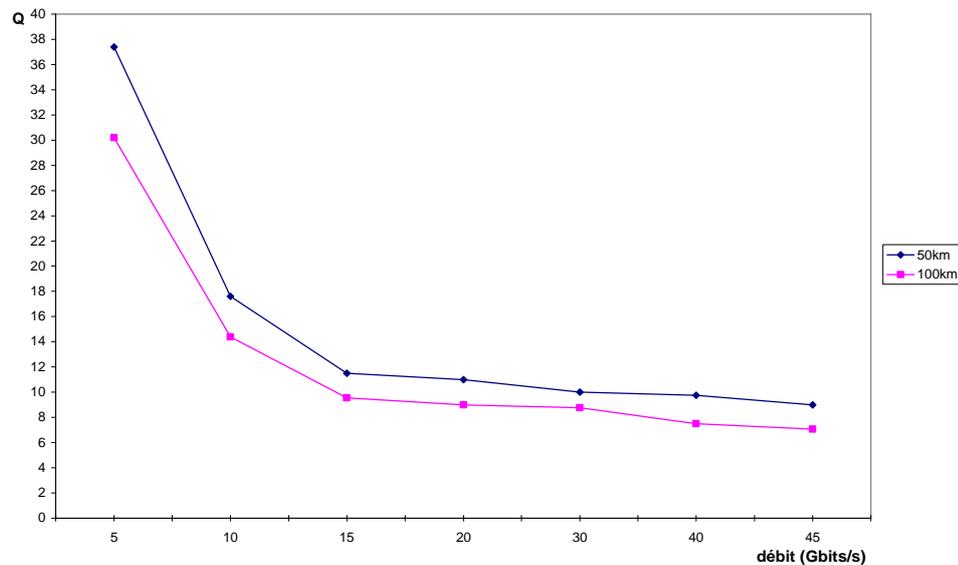
Une observation de ces signaux n'est pas suffisante pour évaluer l'impacte des dispersions sur la ligne de transmission.

Or le simulateur offre une possibilité pour mesurer la qualité d'un système de transmission de données. C'est pourquoi nous allons maintenant mesurer le facteur Q de chaque liaison ainsi pour les différents débits et longueurs. Les résultats seront représentés sous forme de graphes.

### III.7.2. Evaluation des performances :

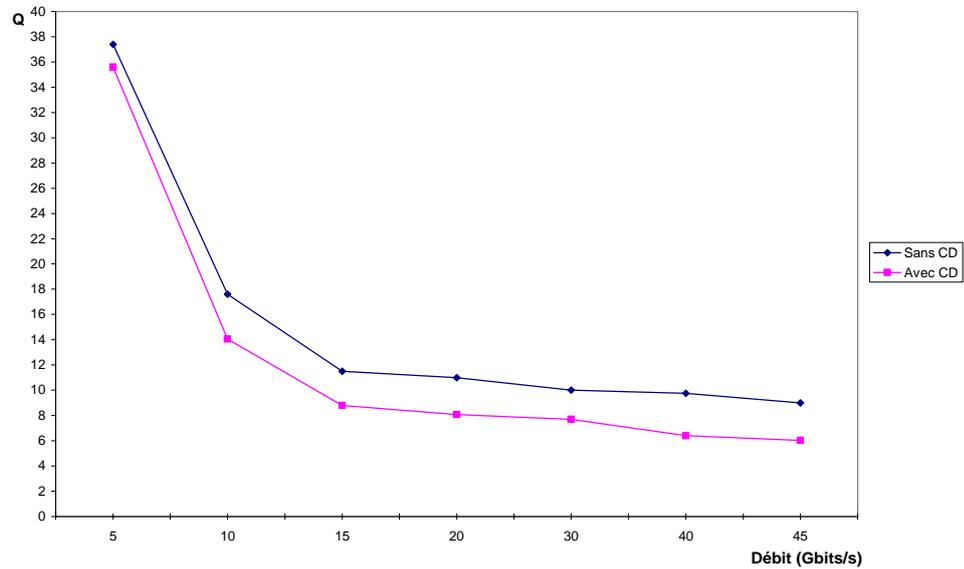
Nous avons mesuré les facteurs Q, les résultats sont représentés sous forme de graphes :

#### a) Liaison de référence :

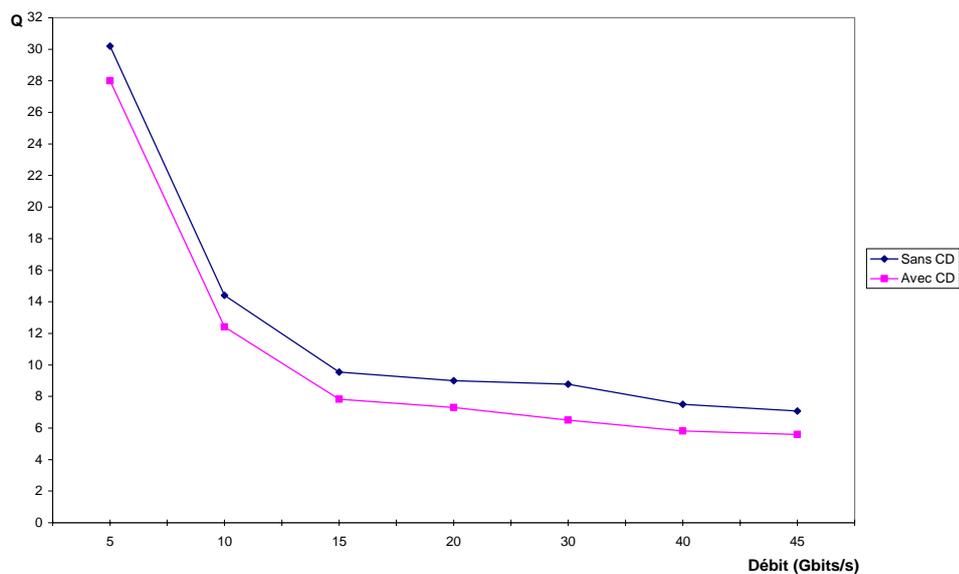


**Figure 3.23:** Les valeurs du facteur Q de la liaison de référence à 50km et 100 km

Cette figure montre bien les effets de l'atténuation en absence de toute dispersion sur la liaison de référence. Cette atténuation décroît avec la longueur de la fibre. On constate aussi que Q reste supérieure à 6, ce qui veut dire que la qualité de transmission est bonne.

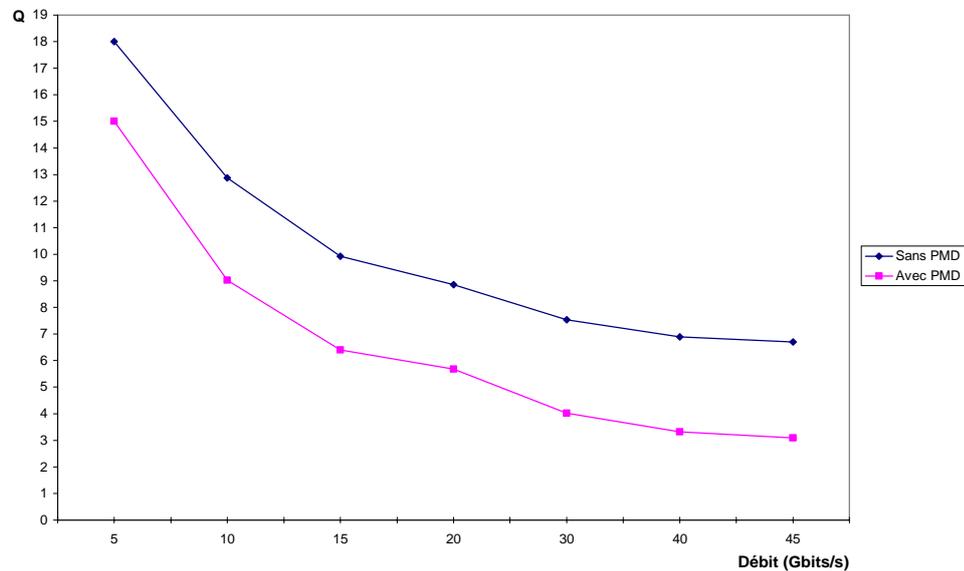
**b.1) Prise en compte de la dispersion chromatique (longueur de la fibre=50km) :****Figure 3.24:** Les valeurs du facteur Q lors de la prise en compte de la CD à 50km

Il est clairement visible sur cette figure que l'effet de la CD dégrade la qualité de la transmission surtout pour les très hauts débits.

**b.2) Prise en compte de la dispersion chromatique (longueur de la fibre=100km) :****Figure 3.25:** Les valeurs du facteur Q lors de la prise en compte de la CD à 100km

Comme nous pouvions le voir l'effet de la CD est plus visible pour cette longueur de la fibre, les valeurs de Q mesurées sont faibles pour les débits : 40Gbits/s et 45Gbits/s (inférieures à 6).

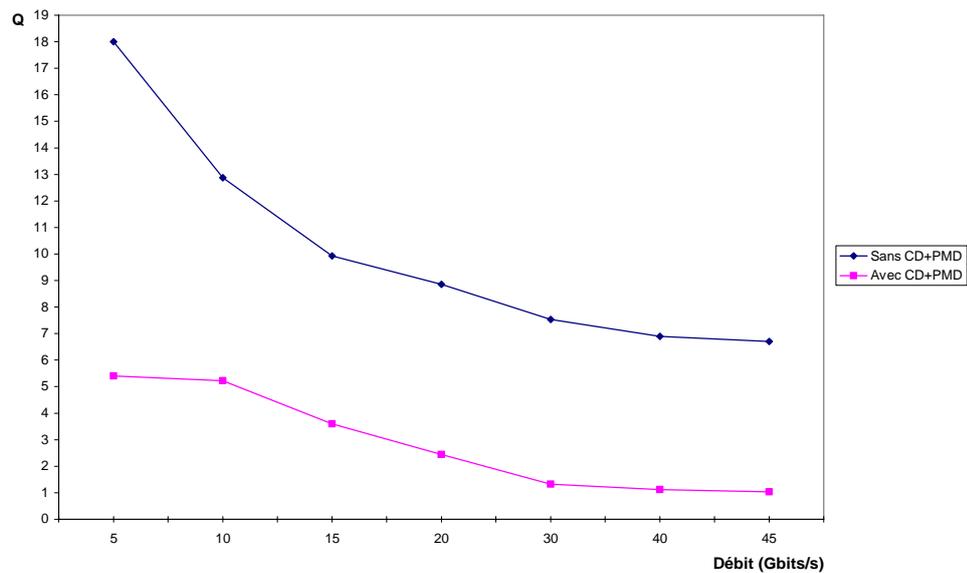
**c) Prise en compte de la dispersion de mode de polarisation (longueur de fibre=300km):**



**Figure 3.26:** Les valeurs du facteur Q lors de la prise en compte de la PMD à 300km

Cette figure représente la dégradation de la qualité de transmission due aux effets de la PMD, notamment pour les très hauts débits (les valeurs de Q sont très faibles).

**d) Prise en compte de la dispersion chromatique et de la dispersion de mode de polarisation (longueur de la fibre=300km) :**



**Figure 3.27:** Les valeurs du facteur  $Q$  lors de la prise en compte de la CD et de la PMD à 300km

Une très forte dégradation des performances du système est visualisée sur cette figure ; C'est l'effet de la contribution de la CD et de la PMD. Pour cette longueur de la fibre le seuil de qualité optimal n'est pas atteint même pour un débit de 5Gbits/s.

### Conclusion :

Ce chapitre, nous a permis de visualiser les effets de la dispersion chromatique et de la dispersion de mode de polarisation et étudier leurs impacts sur la qualité de la transmission d'une liaison par fibre optique.

Ainsi, nous avons pu construire des liaisons par simulation pour mesurer l'impact des effets de dispersions sur les performances du système. Dans un premier temps, nous avons construit une liaison de référence (sans dispersions), aussi, nous avons simulé trois liaisons

différentes. Ceci nous a permis d'introduire la CD et la PMD. Ensuite, nous avons représenté les résultats obtenus des simulations.

Dans ce chapitre, nous avons donc montré l'aide importante que peut apporter la simulation à l'étude des phénomènes : la dispersion chromatique et la dispersion de mode de polarisation.

### **IV.1. Introduction :**

Dans le chapitre précédent, nous avons visualisé les effets de la dispersion chromatique et de la dispersion de mode de polarisation sur la liaison de transmission, ensuite, nous avons mesuré les facteurs de qualités pour les différents débit : 5Gbits/s, 10Gbits/s, 15Gbits/s, 20Gbits/s, 30Gbits/s, 40Gbits/s et 45Gbits/s et cela pour les deux longueur de la fibre : 50km et 100km.

Dans ce chapitre, nous allons interpréter les résultats obtenus, comme nous proposons aussi des solutions afin de compenser les effets de ces dispersions.

### **IV.2. Influence de la dispersion chromatique CD :**

Sur les figures 3.24 et 3.25 On voit que plus le débit augmente, plus le facteur Q diminue ce qui signifie que la transmission est moins de bonne qualité.

D'après les résultats obtenus nous remarquons que pour maintenir la qualité de transmission des débits de 40Gbits/s et 45Gbits/s, la longueur de la fibre ne doit pas dépasser 50km.

Cependant, les liaisons de 5Gbits/s et 10Gbits/s maintiennent une bonne qualité de transmission même à des distances supérieures à 100km.

La dispersion chromatique induit dans le spectre du signal un déphasage quadratique. Ce déphasage conduit dans le domaine temporel à l'élargissement d'une impulsion lors de sa propagation. Elle implique une limitation de distance pour une propagation sans compensation. Cette limitation est d'autant plus drastique que le débit de transmission est élevé.

De multiples techniques ont été développées au cours des quinze dernières années pour résoudre le problème de la dispersion chromatique. Nous nous citons la technique de la fibre

compensatrice DCF (Dispersion Compensating Fiber), cette technique est la plus utilisée dans le domaine des télécommunications.

### Fibre compensatrice DCF :

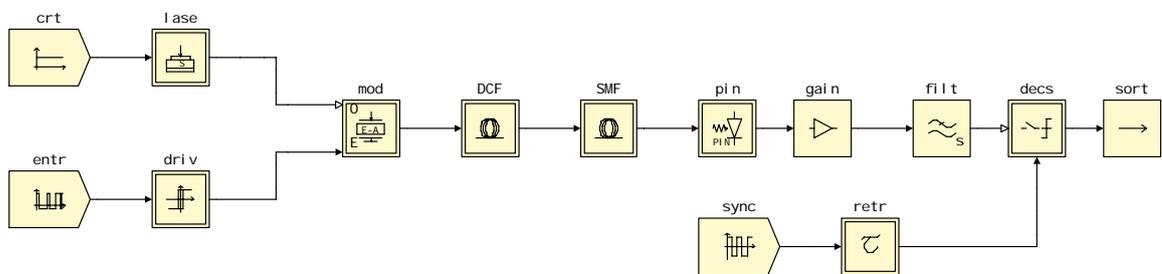
Par design du profil d'indice de la fibre, il est possible d'ajuster la dispersion du guide et d'obtenir ainsi une fibre à dispersion négative (jusqu'à typiquement  $-400\text{ps/nm/km}$ ). La solution, retenue actuellement pour la compensation en ligne, consiste alors à introduire un tronçon de longueur adapté de cette fibre dont la dispersion est de signe opposé par rapport à celle de la fibre de ligne. Donc une dispersion chromatique cumulée nulle [6] :

$$D_t L_t + D_c L_c = 0$$

avec  $D$  : Dispersion chromatique (ps/nm/km)

Le symbole « t » correspond à la fibre de transmission et le symbole « c » correspond à la fibre de compensation.

Pour compenser la dispersion chromatique et annuler les déformations qu'elle induit, nous avons associé 21km de fibre DCF (sa dispersion chromatique est égale à  $-80\text{ps/nm/km}$ ) aux 100km de fibre SMF, support de transmission de notre système (Figure 4.1).



**Figure 4.1** : Schéma de la liaison simulée pour la compensation de la CD

Les facteurs  $Q$  mesurés pour les nouvelles liaisons de 40Gbits/s et 45Gbits/s, sont respectivement 6,62 et 6,3.

On constate bien une augmentation du facteur de qualité, donc une amélioration des performances de la liaison de transmission.

### **IV.3. Influence de la dispersion de mode de polarisation PMD :**

Tout d'abord, on ne constate pas une différence entre les deux sorties de la fibre à 50 km et 100 km. On peut donc considérer que la PMD ne peut pas être prise en compte pour ces deux longueurs de la fibre.

Mais à partir de 200km, la déformation du train d'impulsions est désormais sensible. Pour une longueur de 300km, l'effet devient notable, la déformation observée est très nette.

Tout comme la dispersion chromatique, plus nous augmentons le débit, plus la qualité de la liaison est affectée par la dispersion de mode de polarisation. En particulier, pour les débits supérieurs à 30Gbits/s, le facteur  $Q$  devient insuffisant pour pouvoir espérer mettre en place un système de communication fiable.

Même si la qualité des fibres optiques s'améliore constamment avec des PMD atteignant maintenant 0,04ps/km, les déformations et les retards introduits ne sont absolument pas négligeables si on envisage des communications à hauts débits. Il sera donc nécessaire de trouver des dispositifs pouvant corriger ce défaut.

La PMD est un phénomène aléatoire qui dépend de l'environnement (la température, la pression,...) et pour atteindre des hauts débits sur de très longues distances, il a été suggéré de considérer la compensation dynamique de la PMD. Des recherches sont actuellement menées dans cette direction afin d'identifier l'effet des contraintes, de recourbement, et de température sur la PMD.

#### **IV.4. Influence de la CD et de la PMD :**

En raison de la contribution des deux dispersions, les débits supérieurs à 5Gbits/s ne semblent pas possibles pour une distance de 300km. En effet, les déformations sont extrêmement importantes.

Pour ces débits, le facteur Q est très inférieur à 6, donc une transmission qui n'est pas fiable.

#### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons analysé les effets de la CD et de la PMD sur le débit et la longueur de transmission dans une chaîne de transmission numérique optique. cela nous a permis de retrouver les effets que nous avons montrés dans le chapitre 2 sur la dégradation des qualités de communication.

Les résultats obtenus montrent que la dispersion chromatique est toujours présente, même pour les petites distances mais son effet est plus visible sur les liaisons à haut débit.

Nous avons pu constater que pour des longues distances de transmission l'effet de la PMD doit être pris en compte.

Globalement, les résultats prouvent que plus le débit augmente, plus la qualité de la transmission se dégrade, et qu'en présence des deux dispersions une liaison à haut débit et sur une grande distance génère des fluctuations importantes sur la qualité de la liaison.

## **Conclusion et perspectives**

La conception des systèmes de télécommunications à haut débit sur fibre optique est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important.

La difficulté majeure est la sensibilité aux défauts de propagation qui augmente avec le débit, que ce soit pour les effets dus à la dispersion chromatique (CD) ou les effets induits par la dispersion de mode de polarisation (PMD).

L'objectif principal de ce mémoire était de prouver l'utilité d'un logiciel de simulation et son aide non négligeable à évaluer l'impact des défauts dus à ces deux dispersions sur les performances des systèmes à hauts débits.

Ainsi, nous avons décrit dans un premier chapitre le principe d'une transmission numérique sur fibre optique. Ensuite, nous avons détaillé l'ensemble des composants présents dans nos liaisons qui ont été simulées par la suite. Le troisième chapitre a été consacré à la simulation permettant de caractériser les effets de la dispersion chromatique et de la dispersion de mode de polarisation sur le débit et la distance de transmission dans le cas d'un système monocanal à haut débit.

Les résultats obtenus ont été interprétés dans le dernier chapitre. Ils ont permis de visualiser l'impact de ces dispersions et évaluer les performances des liaisons à hauts débits sur fibre optique. Ils ont aussi prouvé l'indispensable nécessité de trouver des solutions pour remédier aux problèmes de dispersion.

Pour atteindre notre objectif, nous avons mené une campagne de simulation afin de connaître l'impact des effets de dispersion, sur les performances des liaisons de télécommunications.

Il apparaît très clairement qu'une optimisation des systèmes de transmission est nécessaire pour transmettre des débits très élevés.

De nombreuses techniques de compensation de la dispersion chromatique sont employées dans les réseaux de télécommunications, elles présentent bien des avantages et des inconvénients. Des recherches sont menées actuellement afin de minimiser les effets de la dispersion de mode de polarisation.

Nous pouvons dire que ce type d'étude peut comprendre les modules d'émission et de réception, regroupant l'électronique rapide et les fonctions optoélectroniques, et qui participent eux aussi à la limitation des performances des liaisons de transmission numérique optique à haut débit.

## Bibliographie

[1] Azzedine Boudrioua, "*New photonic technology for optical signal processing*", Université de Metz et Supélec, 2005.

[2] Nassima Boudrioua et Abas Dandache, "*Effets de la dispersion chromatique et la dispersion de mode de polarisation dans les liaisons numériques optiques à haut débit*", Université de Metz, 2005.

[3] A.Cozannet, J.Fleuret et H. Maître, M.Rousseau, "*Optique et télécommunications*", Paris : Eyrolles, 1981.

[4] Jean-Christophe Delagnes et Nicolas Riviere, "*Génération d'impulsions ultracourtes, Physiques des lasers et optique non linéaire*", Université Paul Sabatier, Toulouse, 2001.

[5] F.Devaux "*Fabrication caractérisation et mise en oeuvre des modulateurs électro-absorbants en onde guidée à 1,55  $\mu\text{m}$  pour les liaisons à très haut débit*", Thèse de doctorat Université Paris XI, 1993.

[6] Anne Dubois, "*Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique: de la conception des systèmes à la validation des composants*", Thèse en Télécommunications Hautes Fréquences et Optique, Université de Limoges, 24 septembre 2001.

[7] Anne Dubois et Charlotte Canseliet, "*Fibre optique*", Université Pierre et Marie Curie, 2005.

[8] Christophe Finot, "*Influence de la dispersion de mode de polarisation sur la performance d'un système monocanal*", Université de Nantes, 2002.

[9] Pierre-Gérard Fontolliet, "*Systèmes de télécommunications* ", Paris : Nouvelle édition, revue et augmentée, 1996.

- [10] Pierre Halley, "*Les systèmes à fibres optiques*", Paris : Eyrolles, 1985.
- [11] Irène et Michel Joindot, "*Les Télécommunications par fibres optiques*", Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris : Dunod et CNET-ENST, 1996.
- [12] Pierre Lecoy, "*Télécommunications optiques*", Paris : Hermès, 1992.
- [13] PALAIS J.C., "*Fiber optic communications*", Prentice Hall International, 1998.
- [14] Emilien Peytavit, "*Génération et propagation aux fréquences térahertz*", Thèse en électronique, Université des sciences et technologie de Lille, 24 octobre 2002.
- [15] G.F. Poole, "*Statistical Theory of Polarization Dispersion in Single Mode Fibers*", IEEE Journal of Lightwave Technology, November 1991.
- [16] David Pureur et Eric Delevac, Alain Munier, "*la compensation de la dispersion chromatique pour les systèmes de transmission haut débit*", Highwave Optical Technologies, France.
- [17] Anthony Regis et Remain Venot, "Les techniques de transmission optiques", Université de Limoges.
- [18] Technique de l'ingénieur, "*Système de transmission sur fibre optique*", Traité Télécom, TE 7 115, 1995.
- [19] Technique de l'ingénieur, "*Transmission des signaux numériques*", Traité Télécom, TE 7 100, 1995.
- [20] Polarization Mode Dispersion Tutorial, Site Web ProForum Tutorials :  
[http://www.onforum.com/tutorials/polar\\_mode/index.html](http://www.onforum.com/tutorials/polar_mode/index.html).

[21] Composants optoélectroniques, Site Web :

<http://www.commentcamarche.com>.

[22] "Chromatic Dispersion and Polarization Mode Dispersion", Light Reading - The Global Site for Optical Networking.

[http://www.lightreading.com/document.asp?doc\\_id=7303](http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=7303).

[23] Site sur le Réseau National de Recherche en Télécommunications (RNRT).

[http://www.telecom.gouv.fr/rnrt/index\\_exp.htm](http://www.telecom.gouv.fr/rnrt/index_exp.htm)

[24] Emetteurs et Récepteurs Micro-optoélectroniques 40 Gbits/s pour les transmissions optiques numériques ETDM (ERMIONE), projet RNRT, 1999-2002.

[www.telecom.gouv.fr/rnrt/projets/res\\_d115\\_ap99.htm](http://www.telecom.gouv.fr/rnrt/projets/res_d115_ap99.htm).

[25] Polarization Mode Dispersion, Site de Tektronix.

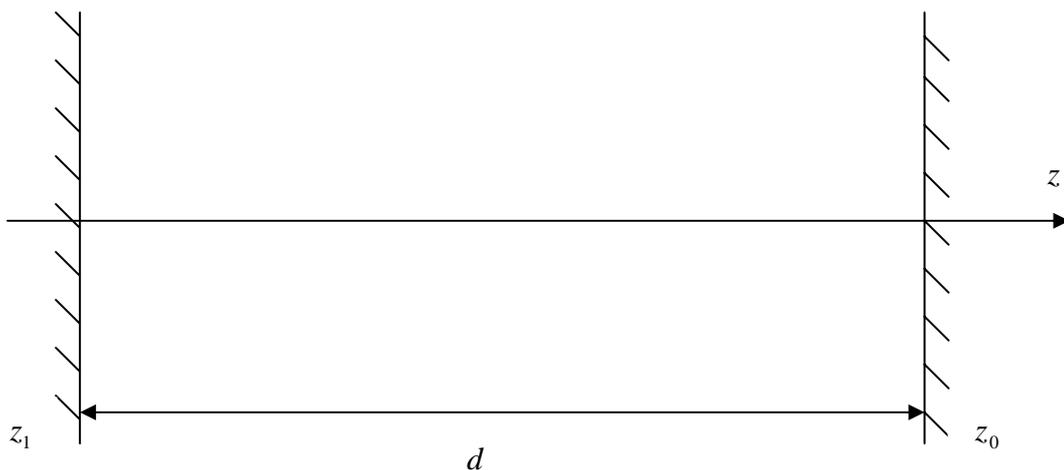
<http://www.tektronix.com/Measurements/commtest/pmd/index.html>.

## Annexe A :

### Le résonateur Pérot-Fabry [3]:

Ce type de résonateur est constitué, dans le cas le plus simple, par deux miroirs plans, parallèles et réfléchissants entre lesquels les ondes lumineuses font de multiples allers-retours. Dans le cas d'un semi-conducteur, les parois clivées du cristal sont utilisées pour constituer la cavité. Une forte valeur de l'indice (de l'ordre de 3,5) du semi-conducteur permet d'obtenir, avec les faces clivées en contact avec l'air, un coefficient de réflexion suffisant pour provoquer ces allers-retours de l'onde dans la cavité.

Nous allons considérer une propagation à une dimension dans un milieu limité par deux plans parallèles parfaitement conducteur (Figure 1).



**Figure 1 :** Modèle de cavité laser monodimensionnelle.

Dans ce cas, les équations de Maxwell admettent des solutions du type :

$$A \exp i\omega\left(t - \frac{z}{c}\right) + B \exp i\omega\left(t + \frac{z}{c}\right)$$

Ces solutions combinent des ondes se propageant le long de  $Oz$  dans un sens et dans l'autre. Les conditions aux limites en  $z_0$  et  $z_1$  se traduisent par les relations :

$$A \exp i\omega\left(t - \frac{z_0}{c}\right) + B \exp i\omega\left(t + \frac{z_0}{c}\right) = 0$$

$$A \exp i\omega\left(t - \frac{z_1}{c}\right) + B \exp i\omega\left(t + \frac{z_1}{c}\right) = 0$$

Elle doivent vérifiées pour toutes les valeurs du temps  $t$ , les seules solutions possibles vérifient donc :

$$\exp 2\frac{i\omega}{c}(z_1 - z_0) = 1$$

soit si  $z_1 - z_0 = d$ ,  $\frac{2\omega d}{c} = 2p\pi$  avec  $p$  entier ; seules les ondes de fréquence  $\nu_p = p \frac{c}{2d}$  peuvent exister dans la cavité ainsi formée.

Cette condition s'écrit aussi :

$$\lambda_p = \frac{2d}{p}$$

Nous voyons de quelle façon les parois imposent une quantification des fréquences susceptibles de se propager.

L'amplitude de l'onde s'écrit alors :

$$2A \exp i\omega\left(t - \frac{z_0}{c}\right) \sin \frac{\omega}{c}(z - z_0)$$

Cette forme est caractéristique d'une onde stationnaire. Tout se passe comme s'il n'y avait plus propagation à l'intérieur de la cavité.

Les relations précédentes nous indiquent quelles fréquences peuvent exister dans la cavité. Elles n'existeront vraiment que si l'on est capable de les exciter. Deux solutions s'offrent à nous : d'une part on place une source dans la cavité, d'autre part on éclaire le résonateur de l'extérieur :

- Dans le premier cas, si la fréquence est égale à  $\nu_p$ , à chaque aller retour les ondes s'ajoutent dans la cavité. L'intensité lumineuse croît tant que la source émet. Aucune énergie n'est rayonnée à l'extérieur, à moins que l'on choisisse l'un des plans légèrement transparent. On dit alors qu'il y a des pertes par couplage. Ces pertes prélèvent un peu d'énergie dans la cavité et la rayonnent à l'extérieur. Le laser fonctionne selon ce principe. Si par contre la fréquence est différente de  $\nu_p$ , alors les interférences successives détruisent l'onde au fur et à mesure de sa propagation. La cavité demeure pratiquement vide.

- Dans le second cas, on emplit progressivement la cavité à l'aide de la source extérieure si  $\nu = \nu_p$  ; une partie de l'énergie est rendue par couplage au milieu extérieur, et l'équilibre est atteint lorsque ces pertes sont égales à l'énergie fournie par la source. Si la fréquence est différente de  $\nu_p$ , comme auparavant la cavité demeure vide.

Supposons la cavité emplie par la source extérieure, et supprimons cette source. On appelle durée de vie  $\tau$  de l'onde dans la cavité, le temps au bout duquel l'énergie est réduite d'un facteur pris conventionnellement égale à  $e$  (base des logarithmes népériens).

Le coefficient de surtension de la cavité à la fréquence  $\nu_p$  est défini par la relation :

$$Q = 2.\pi.\nu_p.\tau$$

Cette présentation monodimensionnelle peut être généralisée à une forme quelconque de cavité et conduit au même genre de résultat.

## **Annexe B :**

### **L'effet Franz-Keldysh :**

L'effet d'un champ électrique sur les propriétés optiques d'un cristal est connu depuis longtemps (Franz 1958, Keldysh 1958). L'application de cet effet aux semi-conducteurs III - V massifs a été envisagée dans le milieu des années 1980 pour la modulation externe à 1,55  $\mu\text{m}$ . L'application d'un champ électrique sur un cristal rompt sa symétrie de translation. Donc, si on choisit une longueur d'onde légèrement supérieure à celle correspondant au bord d'absorption, il est possible de passer d'un état de faible absorption à un état d'absorption importante en changeant le champ électrique.

### **L'effet Stark confiné :**

Un nouveau type de matériau apparaît avec les progrès des technologies d'épitaxie de couches minces de semi-conducteurs : les puits quantiques. Il est en effet possible de faire croître successivement de très fines couches (quelques épaisseurs atomiques) de semi-conducteurs III - V d'énergies de bande interdite différentes. En alternant des strates de semi-conducteurs de petite et grande énergie de bande interdite, les électrons et les trous sont piégés dans les puits ainsi constitués.

La résolution de l'équation de Schrödinger montre que le niveau d'énergie fondamental du porteur piégé est au dessus de l'énergie de bande interdite du matériau puits. Cela résulte du principe d'incertitude d'Heisenberg : comme le porteur est dans un puits, sa position est connue avec une incertitude de l'ordre de la largeur du puits. Il en résulte une incertitude sur la vitesse qui se traduit par un minimum non nul de l'énergie cinétique. L'énergie de transition fondamentale n'est plus  $E_g$ , l'énergie de bande interdite du matériau puits, mais :

$$E_{e-h} = E_e + E_g + E_h$$

où  $E_e$  et  $E_h$  sont les énergies de quantification respectives des électrons et des trous piégés.

Quand un champ électrique est appliqué perpendiculairement par rapport à la direction de croissance des couches, la forme du puits varie progressivement du rectangle au trapèze. Les porteurs piégés peuvent sortir moins difficilement du puits.

**ملخص:**

هذه المذكرة تهتم بدراسة التبدد اللوني و تبدد أسلوب الاستقطاب في شبكة النقل الرقمية و الضوئية العالية التدفق. شملت الدراسة, استعمال الصورية لتقدير هذه الظواهر على قدرات الشبكات الناقلة لتدفقات تفوق تساوي 5جيجا هرتز/الثانية. تبين من هذه الدراسة أن الصورية أداة تساعد على تصميم و تطوير هذه الشبكات.

**الكلمات المفتوحة :** شبكة النقل الرقمية و الضوئية, التدفق العالي, التبدد اللوني, تبدد أسلوب الاستقطاب.

**RESUME :**

Ce travail de mémoire porte sur l'étude de la dispersion chromatique et la dispersion de mode de polarisation, dans les systèmes de transmission numérique optique à haut débit. Dans cette étude, la simulation a été utilisée pour évaluer l'impact de ces phénomènes sur les performances des systèmes optiques transportant des débits supérieurs ou égaux à 5Gbits/s. Il apparaît à l'issue de cette étude que la simulation est un outil d'aide à la conception et l'amélioration de ces systèmes.

**MOTS CLES :** Transmission numérique par fibre optique, Haut débit, Dispersion chromatique, Dispersion de mode de polarisation.

**ABSTRACT :**

This dissertation studies the chromatic dispersion and polarization mode dispersion in optical transmission systems at high debit. In this project, the simulation has been used for the evaluation of the impact of these phenomena on optical systems at debit superior or equal to 5Gbits/s. its seems due to the study, that the simulation is a tool permits the conception and amelioration of these systems.

**KEY WORDS:** Digital transmission on fiber optic, High debit, Chromatic dispersion, Polarization mode dispersion.