



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre : M...../GE/2018

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Télécommunications**

**Spécialité : Systèmes des Télécommunications**

### *Thème*

**Etude et caractérisation d'une chaîne de transmission optique  
à 40 Gigabit/S**

**Présenté par :**

- Asnoui Siham
- Meklleche Naima

***Soutenu le 01/06/2018 devant le jury composé de :***

Président : Mr. Yagoubi. B  
Encadreur : Mr. Benaouali.M  
Co-Encadreur : Mr. Benallou.S  
Examineur : Mr. Ahmedouch.A  
Examineur : Hani.S

**Année Universitaire : 2017 / 2018**

# *Remerciement*

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout Puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Après ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de quelque manière que ce soit à ce travail.

Nous remercions Mr. Benaouali. M, et Mr. Sultani. B Pour les guider vers nous tout au long de ce travail. Leurs commentaires et précieux conseils sur le développement de la recherche.

Nous remercions tous les membres du jury qui se sont fait un honneur d'accepter et de lire cette mémoire :

Président du Jury: Mr. Yagoubi.B et l'examineur Mr. Ahmedouch.A et

L'examineur : Mr. Hani.S

Nous ne pouvons pas terminer sans remercier tous les enseignants, tous les collègues qui nous ont aidés et qui nous ont entièrement soutenus au cours des dernières années.

Merci beaucoup.

## **DEDICACE**

**J** e dédie ce modeste travail

**A** mon père, source d'énergie pour ma réussite,

**A** ma très chère maman

**Q**u'ils trouvent en moi la source de leur fierté

**A** qui je dois tout

**A** mon frère MOHAMMED AMIN et ma sœur FERIEL

**A** RACHIDA, ZAHRA.

**A** tous ma famille.

**A** tous les gens m'aiment

**A** tous ceux que j'aime

**J** e dédie ce travail...

**SIHAM.**

## **DEDICACE**

**J** e dédie cet œuvre,  
**A** ma chère mère,  
**A** mon père,  
**A** mon marie,  
**A** mon fil,  
**A** tout ma famille,  
**A** tous ceux qui m'aiment.

**J** e dédie ce travail...

**NAIMA.**

## Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 01 : les composants Optoélectronique</b>	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Télécommunications par fibre optique.....	3
1.3 La fibre optique .....	3
1.3.1 Structure de la fibre optique.....	3
1.3.2 Les différence types de fibre optique.....	4
1.3.2.1 Fibre optique multimodes.....	4
a. Fibre optique multimodes à saut d'indice.....	4
b. Fibre optique multimodes à gradient d'indice.....	5
1.3.2.2 Les fibres optique monomodes.....	6
1.4 Les caractéristiques de la fibre optique.....	7
1.4.1 Lois de Snell-Descartes.....	7
1.4.1.1 Lois de la réflexion.....	7
1.4.1.2 Lois de la réfraction.....	8
1.4.2 L'ouverture numérique d'une fibre.....	9
1.4.3 Longueur d'onde de coupure .....	10
1.4.4 Atténuation dans la fibre.....	10
a. L'absorption .....	10
b. Les pertes.....	10
c. Les pertes d'insertion.....	11
1.4.5 Dispersion chromatique.....	12
a. La dispersion matériau $D_m$ .....	12
b. La dispersion guide $D_g$ .....	12
1.4.6 Non-linéarité.....	13
a. L'effet Kerr.....	13
b. L'effet Raman.....	13
c. Diffusion Brillouin .....	13
1.4.7 Débit de transmission.....	14
1.5 Les avantages et les inconvénients d'une fibre optique.....	14
a. Les avantage .....	14
b. Les inconvénients.....	15

1.6 Conclusion.....	15
---------------------	----

## **Chapitre 02 : Les composants Optoélectronique**

2.1 Introduction.....	17
2.2 Dispersion d'une Liaison point à point mono-u d'onde.....	17
2.3 Les composants d'émission et réception.....	18
2.3.1 Les composants d'émission .....	18
2.3.1.1 Diode laser DL .....	18
2.3.1.1.1 Caractéristiques d'un laser.....	18
a. Puissance .....	18
b. Le bruit des lasers.....	19
2.3.1.2 Modulateurs.....	20
a. Modulation directe .....	20
b. Modulation externe.....	20
2.3.2 Les composants de réception.....	21
2.3.2.1 Photodiode PIN.....	21
2.3.2.2 Amplificateurs optiques EDFA.....	22
2.3.2.3 Multiplexage .....	23
2.3.2.4 Filtre électrique.....	25
2.3.2.5 Filtre optique .....	25
2.3.2.6 Circuit de décision.....	26
2.4 Critère d'évaluation d'une transmission.. ..	26
2.4.1 Diagramme de l'œil.....	26
2.4.2 Taux d'erreur par bits TEB et le facteur Q.....	27
2.4.2.1 Taux d'erreur par bits TEB.....	27
2.4.2.2 Le facteur Q.....	27
2.4.3 Rapport signal à bruit SNR.....	27
2.5 Conclusion .....	28

## **Chapitre 03 : Simulation et interprétation des résultats**

3.2 Présentation de logiciel COMSIS.....	30
3.2.1 L'interface COMSIS.....	30
3.2.1.1 Fenêtre principale.....	30
3.2.1.2 Fenêtre alphanumérique.....	31

3.2.2 Bibliothèque du logiciel.....	32
3.2.3 Déferrements type d'analyse .....	32
3.2.3.1 Simulation temporelle.....	33
3.2.3.2 Visualisation et le traitement de résultat.....	33
3.2.3.3 Visualisation des résultats de simulation.....	33
3.3 Simulation et interprétation des résultats.....	34
3.3.1 Le schéma de bas.....	34
3.3.1.1 L'émission.....	34
a. Les donnée électrique.....	35
b. Le laser.....	35
3.3.1.2 Réception.....	37
a. La photodiode.....	37
3.3.1.3 Bloc de transmission.....	38
3.3.1.4 Simulation et interprétation de résultat de la chaine de base.....	38
3.3.2 Le schéma bloc de la liaison de transmission optique .....	41
3.3.2.1 l'émission.....	41
a. Le modulateur externe.....	41
b. Courant de commande.....	43
c. Driver.....	43
3.3.2.2 Réception.....	44
a. Le filtre.....	44
b. L'amplificateur électrique.....	46
c. Le régénérateur .....	46
d. L'horloge.....	46
3.3.2.3 Résultat de simulation.....	47
a. Simulation d'une liaison à 40Gbit/s sans fibre compensatrice.....	47
3.3.3 Correction de la qualité de signal .....	49
3.3.3.1 L'influence de la longueur de la fibre compensatrice sur la qualité de signal pour une liaison à 40Gbit/s.....	51
3.3.3.2 La réponse temporelle.....	51
3.3.3.3 La densité spectral de puissance.....	53
3.4 Conclusion.....	54
Conclusion général.....	56

Bibliographie .....58

## Liste des tableaux

<b>Tableau 3.1</b> : paramètre du laser .....	36
<b>Tableau 3.2</b> Paramètres de la fibre optique.....	38
<b>Tableau 3.3</b> : Les résultats de simulation de la réponse temporelle .....	39
de la chaine de base pour 100 et 500 Mbit/s.	
<b>Tableau 3.4</b> : variation du facteur de qualité en fonction du débit.....	40
<b>Tableau 3.5</b> : Les résultats de simulation d'une liaison à40 Gbits/s sans fibre DCF.....	48
<b>Tableau3.6</b> : Paramètres caractéristiques de la fibre de compensation.....	50
<b>Tableau 3.7</b> : Données longueur fibres SMF et DCF.....	51
<b>Tableau 3.8</b> : Les résultats Les résultats de simulation d'une liaison à40 Gbits/s avec fibre DCF.....	53

## Liste des figures

<b>Figure 1.1:</b> Structure générale de la fibre optique.....	4
<b>Figure 1.2:</b> fibre a saut d'indice et son trajet lumineux.....	4
<b>Figure 1.3:</b> un trajet lumineux dans un fibre a saut d'indice.....	5
<b>Figure 1.4:</b> trajet lumineux dans une fibre à gradient d'indice.....	5
<b>Figure 1.5:</b> fibre à gradient d'indice et son trajet lumineux.....	6
<b>Figure 1.6:</b> fibre optique monomode et son trajet lumineux.....	7
<b>Figure 1.7:</b> le phénomène de réflexion.....	8
<b>Figure 1.8:</b> le principe de la réfraction.....	8
<b>Figure 1.9:</b> L atténuation A en dB/km en fonction de la longueur d'onde $\lambda$ en $\mu\text{m}$ .....	11
<b>Figure 2.1:</b> transmission numérique par fibre optique.....	17
<b>Figure 2.2:</b> Caractéristique Puissance-Courant d'un laser.....	19
<b>Figure 2.3:</b> Couches de photodiode PIN.....	22
<b>Figure 2.4:</b> Diagramme schématique d'un amplificateur à fibre dopée.....	23
<b>Figure 2.5:</b> Schéma de principe de l'utilisation du démultiplexage temporel..... (TDM) dans les communications par fibre optique	24
<b>Figure 2.6 :</b> principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre..... Optique (avec 3 longueurs d'ondes)	25
<b>Figure 2.7:</b> d'un diagramme de l'œil.....	26
<b>Figure 3.1 :</b> La fenêtre principale de logiciel COMSIS.....	31
<b>Figure 3.2 :</b> Interface alphanumérique.....	31
<b>Figure 3.3 :</b> La bibliothèque de modèle COMSIS.....	32
<b>Figure 3.4 :</b> Le menu d'analyse de COMSIS.....	32
<b>Figure 3.5 :</b> Fenêtre d'évaluation des performances.....	33
<b>Figure 3.6 :</b> Fenêtre variables.....	34
<b>Figure 3.7 :</b> Le schéma de bas de transmission optique.....	34

<b>Figure 3.8 :</b> Modèle de simulation des données NRZ pseudo aléatoires.....	35
<b>Figure 3.9 :</b> Paramètres du bloc des données électriques.....	35
<b>Figure3.10</b> Modèle de simulation du laser.....	36
<b>Figure 3.11</b> variation de la puissance optique en fonction du courant du laser.....	37
<b>Figure 3.12:</b> Modèle de simulation de la photodiode.....	37
<b>Figure 3.13 :</b> Modèle de simulation de la fibre optique.....	38
<b>Figure.3.14:</b> Diagramme de l'œil par la liaison de base pour 100Migabit/S.....	39
<b>Figure.3.15:</b> Diagramme de l'œil par la liaison de base pour 500Migabit/S.....	40
<b>Figure 3.16:</b> Le schéma - bloc de la liaison de transmission.....	41
<b>Figure 3.17</b> Modèle de simulation du MEA.....	41
<b>Figure 3.18:</b> Paramètres du modulateur externe électro-absorbant.....	42
<b>Figure3.19:</b> Courbe d'absorption du modulateur en fonction de la tension électrique.....	42
<b>Figure 3.20:</b> Modèle de simulation du courant.....	43
<b>figure3.21:</b> Paramètres caractéristiques du courant.....	43
<b>Figure3.22:</b> Modèle de simulation driver.....	44
<b>Figure 3.23:</b> Paramètres caractéristiques du driver.....	44
<b>Figure 3.24:</b> Modèle de simulation du filtre.....	44
<b>Figure 3.25:</b> Paramètres caractéristiques du filtre.....	45
<b>Figure 3.26:</b> Gabarit du filtre de réception.....	45
<b>Figure 3.27:</b> Modèle de simulation d'amplificateur.....	46
<b>Figure .3.28:</b> Modèle de simulation de l'organe de décision.....	46
<b>Figure 3.29:</b> modèle de simulation de l'horloge.....	46
<b>Figure 3.30:</b> Modèle de simulation du retard continu.....	47

<b>Figure3.31:</b> Diagramme de l'œil. ....	49
<b>Figure3.32 :</b> Synoptique d'une chaîne de transmission optique avec une fibre compensatrice.....	50
<b>Figure.3.33</b> Diagramme de l'œil.....	51
<b>Figure 3.34 :</b> Les résultats de simulation Densité spectral de puissance d'une liaison à40 Gbits/s.....	53

## **Glossaire**

**COMSIS:** Communication System Interactive Software.

**Dm:** Dispersion Matériau.

**Dg:** Dispersion Guide.

**DFB:** Diode Laser.

**DEL:** Diodes Electroluminescentes.

**DL:** Diodes Laser.

**DCF :** Fibre de Compensation de Dispersion.

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

**NRZ:** Non Retour à Zéro.

**MEA:** Modulateur Electro-Absorption.

**SMF:** Single Mode *Fibre.*

**TEB:** Taux d'Erreur par Bit.

**RIN:** Relative Intensity Noise.

**TDM:** Time Division Multiplexing.

**WDM:** Wavelength Division Multiplexing.

**S/N:** signal to noise ratio.

**S/B:** rapport signal bruit.

**SNR:** rapport signal à bruit.

**Q:** Le facteur de qualité.

## Introduction général

Depuis le long terme, le concept de communication optique est connu dans l'histoire. L'envoi de messages par la lumière est certainement aussi vieux que les signaux de feu ou de fumée et a continué dans notre ère moderne ; Nous sommes aujourd'hui dans une période où le développement des réseaux Internet est en pleine croissance et avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu ; les technologies de télécommunications optiques visent donc en premier lieu à transmettre des données et de l'information avec des débits très élevés. La transmission optique fait son étude sur la propagation de la lumière en lieu et place de la propagation des ondes radioélectriques et exige un support de transmission spécial dit "Fibre optique". S'effectue à l'aide d'un guide de lumière (fibre optique).

Le développement des objets connectés et des services proposés par internet entraîne une demande de débit exponentielle. Or, dans moins de 10 ans, cette demande dépassera l'offre. Il faut donc trouver des solutions soit pour augmenter le débit, soit pour améliorer la qualité des signaux et éviter qu'ils ne se dégradent, c'est dans ce contexte que ce mémoire a été fait pour étudier et caractériser une chaîne de transmission optique à 40Gigabit/seconde.

Nos travaux de simulation ont été effectués avec le logiciel de simulation COMSIS. Les différents composants qui constituent ce logiciel ont été utilisés pour mesurer les performances attendues d'une telle liaison.

Notre mémoire est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre de ce mémoire décrit la fibre optique comme support d'information en transmission des données. Le second chapitre détaillera l'ensemble des composants présents dans une liaison optique. Enfin, une synthèse sur les différents cas de simulation est illustrée dans le troisième chapitre.

## 1.1 Introduction

La première fibre optique faible perte (20dB/km) produit par compagnie Corning Glass Works de New York en 1970, pour être utilisée dans les réseaux de télécommunication.

La fibre optique peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines voire milliers de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'information. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clés de la révolution des télécommunications.

Dans ce premier chapitre sera une description d'une fibre optique, quelque notion sur la fibre, ces différents types, ces avantages ainsi que ces inconvénients.

## 1.2 Télécommunications par fibre optique

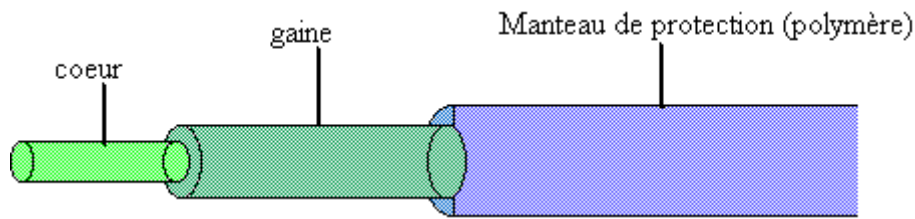
Les télécommunications optiques constituent un domaine multidisciplinaire. Elles mettent en jeu des composants et circuits d'émission et de réception, un support de transmission aux propriétés bien particulières et des techniques appropriées de codage, de modulation et de récupération des informations[1].

## 1.3 La fibre optique

La fibre optique est un support de transmission destiné à transmettre de l'information sur les réseaux informatiques. Autrefois réservée aux liaisons interentreprises; qui a la propriété d'être un conducteur de lumière et sert dans la transmission de données par la lumière.

### 1.3.1 Structure de la fibre optique

Une fibre optique est un cylindre de verre, elle consiste en une partie centrale le cœur avec un indice de réfraction  $n_c(r)$ ; entourée par une gaine optique, d'indice de réfraction  $n_g(r)$  plus faible. Ces deux régions importantes pour le guidage de la lumière sont réalisées avec deux matériaux différents. La fibre optique est souvent recouverte d'un revêtement protecteur qui ne joue aucun rôle dans le guidage de la lumière (une couche de protection mécanique en matière plastique).



**Figure 1.1:** Structure générale de la fibre optique.  
Source: [www.google.com](http://www.google.com)

### 1.3.2 Les différents types de fibre optique

Il existe deux grands types de fibre optique à savoir: la fibre optique multimode et la fibre optique monomode.

La fibre multimode est celle dont le diamètre du cœur est important, c'est à dire de 50 à 60 microns environ et lorsque plusieurs rayons appelés « modes », sont transportés dans la fibre optique de manière simultanée.

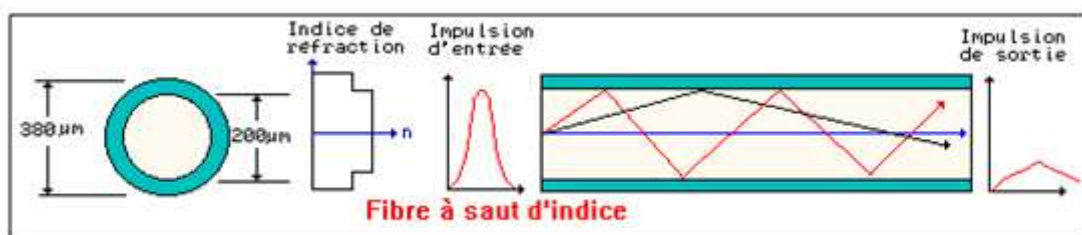
La fibre optique monomode est caractérisée par un diamètre du cœur très petit et lorsqu'on envoie qu'un seul rayon lumineux dans la fibre.

Chaque mode ayant une vitesse de propagation propre (vitesse suivant l'axe de propagation) [2].

#### 1.3.2.1 Fibres optiques multimodes

##### a. Fibres optiques multimodes à saut d'indice

Les fibres optiques multimodes à saut d'indice ont un cœur avec un d'indice constant, et une gaine sombre, il y a alors réflexion des rayons lumineux à la limite entre les deux matériaux. Cependant, le chemin optique varie, ce qui est gênant puisqu'un même signal se retrouve étendu à la sortie (c'est le principe de dispersion).



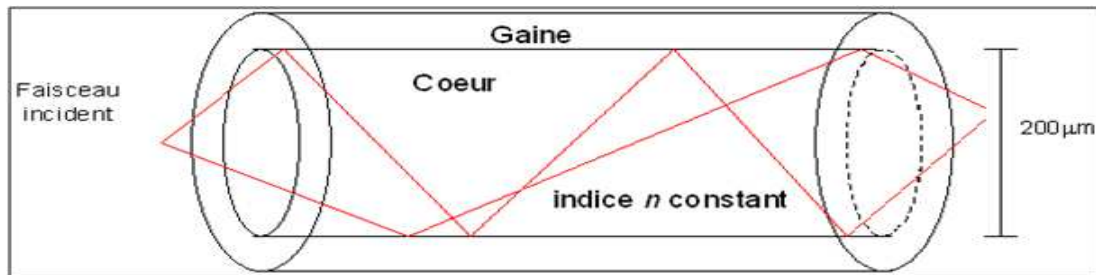
**Figure 1.2:** fibre a saut d'indice et son trajet lumineux  
Source : [igm.univ-mlv.fr](http://igm.univ-mlv.fr)

La lumière est guidée par réflexion totale interne à l'interface cœur-graine, elle suit un chemin en zigzag (figure 1.2). Les fibres optiques multi mode à saut d'indice sont donc utilisées sur de courte distance car le signal est modifié.

Débit: environ 100 Mbit/s ;

Portée maximale: environ 2 Km ;

Affaiblissement: 10 dB/Km.

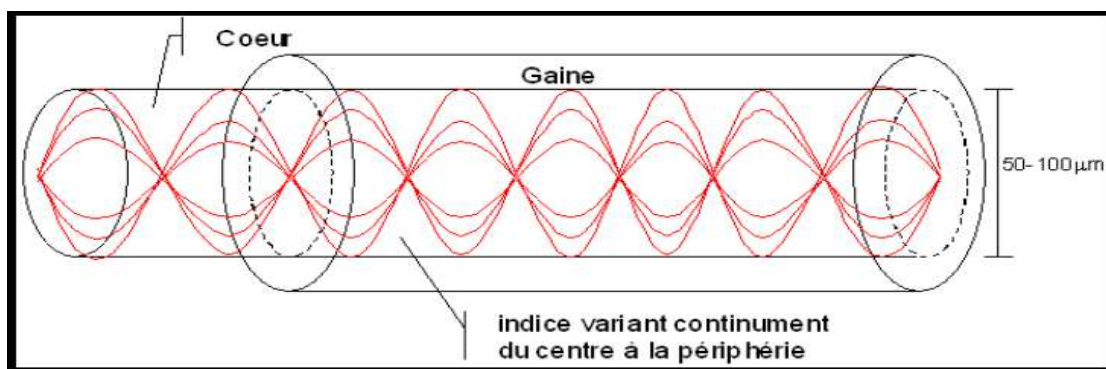


**Figure 1.3:** un trajet lumineux dans une fibre à saut d'indice

Source : <http://physique.unice.fr>

#### b. Fibres optiques multimodes à gradient d'indice

Dans la fibre optique multimode à gradient d'indice, l'indice de réfraction diminue du centre vers la périphérie selon une loi de conservation très précise. Donc les ondes passant par le centre sont les moins rapides mais parcourant moins de chemin, elles arriveront en même temps que celle.



**Figure 1.4:** trajet lumineux dans une fibre à gradient d'indice

Source : <http://physique.unice.fr>

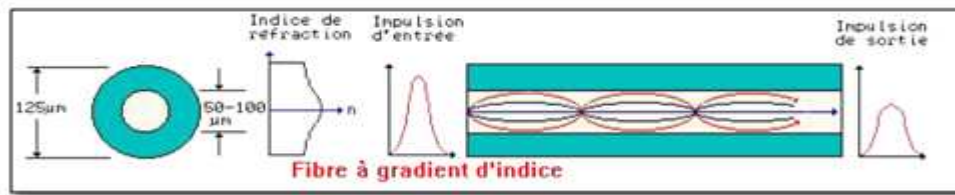
Ces différentes couches de silice de densités multiples influent sur la direction des rayons lumineux, ainsi on peut observer la création des rayons lumineux ayant une forme elliptique, on parle d'onde sinusoïdale. Le trajet des rayons se propage en ondulant de l'axe dans la fibre à gradient d'indice, avec une vitesse d'autant supérieure que le rayon est éloigné de l'axe (figure 1.4).

Avec:

Débit : environ 1 Gbit/s ;

Portée maximale : environ 2 Km ;

Affaiblissement: 10 dB/Km.



**Figure 1.5:** fibre à gradient d'indice et son trajet lumineux  
Source : igm.univ-mlv.fr

La fibre optique multimodes à gradient d'indice est la plus utilisée pour les moyennes distances (inférieures à quelques kilomètres), principalement comme support de transmission dans les réseaux informatiques locaux; car les avantages est que la dispersion est fortement diminuée avec cette fibre. Il y a donc une meilleure réception du signal.

### 1.3.2.2 Les fibres optiques monomodes

Une fibre optique est dite monomode (dites SMF, pour Single Mode Fibre), lorsqu'est sélectionné qu'un seul mode de propagation (se propageant au voisinage de l'axe). Le développement de la théorie électromagnétique dans les fibres optiques permet de montrer que le caractère monomode de propagation est conditionné par la vérification de la relation suivante:

$$V = \left( \frac{2\pi a}{\lambda_0} \right) \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (1)$$

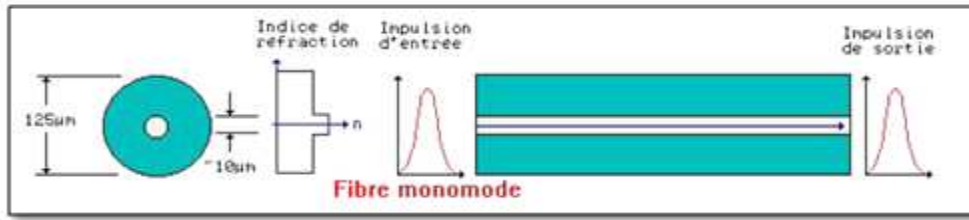
où :

V : la fréquence spatiale normalisée de la fibre ;

a : le rayon du cœur ;

$\lambda_0$  : longueur d'onde dans le vide ;

$n_1$  et  $n_2$ : respectivement les indices du centre du cœur et de la gaine.



**Figure 1.6:** fibre optique monomode et son trajet lumineux

Source : [igm.univ-mlv.fr](http://igm.univ-mlv.fr)

La fibre optique monomode a un cœur dont le diamètre est inférieur ou égal à  $10\mu m$ , ce qui permet le passage d'un unique rayon lumineux dans la fibre optique qui suit l'axe de la fibre (figure 1.6). Il n'y a donc plus de phénomène de dispersion des temps de propagation d'où un très grand débit. Elle est caractérisée par une bande passante théoriquement presque infinie, mais elle requiert des composants chers et des tolérances faibles. À l'heure actuelle, ce type est le plus favorisé; et elle est devenue la solution universelle des systèmes de communications.

Avec :

Débit: environ 100 Gbit/s ;

Portée maximale: environ 100 Km ;

Affaiblissement: 0,5 dB/Km.

**Remarque :** dans notre cas, on a utilisé la fibre monomode, vu la longueur de la chaîne à traiter (chaîne à plusieurs kilomètres).

## 1.4 Les caractéristiques de la fibre optique

### 1.4.1 Lois de Snell-Descartes

Décrivent le comportement de la lumière à l'interface de deux milieux ; ces lois sont au nombre de deux ; une pour la réflexion et une pour la réfraction.

#### 1.4.1.1 Lois de la réflexion

Lorsque la lumière atteint la surface d'un dioptre, une partie de la lumière est réfractée (ou bien déviée dans le nouveau milieu) alors que l'autre partie est renvoyée dans le milieu d'origine: ces rayons subissent une réflexion. Les angles de rayons d'incidence et de réflexion sont égaux et opposé avec la normale à la surface du dioptre :

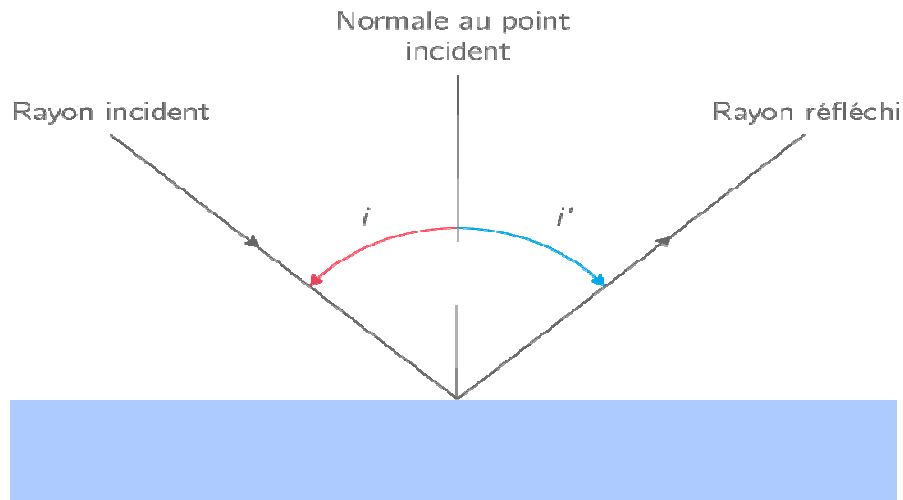
$$i=i' \quad (2)$$

On a deux lois de réflexion :

1<sup>ère</sup> loi : le rayon incident et le rayon réfléchi sont contenus dans le plan d'incidence.

2<sup>ème</sup> loi : le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la normale à la surface réfléchissante.

On représente le phénomène de réflexion ainsi de la façon suivante :



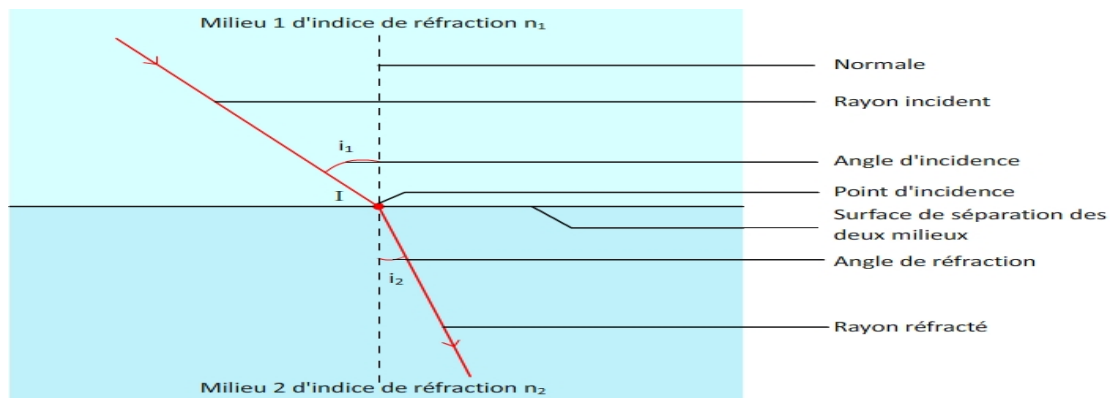
**Figure 1.7:** le phénomène de réflexion.

Source : [www.media.kartable.com](http://www.media.kartable.com).

#### 1.4.1.2 Loi de réfraction

La réfraction est le phénomène de changement Surprenant de direction d'un rayon lumineux lorsqu'il traverse la surface de séparation de deux milieux transparents. En réalité lorsqu'un rayon lumineux traverse la surface de séparation de deux milieux, une partie du signal lumineux va se retrouver réfracté, tandis qu'une autre sera réfléchi.

Le schéma suivant explique le principe de la réfraction:



**Figure 1.8:** le principe de la réfraction

Source : [www.webphysique.fr](http://www.webphysique.fr)

On cite deux lois de la réfraction à savoir :

1<sup>ère</sup> loi : le rayon incident et le rayon réfracté sont contenus dans le plan d'incidence.

2<sup>ème</sup> loi : les angles d'incidence  $i_1$  et de réfraction  $i_2$ , Descartes démontré le principe qui établi la relation suivante :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \quad (3)$$

#### 1.4.1.3.1 Indice de réfraction:

L'indice de réfraction d'un milieu mesure la densité optique de celui-ci. Cela constitue donc Une idée de la difficulté de la lumière à se propager dans ce milieu. l'indice de réfraction s'exprime comme le rapport des vitesses de propagation de la lumière dans l'air et dans le milieu concerné :

$$n_1 = \frac{c}{c_1} \quad (4)$$

Avec :

c: vitesse de la lumière ;

$c_1$ : vitesse de la lumière dans le milieu 1.

#### 1.4.2 L'ouverture numérique d'une fibre

L'ouverture numérique est définie par l'angle d'ouverture des rayons entrant dans le système et l'indice de réfraction dans l'espace objet, tandis que l'ouverture numérique image dépend de l'indice de réfraction dans l'espace image et de l'angle d'ouverture des rayons sortant du système [3].

L'ouverture numérique est régie par la formule suivante :

$$O_N = \sqrt{(n_{\text{coeur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2)} \quad (5)$$

#### 1.4.3 Longueur d'onde de coupure

La longueur d'onde de coupure est celle au-dessus de la quelle la fibre devient monomode :

$$\lambda_c = (2\pi \cdot O_N) / V \quad (6)$$

Avec :

$O_N$ : l'ouverture numérique ;

$V$ : fréquence de coupure.

si  $V < 2,405$  la fibre est monomode ;

si  $V > 2,405$  la fibre est multimode.

Il est préférable de travailler avec une fibre monomode car il est important de n'avoir qu'un faisceau monomode dans la fibre, pour conserver l'énergie dans sa totalité.

#### 1.4.4 Atténuation dans la fibre

L'atténuation correspond à une diminution de la puissance du signal transmis. Elle s'exprime en décibels (dB). On définit un coefficient d'atténuation  $\alpha$  pour une ligne de transmission de longueur  $L$  qui s'exprime en dB/Km tel que:

$$\alpha(\lambda) = -\frac{10}{L} \log \left[ \frac{P_s}{P_e} \right] \quad (7)$$

Avec :

$p_e$ : puissance d'entrée ;

$p_s$ : puissance de sortie ;

$L$  : la longueur de fibre.

L'atténuation de la fibre optique est pratiquement faible, comparativement aux celles des autres supports de transmission comme le cuivre à titre d'exemple. Elle dépend en particulier de la longueur d'onde des impulsions lumineuses.

On a trois phénomènes spécifiés l'atténuation dans la fibre :

##### a. L'absorption

Sous l'influence d'un photon d'énergie suffisante, un électron peut être porté à un niveau d'énergie supérieur à celui où il se trouvait. Une partie de l'énergie du rayonnement incident est ainsi absorbée par le matériau.

Cette interaction rayonnement-matière s'applique au matériau constituant la fibre (absorption intrinsèque), mais aussi aux impuretés qu'elle contient et qui sont la conséquence du mode de fabrication (ion  $Fe^{3+}$ ,  $OH^-$ , etc.) (Absorption extrinsèques) [4].

##### b. Les pertes

- Diffusion de RAYLEIGH : Elle provient des variations de l'indice de réfraction du matériau sur des longueurs inférieures à la longueur d'onde de la lumière ; elle se traduit par une perte de puissance lumineuse inversement proportionnelle à la loi de Rayleigh (voire l'annexe).

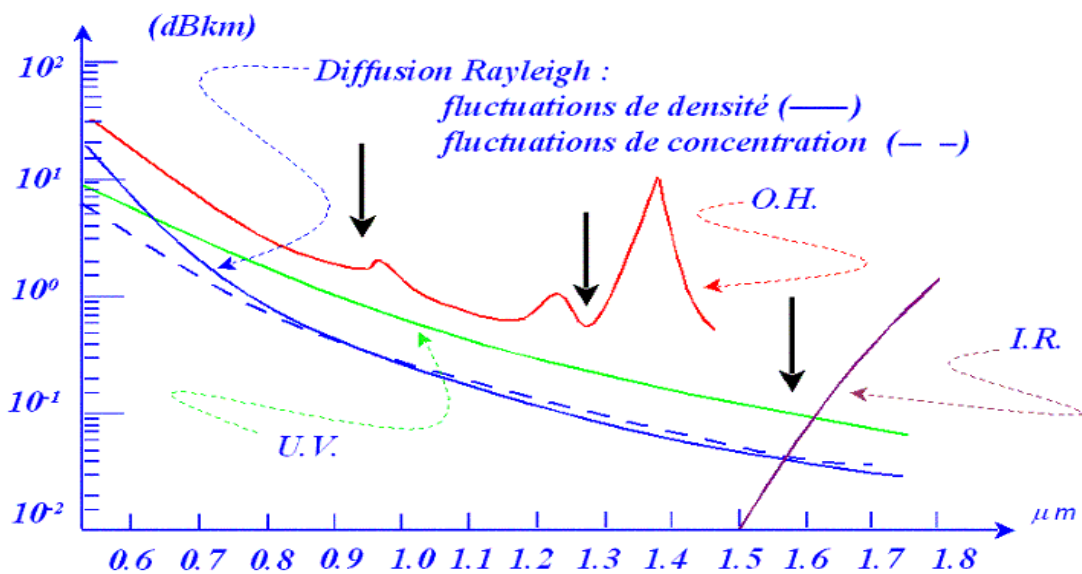
- Défaut de la fibre : Les variations locales du diamètre du cœur, micro-courbures, vont faire qu'un certain nombre de rayons vont subir une réfraction dans la gaine, entraînant une perte d'énergie.

- Couplage de modes : Il s'agit de l'ensemble des phénomènes qui entraînent des échanges d'énergie entre les différentes directions de propagation des rayons. Prenons par exemple un rayon qui arrive avec l'inclinaison  $q$  dans une zone où existent des micro-courbures ; il peut alors se réfléchir suivant un angle  $q'$  différent de  $q$  [5].

### c. Les pertes d'insertion

Une liaison à fibre optique nécessite toujours un couplage source-fibre ou fibre-détecteur; celui-ci est réalisé par des connecteurs. Une liaison peut également nécessiter le raccordement de fibres entre elles. Cette connexion peut être démontable (connecteurs fibre à fibre) ou permanente (soudure). Toute interconnexion doit causer le minimum de pertes [5].

Deux phénomènes de l'atténuation: l'absorption et la diffusion de la lumière comme le montre la figure ci-dessus.



**Figure 1.9:** L'atténuation  $A$  en  $\text{dB/km}$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  en  $\mu\text{m}$   
Source: [www.webnode.fr](http://www.webnode.fr).

### 1.4.5 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique est une variation de la vitesse de propagation de l'onde lumineuse avec la longueur d'onde, le long de la fibre, elle concerne aussi bien les fibres monomodes que les multimodes [6].

Elle correspondant aux variations de temps de propagation des diverses longueurs d'onde, est l'un des facteurs limitant de la bande passante.

En fait, deux types de dispersion regroupés par ce terme, à savoir:

**a. La dispersion matériau  $D_m$**

La dispersion du matériau, aussi appelée dispersion de l'indice de réfraction traduit le fait que l'indice de réfraction du milieu varie en fonction de la longueur d'onde. Cette dispersion est provoquée par la réponse électronique du milieu à une excitation électromagnétique. Cependant le rayonnement laser créé au sein de l'amplificateur engendre une dépendance supplémentaire de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde et de la puissance [7].

**b. La dispersion guide  $D_g$**

Ceci est dû au fait que la lumière n'est en fait pas strictement confinée dans le cœur. Les champs électrique et magnétique constituant l'impulsion lumineuse s'étendent en fait (légèrement) à l'extérieur du cœur, donc dans la gaine. Le champ électromagnétique "déborde" dans la gaine d'autant plus que la longueur d'onde est grande. L'indice de réfraction vu par l'onde est donc une moyenne entre de l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine [8].

La dispersion du matériau  $D_m$  est donnée par :

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda d^2}{c} \frac{n_{\text{cœur}}(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (8)$$

$c$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

La dispersion du guide  $D_g$  est donnée par:

$$D_g \approx -\frac{n_{\text{gaine}} - n_{\text{cœur}}}{c\lambda} V \frac{\Theta^2(bV)}{\Theta V^2} \quad (9)$$

Ou :

$$V \frac{\Theta^2(bV)}{\Theta V^2} \approx 0.08 + 0.54395 (2.834 - V)^2 \quad (10)$$

La dispersion chromatique  $D$  est donc la somme de  $D_m$  et  $D_g$ :

$$D = D_m + D_g \quad (11)$$

**Remarque** : dans le cas de deux fibres, la loi de dispersion est de la forme:

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \quad (12)$$

Avec :

$D_1$  : dispersion de 1<sup>ère</sup> fibre optique;

$D_2$  : dispersion de 2<sup>ème</sup> fibre optique;

$L_1$  : la longueur de 1<sup>ère</sup> fibre optique;

$L_2$  : la longueur de 2<sup>ème</sup> fibre optique.

#### 1.4.6 Non-linéarité

On dit un canal de transmission est non linéaire lorsque sa fonction de transfert dépend du signal d'entrée; les principales sources de non linéarité dans les fibres optiques sont L'effet Kerr, la diffusion Raman et l'effet Brillouin[3].

##### a. L'effet Kerr

L'effet Kerr est un phénomène électro-optique de "biréfringence" se produit par un champ électrique extérieur dans un matériau [9]. Cela se caractérise par l'existence de deux indices de réfraction différents : un rayon lumineux peut être séparé en deux rayons lorsqu'il entre dans ce matériau [3].

##### b. L'effet Raman

L'effet Raman est un phénomène physique de diffusion moléculaire de la lumière [10]. Il s'agit d'une interaction entre une molécule possédant des niveaux vibrationnels d'énergie discrets et un champ incident d'énergie, petite devant l'énergie d'ionisation (diffusion élastique basse fréquence).

##### c. Diffusion Brillouin

La diffusion Brillouin est un couplage de la lumière avec les ondes acoustiques d'un milieu. Il 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 [11].

### 1.4.7 Débit de transmission

Lorsque le débit des canaux augmente, la capacité des systèmes augmente seulement si l'efficacité spectrale augmentera.

En 2015, une société française (orange) a expérimenté la mise à niveau de débit vers 36 téra-bit/s par 32 canaux. et en 2020, la croissance du trafic sera plus importante d'un facteur de 10 que celle de la croissance de la capacité.

## 1.5 Les avantages et Les inconvénients d'une fibre optique

### a. Les avantages

- Le mode de transmission est le plus fiable et le plus sécurisé.
- La transmission de gros volumes de données à haut débit.
- Le signal lumineux reste pur le long de la fibre optique et ne s'affaiblit pas (il n'y a pas d'atténuation du signal comme avec le cuivre).
- Il est impossible d'écouter ou d'intercepter les signaux lumineux qui circulent à l'intérieur d'une fibre optique. Le support est sécurisé.
- Il n'y a pas d'interférences, ni de rayonnement.
- La fibre est un diélectrique, il ne présente pas de risque d'étincelle.
- Les fibres optiques durent généralement plus longtemps ; environ plus de 100 ans.
- Les fibres optiques peuvent être tirées sur des diamètres plus petits que pour le fil de cuivre.
- Parce que les fibres optiques sont plus minces que les fils de cuivre, d'autres fibres peuvent être regroupées dans un câble. Cela permet à plus de lignes téléphoniques ou plusieurs canaux de passer dans le même câble.
- Un câble à fibre optique typique peut transporter environ 9000 voies téléphoniques ou plus de 1000 chaînes de musique, ou 8 chaînes de télévision. Ces chiffres sont cinq fois supérieurs à ce que pourrait supporter un câble de cuivre.
- Les câbles à fibre optique ont beaucoup plus de bande passante que les câbles métalliques.

**b. Les inconvénients**

- La fibre optique est plus chère.
- Plus difficile à installer et à maintenir, et seuls des techniciens qualifiés et expérimentés peuvent mettre en place un câblage en fibre optique.
- Le verre de la fibre optique est fragile.
- La connexion de deux fibres optiques requière un polissage délicat et un parallélisme parfait.

**1.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement les fibres optiques et les Télécommunications par fibre optique. Nous avons conclu que la lumière lorsqu'elle entre d'un bout d'une fibre optique, elle ne sort pas de la même forme. Ceci est dû à des phénomènes divers et complexe que la lumière rencontre durant sa propagation, ce qui peut présenter soit des avantages, soit des inconvénients pour les systèmes optiques.

La lumière se propage sous forme d'onde, qui selon le milieu, peut subir d'absorption, de réflexion, de réfraction, de diffraction, et de dispersion.

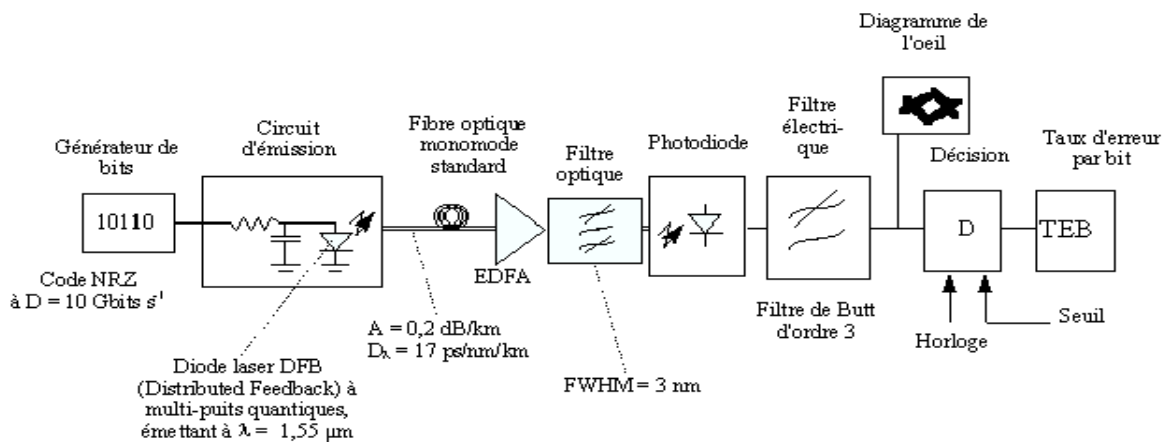
## 2.1 Introduction

Les communications optiques consistent principalement à transporter de l'information sous forme lumineuse d'un point à un autre, à travers un guide diélectrique. L'information à transmettre est convertie d'un signal électrique en signal optique grâce à un émetteur, elle est ensuite injectée dans une fibre optique. Le signal subira le traitement inverse à savoir la conversion optique-électrique grâce à un récepteur.

Ce chapitre sera une description d'une liaison par fibre optique, les composantes d'un émetteur, le récepteur, et une explication sur les critères d'évaluation d'une transmission.

## 2.2 Description d'une Liaison point à point mono-longueur d'onde

Le transfert d'informations entre deux points peut être effectué selon une forme qui est soit analogique (amplitude, fréquence ou phase), soit numérique. Dans la plupart des cas, la configuration est de type numérique, par variation directe du courant de diode ou par l'utilisation du problème externe.



**Figure 2.1** : transmission numérique par fibre optique.

Source : [1].

Le principe de la liaison est l'information est codée en amont. Ce codage est illustré par l'utilisation d'un générateur de bits pseudo-aléatoire. Celui-ci attaque un circuit de modulation rapide, qui module le courant de la diode laser performante (DFB). (la diode laser transfère un signal électrique à un signal optique), et le signal optique est introduit dans une fibre monomode, puis amplifié optiquement par le biais d'un amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA), afin d'améliorer le rapport signal à bruit après photo détection ; et après détection au moyen d'une photodiode, grâce à un diagramme de l'œil la qualité globale de la liaison numérique peut être évaluée, à partir duquel le meilleur moment d'échantillonnage (Horloge) et le niveau seuil de tension (Seuil) pour la prise de décision sont choisis[1].

### 2.3 Les Composants d'émission et réception

Comme tous les systèmes de communications, les liaisons optiques se basent sur trois blocs fondamentaux pour effectuer le transfert de l'information: l'élément d'émission, le canal de communication et le récepteur.

#### 2.3.1 Les Composants d'émission

Selon le type de mécanisme mis en jeu pour l'émission de lumière On distingue les diodes électroluminescentes (DEL) pour émission spontanée et les diodes laser (DL) pour émission stimulée.

**Remarque :** Dans notre cas de liaisons haut débit (40Gbit/s), seule la diode laser, nettement plus performante.

Les diodes laser interviennent essentiellement par leurs caractéristiques statiques et par leurs caractéristiques dynamiques.

##### 2.3.1.1 Diodes Lasers DL

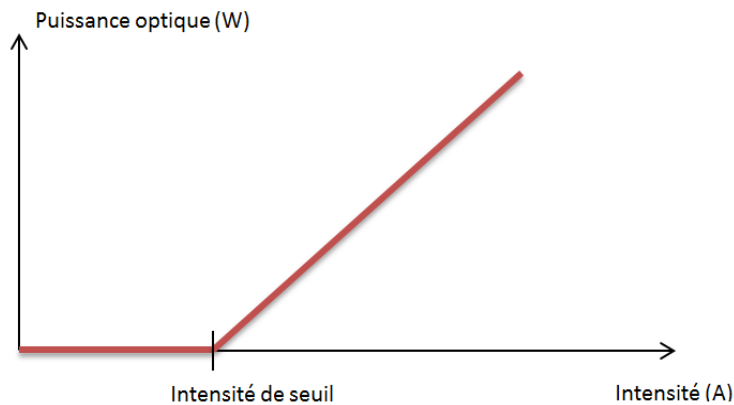
Le laser système permet de moduler directement le courant électrique représentant la séquence de données en le transformant en une puissance optique.

La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, elle est caractérisé par: une faible largeur spectrale et une bande passante importante [12]. C'est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permette d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre [13].

### 2.3.1.1.1 Caractéristiques d'un laser

#### a. Puissance :

La puissance d'une diode laser dépend du courant de la jonction. La variation de la puissance lumineuse en fonction du courant permet de mettre en évidence l'existence d'un courant seuil. Lorsque le courant augmente au-dessus du seuil, l'émission stimulée apparaît : tous les porteurs injectés en supplément subissent une recombinaison stimulée [11].



**Figure 2.2 :** Caractéristique Puissance-Courant d'un laser

Source : Wikipédia

Le courant de seuil marque la séparation entre un fonctionnement dominé par l'émission spontanée et un fonctionnement dominé par l'émission stimulée. La puissance émise par le laser se calcule de la façon suivante [14]:

$$p = \eta (I - I_s) \quad \text{pour} \quad I_s > I \quad (1)$$

Et:

$$p=0 \quad \text{pour} \quad I_s < I \quad (2)$$

Où :

$I$  est le courant injecté au laser ;

$I_s$  le courant de seuil du laser ;

$\eta$  est le rendement du laser (égal à la pente de la zone émission).

### b. Le bruit des lasers

Un laser à semi-conducteur constitue un générateur de fréquences optiques particulièrement imparfait et affecté par des bruits d'amplitude et des bruits de fréquence. Ces fluctuations imposent une limite ultime aux performances de n'importe quel système optique de communications. Ce bruit est provoqué notamment par l'émission spontanée dans la diode laser [11]. Le bruit d'amplitude ou d'intensité à une certaine fréquence est caractérisé par le RIN (Relative Intensity Noise) défini par le rapport entre la densité spectrale des fluctuations de la puissance optique  $\Delta P$  et le carré de cette puissance  $P$ . On utilise habituellement la quantité  $RIN(f)$ , expression en décibels de  $rin(f)$  [14].

$$RIN(f) = 10 \log(rin(f)) \quad (3)$$

$$rin(f) = \frac{(\Delta P(f))^2}{P(f)^2} \quad (4)$$

#### 2.3.1.2 Modulateurs

Un modulateur, c'est un système adroit de modifier les paramètres de la lumière (amplitude et ou phase ; mais cela pourrait être : polarisation, direction de propagation, fréquence, répartition de modes, etc.) en fonction d'un signal de commande. Un modulateur est un système d'interaction. Les interactions entre phénomène physique de nature

différente mécanique (ou élastique), acoustique, magnétique, etc [13].

### **a. Modulation directe**

On agit sur le courant de jonction qui provoque l'effet laser. En première approximation, la puissance optique délivrée varie linéairement en fonction du courant. Cette modulation provoque une modification dynamique du spectre due à la conversion amplitude-fréquence et du diagramme de rayonnement, avec des effets nuisibles aux grandes vitesses de modulation. La modulation directe offre l'avantage d'être simple et peu coûteuse, en plus elle nécessite une tension réduite (la tension appliquée n'est que de 2 à 3 Volts) et une puissance faible [13].

### **b. Modulation externe**

Le principe de 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 [11].

La modulation externe est indispensable pour maintenir une qualité de transmission correcte, et ce type de modulation permet d'obtenir de très grands débits.

**Remarque :** Dans notre cas on va utiliser la modulation externe par ce qu'en a utilisé débit élevé (40Gbit /S) ; et une chaîne de transmission compliquée (plusieurs composants).

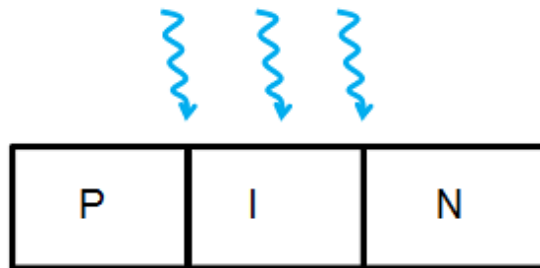
## **2.3.2 Les Composants de réception**

Le point clef des liaisons par fibre optique est la détection. En général, les signaux reçus sont très faibles et rapides. Le rayonnement incident crée, par génération bande à bande, des paires électron-trou séparées par un champ électrostatique, puis collectées par des contacts électriques. Ce flux de charges donne lieu à un photocourant. Le système de détection comprend, en plus de l'élément photodétecteur proprement dit (une photodiode PIN), un ensemble de circuits électroniques, à commencer par un pré-amplificateur faible bruit [1].

### 2.3.2.1 Photodiode PIN

Les photodiodes PIN sont développées à partir des photodiodes à jonction PN, Le fonctionnement de la photodiode PIN est similaire à celui de la photodiode à jonction PN, sauf que la photodiode PIN est fabriquée différemment pour améliorer ses performances, il est développée pour augmenter le courant porteur et la vitesse de réponse des porteurs minoritaires, et il génère aussi, plus de courant électrique que les photodiodes à jonction PN avec la même quantité d'énergie lumineuse.

Une photodiode à jonction PN est constituée de deux couches, à savoir: les semi-conducteurs de type p et de type n, tandis que la photodiode PIN est constituée de trois couches, une couche d'addition appelée semi-conducteur intrinsèque est placée entre les semi-conducteurs de type p et de type n pour augmenter le courant porteur minoritaire.



**Figure 2.3:** Couches de photodiode PIN

Source : [www.physics-and-radio-electronics.com](http://www.physics-and-radio-electronics.com)

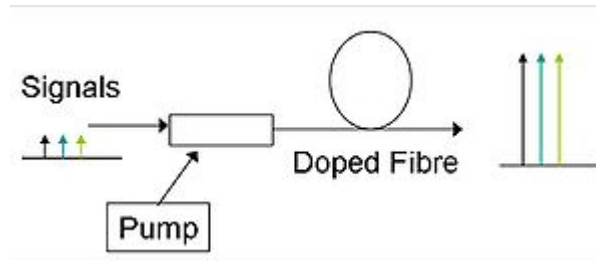
#### 2.3.2.1.1 Avantages de la photodiode PIN :

- Large bande passante ;
- Haute efficacité quantique ;
- Vitesse de réponse élevée.

#### 2.3.2.2 Amplificateurs optiques EDFA

Un EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) est un amplificateur optique basé sur une fibre optique dopée à l'Erbium, qui amplifie les signaux optiques. Ils utilisent des lasers à semi-conducteurs pour pomper la fibre dopée à l'erbium afin d'amplifier la lumière où les

fibres de télécommunication ont leur minimum de perte. Il permet d'amplifier simultanément des longueurs d'ondes, et de compenser les pertes subies lors de la propagation.



**Figure 2.4:** Diagramme schématique d'un amplificateur à fibre dopée.

Source : [www.composelec.com](http://www.composelec.com)

### 2.3.2.2.1 Avantages et désavantages de l'EDFA

#### a. Avantages

EDFA à une utilisation élevée de la puissance de la pompe (> 50%). Amplification directe et simultanée d'une large bande de longueur d'onde (> 80 nm) dans la région de 1550 nm, avec un gain relativement plat. La planéité peut être améliorée par des filtres optiques à gain de gain, Gain supérieur à 50 dB et Chiffre à faible bruit adapté aux applications de longue distance.

#### b. Inconvénients

- La taille d'EDFA n'est pas petite ;
- Il ne peut pas être intégré avec d'autres dévies de semi-conducteurs.

### 2.3.2.3 Multiplexage :

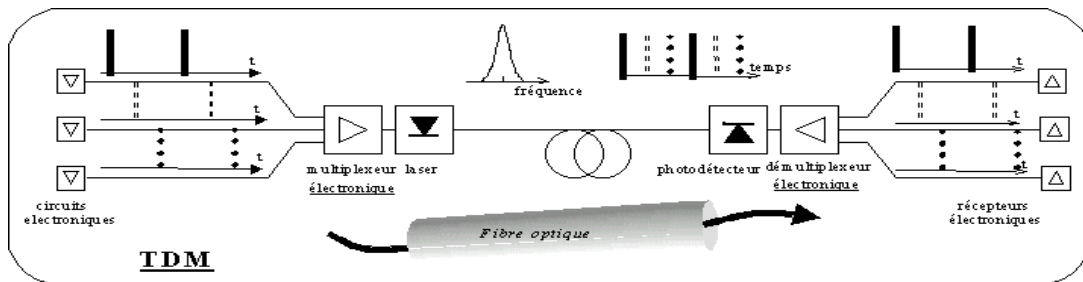
Il consiste en fait à faire passer plusieurs informations sur un seul support de transmission. A l'aide de ce principe simple, de larges économies sont possibles grâce à la réduction des coûts d'installation et/ou d'exploitation. (Moins de câbles pour faire passer la même quantité d'information).

### 2.3.2.2.1 Les type de multiplexage

#### a. Le multiplexage en temps(TDM)

Le TDM (Time Division Multiplexing) consiste à découper la bande passante de la fibre optique en unités de temps, que vont se partager les différentes communications. Cela permet donc à un émetteur de transmettre plusieurs canaux numériques élémentaires à faible débit sur un même support de communication à plus haut débit. Les informations importantes à retenir est répartition du temps d'utilisation entre les communications; et chaque signal est commuté à tour de rôle à grande fréquence [15].

Voici un schéma permettant d'illustrer le découpage en temps entre les différentes connexions:

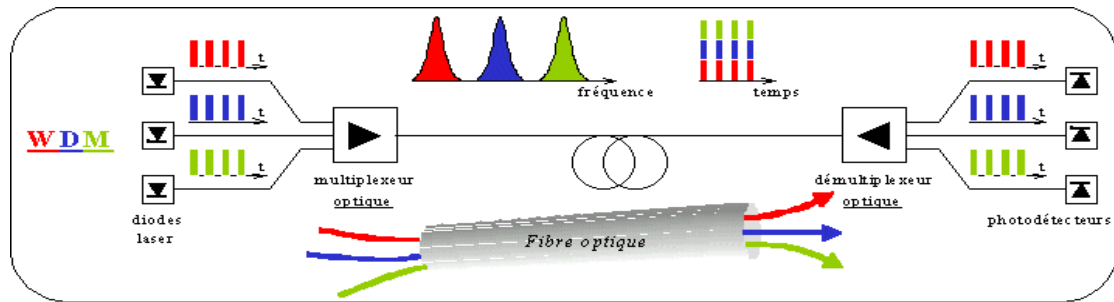


**Figure 2.5:** Schéma de principe de l'utilisation du démultiplexage temporel (TDM) dans les communications par fibre optique

Source: [1].

#### b. Le multiplexage en longueur(WDM)

Le WDM (Wavelength Division Multiplexing) consiste à mélanger plusieurs signaux optiques sur une même fibre optique afin de multiplier la bande passante de celle-ci. Les signaux sont portés par des longueurs d'ondes différentes, et espacés assez largement afin de ne pas interférer les unes avec les autres [15].



**Figure 2.6** : principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre

Optique (avec 3 longueurs d'ondes).

Source: J. L. Verneuil, Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gb/s, *thèse* à l'université de Limoges, 2003.

#### 2.3.2.4 Filtre électrique

Les filtres électriques sont des circuits électroniques qui vont atténuer les signaux dans une certaine gamme de fréquence. Les filtres vont modifier l'ensemble des sinusoïdes qui leur parviennent. Si on leur envoie un signal (une tension ou courant quelconque) sur leur entrée, ils vont traiter ce signal et fournir une version traitée sur leur sortie [16].

Les filtres se divisent en quatre groupes:

- Passe-haut - laisse passer les hautes fréquences ;
- Passe-bas - laisse passer les basses fréquences ;
- Bloque bande - laisse passer tous les courants sauf ceux proche d'une fréquence ;
- Passe bande - ne laisse passer que les courants proches d'une fréquence.

#### 2.3.2.5 Filtres Optiques

En optique, les filtres sont des dispositifs qui laissent passer une partie du rayonnement lumineux, sans autrement affecter son cheminement. Ils sont utilisés pour transmettre ou rejeter sélectivement une longueur d'onde ou une gamme de longueurs d'onde.

**Remarque** : Dans notre cas, le filtre qui nous utilisons est le filtre « bisel » d'ordre 5. ce filtre est caractérisé par la fréquence de coupeur. Le filtre sera sélectif quand la bande passante est petite.

### 2.3.2.6 Circuit de décision

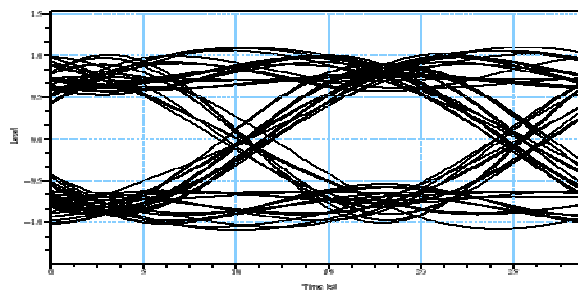
C'est un circuit qui mesure la valeur probable d'un élément de signal et prend une décision de signal de sortie sur la base de la valeur du signal d'entrée et d'un ou de plusieurs critères prédéterminés. On doit assurer au récepteur une qualité d'information parfaite. Pour cela, une remise en forme du 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 [17]. 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. Cette récupération de rythme est effectuée grâce à une boucle à verrouillage de phase classique [14].

## 2.4 Critères d'évaluation d'une transmission

### 2.4.1 Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil permet de visualiser la qualité d'un signal dans le domaine temporel en superposant un grand nombre de séquences en temps réel au moyen d'un oscilloscope rapide synchronisé sur le signal d'horloge du signal de données. Pour superposer tous les bits il suffit de faire glisser temporellement chaque séquence bit à bit [17].

Il n'a toutefois qu'une valeur qualitative (facteur de qualité qualitatif), le critère qui permet réellement d'évaluer de manière quantitative la qualité du signal est le taux d'erreur binaire.



**Figure 2.7:** d'un diagramme de l'œil

Source: [www.scicos.org](http://www.scicos.org).

L'ouverture de l'œil caractérise le bruit et les distorsions apportées par la chaîne de transmission. L'opération d'échantillonnage doit se produire à l'instant précis où l'œil est le plus ouvert. Un œil bien ouvert permettra au dispositif de démodulation de discerner aisément les symboles transmis. A l'opposé, un œil fermé se traduira inévitablement par de nombreuses erreurs de transmission [17].

## 2.4.2 Taux d'erreur binaire TEB et facteur Q

(Facteur de qualité quantitatif)

### 2.4.2.1 Taux d'erreur binaire: TEB

Le taux d'erreur binaire s'exprime en puissance négative. La méthode, pour évaluer les performances d'un système, consiste à comparer les bits envoyés avec les bits reçus [18].

Le taux d'erreur binaire d'une liaison est le rapport entre le nombre d'erreurs et le nombre de bits transmis, il est utilisé pour quantifier un canal de transport de données en comptant le taux d'erreurs dans une chaîne de données. TEB est un paramètre-clé qui est utilisé dans l'évaluation des systèmes qui transmettent des données numériques à partir d'un emplacement à un autre.

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits errones}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad (5)$$

### 2.4.2.2 Le facteur Q

Le principe de ce facteur de qualité est de varier de la même manière que le rapport signal à bruit en régime de propagation linéaire et en faisant abstraction des imperfections au niveau des équipements d'émission et de détection. Pour la majorité des formats de modulation et des technique de détection lorsque le rapport signal à bruit se dégrade de 1dB, la facteur de qualité se dégrade lui aussi de 1dB [19].

Le facteur de qualité  $Q$  de la liaison est défini par l'expression:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (6)$$

Où ;  $I_1$  et  $I_0$  sont respectivement les valeurs moyennes des niveaux « 1 » et « 0 »,  $\sigma_1$  et  $\sigma_0$  les racines carrés des variances des densités de probabilité des symboles « 1 » et « 0 ».

### 2.4.3 Rapport signal à bruit SNR

Le rapport signal bruit S/B (signal to noise ratio S/N), permet de mesurer la qualité d'un canal de transmission. C'est un nombre sans unité qui est d'autant plus grand que le bruit est négligeable.

Le facteur  $Q$  permet d'accéder au rapport signal à bruit (SNR) :

$$\text{SNR} = Q^2 = \left( \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \right)^2 \quad (7)$$

**Remarque:** Nous obtenons une réception correcte si le facteur de qualité est supérieur de 6 et le taux d'erreur binaire inférieur de  $10^{-9}$ .

### 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu une description d'une liaison par fibre optique, les composantes d'un émetteur, le récepteur et ses caractéristiques et les critères d'évaluation d'une transmission. On a fourni l'essentiel d'informations qu'on voit utiles comme document d'aide par la suite de ce mémoire. Donc nous allons voir dans le chapitre suivant la simulation d'une chaîne de transmission optique par logiciel COMSIS.

### 3.1. Introduction

Grâce à de puissants logiciels de simulation, il est fortement recommandé avant de réaliser matériellement une transmission numérique ou analogique, de procéder à l'étape de simulation en étudiant, analysant et évaluant complètement la chaîne de transmission correspondante. La méthode expérimentale, qui consiste en des mesures itératives sur un banc de test, est très coûteuse en temps et en argent et ainsi que le manque du matériel, c'est la raison pour laquelle on choisit les outils de simulation qui constituent une assistance intéressante pour trouver des solutions très rapides et moins coûteuses. Pour cela, il existe pas mal de logiciels qui répondent à ces exigences. Dans notre cas, on a opté pour simulateur COMSIS qui est très facile à utiliser et à maîtriser et vu sa disponibilité aussi.

En utilisant ce logiciel COMSIS, on va présenter dans ce chapitre les résultats de simulations de la caractérisation d'une chaîne de transmission à 40 Gbit/s. Les résultats obtenus de cette simulation ont été basés sur le diagramme de l'œil. Dans cette partie on va se baser sur les différents paramètres qui influent sur la qualité de la liaison optique (longueur de fibre, coefficient d'atténuation, dispersion chromatique, débit binaire, etc.,...)

### 3.2 Présentation de logiciel COMSIS

COMSIS est un logiciel de simulation des systèmes de télécommunication, développé par la société française IPSIS (Ingénierie Pour Signaux et Systèmes), L'acronyme de COMSIS signifie communication System Interactive Software.

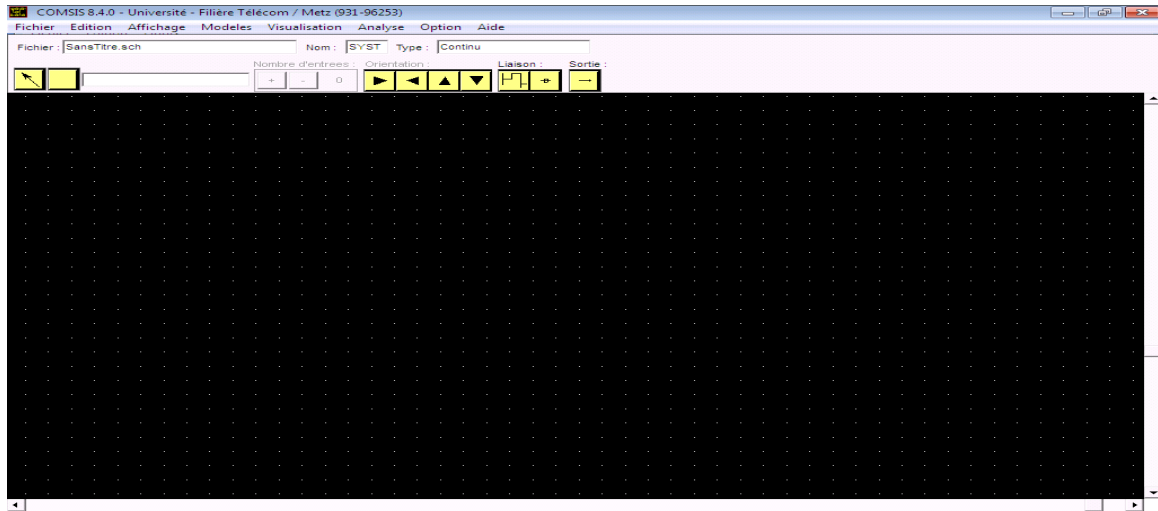
#### 3.2.1 L'interface COMSIS

L'exécution de COMSIS commence par l'affichage de deux fenêtres qui constituent l'interface principale de ce logiciel à savoir :

##### 3.2.1.1 Fenêtre principale

Elle rassemble deux types de fonctions de COMSIS, les fonctions d'édition de schémas blocs et les fonctions de traitement.

La fenêtre principale présente par la figure ci-dessous

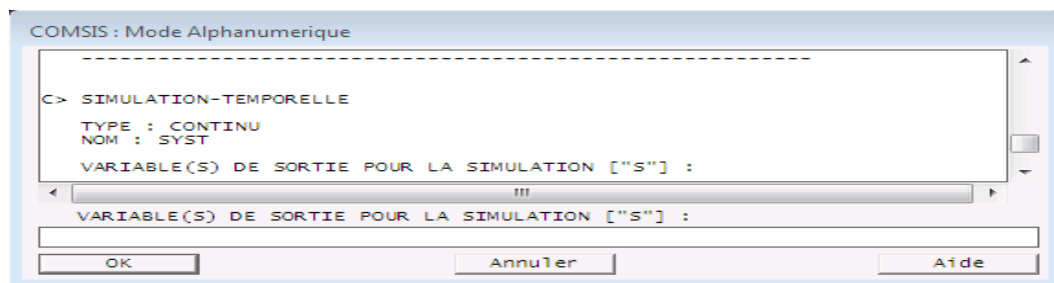


**Figure 3.1 :** La fenêtre principale de logiciel COMSIS.

Suivant l'utilisation de la fenêtre principale du COMSIS il suffit de sélectionner les composants disponibles dans la bibliothèque à l'aide de la souris et les mettre sur la feuille du dessin. L'agrandissement, la réduction ainsi que la position de la zone de dessin sur la feuille de dessin sont respectivement contrôlés par les commandes de zoom et les barres de défilement), Ces modèles doivent être nommés et interconnectés entre eux. Une fois terminé on passe au paramétrage de ces derniers qui peut-être numérique ou formel. La chaîne est maintenant complète et peut être analysée.

### 3.2.1.2 Fenêtre alphanumérique

Cette fenêtre est utilisée au lancement d'une analyse pour insérer des paramètres de simulation ou pour afficher l'ensemble des messages ou informations édités, spontanément ou sur requêtes, par le logiciel au cours de son exécution.



**Figure 3.2 :** Interface alphanumérique.

### 3.2.2 La Bibliothèque du logiciel

Elle englobe tous les types de modèles qui permettent de réaliser les différents schémas blocs: entrées, régénérateurs, codeurs, modulateur, filtres,...

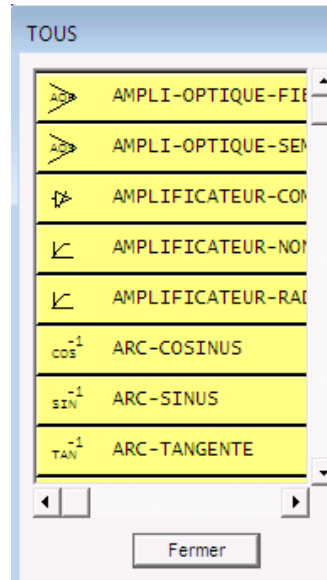


Figure 3.3 : La bibliothèque de modèle COMSIS.

### 3.2.3 Différents types d'analyse

A travers le logiciel COMSIS on peut effectuer plusieurs types d'analyse (statique, stabilité, transfert de boucle,...) d'un composants, d'un opérateur fonctionnel, de la liaison entière ou partielle permettant de visualiser leurs performances ou leurs caractéristiques.

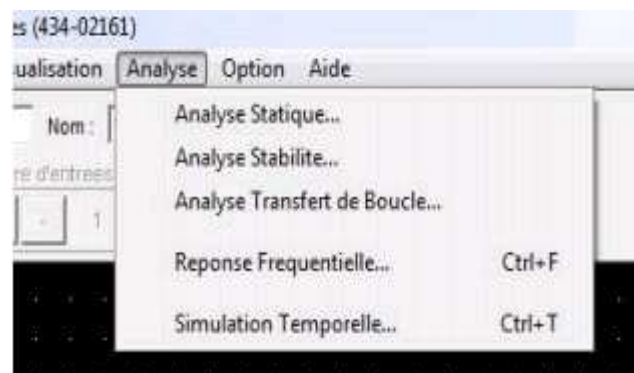


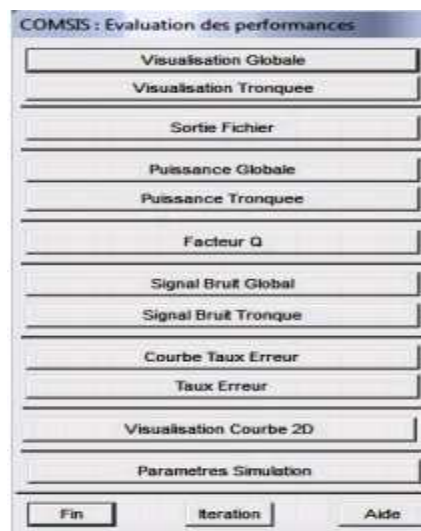
Figure 3.4 : Le menu d'analyse de COMSIS.

### 3.2.3.1 Simulation temporelle

La commande de Simulation Temporelle du menu Analyse permet de déterminer la réponse d'un système à des signaux dans le domaine temporel.

### 3.2.3.2 Visualisation et le traitement des résultats

D'après les propriétés du logiciel COMSIS .La simulation temporelle est l'analyse permettant le plus grand nombre de possibilités dans l'exploitation des résultats. Les autres analyses affichent directement le résultat demandé dans la fenêtre graphique. Durant la simulation, un écran de contrôle permet de suivre l'état d'avancement des calculs. A la fin de la simulation, la fenêtre d'évaluation des Performances propose plusieurs possibilités.



**Figure 3.5 :** Fenêtre d'évaluation des performances.

Les commandes suffixées Globales exploitent les signaux sur tous les points simulés. Les commandes suffixées Tronqué(e) offrent la possibilité de travailler sur un sous ensemble de points, en limitant la durée du signal et/ou en le sur-échantillonnant.

### 3.2.3.3 Visualisation des résultats de simulation

La commande visualisation affiche les variables calculées, soit directement dans le domaine temporel, soit après qu'elles aient subi un prétraitement. Lorsque cette commande est activée, la fenêtre Variables et Prétraitements apparait et donne accès aux choix de ces traitements à effectuer et des variables simulées sur lesquels les effectuer.



Figure 3.6 : Fenêtre variables et prétraitement à visualiser.

### 3.3 Simulation et Interprétation des résultats

#### 3.3.1 Le schéma de base

Le schéma fondamental le plus général et le plus simple possible, dans les liaisons de transmission optique est représenté dans la Figure 3.7

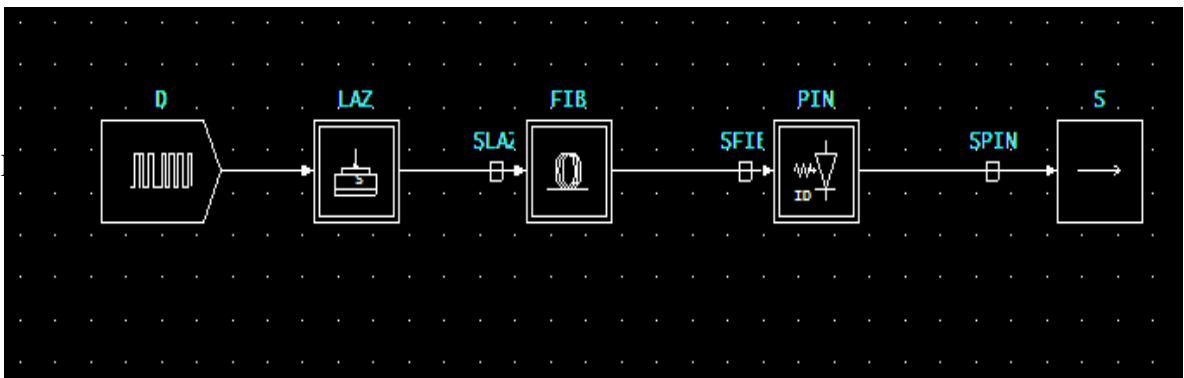


Figure 3.7 : Le schéma de bas de transmission optique

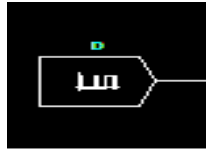
Les parties ci-dessus présentent les caractéristiques des éléments utilisés de la bibliothèque COMSIS pour construire les différents blocs de la liaison de transmission.

#### 3.3.1.1 L'émission

L'objectif de l'émetteur consiste à inscrire l'information électrique binaire sur un signal lumineux continu et modulé.

### a. Les données électriques

Les données électriques permet de générer un courant d'entrée de laser, au format NRZ sont une succession de tensions de niveau haut et de niveau bas, Le modèle disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appelle (SEQUENCE-BINAIRE-PSEUDO-ALEATOIRE). Il est représenté Figure 3.8



**Figure 3.8 :** Modèle de simulation des données NRZ pseudo aléatoires.

Ce modèle délivre une séquence de créneaux d'amplitude  $\pm 1$  de durée égale à l'inverse du débit. Le choix de la longueur  $n$  du registre détermine la période de la séquence, qui est égale à  $2^n - 1$  pour les séquences de longueur maximale (dans COMSIS,  $n$  est supérieur ou égal à 2 et inférieur ou égal à 34).

Les paramètres de ce bloc sont donner dans la figure suivante :

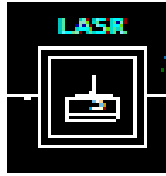


**Figure 3.9 :** Paramètres du bloc des données électriques

### b. Le laser

Ce modèle permet de simuler un laser à rétroaction répartie ou laser DFB. Il est possible de décrire soit par ses paramètres physiques internes, soit par des grandeurs « systèmes » ou mesurables, souvent plus accessibles. Ce sont ces derniers qui seront utilisées. Le modèle disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appelle (LASER-SYSTEME). Il est représenté Figure 3.10

La figure ci-dessous représente modèle de simulation du laser.



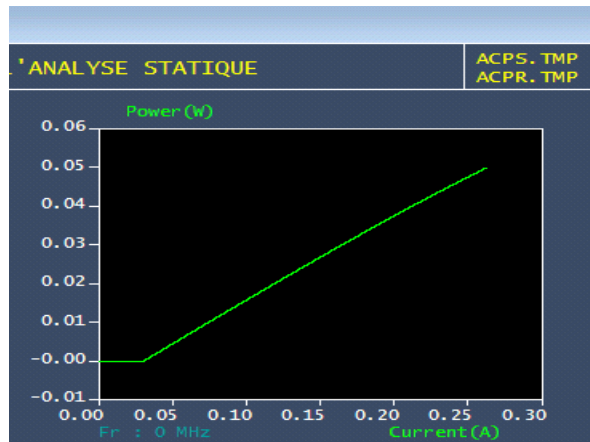
**Figure3.10** : Modèle de simulation du laser

Les paramètres du laser sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Paramètres système de laser		Données physiques de laser	
Longueur d'onde	1550 nm	Facteur de réflexion	0.25
Courant de seuil	25 mA	Rendement différentiel	0.6
Rendement	0.25 W/A	Facteur d'émission spontanée	2
Largeur de raie	5MHz à 60 mA	Hauteur de la cavité	0.1 $\mu\text{m}$
Taux d'amortissement	2MHz à 100 mA	Largeur de la cavité	5 $\mu\text{m}$
Bande à -3 dB	10MHz à 100 mA	Longueur de la cavité	200 $\mu\text{m}$
Espacement entre mode	1nm	Densité porteurs-transparence	$5.10^{17} \text{cm}^{-3}$
Chirp	100MHz /mA	Facteur de confinement	0.1
Bruit RIN	-145dB/Hz à 100 mA		

**Tableau 3.1** : paramètre du laser

L'analyse statique de la diode laser en utilisant le logiciel COMSIS, est présentée sur la Figure ci-dessous.



**Figure 3.11 :** variation de la puissance optique en fonction du courant du laser

D'après l'analyse statique nous avons extraire la valeur et le courant de seuil a peu près 25mA.

### 3.3.1.2 Réception

Le système de réception est composé des éléments suivants :

#### A. La photodiode

C'est une photodiode idéale, son modèle qui est disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appel PHOTODIODE-PIN (voir figure 3.12)



**Figure 3.12:** Modèle de simulation de la photodiode

Les paramètres de la photodiode qu'on a utilisée en simulation sont :

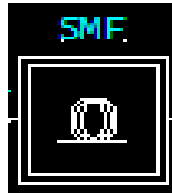
Sensibilité = 0.8 (A/w)

Courant d'obscurité = 5nA

Le courant d'obscurité,  $I_{obs}$  est le courant qui circule dans la jonction PN ou PIN en l'absence d'éclairement.

### 3.3.1.3 Bloc de transmission

On a utilisé comme bloc de transmission une fibre optique de type monomode, avec un coefficient d'atténuation égale 0.25db/km, ce modèle est disponible dans la bibliothèque de COMSIS et il s'appelle (FIBRE-OPTIQUE- MONOMODE). Il est représenté figure 3.13



**Figure 3.13** : Modèle de simulation de la fibre optique

Les caractéristiques de la fibre optique sont mentionnées sur le tableau suivant :

<b>Paramètres système de la fibre de transmission (SMF)</b>	
Longueur (km)	50
Atténuation (dB/km)	0.25
Dispersion chromatique (Ps/nm/km)	17
Effet Kerr	Oui
Effet Raman	Non
Coefficient de non linéarité ( $m^2/W$ )	$2,7 \cdot 10^{-20}$
Aire effective de la section ( $\mu m^2$ )	80
Dispersion Modale de Polarisation	Non
Retard (ns)	$4 \cdot 10^{-3}$

**Tableau 3.2** Paramètres de la fibre optique

### 3.3.1.4. Simulation et interprétation les résultats de la chaîne de base

Dans cette simulation on a voulu caractériser la transmission optique à partir d'un débit de 100 Mbit/s et découvrir les limites de cette chaîne quand le débit augmente.

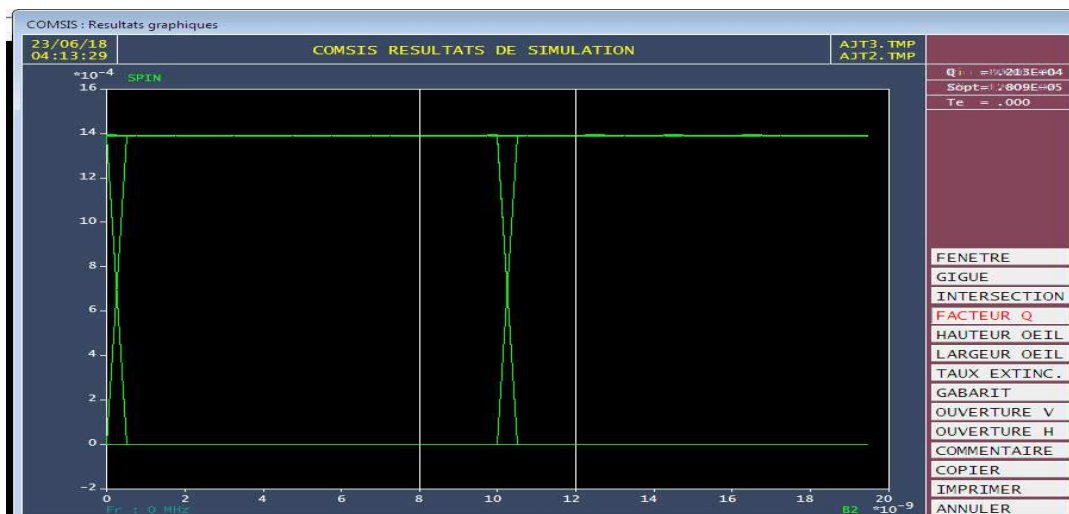
Nous avons simulé la liaison de transmission optique à partir d'un débit de 100 Mbit/s jusqu'à 500 Mbit/s, pour 10000 points, avec une fibre optique de longueur 50 Km.

Les résultats de simulation de la réponse temporelle sont représentés dans le tableau ci-dessous.

	bloc d'entrée	Le bloc de sortie
La réponse Temporelle		

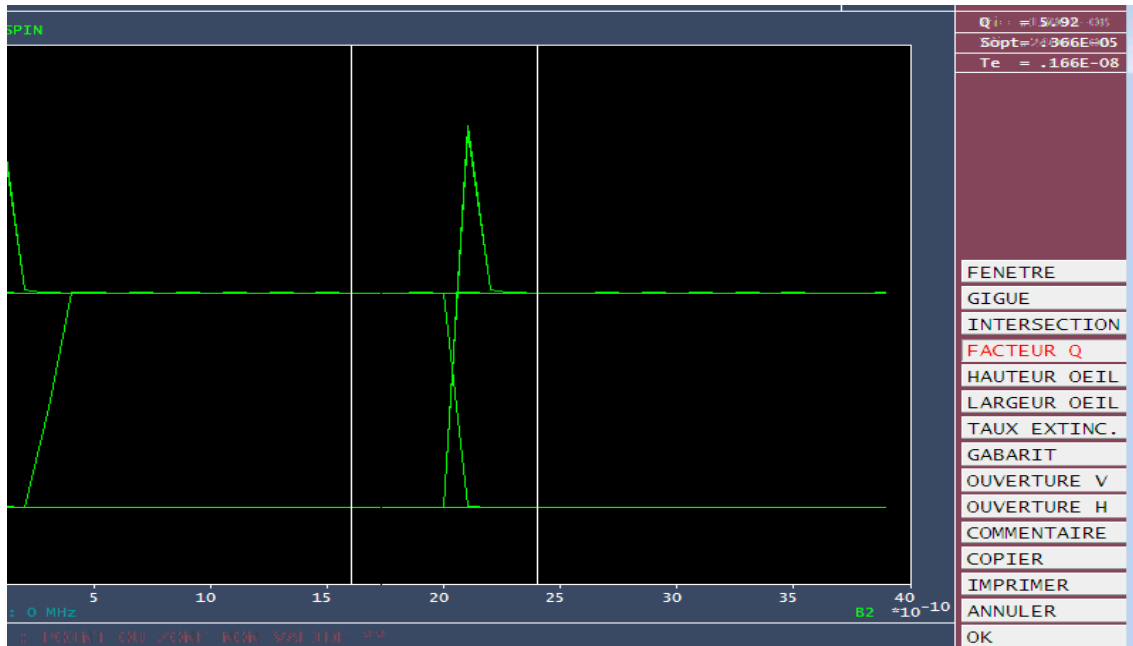
**Tableau 3.3** Les résultats de simulation de la réponse temporelle de la chaîne de base pour 100 et 500 Mbit/s

D'après ces résultats de simulation on peut dire qu'il y'a pas de différence entre le signal d'entrée et celui de la sortie, et la qualité de la transmission est meilleur pour 100 Mbit/s ( $Q=0.2 \times 10^4$ ) avec un taux d'erreur par bit nul suivant le diagramme de l'œil ci-dessous.



**Figure.3.14** : Diagramme de l'œil par la liaison de base pour 100Mbit/s .

La qualité de la transmission est faible pour 500 Mbit/s ( $Q=5.92$ ) avec un taux d'erreur par bit  $TEB=10^{-8}$  suivant le diagramme de l'œil ci-dessous.



**Figure.3.15** : Diagramme de l'œil par la liaison de base de 500 Mbit/s

Nous avons changés le débit binaire suivant le tableau des données ci-dessous.

Débit binaire(Mbit/s)	100	200	400	500
Facteur de qualité Q	$0.21 \times 10^4$	$0.19 \times 10^4$	71	5.92
TEB	0	0	0	$0.16 \times 10^{-8}$

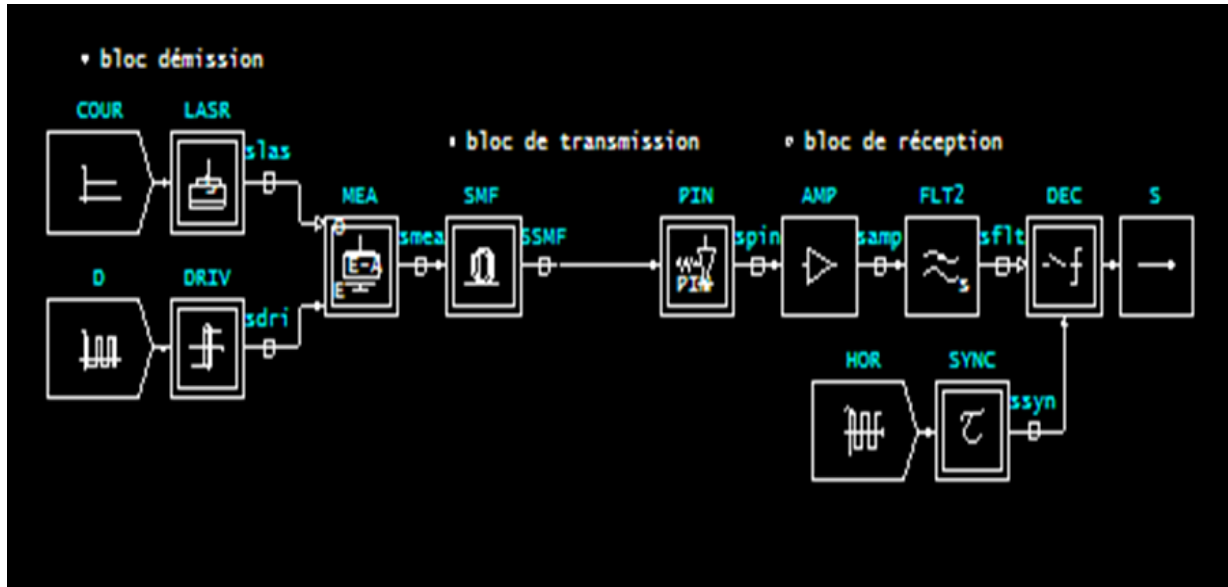
**Tableau 3.4** : variation du facteur de qualité en fonction du débit

D'après les résultats de simulation obtenus nous avons pu remarqués que le facteur de qualité est en proportion inverse avec le débit, et au delà de 500 Mbit/s le facteur de qualité est devenu très faible, ce qui implique que le signal en question sera presque perdu.

Pour atteindre le 40 Gbits/s, il est indispensable de procéder à des modifications sur la chaine de transmission, ce qu'on va le faire dans l'étape suivante.

### 3.3.2 Le schéma bloc de la liaison de transmission optique

Le schéma bloc de la liaison de transmission que nous avons simulé est représenté dans la figure 3.16



**Figure 3.16** Le schéma - bloc de la liaison de transmission

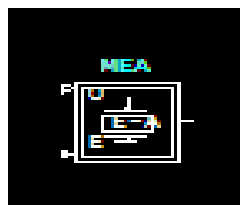
Les parties ci-dessus présentent les caractéristiques des éléments utilisés de la bibliothèque COMSIS pour construire les différents blocs de la liaison de transmission.

#### 3.3.2.1 L'émission

Pour la simulation, on a ajoutons trois blocs pour l'émission, ces blocs vont être présentés ci-dessus.

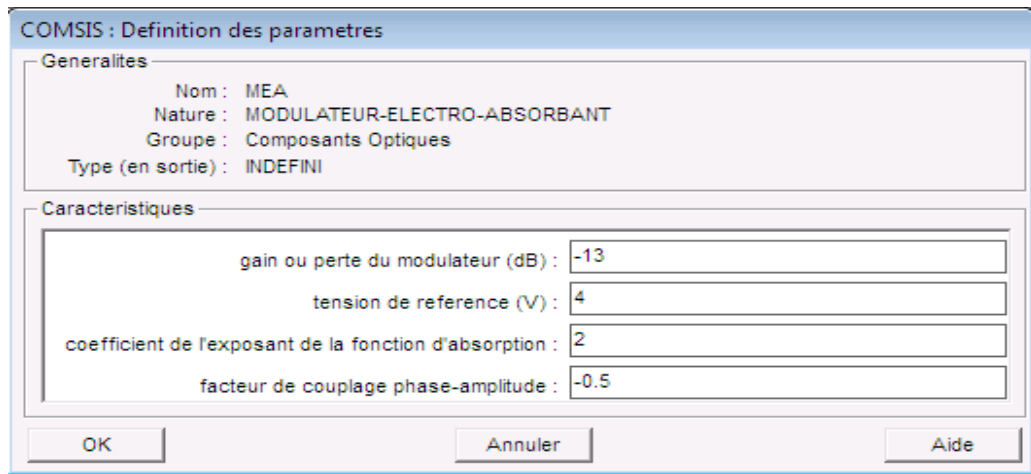
##### a. Le modulateur externe

Le modulateur externe disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appel Modulateur-Electro-Absorption. Il est représenté par le bloc suivant (figure 3.17).



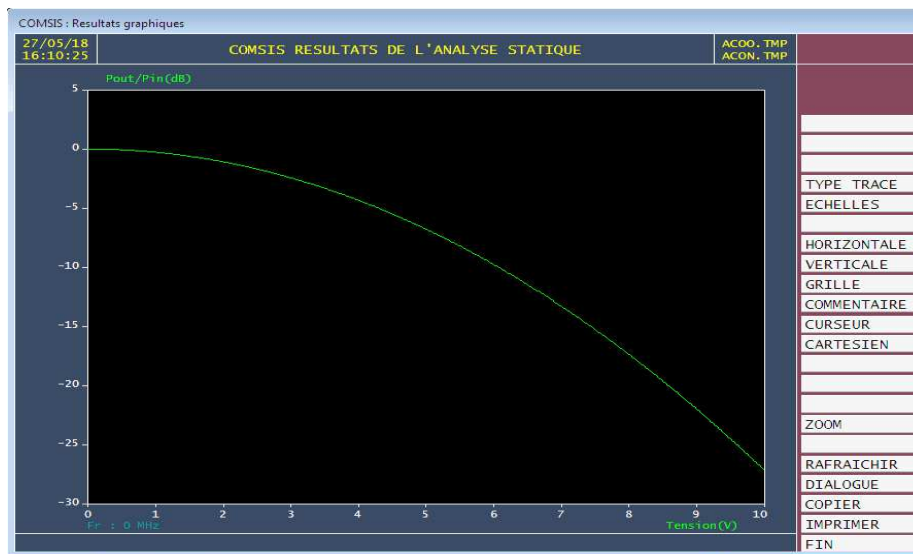
**Figure 3.17** : Modèle de simulation du MEA.

Les paramètres caractéristiques du modulateur externe sont représentés dans la figure 3.18 :



**Figure 3.18:** Paramètres du modulateur externe électro-absorbant

L'analyse statique du modulateur, représente la variation de la puissance en fonction de la tension figure 3.19:



**Figure 3.19 :** Courbe d'absorption du modulateur en fonction de la tension électrique

D'après cette analyse on voit que pour une tension nulle le modulateur laisse passer toute la lumière reçue à son entrée. Pour une tension négative il absorbe une proportion du signal optique. La tension de référence (égale à -4V dans l'exemple) signifie que le modulateur peut fonctionner dans une gamme de tension électrique comprise entre 0 et -4 V. Au-delà, le composant risque de se dégrader. Le MEA ne fonctionne pas pour une

tension de +1 V et absorbe très peu pour une tension de -1 V. il est donc nécessaire d'introduire un composant qui permet de convertir les niveaux de tension haut et bas et conduire au bon fonctionnement de modulateur. Ce module qui est le driver sera insérer entre la séquence binaire pseudo-aléatoire et le MEA.

### b. Courant de commande

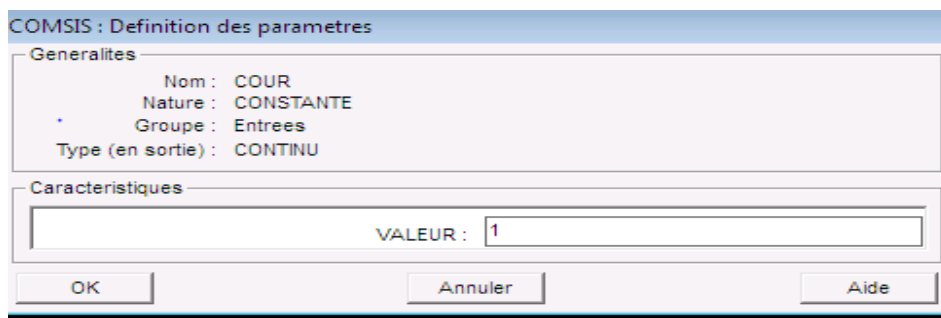
L'entrée électrique du modulateur contient la séquence de données à transmettre. La deuxième entrée comporte le signal optique continu modulant de l'information à transmettre. Cette entrée est constituée d'un laser et d'un courant de commande du laser.

La figure ci-dessous nous montre le bloc de courant laser utilisé :



**Figure 3.20** : Modèle de simulation du courant

Les paramètres du courant de commande utilisé sont donnés par la figure suivante :



**Figure3.21** : Paramètres caractéristiques du courant

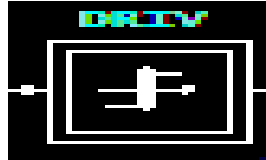
### c. Driver

Le modèle disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appelle (DETECTION\_SEUILS) Il est représenté Figure 3.22

Le rôle du driver est de modifier le niveau bas de -1V à -4 V et le niveau haut de +1 V à 0 V, afin d'assurer une modulation maximale d'amplitude et par conséquent une simple séparation des niveaux optiques lors de transmission de signal. L'opérateur

COMSIS qui modifie les différents niveaux sans déformation du signal est le détecteur à seuil. Il est considéré comme le driver idéal.

La figure ci-dessous représente modèle de simulation driver.



**Figure3.22** : Modèle de simulation driver

Les paramètres de driver sont donnés par la figure ci-dessous :

 La fenêtre est intitulée 'COMSIS : Definition des paramètres'. Elle est divisée en deux sections principales : 'Generalites' et 'Caracteristiques'.
 

- Section 'Generalites' :
  - Nom : DRIV
  - Nature : DETECTION-SEUILS
  - Groupe : Operateurs Classiques
  - Type (en sortie) : CONTINU
- Section 'Caracteristiques' :
  - NIVEAU BAS DE DETECTION : -1
  - NIVEAU HAUT DE DETECTION : 1
  - NIVEAU BAS DE SORTIE : -4
  - NIVEAU HAUT DE SORTIE : 0

 En bas de la fenêtre, il y a trois boutons : 'OK', 'Annuler' et 'Aide'.

**Figure 3.23** : Paramètres caractéristiques du driver

### 3.3.2.2 Réception

Le système de réception en ajoutant les éléments suivant :

#### a. Le filtre

Dans cette simulation on a utilisé un filtre de Bessel type passe-bas d'ordre 5, et de fréquence de coupure 0,8 fois le débit. La figure 3.26 présente le gabarit de ce filtre simulé avec COMSIS. Le modèle de ce filtre dans la bibliothèque de COMIS est représenté dans la figure suivante :



Figure 3.24: Modèle de simulation du filtre.

Les paramètres caractéristiques du filtre :

COMSIS : Définition des paramètres

Generalites

Nom : FLT2  
Nature : FILTRE PASSE-BAS CONTINU  
Groupe : Filtrés  
Type (en sortie) : CONTINU

Parametres de synthese

Frequence f1 (MHz) : 30000  
Frequence f2 (MHz) : 100000  
Frequence f3 (MHz) : 0  
Frequence f4 (MHz) : 0  
Attenuation a1 (dB) : 3  
Attenuation a2 (dB) : 5.91  
Frequence d'echantillonnage (MHz) : 0

Synthetiser...

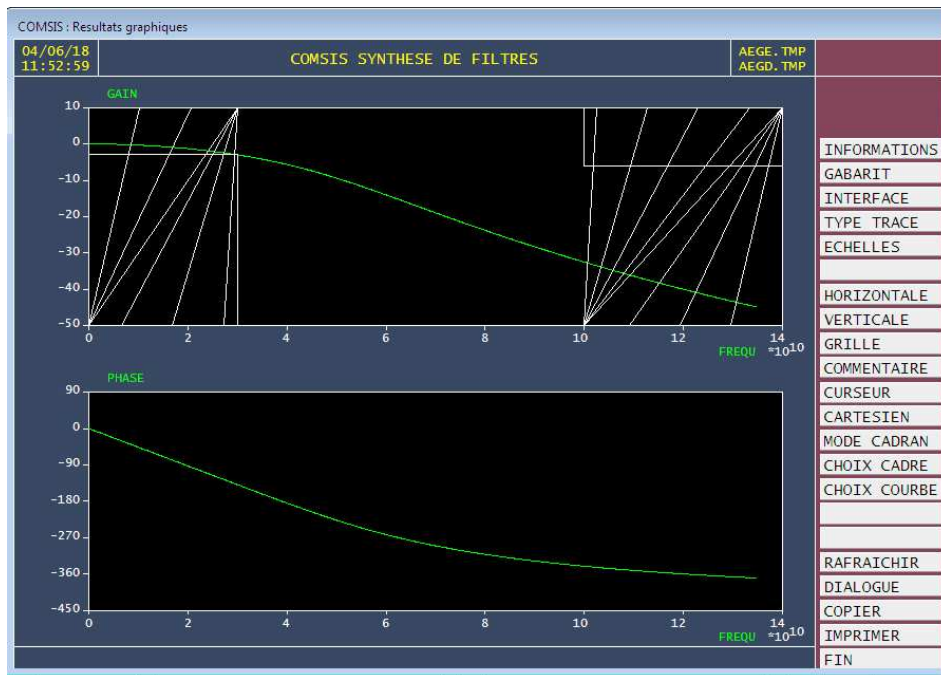
Caracteristiques

Modele : BESSEL  
Degre : 5  
Gain : .268969473800297E+28  
Forme numerateur : POLYNOME  
Numerateur : 1  
Forme denominateur : RACINE  
Denominateur : (-.283634379233925E+06),(-

OK Annuler Aide

Figure 3.25 : Paramètres caractéristiques du filtre

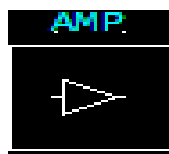
La figure ci-dessous présente le gabarit de ce filtre simulé avec COMSIS.



**Figure 3.26** : Gabarit du filtre de réception.

### b. L'amplificateur électrique

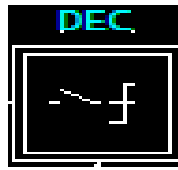
Le signal est fortement atténué après le passage dans la fibre optique et la photodiode, alors il est conseillé d'utiliser un amplificateur électrique pour amplifier le signal avant la prise de décision. Le modèle disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appelle (GAIN). Il est représenté en figure 3.27



**Figure 3.27** : Modèle de simulation d'amplificateur

### c. Le régénérateur

Pour démunir les erreurs de décision, on place un régénérateur dans le circuit de décision. Le modèle disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appelle (DECISION). Il est représenté sur la figure 3.28 :



**Figure 3.28** : Modèle de simulation de l'organe de décision

#### d. L'horloge

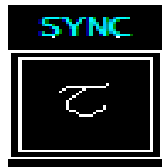
Le modèle disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appelle (HORLOGE). Il est représenté Figure 3.29.



**Figure.3.29** : modèle de simulation de l'horloge.

Pour synchroniser l'horloge aux fronts montants pour qu'ils tombent au milieu des bits du signal, c'est pour cela en place un opérateur de retard après l'horloge.

Le bloc de retard continu est symbolisé par le bloc suivant :



**Figure 3.30** : Modèle de simulation du retard continu.

### 3.3.2.3 Résultats de simulation

#### a. Simulation d'une liaison à 40Gbit/s sans fibre de compensation

Dans cette simulation on a voulu caractériser la transmission optique pour un débit de 40Gbit/s et découvrir les limites de cette chaîne quand le débit augmente.

Nous avons simulé la liaison de transmission optique pour 10000 points, avec une fibre optique de longueur 50 Km, et une fréquence optique associée à la fibre qui vaut 0.19Ghz.

Les résultats de simulation sont représentés dans le tableau ci-dessous.

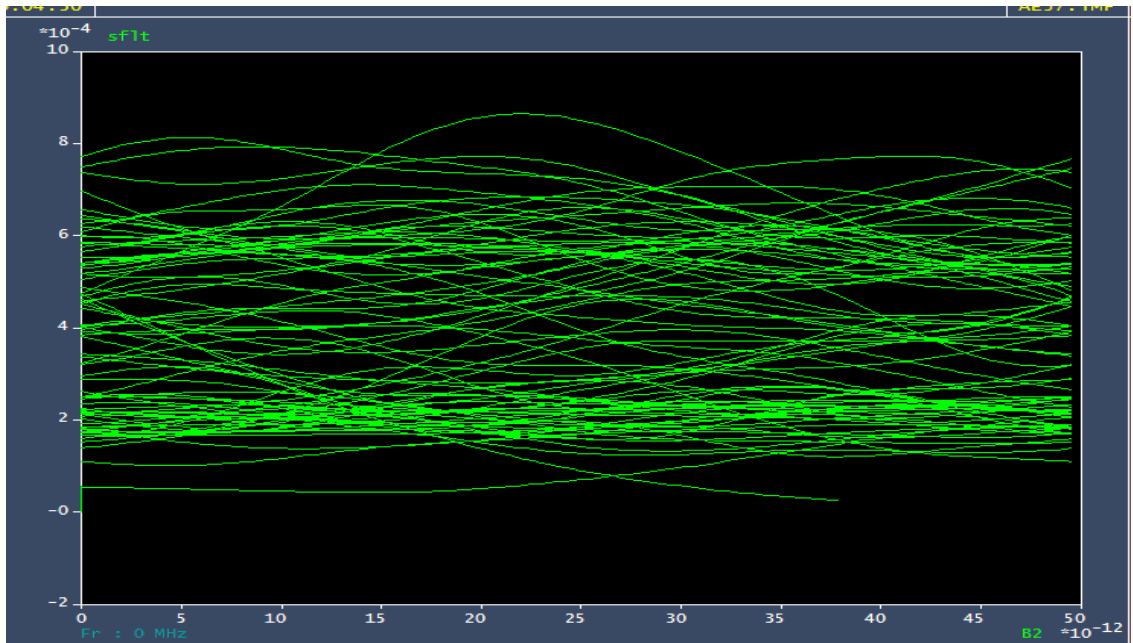
	bloc d'entrée	Le bloc de sortie
La reponse temporelle		
La densité spectrale de puissance		
La puissance		

**Tableau 3.4** : Les résultats de simulation d'une liaison à 40 Gbits/s sans fibre DCF

D'après les résultats de cette simulation on a remarqué qu'il n'y a pas de grande différence entre le signal d'entrée et celui de la sortie mais suivant le diagramme de l'œil ci-dessous, la qualité du signal est faible.

Pour remédier les anomalies précédentes, le recours à la correction de la qualité de la chaine de transmission est indispensable. Cette opération va être effectuée dans l'étape suivante :

### Digramme de l'œil



**Figure3.31** : Diagramme de l'œil

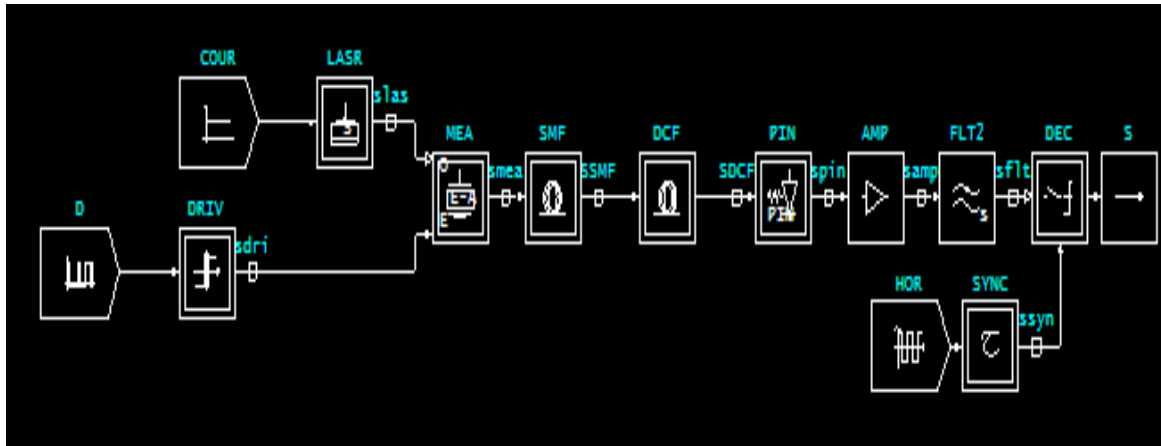
Ce diagramme de l'œil explique l'impossibilité d'avoir une réception correcte, avec un facteur de qualité égal  $Q=2.03$ , et un taux d'erreur binaire de  $10^{-01}$ .

### 3.3.3 Correction de la qualité de la chaine de transmission

Pour compenser la dispersion chromatique et annuler les déformations des signaux qu'elle induit, il faut associer fibre compensatrice DCF.

Dans cette simulation on a ajouté une fibre de compensation pour remédier au problème de la qualité du signal en transmission.

La figure ci-dessous représente synoptique d'une chaîne de transmission optique avec une fibre compensatrice.



**Figure3.32 :** Synoptique d'une chaîne de transmission optique avec une fibre compensatrice.

Les caractéristiques de la fibre de compensation sont représenté dans le tableau suivant :

Paramètres système de la fibre compensatrice (DCF)	
Longueur (km)	10
Atténuation (dB/km)	0.6
Dispersion chromatique (ps/nm/km)	-85
Effet Kerr	Oui
Effet Raman	Non
Coefficient de non linéarité (m <sup>2</sup> /W)	$7.10^{-20}$
Aire effective de la section (μm <sup>2</sup> )	30
Dispersion Modale de Polarisation	Non
Retard (ns)	$4.10^{-3}$

**Tableau3.5 :** Paramètres caractéristiques de la fibre de compensation

### 3.3.3.1 L'influence de la longueur de la fibre de compensation sur la qualité du signal pour une liaison à 40Gbit/s

Nous avons fixé la longueur de la fibre optique (SMF) à 50 Km et on a varié la longueur de la fibre compensatrice (DCF) suivant le tableau des données ci-dessous.

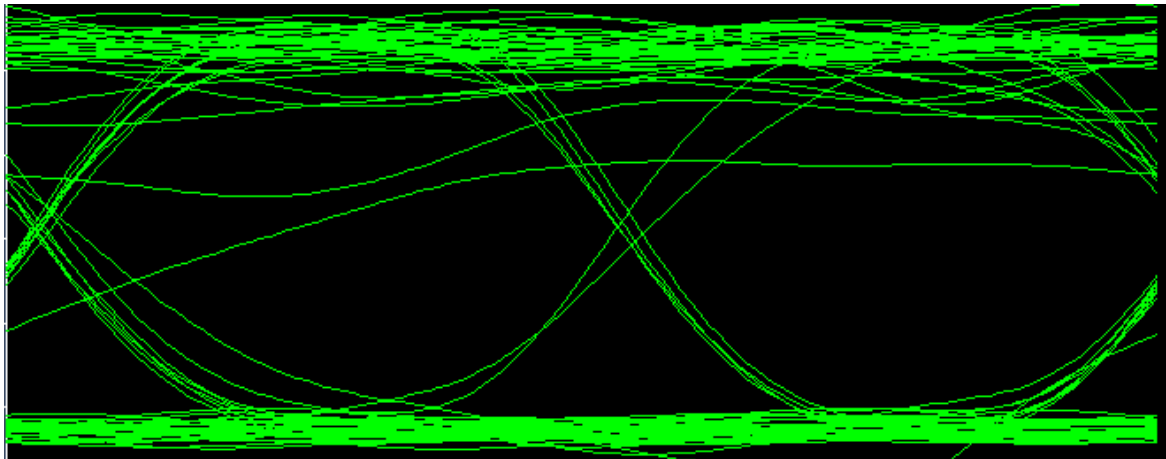
SMF(Km)	50	50	50	50	50	50
DCF(Km)	1	5	10	15	20	25
D (Ps/nm)	-850	-170	-85	-56	-42	-34
Q	8.88	9.24	9.30	8.13	7.29	6.01
TEB	$10^{-18}$	$10^{-19}$	$10^{-20}$	$10^{-15}$	$10^{-12}$	$10^{-9}$

**Tableau 3.6 :** Données longueur fibres SMF et DCF

A chaque variation de la longueur de la fibre DCF on a pu calculer le facteur de qualité ainsi que le TEB.

D'après le tableau sus cité on peut dire que la qualité de la transmission est meilleur (Q=9.3) pour une longueur de 10 km de la fibre DCF avec un taux d'erreur  $10^{-20}$  (figure 3.33).

La figure ci-dessous nous montre cette qualité de signal reçu à la sortie de la chaîne de transmission.

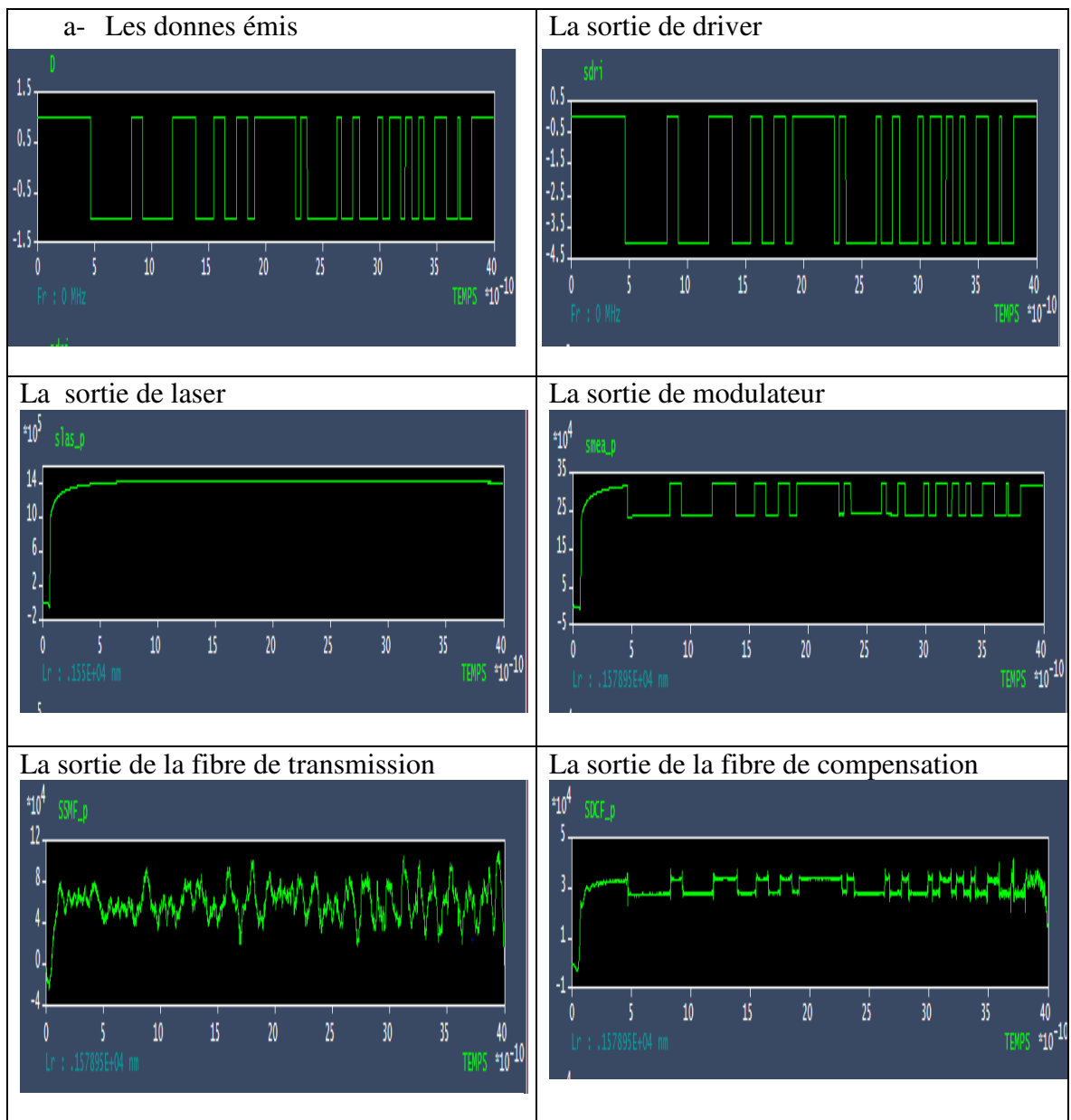


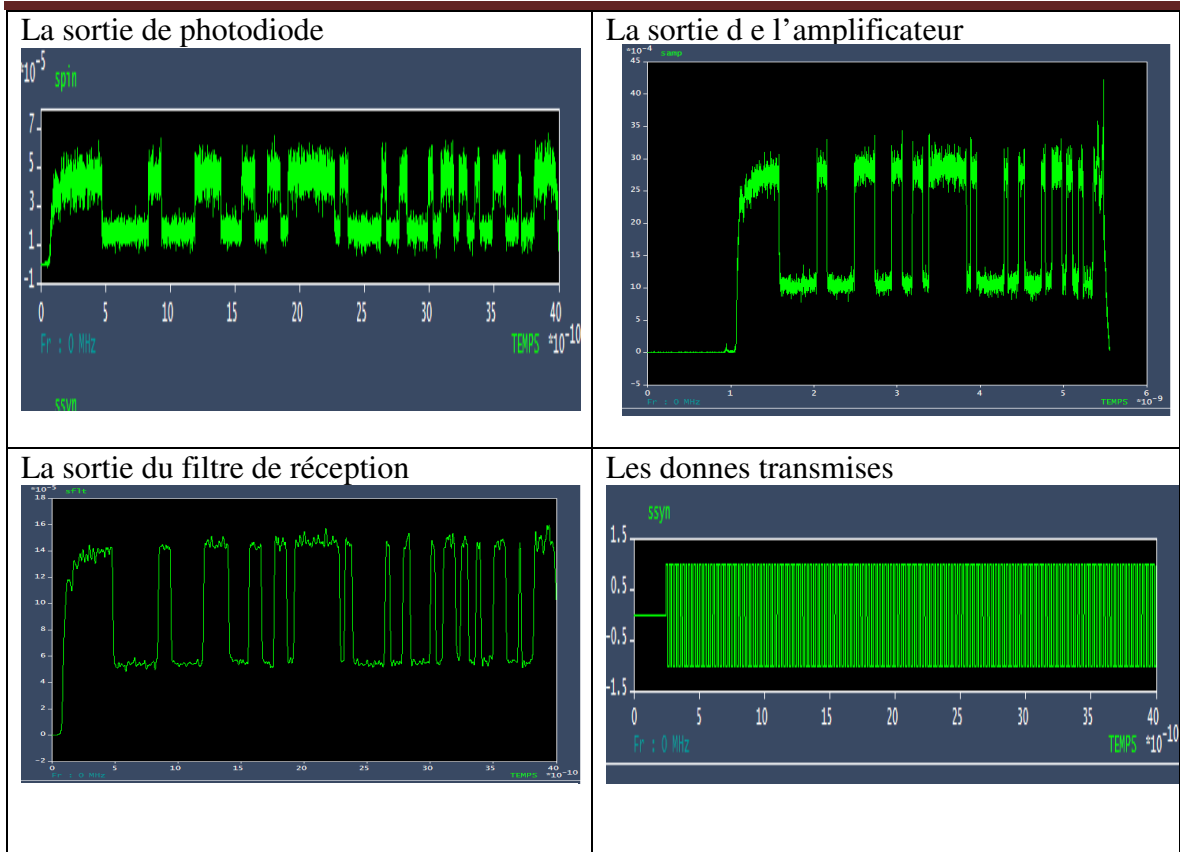
**Figure.3.33:**Diagramme de l'œil

### 3.3.3.2 La réponse temporelle

Dans ce qui suit on va présenter les résultats de simulation temporelle pour une chaîne de transmission avec une fibre de compensation.

Nous avons simulé la liaison de transmission optique par 10000 points de calcul, avec une longueur fixée à 50 Km de la fibre SMF et celle de la DCF à 10 km, avec un pas de calcul de  $0.5 \times 10^{-6}$ .





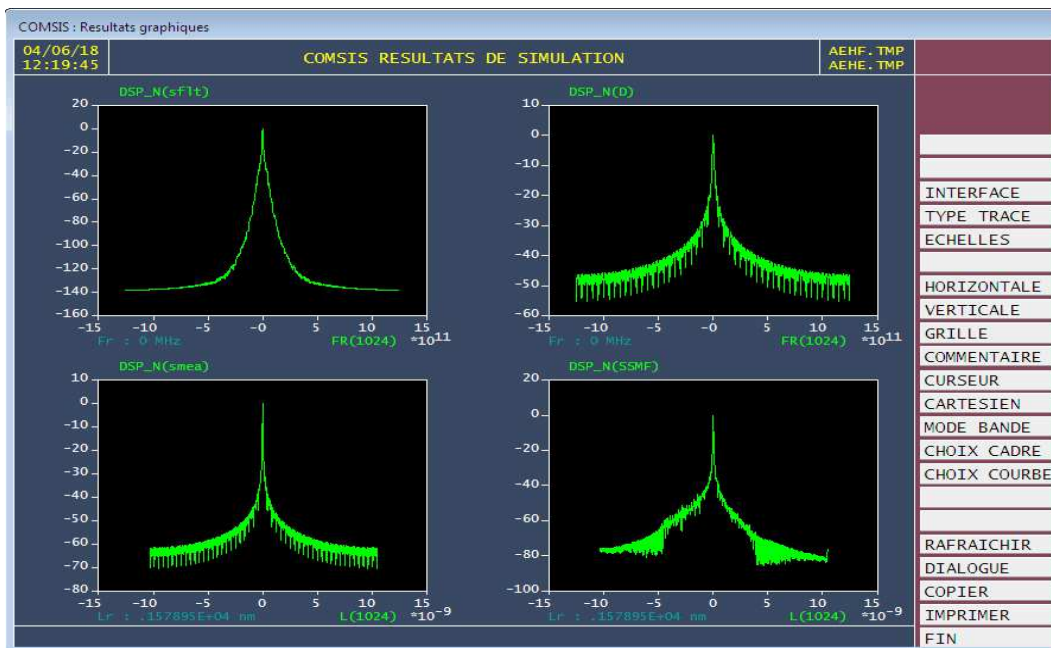
**Tableau 3.7 :** Les résultats de simulation d'une liaison à 40 Gbits/s avec fibre DCF.

Le tableau ci-dessus porte différents figures, chacune est l'allure du signal temporel à la sortie de chaque bloc de la chaîne de transmission.

### 3.3.3.3 Densité spectrale de puissance

Dans ce qui suit on va présenter les résultats de simulation de densité spectrale de puissance pour les données (D), modulateur (MEA), fibre (SMF) et le filtre (flt).

## Densité spectrale de puissance



**Figure 3.34 :** Densité spectrale de puissance d'une liaison à 40 Gbits/s.

La figure ci-dessus nous montre la variation de la DSP au cours des composants de la chaîne de transmission.

### 3.4 Conclusion

Dans cette partie nous avons pu simuler trois différentes chaînes de transmission optique, chacune est une amélioration de la précédente.

On a commencé par une simple chaîne de référence en passant par une simulation de différents débits de l'ordre de Méga b/s et avec une longueur de fibre qui atteignent les 100Km.

Le deuxième cas de simulation est porté sur l'élévation de débit toutes en étudiant les caractéristiques des composants utilisés, afin de rapprocher le plus possible de la conception de notre chaîne de 40 Gb/s. Nous avons aboutis à des résultats, mais avec un facteur de qualité assez faible, ce qui représente une anomalie majeure de cette partie de simulation. Cette particularité a été surmontée par des modifications sur la chaîne de transmission comme nous avons vu dans la troisième partie de simulation où on a pu atteindre le débit désiré de 40 Gb/s et avec un facteur de qualité assez important.



### Conclusion générale

Malgré le développement des télécommunications, son importance et sa rapidité. Cela n'a toute fois pas fonctionné, car les structures du système connaissent de véritables bouleversements. C'est de ce point de vue est basé notre mémoire en décrivant brièvement la fibre optique et les caractéristiques d'une chaîne de transmission optique. Il complète la plupart des composants dans ces liaisons à fibres optiques et les descriptions de base qui doivent être abordées afin de comprendre de concevoir un système de transmission.

La création de nouveaux systèmes plus efficaces est un problème complexe, car le nombre de paramètres qui affectent la performance du lien est importante. De plus, les outils de simulation utilisent de plus en plus leurs avantages pour gagner du temps et de l'argent en évitant des expériences répétées sur les démonstrateurs de systèmes.

Dans notre projet, nous sommes appuyés sur le logiciel COMSIS, pour faciliter la connaissance et le contrôle de cette simulation.

Le but principal de ce mémoire était de simuler un système de transmission par fibre optique à haute débit qui peut atteindre 40 Gbit/s en utilisant un logiciel de simulation comme COMSIS ainsi on s'est focalisé en particulier sur l'étude de l'atténuation et de la dispersion chromatique dans les fibres optiques. Dans cette simulation on a modifié les longueurs de la fibre et les paramètres des composants nécessaires à la simulation système, tout en essayant de maintenir les performances globales de la liaison.

Les résultats obtenus valident notre étude qui s'articule sur le choix et l'emplacement des composants utilisés pour développer cette liaison. En ce basant sur l'effet des différentes composantes qui constituent le système grâce à leurs paramètres fonctionnels, tel que le diagramme de l'œil, le taux d'erreur, et le facteur de qualité.

Les résultats encourageants obtenus à l'issue de cette étude poussent d'autre à envisager d'augmenter le débit. Sachant que tous les composants utilisés dans le système présenté dans ce mémoire sont compatibles avec un débit pouvant atteindre 40 Gb/s.

### Bibliographier

- [1] « Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples », article présenté par E. Cassan, (IEF, Université Paris-Sud Orsay), juin 2003.
- [2] Réalisation de TPE :la fibre optique, 2011-2012 sites.google.com/site/lafribreoptique/i--la-transmission.
- [3] « Non-linéarité » ,wikipedia.
- [4]<http://jflemen.iutlan.univ-rennes1.fr/NTPF2/SERIE2/fibrath.htm>,
- [5] « FIBRES OPTIQUES »article présenté par B. AMANA et J.-L. LEMAIRE, [www.u-cergy.fr](http://www.u-cergy.fr).
- [6] « Mesure de la dispersion chromatique dans des fibres à cristaux photoniques », Rapport de stage présenté par : Welschinger Jean-Emrik.
- [7]« Contrôle de la dispersion chromatique dans les fibres optiques à cristaux photoniques à Profil d'indice non standard »,mémoire présenté par Ahmed Ouadgui, Université Abd El Malek Assaadi , 2010.
- [8][http://www.wigm.univmlv.fr/~dr/XPOSE2007/rlefievr\\_Fibre\\_Optique\\_et\\_WDM/liens.hm](http://www.wigm.univmlv.fr/~dr/XPOSE2007/rlefievr_Fibre_Optique_et_WDM/liens.hm)
- [9] « Effet Kerr »,B, TP :Master 1 Physique » realisee par AMANA, Ch. RICHTER et O. HECKMANN , Université de Cergy-Pontoise, Effet Kerr [www.u-cergy.fr](http://www.u-cergy.fr).
- [10] « RAMAN EFFET », article présentée par Michel DELHAYE, *Encyclopædia Universalis*, 19 juin 2018. URL: <http://www.universalis.fr/encyclopedie/effet-raman>.
- [11] « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », Thèse présentée par Jean-Louis verneuil, Université de Limoges, Novembre 2003.
- [12] « L'amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux de télécommunications », Mémoire présentée par A.Belkhira et S .Mokrani, , Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, juin 2010.
- [13] « Etude d'une liaison de transmission par fibre optique et simulation d'un résonateur optique en anneau », mémoire présentée par kafe djogoo kungwa ,2016.
- [14] « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique: vers une compensation électronique de la PMD », Thèse Présentée par Nassima BOUDRIOUA, l'Université Paul Verlaine – Metz, Octobre 2007.
- [15] « Communication par fibre optique: des Romains à nos jours », article présentée par Camille-Sophie Brès, école polytechnique federal de lausanne.
- [16] [www.wikibooks.org/fr/wiki/Électronique/Les\\_filtres\\_électriques](http://www.wikibooks.org/fr/wiki/Électronique/Les_filtres_électriques).

## Bibliographie

---

[17] « La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable », Thèse présentée par BENAMEUR Sarah, Université de Limoges, 2015.

[18] « Câbles sous-marins de télécommunication à fibre optique » article présentée par Olivier Gautheron, 2011.

[19] « Etude des formats de modulation et des méthodes de détection pour les transmissions multiplexées en longueurs d'ondes sur fibre optique au débit de 40Gb/s et 100Gb/s », Thèse présentée par Gabriel Charlet. Université Paris Sud - Paris XI, 2011.