

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حنبل بليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

DJAHLAT Rachid

&

GUERDOUF Moussa

pour l'obtention du diplôme Master en Électronique option Réseaux et Télécommunication

---

Thème

---

# Etude et simulation d'une liaison par fibre optique à haut débit

---

Proposé par : Mr. NACER Saïd

Année Universitaire 2011-2012

## Remerciements

---

*Nous adressons nos sincères sentiments de gratitude à notre promoteur **M.NASSER** qui a fait plus que son devoir pour hausser notre niveau intellectuel et son aide et soutien moral.*

*Nous tenons à le remercier vivement pour sa gratitude et sa patience avec notre profond respect, merci infiniment notre professeur.*

*Nous remercions les membres de jury qui ont accepté d'examiner ce travail.*

*Nous adressons aussi nos remerciements à tous ceux qui ont contribué à notre formation de près ou de loin, depuis les premières lettres d'alphabet.*

---

## خلاصة

هذا العمل يركز على دراسة أنظمة النقل الرقمية البصرية ذات التدفق السريع والمسافة الطويلة. هذه الأنظمة تدعو إلى تكنولوجيا غالبا ما تكون معقدة جدا و غالية الثمن, أين المحاكاة تمثل أداة مساعدة مهمة جدا في هذه الأنظمة.

في هذه الدراسة المحاكاة تم تأديتها بمساعدة برنامج COMSIS و قد تم دراسة تأثير مختلف المعالم (التدفق, الاطوال) على فعالية هذا النظام.

**كلمات المفاتيح:** النقل بالألياف الضوئية , التدفق السريع, COMSIS

---

## Résumé

Ce travail porte sur l'étude des systèmes de transmission numériques optiques à haut débit et longue distance. Ces systèmes font appel à une technologie souvent très complexe, pointue et très chère, d'où la simulation constitue un outil d'aide à la conception très important.

Dans cette étude, la simulation a été faite à l'aide du logiciel COMSIS et l'impact de différents paramètres (débits, longueurs) sur les performances de ce système a été étudié.

**MOTS CLES :** Transmission par fibre optique, Haut débit, COMSIS.

---

## Summary

This work concerns the study of systems of digital, optical high-speed and long distance transmission. These systems appeal to a very complex, sharp and very expensive technology, from where, the simulation establishes a very important help tool to the conception.

In this study, the simulation was done with the help of the software COMSIS and the impact of the different parameters (flow, length) on the performances of this system was studied.

**KEYWORDS:** Transmission by optical fiber, broad band (debit), COMSIS

# Sommaire

<b>Introduction génération.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Description des composants de la liaison optique</b>	
1.1 Structure d'une chaîne de transmission par fibre optique.....	3
1.2. La fibre optique.....	5
1.2.1 Présentation générale des fibres.....	5
1.2.2 La réflexion totale interne.....	5
1.2.3 Le guidage de signal optique dans une fibre.....	6
1.2.4 Les différents types de fibre optique.....	8
a) La fibre monomode.....	8
b) La fibre multimode.....	9
1.2.5 Caractérisation de la fibre.....	11
a) Atténuation.....	11
c) Dispersion.....	12
d) Bande passante.....	13
1.2.6 Fibre en télécom.....	14
a) Comparaison entre différente fibre optique.....	14
b) Les applications de la fibre optique.....	14
c) Avantages et inconvénient de fibre optique.....	14
1.3 Module d'émission.....	16
1.3.1 catégories d'émetteurs.....	16
a) les diodes électroluminescentes LED.....	16
b) Les diodes LASER (DL).....	19

e) Les différentes sources lasers utilisées pour les transmissions hautes débit.....	24
1.4 Module de réception.....	25
1.4.1. Le Photodétecteur.....	26
a) Principe d'un photodétecteur... ..	26
b) Caractéristiques d'un photodétecteur.....	27
c) Catégories de photodiode PIN, APD.....	31

## **Chapitre II : Caractéristiques de la liaison**

2.1. Technique de modulation .....	35
2.1.1. Définition de la modulation optique .....	35
a) La modulation directe.....	35
b) la modulation externe.....	36
2.2. Les techniques de transmission.....	40
2.2.1. Le multiplexage temporel (TDM).....	40
a) Le multiplexage temporel optique (OTDM).....	40
b) Le multiplexage temporel électronique (ETDM).....	41
2.3. Le multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	42
2.3.1. Principe.....	42
2.3.2 Description.....	43
a) DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).....	43
b) U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing).....	44
2.2.3 Application.....	44
2.4. Le multiplexage en longueur d'onde combiné au multiplexage temporel.....	45
2.5. L'accès multiple à répartition de code (CDMA).....	45
2.6. Les amplificateurs Optiques.....	45
2.6.1. Amplificateur Optique à semi-conducteur (AOSC).....	46
2.6.2 Amplificateur Optique Dopé à Erbium (EDFA).....	46
2.6.3. Comparaison des amplificateurs optiques.....	48
2.7. Utilisation de l'amplificateur optique.....	49

2.8.. Les Isolateurs.....	49
2.9. Les Coupleur optique (OXC).....	50
2.10. Les Filtres optiques.....	50
2.11. Critère de qualité .....	50
2.11.1 Le facteur Q.....	50
2.11.2. Diagramme de l'œil de la liaison optique point à point .....	51
2.11.3. Rapport signal sur bruit .....	52
2.11.4. probabilité d'erreur (TEB).....	52
	55

### **Chapitre III : Simulation et résultats obtenus**

3.1. Présentation générale.....	54
3.2. Schéma de liaison par fibre optique à haut débit.....	58
3.3. La partie d'émission.....	58
3.3.1. Les données électriques et le driver de modulateur.....	58
3.3.2. Le Laser.....	60
3.3.3. Le modulateur externe.....	61
3.4. La partie réception.....	62
3.4.1. La photodiode.....	62
3.4.2. L'amplificateur électrique.....	63
3.4.3. Le filtre.....	64
3.4.4. Le régénérateur.....	64
3.5. La partie transmission .....	65
3.5.1. La fibre optique.....	65
3.5.2. La fibre optique compensatrice.....	66
3.6. Résultats de la simulation .....	67
3.7. Influence du débit sur les caractéristiques de la liaison.....	75
a) Une liaison de 10Gbits/s.....	75
b) Une liaison de 20Gbits/s.....	76
c) Une liaison de 30Gbits/s.....	76
d) Une liaison de 40Gbits/s.....	77

3.7.2. Influence de la longueur de la fibre sur les caractéristiques de la liaison..... 78

- a) Une liaison de 10km..... 78
- b) Une liaison de 50km..... 78
- c) Une liaison de 80km..... 79
- d) Une liaison de 100km ..... 79

**Conclusion général**..... 81

Bibliographie.....

# Introduction générale

---

Les premières expériences de transmission optique datent de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle avec la modulation de l'intensité de la lumière par un signal acoustique. Faute de savoir guider efficacement la lumière jusqu'au destinataire, ces moyens ne sont pas développés pour la transmission, mais donnent naissance à l'enregistrement optique du son.

Utilisant le principe connu depuis longtemps des fontaines lumineuses, les fibres optiques, minces cheveux de verre très transparents, ont fait l'objet d'applications décoratives, puis plus utilitaires (éclairage et endoscopie où l'atténuation n'est pas un paramètre critique). Partie en 1960 de 1000dB/Km, l'atténuation est descendue à 20 dB/Km en 1975, puis 0,2dB/Km en 1984. Actuellement on sait fabriquer des fibres ayant une atténuation inférieure à 0,2 dB/Km.

L'apparition du laser depuis 1960 a permis d'envisager la transmission d'informations à distance, sur le principe des faisceaux hertziens, à des fréquences beaucoup plus élevées (de l'ordre de  $10^{14}$  Hz). Déjà envisagées par les théoriciens, les transmissions sur fibres optiques deviennent un objectif réaliste à partir de 1966 lorsque furent fabriquées les premières fibres de silice.

Le développement spectaculaire dans le domaine des télécommunications a été rendu possible grâce à la maîtrise des diodes lasers à semi-conducteur, qui allient les performances des lasers à la facilité d'emploi des composants électroniques, et grâce aux progrès dans la technologie de fabrication des fibres optiques, permettant une très faible atténuation et une résistance mécanique suffisante.

La seconde génération de système de transmission sur fibre optique, apparue dans les années 1980, découle directement de la mise au point de la fibre monomode et du laser à

semi-conducteur à  $1.3\mu\text{m}$ , longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est minimale.

Des débits supérieurs à 1Gbits/s avec un espacement entre répéteurs de plusieurs dizaines de kilomètres, sont alors atteints. Les portées de ces systèmes sont limitées par les pertes de fibre 0,5dB/Km dans le meilleur cas, et l'idée apparaît alors de développer des sources émettant à la longueur d'onde de  $1,55\mu\text{m}$  pour laquelle l'atténuation est minimale en utilisant des fibres à dispersion décalée avec un débit supérieur à 2Gbits/s.

Dans tous les pays, on considère aujourd'hui que les futurs réseaux d'interconnexion seront optiques, utilisant des systèmes capables de transmettre des débits de plusieurs Gbits/s (actuellement des Tbits/s), car dans le domaine des liaisons internationales, les câbles sous-marins en fibre optique, dont le premier TAT8, a été posé en 1989, ont permis d'augmenter la capacité, mais aussi l'espacement entre répéteurs.

L'amplification optique à fibre dopée, annoncée en 1987 constitue aujourd'hui un dispositif clé des futurs systèmes optiques. Aisément insérable en ligne, il sera possible d'accroître la capacité de transmission sans changer la configuration physique du réseau de transport. Les futures générations de câbles sous-marins qui franchiront les 6500 Km de l'atlantique ne comporteront plus aucun répéteur-régénérateur, mais seulement des amplificateurs optiques à intervalles réguliers de 100 km. De plus ils permettent de compenser les pertes introduites par les coupleurs, les commutateurs etc, et de distribuer le signal à un grand nombre d'utilisateurs, car la bande passante est énorme, ce qui permet d'envisager l'amplification simultanée de plusieurs porteuses optiques juxtaposées dans le spectre, constituant ce que l'on appelle un multiplex.

Ce travail, repartit en trois chapitres, consistera à décrire les différents éléments intervenant dans un système de transmission optique à haut débit.

Les deux premiers chapitres consacrés à l'étude théorique auront pour objectif, dans un premier temps, de faire une étude sur les composants optoélectroniques de la ligne, dans cette partie ce sont les sources optiques, la fibre optique, les photodétecteurs qui feront l'objet d'une étude attentive. . Juste après cette première phase une étude sera consacrée aux caractéristiques principales d'une liaison optique telles que les techniques de

multiplexages, les différents amplificateurs optiques, les isolateurs, les coupleurs, les filtres et les critères de qualité.

Le dernier chapitre, plutôt pratique, sera entièrement dédié à une série de simulations qui seront réalisées, dans notre cas, à l'aide du logiciel COMSIS (**COM**munication**S**ystem **I**nteractive **S**oftware).

# Chapitre 1 Description des composants de la liaison optique

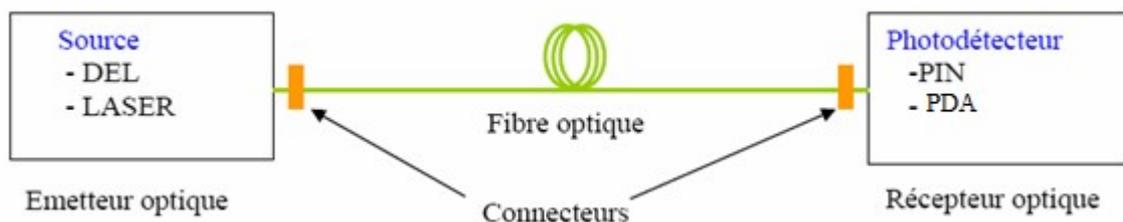
---

## 1.1. Structure d'une chaîne de transmission par fibre optique

Les progrès récents de la technologie des lasers semi-conducteurs et des fibres optiques à faible atténuation rendent possible la réalisation de systèmes de télécommunication utilisant comme canal de transmission une fibre optique. De tels systèmes sont déjà opérationnels. Il importe de connaître leur structure générale. [1]

Dans sa forme la plus simple, un système de communication par fibre optique est constitué de trois éléments (*Fig.1.1*) :

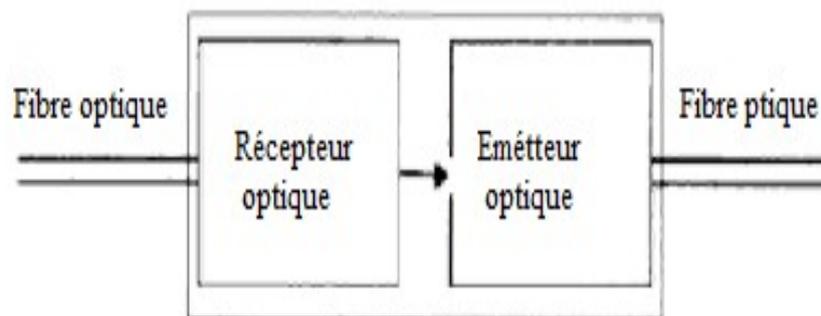
- Un module d'émission dont la fonction est de transformer l'information sous forme de signal électrique en information sous forme de lumière. C'est l'émetteur optique.
- Un canal de transmission de la lumière qui est la fibre optique.
- Un module de réception dont la fonction est de transformer l'information optique reçue en information sous forme de signal électrique. C'est le récepteur optique.



*Fig. 1.1* système de communication à fibre optique.

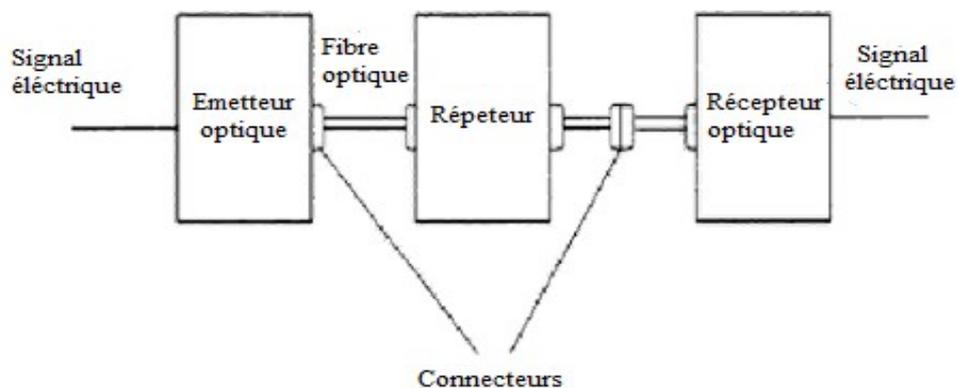
Les transmissions à très longues distances peuvent nécessiter l'utilisation d'un ou plusieurs répéteurs ayant pour fonction d'amplifier le signal optique. Un répéteur est constitué d'un récepteur optique suivi d'un émetteur optique (*Fig.1.2*). [1]

L'émetteur optique contient la source de lumière qui peut être une diode électroluminescente ou une diode laser.



*Fig. 1.2* répéteur optique

- Le récepteur optique contient le détecteur optique qui peut être une photodiode PIN ou PDA (Photodiode à Avalanche).
- L'émetteur et le récepteur optique sont dotés de connecteurs permettant de coupler la source et le récepteur de lumière à la fibre.
- Le canal de transmission peut contenir des connecteurs permettant de coupler deux fibres entre elles (figure 1.3)

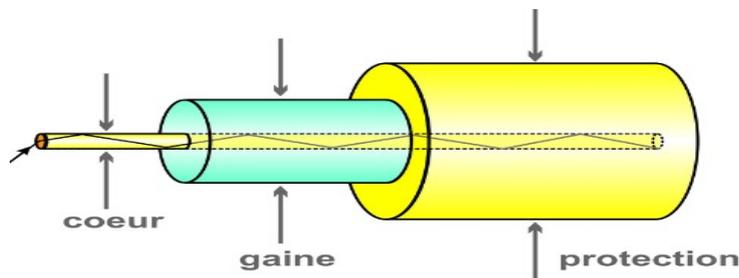


*Fig. 1.3* système générale de communication à fibre optique avec connecteurs.

## 1.2. La fibre optique

Dans ce chapitre, nous allons montrer que l'étude de la propagation peut se faire de façon très simplifiée, mais correcte, et cela grâce aux lois classiques de l'optique géométrique, qui consiste à suivre l'évolution des rayons lumineux dans la fibre optique et à calculer les trajectoires des rayons. [1]

### 1.2.1. Présentation générale des fibres



*Fig.1.4.* structure d'une fibre optique

La fibre optique est un fil transparent très fin qui guide la lumière, entourée d'une gaine protectrice, elle est utilisée pour conduire la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voir milliers de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'information. La fibre trouve son utilisation principale dans les réseaux de transmission pour les télécommunications; C'est un guide d'ondes électromagnétiques. La fibre optique est constituée d'une partie centrale appelée cœur, ayant un indice de réfraction légèrement supérieur à celui de la gaine entourant le cœur. L'ensemble cœur-gaine étant couvert d'une couche protectrice.

### 1.2.2. La réflexion totale interne

Le principe de la réflexion totale interne est à la base de la propagation des ondes lumineuses dans la fibre optique. D'après ce principe, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est plus faible, il peut être réfléchi. De plus, lorsque l'angle d'incidence du rayon lumineux est plus grand que l'angle critique, la lumière est réfléchie en totalité et il n'y a aucune perte de lumière (*Fig.1.5*). [2]

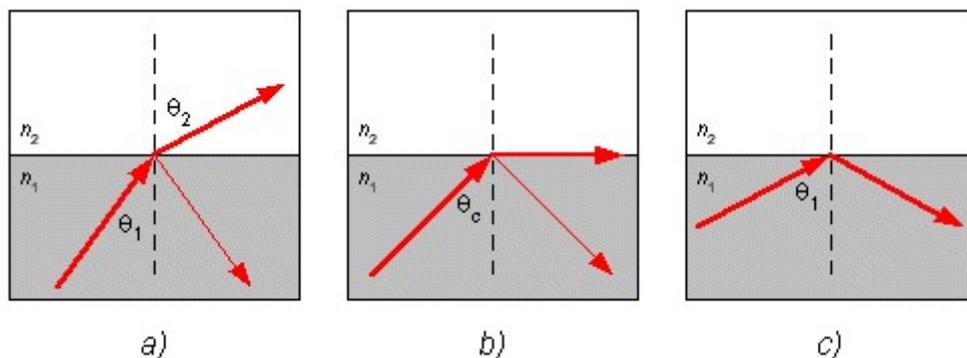
La réflexion totale interne est régie par deux facteurs : les indices de réfraction des deux milieux et l'angle critique  $\theta_c$ . Ces facteurs sont reliés par l'équation suivante :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.1)$$

$n_1$ : L'indice de réfraction du cœur.

$n_2$ : L'indice de réfraction de la gaine.

En connaissant les indices de réfraction des deux matériaux de l'interface, l'angle critique peut facilement être calculé.

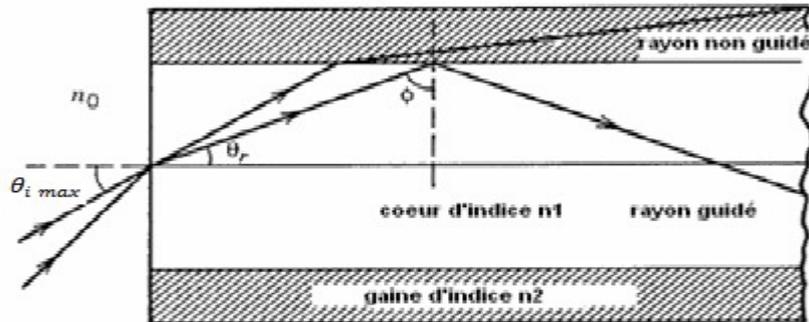


**Fig.1.5** a) Réfraction d'un rayon lumineux pour  $\theta_1 < \theta_c$ , le rayon incident est aussi partiellement réfléchi dans le premier milieu ; b) rayon critique lorsque  $\theta_1 = \theta_c$ , et c) réflexion totale interne pour  $\theta_1 > \theta_c$ .

### 1.2.3. Le guidage de signal optique dans une fibre [3]

Une fibre optique est un cylindre de matériau diélectrique transparent dans l'indice de réfraction  $n_1$  est supérieure à celui du milieu environnant. Comme le phénomène de réflexion totale interne se produit à l'interface de la fibre et du milieu extérieur. Cette surface doit être bien définie exempte de défauts. La lumière se propageant dans la fibre remplit les conditions de la réflexion totale, c'est-à-dire arrive sur l'interface avec un angle supérieur à l'angle critique  $\theta_c$ . S'il y'a un défaut à l'interface, cette condition peut ne plus être remplie et la lumière peut être réfractée hors de la fibre et donc être perdue.

Pour éviter cet inconvénient, on entoure la fibre optique d'un autre diélectrique. Elle se présente alors sous la forme de deux cylindres concentriques le cœur ( $n_1$ ) et le gain ( $n_2$ ) de la fibre optique. C'est à l'interface *cœur-gaine* que se produiront les réflexions totales internes. Il faut donc qu'on ait toujours  $n_1 > n_2$ . La **Fig.1.6** représente la coupe longitudinale d'une telle fibre.



**Fig. 1.6.** Coupe longitudinale d'une fibre optique.

Prenons la **Fig.1.6** où un rayon incident fait un angle  $\theta_i$  avec l'axe de la fibre. En raison de l'interface *air - fibre*, le rayon se réfracte. L'angle du rayon réfracté est donné par :

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r \quad (1.2)$$

Le rayon réfracté rencontre l'interface *cœur-gaine* et est réfléchi encore une fois de plus. Cependant, la réflexion n'est possible que pour des angles d'incidence  $\theta$  vérifiant la condition :  $\sin \theta > \frac{n_2}{n_1}$ . Pour des angles supérieurs à un angle critique  $\theta_c$ , défini par :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

Le rayon subira une réflexion interne totale à l'interface *cœur-gaine*. Puisque de telles réflexions ont lieu tout au long de la fibre, tous les rayons satisfaisant la condition  $\theta > \theta_c$  restent confinés (*emprisonnés*) dans le cœur de la fibre. C'est le mécanisme de base responsable du confinement de la lumière à l'intérieur de la fibre optique, grâce aux valeurs de  $n_1$  et  $n_2$ .

A partir des *Eqs. (1.2) et (1.3)*, on peut déduire l'angle maximum que peut faire le rayon incident à l'entrée de la fibre pour rester confiné dans le cœur.

$$n_0 \sin \theta_{i \max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.4)$$

Par analogie aux lentilles (*verres*),  $n_0 \sin \theta_{i \max}$  est connu sous le nom d'*ouverture numérique* (*ON*) de la fibre. Elle représente la capacité d'une fibre à récolter (*rassembler*) de la lumière. Parce que  $n_1 \approx n_2$ , *ON* peut se mettre sous la forme :

$$ON = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad , \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.5)$$

Où  $\Delta$  est la *différence relative d'indice* à l'interface *cœur-gaine*. Plus précisément,  $\Delta$  devrait être aussi grand que possible pour permettre de coupler un maximum de lumière dans la fibre. Cependant, de telles fibres ne sont pas pratiques dans le domaine des communications optiques à cause du phénomène de *la dispersion modale*.

#### 1.2.4. Les différents types de fibre optique [4]

Suivant les dimensions du cœur et les valeurs des indices  $n_1$  et  $n_2$ , on peut classer les fibres en deux catégories :

- ✓ La fibre monomode.
- ✓ La fibre multimode.

##### a) La fibre monomode :

Le diamètre du cœur est inférieur à  $10 \mu m$  de telle sorte que le parcours de la lumière devient presque longitudinal.

Le diamètre de la gaine est compris entre  $50 \mu m$  et  $125 \mu m$ .

La fibre est monomode si le rayon du cœur (normalisé) vérifie la relation suivante :

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{2.405}{2 * \pi * ON} \quad (1.6)$$

Où :  $a$  : rayon du cœur,  $\lambda$  : longueur d'onde et *ON* : ouverture numérique.

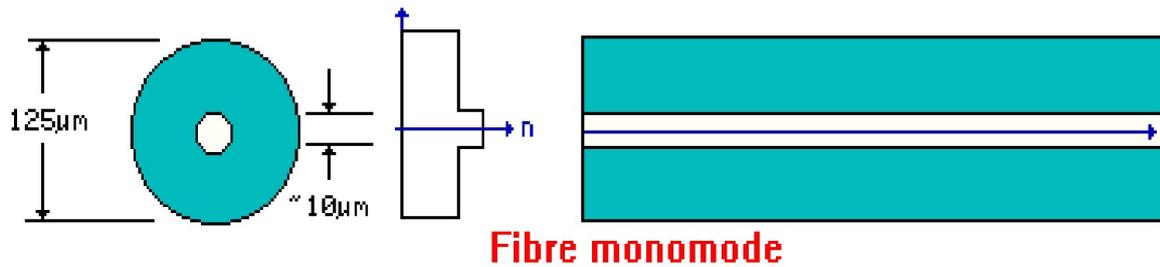


Fig. 1.7 fibre monomode

**b) La fibre multimode :**

Dans le cas où la relation (1.6) n'est pas vérifiée, la fibre est alors multimode.

Le nombre de modes ( $M_g$ ) qui se propagent dans cette fibre est proportionnel au carré de la fréquence normalisée et est donnée par la relation suivante :

$$M_g = \frac{V^2}{2} \quad (1.7)$$

Où :

$V$ : est la fréquence normalisée, donnée par  $V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \text{ON}$  (1.8)

Il est à remarquer qu'à chaque mode de propagation correspond un rayon qui possède sa propre trajectoire.

Les fibres multimodes ont un diamètre de cœur important (de 50 à 85  $\mu m$ ).

✓ Il existe deux types de fibre multimode :

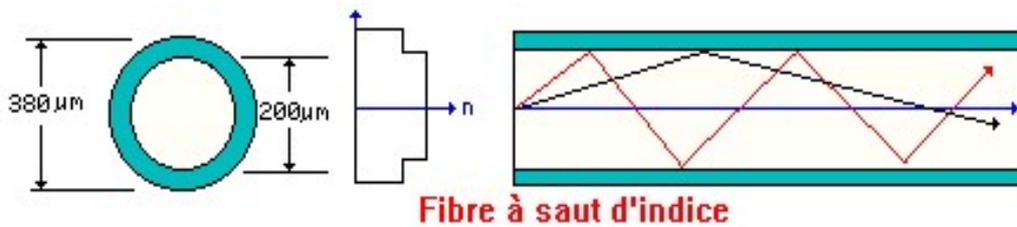
✚ La fibre multimode à saut d'indice.

✚ La Fibre multimodes à gradient d'indice

➤ **Fibre multimodes à saut d'indice :**

L'indice de réfraction constant varie brusquement (saut) quand on passe du cœur à la gaine.

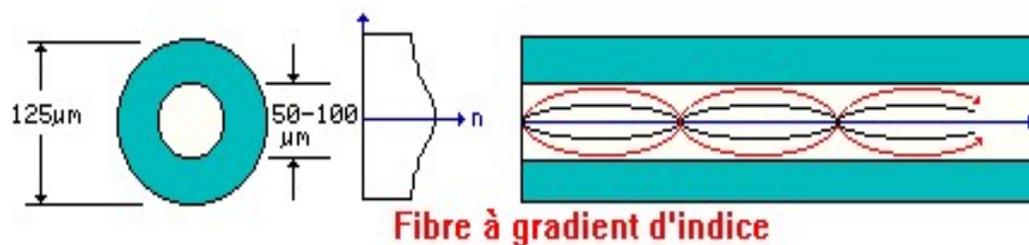
Le guidage de la lumière se fait suivant des lignes brisées



*Fig.1.8* : Fibre multimodes à saut d'indice.

➤ **Fibre multimodes à gradient d'indice :**

Le cœur possède un indice de réfraction qui décroît progressivement du centre à la périphérie suivant un profil parabolique. Le faisceau lumineux suit une trajectoire d'allure curviligne.



*Fig.1.9* Fibre multimodes à gradient d'indice

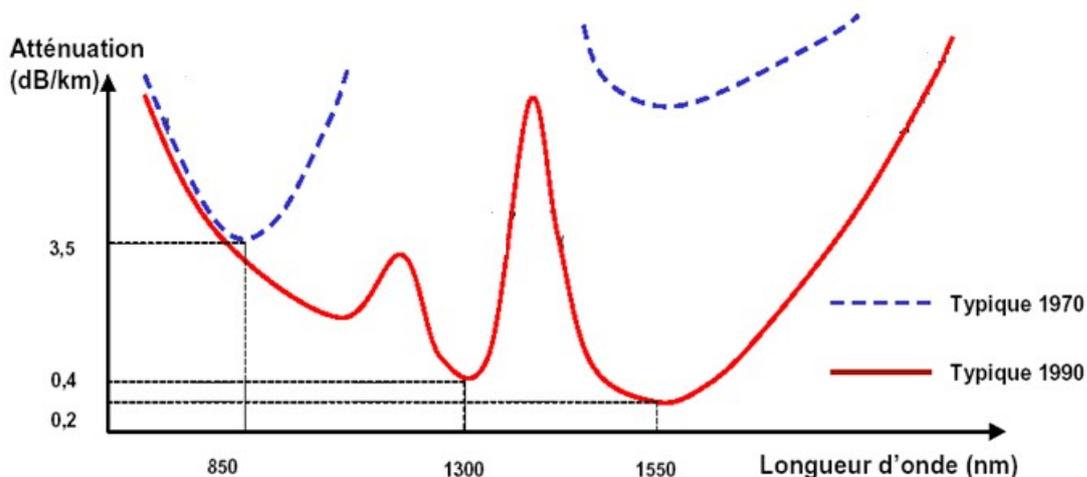
La fibre multimode présente un certain nombre d'avantages :

- ✓ La possibilité d'utiliser des sources peu directives.
- ✓ La facilité de couplage avec la source (diamètre du cœur relativement grand par rapport à celui de la monomode).
- ✓ L'utilisation des connecteurs qui ne demandent pas une grande précision de fabrication.

## 1.2.5. Caractérisation de la fibre

### a) Atténuation

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. Dans le cas de la silice pure, le minimum théorique d'atténuation devrait descendre à 0,14 dB/km vers  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ . De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les micro-courbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour la fibre standard des télécommunications dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement. La **Fig.1.10** montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications. [4]



**Fig.1.10** Atténuation spectrale d'une fibre optique [4]

- La « fenêtre à 1300 nm » qui a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,4 dB/km.
- La « fenêtre à 1550 nm » qui a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km.

## b) Dispersion

### ➤ Dispersion modale

L'élargissement de l'impulsion dû à la dispersion modale résulte de la différence des temps de propagation des différents modes qui se propagent dans une fibre multimode. La largeur maximum de l'impulsion à la sortie d'une fibre à saut d'indice dépend de la différence des temps de propagation entre le mode qui parcourt la plus grande distance et celui qui parcourt la plus petite distance.

$$\Delta t_m = \frac{n_1}{8.c} \cdot \Delta^2 \cdot L \quad (1.9)$$

L : longueur de la fibre.

c : vitesse de la lumière dans le vide.

### ➤ Dispersion chromatique : [1]

Les sources de lumière ne sont jamais monochromatiques, la lumière émise par ces sources est constituée de la somme d'onde à diverses longueurs d'ondes.

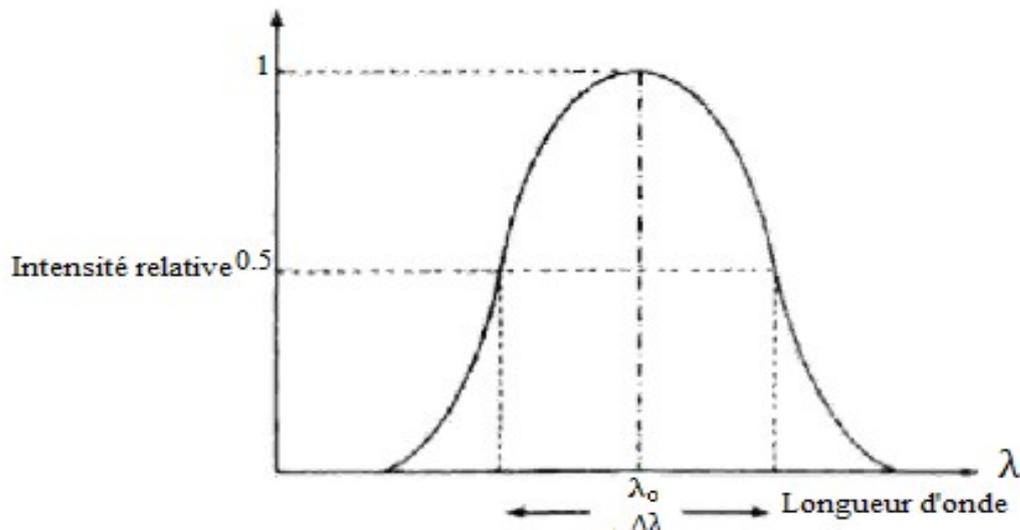
L'indice de réfraction du matériau constituant la fibre varie avec la longueur d'onde. Il en résulte une vitesse de propagation différente pour chaque longueur d'onde. Si on injecte de la lumière constituée de plusieurs longueurs d'onde suivant une direction donnée (mode spécifié), cette lumière, se propageant à différentes vitesses selon la longueur d'onde, est décomposée dans le temps. Il en résulte un délai entre les différentes longueurs d'onde en bout de fibre même si elles ont été injectées au même instant. Cette dispersion est appelée *dispersion chromatique* ou *dispersion matériau*. Une étude théorique montre que le délai est calculé au moyen de la formule suivante :

$$\Delta t_c = -\frac{\lambda_0 \Delta \lambda}{c} \left( \frac{d^2 n_1}{d \lambda^2} \right)_{\lambda_0} \cdot L \quad (1.10)$$

$\Delta \lambda$  : Largeur spectral de la source.

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

$\lambda_0$  : longueur d'onde centrale de la source.



*Fig.1.11* intensité relative en fonction de longueur d'onde

Le délai  $\Delta t_c$  dû à la dispersion chromatique dépend donc de la largeur spectrale de la source et d'une propriété du cœur de la fibre par l'intermédiaire du terme  $\left( \frac{d^2 n_1}{d \lambda^2} \right)_{\lambda_0}$ .

### c) **Bande passante** [5]

La fibre optique est un filtre passe bas, la bande passante (à -3dB) est égale à la fréquence de coupure haute et dépend de la dispersion totale. La dispersion étant proportionnelle à la longueur de la fibre, la bande passante diminuera donc avec cette longueur. [5]

$$\Delta F = \frac{0.35}{\Delta t_t} \quad (1.11)$$

$$\Delta t_t^2 = \Delta t_c^2 + \Delta t_m^2 \quad (1.12)$$

Avec  $\Delta t_c$ ,  $\Delta t_m$ : dispersion chromatique, et modale.

## 1.2.6. Fibre en télécom

### a) Comparaison entre différentes fibres optiques

Fibre multimode	Fibre monomode
<ul style="list-style-type: none"><li>✓ A été la première utilisée.</li><li>✓ Facile à utiliser mais a une bande passante limitée.</li><li>✓ Réserve aux courtes distances.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Bande passante très élevée.</li><li>✓ Composants chers.</li><li>✓ Elle est la solution universelle pour les longues distances.</li></ul>

### b) Les applications de la fibre optique

Aujourd'hui les applications des fibres optiques concernent essentiellement :

- Les télécommunications, pour la réalisation des réseaux hauts débit des opérateurs en technologie WDM, SDH, ATM.
- L'audiovisuel, pour la réalisation des réseaux câblés de télévision en association avec le câble coaxial utilisé pour le raccordement de l'abonné,
- La médecine la fibre optique est notamment utilisée en chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétine... et en endoscopie, pour éclairer l'intérieur du corps et transmettre les images jusqu'au médecin.

### c) Avantages et inconvénient de la fibre optique

#### Avantages

Les fibres optiques offrent de nombreux avantages pour les télécommunications. Nous en donnons un premier aperçu ci-dessous.

- ✓ Pertes très faibles : En fonction du type de fibre, l'atténuation du signal peut atteindre environ 0,2 dB/km pour une longueur d'onde de 1,55  $\mu\text{m}$ , et d'environ

0,35 dB/km à 1,3  $\mu\text{m}$ , ce qui correspond à une diminution de la puissance de 50% après 15 et 8,6 km respectivement.

- ✓ Bande passante très grande : Grâce aux fibres optiques, on peut transmettre des signaux digitaux à 5 Tb/s sur des distances de 1500 km.
- ✓ Absence de rayonnement vers l'extérieur : La lumière est confinée à l'intérieur de la fibre optique. Par conséquent, il n'est pas possible de détecter le signal entre l'émetteur et le récepteur. Cela est particulièrement important pour garantir la confidentialité de la communication.
- ✓ Isolation électrique : Comme les fibres optiques sont isolantes, le contact accidentel entre deux fibres ne provoque pas de court-circuit et donc pas de dégâts à l'électronique associée.
- ✓ Résistance aux températures élevées et aux produits corrosifs : Les fibres de verre résistent mieux aux produits corrosifs que le cuivre. De plus, les fibres en verre peuvent supporter des températures proches de 800°C, ce qui permet de résister au feu plus longtemps que les câbles en cuivre.
- ✓ Poids et dimensions réduites : Le poids très faible des fibres par rapport à un câble en cuivre de la même capacité leur donne un avantage économique lors de l'installation.

### Inconvénients

- ✓ La fibre optique ne permet pas le transport d'énergie.

Les répéteurs doivent être alimentés séparément, soit localement, soit par second câble électrique, soit par un câble mixte optique et électrique.

- ✓ Les techniciens des installations doivent protéger leurs yeux.

Il est indispensable de porter des verres de protection infrarouge pour travailler de près sur un dispositif en fonctionnement.

- ✓ pertes de raccordement entre différents composants optiques du système.

Parmi les pertes de raccordement on trouve :

- pertes de couplage à la source : une partie seulement de la puissance émise par le laser sera captée par la fibre à cause de la désadaptation entre eux.

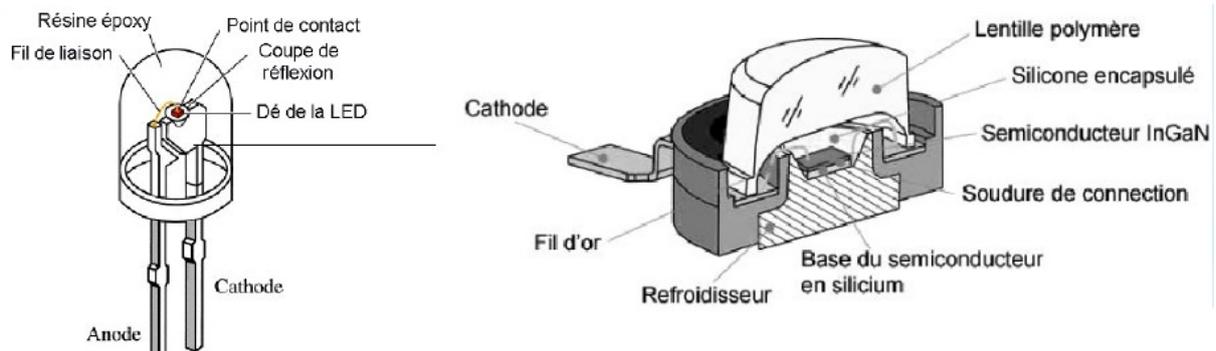
- pertes d'épissurage : elle est due à cause d'une discontinuité des rayons, une erreur d'espacement, une erreur d'excentrement, une erreur d'alignement angulaire.

### 1.3. Module d'émission

Dans une description de type « système » des liaisons par fibre optique, les diodes laser interviennent essentiellement par leurs caractéristiques statiques et par leurs caractéristiques dynamiques.

#### 1.3.1. Catégories d'émetteurs

##### a) Les diodes électroluminescentes : LED



*Fig.1.12.*LED (Diode électroluminescente)

Les diodes électroluminescentes (LED Light Emitting Diode) sont des sources semi-conductrices lumineuses de faible puissance. Elles existent depuis de nombreuses années (première LED dans le visible, à base de GaAsP commercialisée en 1962) et couvrent une large gamme spectrale. Néanmoins, il a fallu attendre les années 1990 pour réaliser des LEDs bleues. Ceci fut l'un des événements majeurs dans l'optoélectronique des dix dernières années. Ce sont les composants le plus simples, qui réalisent directement l'émission de photons par recombinaison des porteurs dans une hétérojonction polarisée en direct.

La puissance lumineuse émise est alors pratiquement proportionnelle au courant injecté, avec un rendement externe médiocre ; en particulier, seule une faible partie peut être couplée dans une fibre optique à cause de la forte divergence. Le spectre, typique de l'émission spontanée, est continu et assez large (d'où la forte sensibilité à la dispersion chromatique).[6] [7] [8]

Ce composant de performances limitées (notamment en rapidité) est cependant intéressant et très utilisé grâce à son faible coût, son bruit très bas, et son excellente fiabilité.

### ➤ **Caractéristiques des LED**

#### ❖ **Rendement quantique**

Le rendement quantique est défini comme étant le rapport entre le nombre de photon créés et le nombre d'électrons injectés. [9]

$$\eta_q = \frac{\text{Nombre de photons créés}}{\text{Nombre d'électrons injectés}} \quad \text{(I.13)}$$

#### ❖ **Longueur d'onde d'émission**

Longueur d'onde d'émission. Ce paramètre détermine la couleur du faisceau lumineux émis.

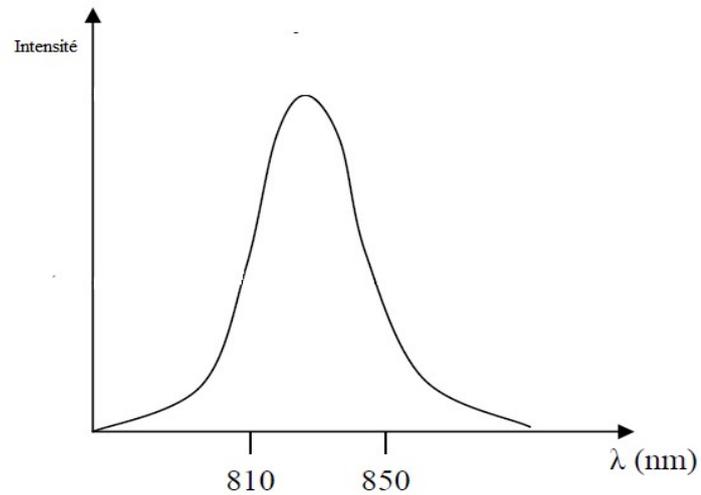
$$\lambda = \frac{1.24}{E_g} \quad \text{(I.14)}$$

$\lambda$  : Longueur d'onde, en  $\mu m$ .

$E_g$  : Intervalle de bande, en  $eV$ .

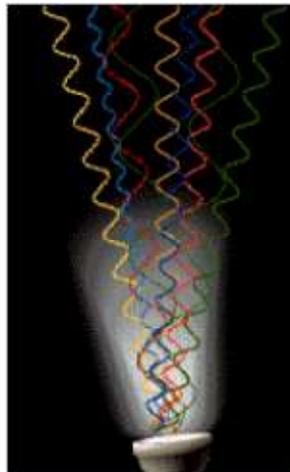
Les autres caractéristiques importantes des LED sont : [5]

- La diode LED est une source polychromatique, et incohérente.
- Le spectre d'émission est assez large (**Fig.1.13**).



**Fig.1.13.** Spectre d'émission d'une diode électroluminescente

- Les LEDS ont un diagramme de rayonnement moins directif.



**Fig.1.14** Diagramme de rayonnement d'une LED

- La caractéristique puissance-courant est assez linéaire.

➤ **Caractéristiques électronique principales d'une LED**

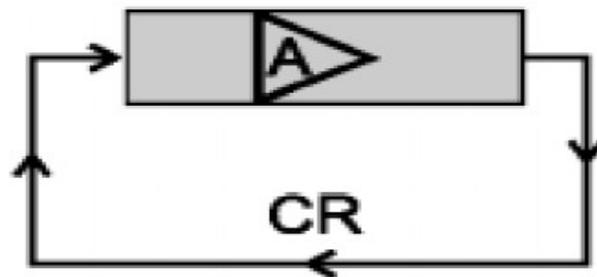
Les caractéristiques électriques le plus importantes sont :

- Le courant direct moyen qu'elle peut supporter en permanence. Il est compris entre 10 et 50 mA pour une LED à usage général.
- Le courant direct crête qu'elle peut supporter en régime impulsionnel.

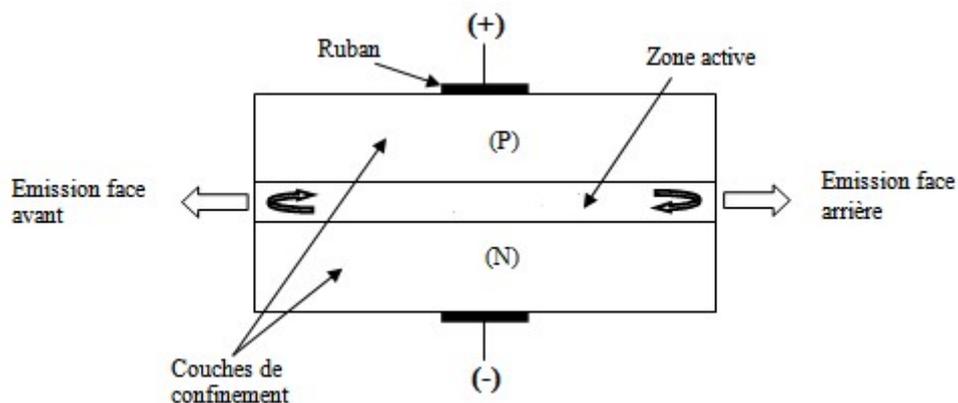
- la tension inverse maximale  $V_{Rmax}$  admissible sans dommage .Vis à vis de la tension inverse, la LED est plus fragile qu'une jonction PN et la limite courante de  $V_{Rmax}$  est de -5 volts.

### b) Les Diodes lasers (DL)

La diode Laser, encore appelée Laser a semi-conducteur, Laser a injection, Laser a jonction, Laser a hétérojonctions. Une diode laser est constituée par une jonction PN dont la partie active est une cavité électromagnétique résonnante. La plus grande partie de l'énergie est concentrée dans cette cavité et la lumière est émise parallèlement à la jonction .Une diode laser est un composant capable de produire un rayonnement par émission stimulée comme l'indique l'acronyme dont le mot est issu : "Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation" .Deux notions peuvent résumer cet effet : amplification et contre-réaction (Fig.1.15).[11] [12]



**Fig. 1.15** Un laser est un oscillateur composé d'un milieu amplificateur (A) et d'une boucle de contre-réaction (CR).



**Fig.1.16** .Diode LASER

Les trois phénomènes importants de transitions quantiques présents dans les lasers à semi-conducteurs sont : [5]

### *Emission spontanée*

Dans une DEL la lumière est émise par émission spontanée : les électrons et les trous ayant une durée de vie  $\tau_{sp}$  se recombinent dans un semi-conducteur à gap direct en émettant un photon (recombinaison radiative).

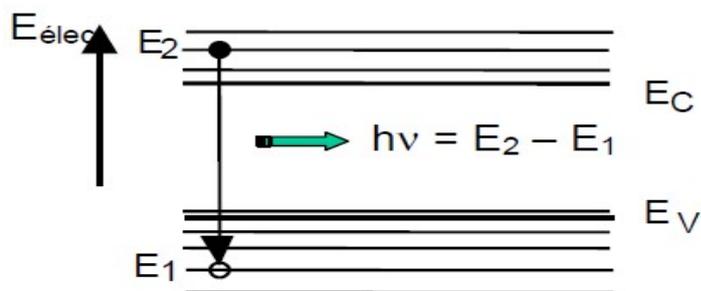
- L'électron occupe un niveau d'énergie  $E_2$  dans la bande de conduction.
- Le trou occupe un niveau d'énergie  $E_1$  dans la bande de valence.

Le photon émis à l'énergie :

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (I.15)$$

L'énergie du photon est un peu supérieure à l'énergie de bande interdite, mais pas très différente, on peut écrire en première approximation :

$$h\nu \approx E_g \quad (I.16)$$



**Fig. 1.17** Dans le cas d'un semi-conducteur, les niveaux  $E_2$  et  $E_1$  appartiennent à des continuums situés dans les bandes de conduction et de valence.

Les photons sont émis de façon aléatoire, de sorte que le rayonnement produit par un grand nombre de recombinaisons spontanées est incohérent.

## Absorption et émission stimulée

Pour simplifier, nous allons considérer un système constitué d'atomes isolés identiques de densité atomique  $N$ , chaque atome possédant entre autre, deux niveaux discrets d'énergie  $E_2$  et  $E_1$ , entre lesquels les électrons vont effectuer des transitions.

- ✓ Etat fondamental : l'électron est sur le niveau  $E_1$ ; soit  $N_1$  la densité atomique correspondante.
- ✓ Etat excité : l'électron est sur le niveau  $E_2$  ; soit  $N_2$  la densité atomique correspondante.

Lorsqu'un faisceau de lumière monochromatique, d'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$  se propage dans le milieu, les photons qui constituent ce faisceau peuvent produire deux effets totalement symétriques :

- a) Absorption : Un photon peut fournir son énergie à un électron situé sur le niveau  $E_1$ , ce qui provoque une transition  $E_1 \rightarrow E_2$ . Le photon disparaît (il est absorbé)

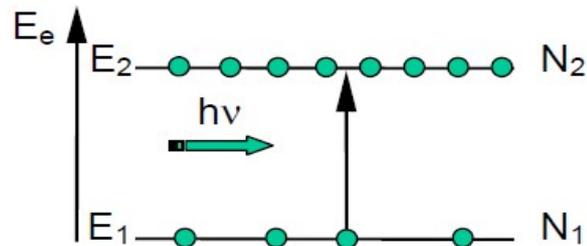


Fig. 1.18. Absorption

- b) Emission stimulée : En supposant qu'un électron soit présent sur le niveau  $E_2$ , le passage d'un photon peut déclencher une transition électronique  $E_2 \rightarrow E_1$  qui s'accompagne de l'émission d'un photon identique au photon incident (même fréquence et même phase).

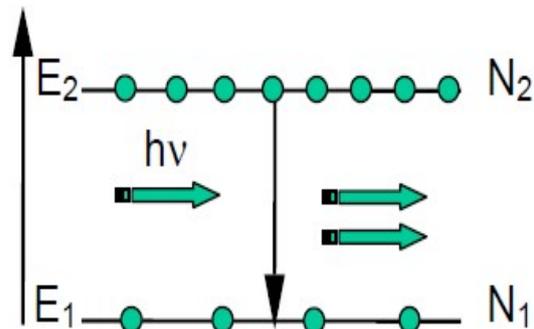


Fig.1.19. Emission stimulée

Donc Le principe de fonctionnement des composants d'émission/réception repose sur l'interaction lumière/matière dans les semi-conducteurs (émission spontanée, émission stimulée, et absorption).

### ➤ Principe du Laser

- ✓ On fait passer un signal lumineux plusieurs fois dans un amplificateur grâce à une boucle de contre réaction.
- ✓ Émission stimulée: recombinaison d'une paire électron-trou stimulée par des photons déjà présents dans le semi-conducteur.
- ✓ Quand il y a compensation des pertes, on atteint le seuil du laser. Il faut réduire ce seuil au maximum.
- ✓ Une fois l'effet laser obtenu, on constate que certaines ondes bien déterminées, qui se propagent dans la cavité, sont favorisées tandis que d'autres sont atténuées.[13]

### ➤ Caractéristiques des diodes laser

La cohérence du rayonnement laser se traduit par des caractéristiques très différentes de celles des DEL :

#### *a) Puissance [13]*

Le relevé de la puissance lumineuse en fonction du courant permet de déterminer le courant seuil. Cette puissance dépend du courant de jonction.

Dans le cas de l'oscillation pulsée, on peut obtenir une puissance de pointe de quelques watts, ce qui correspond à un ordre de grandeur de plus qu'en fonctionnement continu. Dans les télécommunications optiques la puissance exigée est de l'ordre de 10mW.

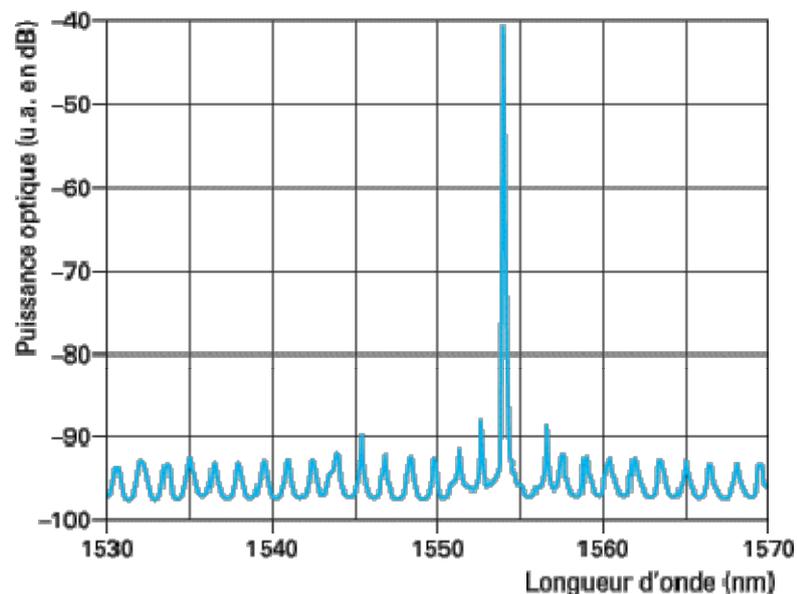
#### *a) L'ouverture du faisceau lumineux*

Elle est très réduite et conduit à une efficacité d'injection bien plus grande que dans le cas d'une DEL : la perte d'injection typique est de l'ordre de 3 dB. De plus, la mise en œuvre de fibres monomodes est grandement facilitée par la réalisation de lasers dont la structure d'émission est optimisée. [14]

b) La largeur spectrale du rayonnement émis

Elle est très réduite, de l'ordre de quelques angströms, pour une diode de structure classique. Cette caractéristique diminue l'influence de la dispersion chromatique des fibres et donc augmente la capacité de la liaison

Compte tenu du faible encombrement spectral des diodes lasers, il est possible de placer dans une fenêtre de transmission autour de 1.3 ou 1.5  $\mu\text{m}$ , par exemple, plusieurs canaux correspondant à des longueurs d'onde différentes. Cette possibilité de multiplexage en longueur d'onde augmente d'autant la capacité de la liaison.

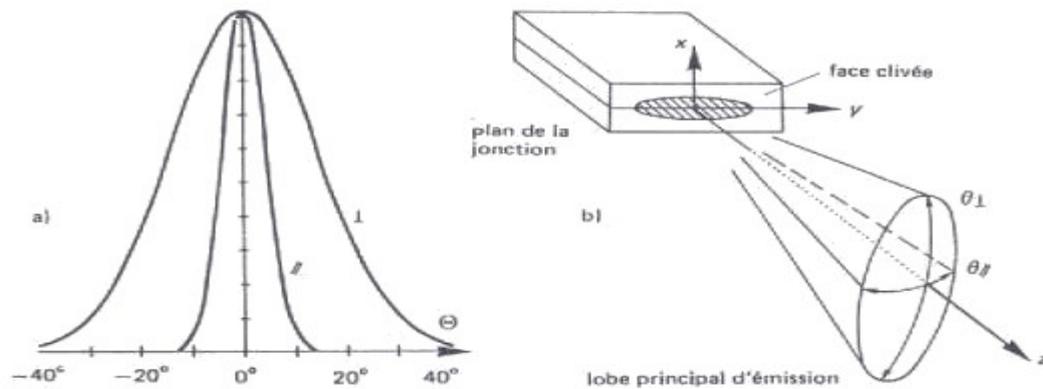


*Fig.1.20.* Spectre d'émission d'une diode laser

b) Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement dépend des dimensions de la région émissive.

Le diagramme de rayonnement du Laser sera défini par 2 angles  $\theta_{||}$  et  $\theta_{\perp}$ : moins de  $20^\circ$  d'ouverture dans le plan parallèle à la jonction et plus de  $40^\circ$  dans le plan perpendiculaire. (**Fig.1.21**)[13]



**Fig. 1 .21** a) évolution de la puissance optique avec l'angle dans les directions Ox et Oy.

b) Diagramme de rayonnement .On a seulement représenté la zone active et le lobe est mesuré à mi puissance.

Les autres caractéristiques importantes des diodes laser sont:

- ✓ La bande passante qui atteint aujourd'hui quelques gigahertz;
- ✓ Le courant de seuil laser de quelques dizaines de milliampères, la puissance émise de quelques milliwatts. Ces paramètres varient avec la température, particulièrement pour les lasers à  $1.3$  et  $1.5 \mu\text{m}$ .

**c) Les différentes sources lasers utilisées pour les transmissions hautes débit.**

➤ **Laser DFB (Distributed Feed Back)**

Pour des raisons de qualité de propagation et d'occupation spectrale, le multiplexage en longueur d'onde dense exige une émission monochromatique qui privilégie l'usage du laser à contre-réaction distribuée ou DFB. La stabilité de longueur d'onde dans le temps autorise leur utilisation dans les systèmes WDM sans stabilisateur externe, à condition que les canaux soient espacés de plus de  $50 \text{ GHz}$ .

Pour des espacements plus faibles, un stabilisateur (locker) est nécessaire. Celui-ci peut être directement intégré dans le module. [14]

Type de laser	Description	Longueur d'onde
DFB Laser	Forte puissance de sortie ; largeur spectrale étroite ; très cher	1310-1550(nm)

*Tableau.1.1.* caractéristique de laser DFB utilisés dans les transmissions optiques.

### ➤ Lasers accordables

L'une des pièces maîtresses des composants accordables est incontestablement le laser accordable. Pour pourvoir les marchés des réseaux métropolitains et de longues distances, les lasers accordables devront avoir : une puissance de sortie élevée (quelques milliwatts), une plage d'accordabilité importante, une accordabilité rapide et une modulation directe ou intégrée élevée (>2.5 Gb/s) [3].

Évidemment, ils devront aussi être fiables, stables et précis pour pouvoir conquérir le marché. Bien que l'on puisse généraliser les grandes caractéristiques des lasers accordables, il n'en reste pas moins qu'elles dépendent extrêmement de l'application à laquelle les lasers sont destinés, même si l'on se restreint aux applications en télécommunications.

## 1.4. Module de réception

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 un générateur de courant. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée, la deuxième est la rapidité, car il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à haut débit. 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-conducteurs, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, tel est le cas des photodiodes PIN ou à avalanche.

### **1.4.1. Le photodétecteur**

Les photodétecteurs sont des composants, réalisés à l'aide de semi-conducteur en général, qui détectent des signaux optiques à travers tout un processus électronique. L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique. Ce rôle est tenu par le photodétecteur, qui pour simplifier, se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant, la photodiode est basée sur l'effet photoélectrique c'est-à-dire sur la capacité d'une substance à émettre des électrons quand elle est frappée par un rayonnement lumineux. Les propriétés les plus importantes dans ce dernier sont leur sensibilité pour la longueur d'onde utilisée, et leur rapidité qui les rend utilisable dans des systèmes fonctionnant à haut débit. Une autre propriété importante est le rapport signal sur bruit (S/B) maximum.

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. Parmi les détecteurs les plus utilisés, on retient les photodiodes PN, PIN et à avalanche(PDA). Dans ce chapitre, nous rappellerons le principe de la photodétection après nous donnerons un bref aperçu du fonctionnement de ces trois types de détecteurs.[4]

#### **a) Principe de la photodétection**

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur. Sous l'effet d'un photon d'énergie suffisante, un électron est arraché de la bande de valence et passe dans la bande de conduction, produisant une paire de porteurs libres(les électrons moins liés deviennent libres) qui sont collectés aux bornes d'une jonction polarisée en inverse (dans cette jonction, il existe une zone sans porteurs libres dite zone déplétion ou règne un champ électrique E).

Le photon a donc laissé place à 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 photo courant. Le nombre de paires électron trou est égal au nombre de photons absorbés.

### **b) Caractéristiques d'un photodétecteur**

Les paramètres qui permettent de déterminer les performances d'un photodétecteur sont : le rendement quantique interne, le gain, le temps de réponse intrinsèque, la sensibilité, le bruit, la bande passante et la rapidité.

Pour faire passer l'électron de la bande de valence à la bande de conduction il doit posséder une énergie  $E_{\text{photon}}$  supérieure ou égale à la hauteur de la bande d'énergie interdite  $E_g$  ( $E_{\text{photon}} \geq E_g$ ). Cela implique une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  au-delà de laquelle le matériau devient transparent à ce rayonnement.  $\lambda_c$  est déterminée par l'énergie de bande interdite  $E_g$  du semi-conducteur selon la relation suivante :

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \Rightarrow \lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (1.17)$$

h : constant de Planck

Ensuite, il peut traverser le détecteur sans être absorbé. Donc Le coefficient d'absorption du semi-conducteur (*Fig.1.22*) est un facteur essentiel qui va déterminer le rendement du photodétecteur.

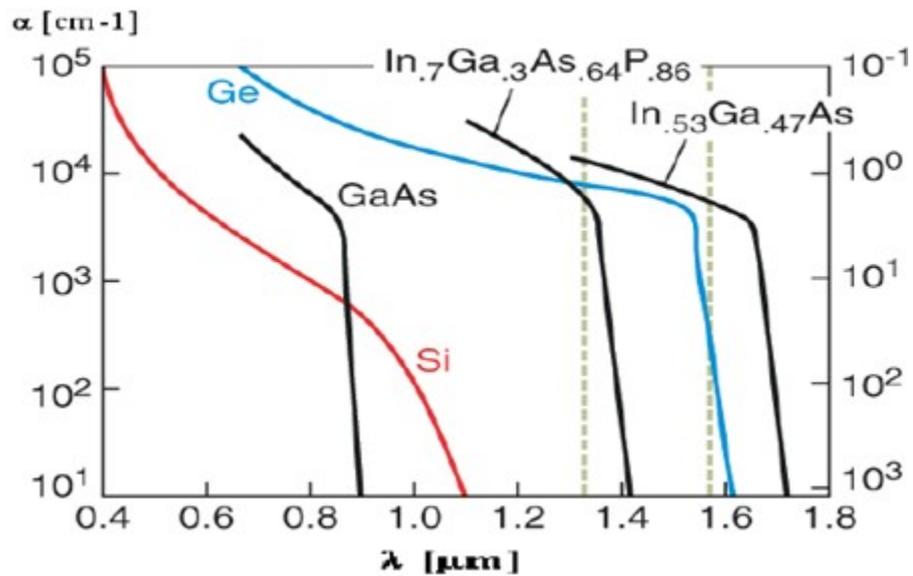


Fig.1.22.Coefficient et longueur d'absorption des matériaux semi-conducteurs.

Ce coefficient dépend du matériau utilisé et de la longueur d'onde. Mais il y a d'autres propriétés qui caractérisent un photodétecteur : [15]

- la rapidité : on peut la caractériser par le temps de réponse ou le gain complexe du photodétecteur. C'est une fonction dépendante de nombreux paramètres comme la vitesse de déplacement des porteurs, l'épaisseur de la zone déplétion, la longueur d'onde etc. [1]
- la bande passante : elle permet de savoir si le courant peut suivre une variation brusque du flux de photons, et quel est le facteur de proportionnalité entre le temps de montée ou de descente du photocourant et ceux du flux lumineux.
- le rendement quantique ( $\eta_q$ ) : Le paramètre qui nous renseigne sur le taux de conversion des photons en paires d'électrons-trous. Il est défini comme étant le rapport entre  $n_e$  (nombre d'électrons créés) et  $n_p$  (nombre de photons incidents).

$$\eta_q = \frac{n_e}{n_p} \quad \text{ou} \quad \eta_q = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/h\nu} \quad (1.18)$$

Pour les dispositifs sans gain, le rendement est toujours inférieur à l'unité. Ceci s'explique par le fait que parmi tous les photons incidents seuls un certain nombre d'entre eux créent des paires électrons-trous.

Lorsque l'énergie d'un photon est supérieure au band gap du semi-conducteur, une paire électron-trou est photogénéré pour chaque photon absorbé dans les cas idéal, ce qui donne un rendement quantique interne  $\eta_{\text{int}} = 1$ . Si tous les porteurs photogénéré sont collectés, le rendement quantique externe  $\eta_{\text{ext}} = 1$ .

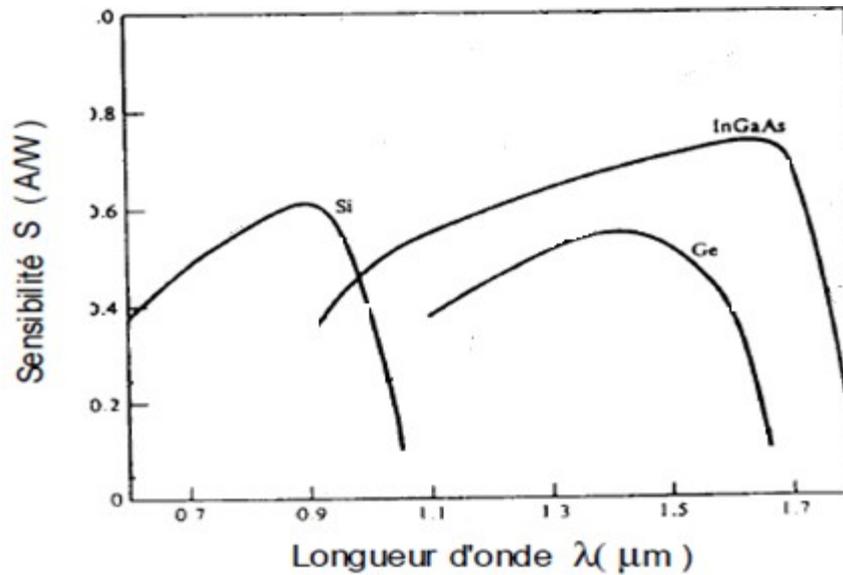
- La sensibilité ( $S$ ) : quant à elle dépend de la structure du composant en termes de dopage et de profondeur des couches et bien évidemment de la nature des matériaux utilisés. Cependant, suivant le semi-conducteur employé, la plage de sensibilité au spectre lumineux varie grandement. La sensibilité du photodétecteur exprimée en ampères par watt et définissant le rapport du photocourant  $I_{\text{ph}}$  au flux énergétique (ou puissance optique  $P_{\text{opt}}$ ) reçu(e).

$$S(\lambda) = \frac{I_{\text{ph}}}{P_{\text{opt}}} \quad \text{(I.19)}$$

Le rendement quantique et la sensibilité sont reliés par les relations suivantes, avec «  $e$  » représentant la charge élémentaire de l'électron, «  $h$  » la constante de Planck, «  $\lambda$  » la longueur d'onde et «  $c$  » la vitesse de la lumière :

$$\eta_q = \frac{I_{\text{ph}}/e}{P_{\text{opt}}/h\nu} \text{ et } S(\lambda) = \frac{I_{\text{ph}}}{P_{\text{opt}}} = \eta_q \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} = \eta_q \cdot \frac{\lambda_{\mu\text{m}}}{1.24} \quad \text{(I.20)}$$

Le courant créé est proportionnel à la puissance lumineuse, ce qui signifie que la puissance du signal électrique est proportionnelle au carré de la puissance optique. Il s'agit d'une détection quadratique.



**Fig.1.23.** Courbes de sensibilité et de rendement selon les longueurs d'onde pour divers matériaux.

A partir de la (**Fig.1.23**), on observe que la sensibilité « S » augmente avec «  $\lambda$  », puis s'écroule à la fréquence de coupure. Il apparaît donc pour chaque matériau une longueur d'onde pour laquelle la sensibilité est maximale.

- Une caractéristique essentielle d'un photodétecteur est son bruit : Certains électrons du courant utile peuvent être générés sans qu'un photon n'ait été absorbé. Ils s'ajoutent aux photoélectrons et parasitent le courant.
- Dans la notion de rapport signal sur bruit (S/B) d'une liaison à fibre optique, ces électrons permettant alors de caractériser le dénominateur de ce rapport. La qualité du signal dépend bien évidemment de la source émettrice et de la qualité des fibres optiques.

### c) Catégories de photodiode PIN, APD

Dans cette partie nous présentons brièvement les 2 types de photodétecteurs ainsi que les principales notions physiques à l'origine de leur fonctionnement :

#### Les photodiodes PIN

Les diodes PIN sont les détecteurs les plus couramment utilisés avec les fibres optiques. Schématiquement, il s'agit d'un semi-conducteur intrinsèque (non dopé), pris en sandwich entre un semi-conducteur de type n et un semi-conducteur de type p. La concentration de charges libres dans le semi-conducteur intrinsèque est très faible, ce qui lui procure une résistivité élevée. Le champ électrique sera donc grand dans cette région de résistivité élevée, et faible dans les parties n et p, de résistivité plus faible. [16]

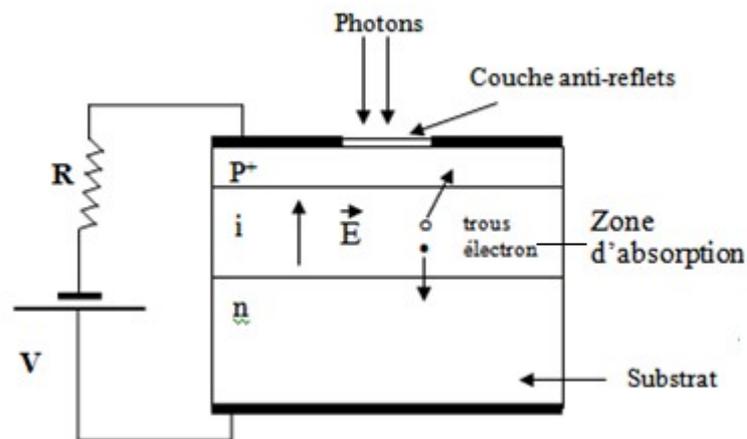


Fig.1.24. Photodiode PIN

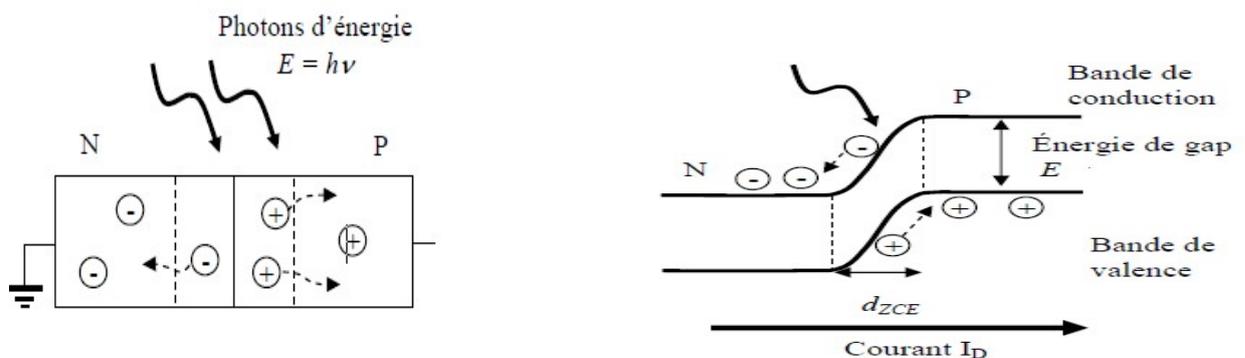
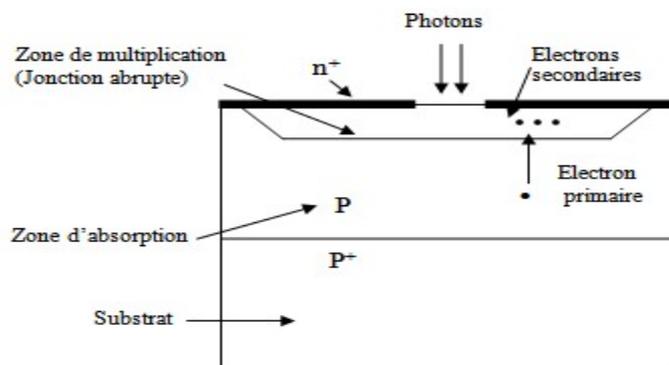


Fig.1.25.a) Diode PIN comme détecteur de lumière. b) Diagramme d'énergie correspondant.

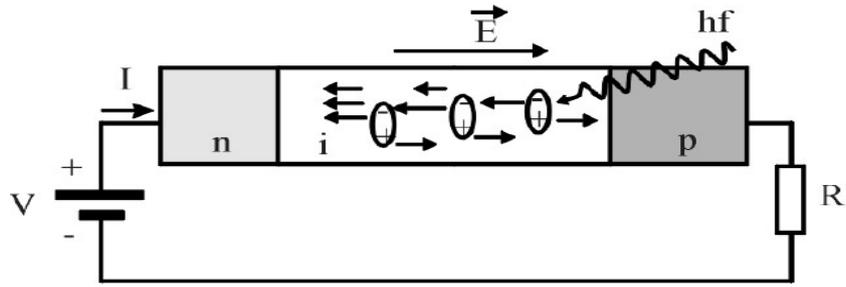
Considérons une jonction PN dopée polarisée (*Fig.1.25.a*). Le centre de la jonction PN, habituellement appelée zone d'appauvrissement ou zone de déplétion, est légèrement dopé N pour former une zone active intrinsèque que l'on appelle zone de charge d'espace. L'ensemble forme une jonction appelée PiN. Cette zone est là pour faciliter l'absorption des photons. Si un photon incident possède une énergie supérieure à l'énergie de gap entre les bandes de conduction et de valence (*Fig.1.25.b*), une paire électron-trou est formée (électron dans la bande conduction et le trou dans la bande de valence). L'énergie de gap dépend de la structure des bandes d'énergie, donc du matériau. Une différence de potentiel apparaît au borne de la jonction, facilité par l'action de la polarisation (si  $p$   $V$  augmente,  $dZCE$  augmente, et l'énergie de gap diminue) ; si le composant est inséré dans un circuit électrique, un courant peut ainsi se créer, que l'on appelle courant photogénéré.

#### Photodiode PDA (à avalanche) :

Une photodiode à avalanche est un dispositif attractifs et avant tout une structure PIN, à laquelle on applique une polarisation inverse proche (mais inférieure en valeur absolue) à la tension de claquage. Les photos porteurs créés dans la zone de charge d'espace sont alors multipliés par l'effet d'avalanche. En effet, lorsque ces porteurs traversent une région où règne un champ électrique élevé ( $>10^5$  V/cm), ils peuvent acquérir une énergie suffisante pour ioniser les atomes du réseau cristallin créant ainsi de nouvelles paires électron trou qui immédiatement dissociées, pourront à leur tour créer d'autres paires électron trou, entraînant une amplification du photocourant primaire.[17]

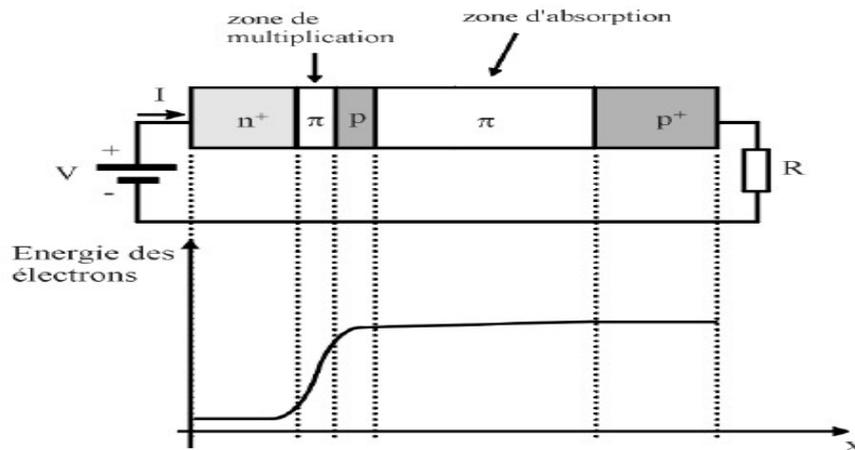


*Fig.1.26. Photodiode à avalanche (PDA)*



**Fig.1.27.** Multiplication par avalanche des paires électron-trou dans la région intrinsèque dans une diode PIN polarisée dans le sens bloquant.

La diode  $p^+ \pi p \pi n^+$  est une variante de la diode PIN qui combine une couche d'absorption suffisamment épaisse avec une zone de multiplication étroite. Les régions  $p^+$  et  $n^+$  sont les zones déjà connues de la diode PIN. Elles sont fortement dopées pour avoir une résistivité faible. Les zones  $\pi$  sont très légèrement dopées, "presque intrinsèques". La chute de potentiel est localisée principalement entre les régions  $p$  et  $n^+$ , à travers la région  $\pi$  étroite. En effet, on n'obtient presque pas de chute de potentiel entre une zone  $p$  et une zone  $p^+$ . Par conséquent, le champ électrique est intense dans la zone  $\pi$  étroite. L'absorption a lieu principalement dans la zone  $\pi$  épaisse. Les trous générés se déplacent vers la zone  $p^+$  où ils sont collectés et contribuent au courant inverse. Les électrons se déplacent dans le sens contraire au champ électrique. Quand ils atteignent la zone  $p$  entre les deux zones  $\pi$ , ils sont accélérés vers la zone  $\pi$  étroite où le champ est intense. La multiplication par avalanche se produit alors dans cette zone étroite, et les charges sont séparées sous l'action du champ électrique. Comme la région de multiplication est étroite, une tension faible suffit pour produire le champ nécessaire à la multiplication.



**Fig.1.28.** Photodiode à avalanche  $p^+\pi p\pi n^+$  comme détecteur de lumière et diagramme d'énergie des électrons correspondant.

Les photodiodes à avalanche offrent une très bonne sensibilité, de l'ordre de quelques dizaines d'A/W, soit 20 à 100 fois plus qu'une diode PIN. Elles sont linéaires pour des puissances optiques entre une fraction de nano watt (nW) et quelques  $\mu$ W. Pour des puissances supérieures, une diode à avalanche n'est pas nécessaire: une simple diode PIN ou PN suffit. Leur bande passante est élevée, avec un temps de montée de l'ordre de quelques 100 ps.

### 2.1. Technique de modulation

#### 2.1.1 Définition de la modulation optique

La modulation est la variation dans le temps d'une caractéristique physique d'un signal (onde porteuse) en fonction des informations à transmettre. Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre; ainsi les informations sont transmises grâce à l'onde porteuse dont on va modifier soit l'amplitude (modulation d'amplitude), soit la fréquence (modulation de fréquence) soit la phase (modulation de phase). [18]

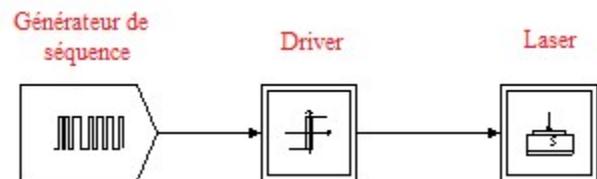
Il existe principalement deux techniques : la modulation directe et la modulation externe.

##### a) La modulation directe

Un des principaux avantages de lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibre optique réside dans le fait que le signal est modulé facilement : la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation de la lumière émise soit en intensité, soit en fréquence optique. Ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser.

Cette solution de modulation directe requiert assez peu de composants. En dehors de la source optique, le laser, seuls un générateur de courant et un driver sont nécessaires.

Le premier va émettre à un débit donné 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, transforme les niveaux du courant issu du générateur.



**Fig2.1.** Synoptique de la modulation direct.

En première approximation, la puissance optique délivrée varie linéairement en fonction du courant.

La modulation directe connaît beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en œuvre. Mais elle comporte aussi des limites.

Ce type de modulation provoque une modification dynamique du spectre due à la conversion amplitude-fréquence (désignée par le terme anglo-américain de *chirp*) et du diagramme de rayonnement. Le temps de réaction des lasers, leurs oscillations, leur bruit, font que la modulation directe engendre pour les hauts et très hauts débits certaines dégradations sur le signal optique modulé. A cela, la modulation externe constitue un remède.

En Conclusion, 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.

## **b) La modulation externe**

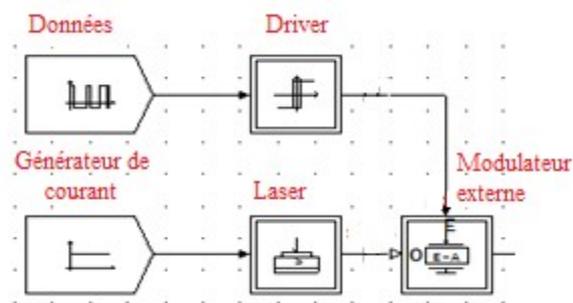
### **➤ Principe**

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.

### ➤ Les composants

La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable : le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe  $v(t)$ , modulée et 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.



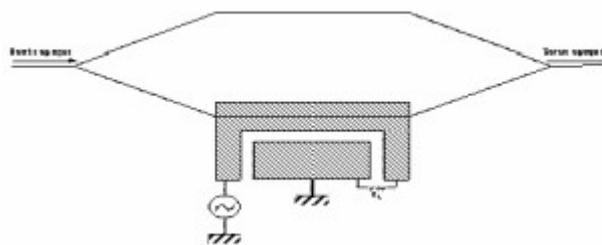
*Fig.2.2* Synoptique de la modulation externe.

Il existe deux types de modulateurs externes : les modulateurs de type Mach-Zehnder et les modulateurs électro-absorbants .

### 📌 Le modulateur Mach-Zehnder

Il est constitué de deux jonctions Y. La lumière injectée à l'entrée est divisée en deux (*Fig.2.3*). Les deux faisceaux se recombinent ensuite à la sortie du composant. Une tension est appliquée sur l'un des deux bras du Mach-Zehnder.

Par conséquent, l'indice de réfraction du matériau électro-optique est modifié par l'application d'une tension, entraînant ainsi un déphasage entre les deux faisceaux. Suivant la différence de marche (phase relative) créée, les deux faisceaux interfèrent de manière constructive (toute la puissance optique est disponible en sortie), ou destructive (aucune lumière n'est injectée dans le guide de sortie). Ce dispositif est réalisé en optique intégrée sur des substrats de niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ), de semi-conducteurs (GaAs ou InP), voire de polymères. L'application d'une tension sur une électrode permet de contrôler le déphasage induit par l'effet électro-optique et de coder l'information électrique sous forme optique. L'absence de modulation de phase parasite évite ainsi tout problème de transmission lié au *chirp*. [19]



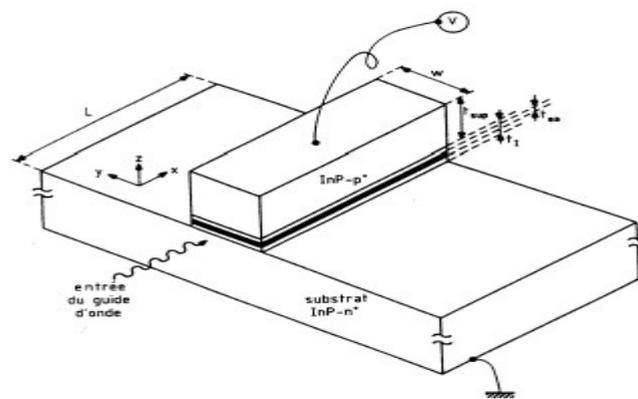
**Fig.2.3** Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder

Les pertes d'insertion du dispositif proviennent du rendement de couplage avec la fibre, des pertes de propagation des guides, en particulier dans les coudes : 4 à 6 dB est une valeur typique.

### **Modulateur électro-absorbant**

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. La dérivée de l'absorption par rapport à la longueur d'onde est la plus grande au voisinage du bord d'absorption. Une augmentation du champ électrique translate le bord d'absorption vers les grandes longueurs d'onde et de ce fait, augmente l'absorption de la lumière traversant le semi-conducteur.

Du point de vue structure, les modulateurs ont actuellement la même configuration géométrique qu'une diode laser. Le ruban guidant est enterré entre deux couches de confinement de type P et de type N formant une jonction polarisée en inverse. Le matériau du guide optique est choisi de telle sorte que la longueur d'onde de son bord d'absorption soit légèrement inférieure à celle du signal dont on veut moduler l'intensité. Par exemple, le guide sera en InGaAsP non dopé et les couches de confinement en Phosphure d'Indium (InP) pour moduler une onde optique à  $1,55 \mu\text{m}$ . À cette longueur d'onde, le guide est transparent pour une tension nulle et apporte une atténuation pour une tension négative.[19]



**Fig.2.4.** Structure d'un guide d'onde en arête contenant un matériau électro-absorbant

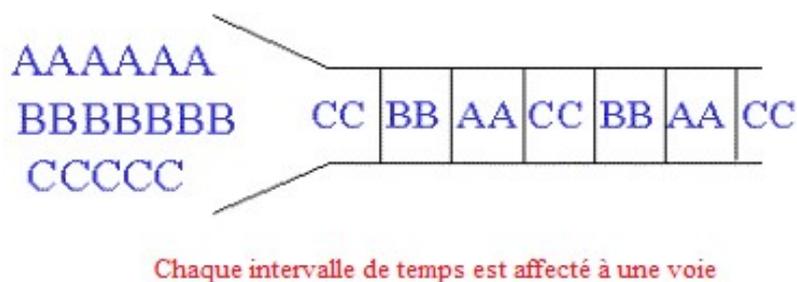
Les performances dépendent du matériau utilisé (massif ou à puits quantiques). Les dispositifs dont le guide est formé de puits quantiques permettent d'obtenir une efficacité d'électro-absorption par unité de longueur plus importante et une bande passante plus élevée mais ils demandent une tension de commande plus forte et sont plus sensibles à la polarisation de la lumière que les dispositifs dont le guide est formé de matériaux massifs. Malgré la sensibilité à la polarisation, l'avantage de cette structure est de permettre d'associer sur un même substrat d'InP une diode laser DFB fonctionnant en continu et un modulateur d'intensité.

## 2.2. Les techniques de transmission

### 2.2.1 Le multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage temporel (TDM=Time Division Multiplexing) consiste à offrir à un utilisateur à la fois, la totalité de la bande passante pendant un court instant. L'allocation de la bande passante se fait en divisant l'axe du temps en intervalles de temps, et chaque utilisateur ne pourra transmettre que pendant son intervalle de temps. [20]

Il est possible de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé (par exemple, conception d'une connexion à 10 Gbits/s, à partir de 10 sources à 1 Gbits/s).



*Fig.2.5.* Répartition des périodes dans le cas du TDM.

#### a) Le multiplexage temporel optique (OTDM)

Le multiplexage temporel peut être réalisé optiquement. L'émetteur est constitué de N sources optiques en parallèle modulées au débit  $D_b$  bits/s. Cette technique nécessite que les signaux optiques soient ensuite codés de type RZ pour que les impulsions codées aient désormais une durée inférieure à  $T/N$  et que le multiplexage optique puisse se faire sans recouvrement optique.

Par exemple, un signal modulé à 40 Gbits/s peut être obtenu par multiplexage des sorties codées RZ de 4 modulateurs optiques attaqués par des trains à 10 Gbits/s. (*Fig.2.6*)

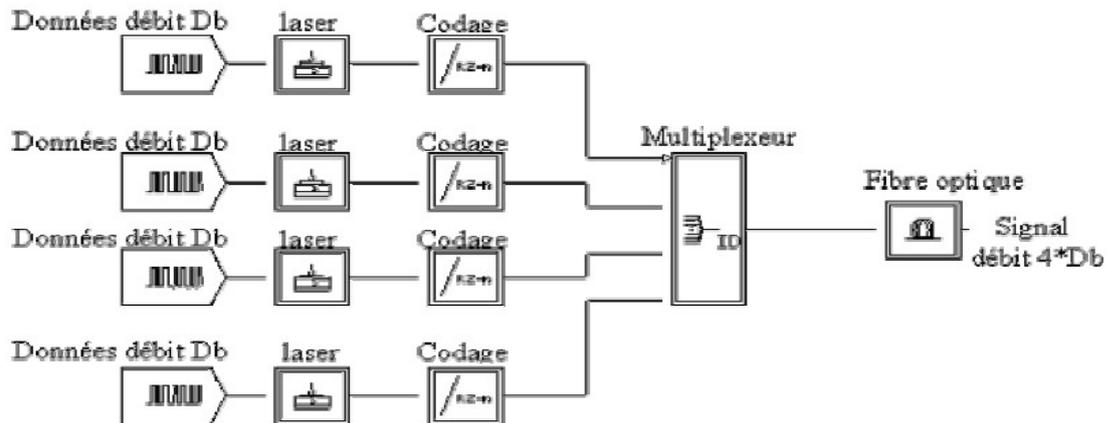


Fig.2.6. Synoptique d'un multiplexage OTDM.

Le multiplexage optique temporel est utilisé ici pour accroître les débits transmis. Le temps est partagé entre les différents utilisateurs : chacun d'eux dispos d'une tranche temporelle pour émettre. Les différents signaux sont " assemblés " pour être transmis sur une porteuse optique unique. [20][6]

### b) Le multiplexage temporel électronique (ETDM)

Dans les techniques ETDM, le multiplexage des données électriques à transmettre s'effectue à l'aide de dispositifs électroniques. Le signal de sortie du multiplexeur est appliqué à l'entrée d'un modulateur optique qui permet la transmission sur la fibre optique (*Fig.2.7*).

La différence avec la technique OTDM réside dans le fait que le modulateur optique doit fonctionner non pas au débit des données  $D$  mais à celui  $R$  du signal en sortie du multiplexeur. Or si, les données ont un débit  $D$  et que le nombre d'utilisateur est  $N$ , on a :  $R=N*D$ .

Plus le nombre d'utilisateurs augmente, plus le débit  $R$  est élevé ce qui représenté la principale limitation de cette technique. [20]

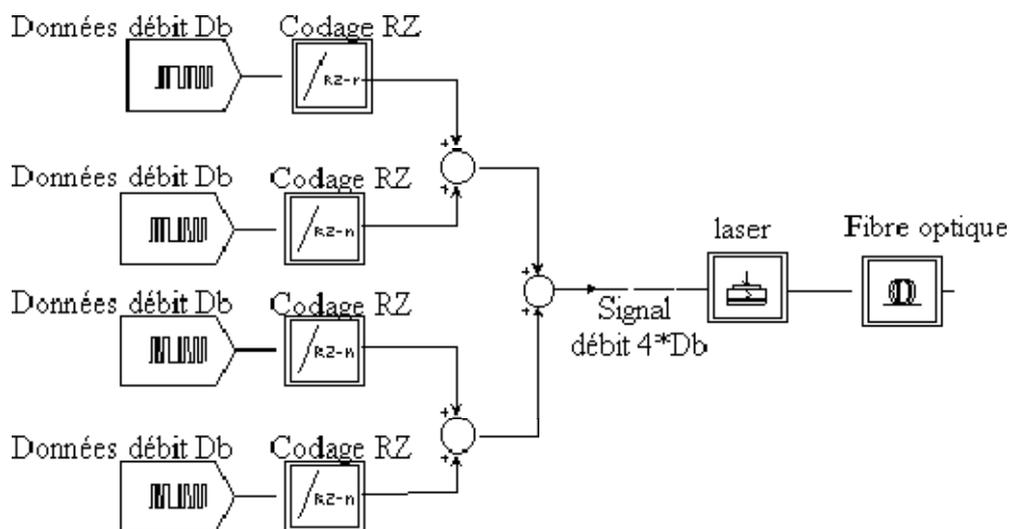


Fig.2.7. Synoptique d'un multiplexage ETDM.

## 2.3. Le multiplexage en longueur d'onde (WDM)

### 2.3.1. Principe

Le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing), consiste à envoyer dans une seule fibre,  $N$  porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit  $D$ .

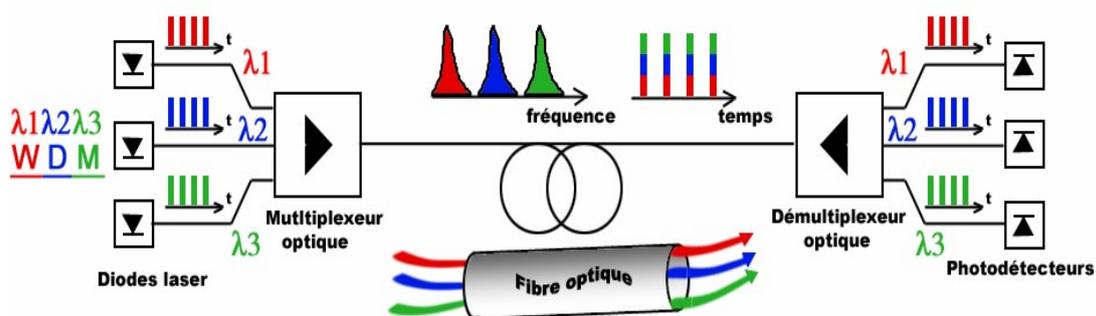
Contrairement au multiplexage temporel, ce n'est plus l'axe du temps qui est découpé en périodes mais la bande passante. Chaque sous-bande est affectée à un canal. Plusieurs transmissions peuvent donc être réalisées simultanément, chacune sur une bande de fréquences particulières.

Ce procédé est également connu sous le nom de multiplexage fréquentiel (Frequency Division Multiplexing). En fait, ces deux termes recouvrent la même notion, mais on parle de multiplexage en longueur d'onde lorsque la séparation entre deux canaux est relativement grande, tandis que l'on parle de multiplexage en fréquence lorsque cet écart est petit. [20]

### 2.3.2. Description

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite:

- Un ensemble de *diodes laser* émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches (dans le voisinage des 1550 nm).
- Des *multiplexeurs/démultiplexeurs optiques* pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans/de la fibre. La *Fig.2 .8* représente un exemple d'une liaison utilisant le multiplexage WDM.



*Fig.2 .8.* Schéma de principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre optique (avec 3 longueurs d'ondes).

Pour assurer une bonne qualité de transmission du signal dans la fibre, il faut déterminer l'espacement minimum à respecter entre les longueurs d'onde émises par chaque source pour s'assurer qu'il n'y ait pas de chevauchement. Cet espacement dépend de plusieurs facteurs :

- ✓ Qualité de la fibre
- ✓ Qualité des multiplexeurs/démultiplexeurs,
- ✓ Longueur de transmission,
- ✓ Qualité des sources,
- ✓ Débit des données de chaque source ...

#### a) DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

La technologie WDM est dite dense lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'onde est égal ou inférieur à 100 GHz. On l'emploie désormais pour les

transmissions longues distance. Dans la pratique, cela signifie que l'on fait passer dans une même fibre beaucoup de signaux portés par des fréquences très rapprochées les unes des autres.[20]

### b) U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing)

C'est une amélioration et développement de DWDM, elle permet jusqu'à 400 canaux de transmission.

### 2.2.3. Application

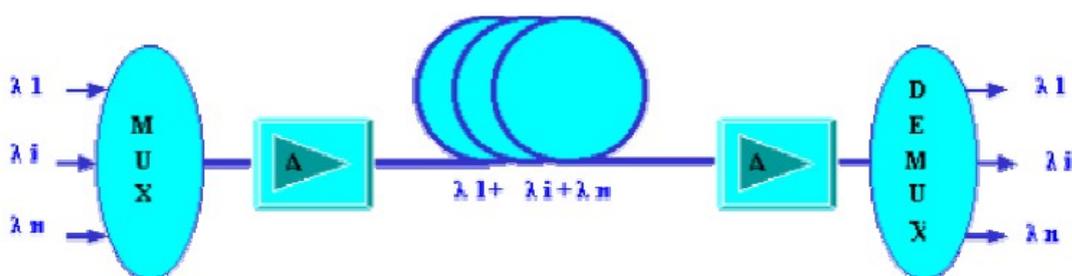
L'intérêt premier du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs.

On trouve aujourd'hui des systèmes à  $4 * 10$  Gbits/s,  $16 * 10$  Gbits/s. Cependant, il est à noter que le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission WDM se fait lorsqu'il est associé à l'amplification optique (*Fig.2.9*).

En effet, l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) permet l'amplification simultanée de l'ensemble des N canaux d'un multiplex, sans distorsion du signal utile.

Envoyer N canaux dans une fibre optique plutôt que N fibres devient un avantage économique indiscutable. [20]

A noter également que s'il y a encore peu de temps, l'espacement entre canaux était de l'ordre de 1nm, le terme de DWDM (Dense DWM) est maintenant utilisé, grâce à l'apparition, sur le marché, de lasers de très bonne qualité, l'espacement entre les longueurs d'onde a pu être réduit, et est descendu à 0,8 nm ou 0,4 nm.



*Fig.2 .9.* Utilisation du WDM couplé avec l'amplification optique.

## 2.4. Le multiplexage en longueur d'onde combiné au multiplexage temporel

D'après les deux types de multiplexage vus précédemment, rien n'empêche à chaque signal modulé issu d'une étape de multiplexage temporel, d'être ensuite multiplexé avec d'autres signaux à d'autres longueurs d'onde.

Associer TDM et WDM est d'ailleurs la situation la plus fréquente. Dans ce cas, après démultiplexage optique, une étape de démultiplexage temporel permet la restitution des signaux d'origines " bas débit ".

## 2.5. L'accès multiple à répartition de code (CDMA)

Le terme CDMA (*Code Division Multiple Access*) désigne toute forme d'utilisation du principe d'étalement de spectre par de multiples émetteurs qui transmettent une information simultanément à un même récepteur et sur une même bande de fréquence, le tout avec un minimum d'interférences.

Les techniques d'étalement de spectre (*Spread Spectrum*), qui reposent sur l'élargissement de la bande spectrale d'un signal, peuvent être utilisées pour le multiplexage. L'étalement de spectre consiste à transformer le signal de façon à multiplier la largeur de son occupation spectrale par une quantité nommée gain de codage (*processing gain*).

L'élargissement de la bande permettant une meilleure reconnaissance du signal en réception, on peut autoriser l'émission de signaux d'autres utilisateurs sur la même bande sous certaines conditions, ces autres utilisateurs étant considérés comme du bruit, l'interférence multiutilisateur (IAM) désigne ce bruit. La bande n'est alors partagée ni selon les fréquences, ni en temps, mais sur la base d'un procédé de codage.

## 2.6. Les Amplificateurs optiques

L'amplificateur optique a un gain en largeur de bande très large, c'est-à-dire que toutes les longueurs d'onde transmises dans la fibre peuvent être amplifiées simultanément alors qu'il fallait un régénérateur par longueur d'onde. Ces nombreux avantages ont fait de l'amplificateur optique un élément essentiel dans les réseaux hauts performances. [21]

### 2.6.1. Amplificateur optique à semi-conducteurs (AOSC)

Les premiers travaux sur les AOSC ont démarré au début des années 80, à partir du moment où les lasers à semi-conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable. Leur structure de base est peu différente de celle d'une diode laser. Contrairement aux lasers à semi-conducteur, il n'y a pas de miroirs aux extrémités mais un revêtement anti-reflets est déposé sur les faces afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit. [22]

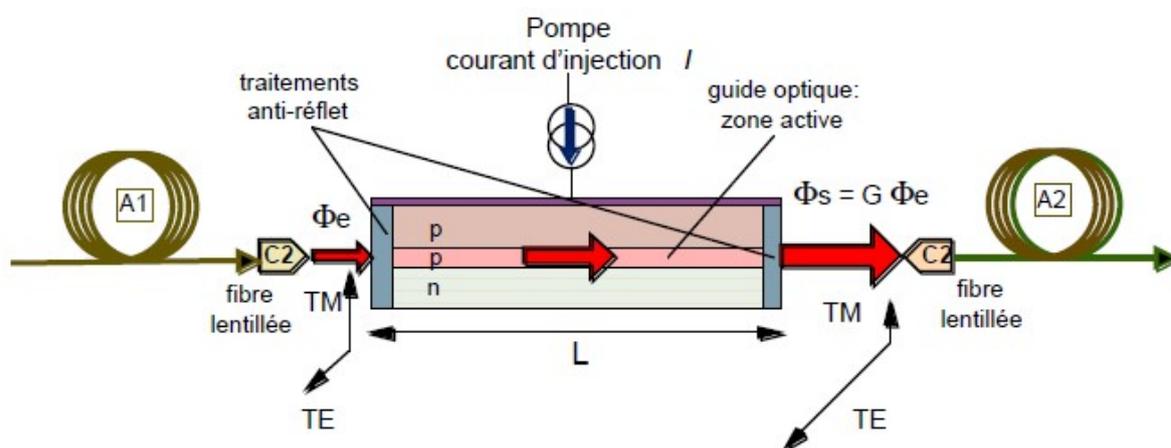


Fig.2 .10. Schéma d'un amplificateur à semi-conducteur [21]

La lumière incidente entrant dans le circuit, elle est amplifiée et sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre. Voici quelques caractéristiques : un gain élevé jusqu'à 30 dB, une puissance de saturation en sortie de 5 à 10 mW, une bande passante de 5 THz à  $\lambda = 1550$  nm...

### 2.6.2. Amplificateur Optique Dopé à Erbium l'EDFA

Certainement l'un des systèmes d'amplification les plus prometteur car celui-ci est un système simple, *l'amplificateur optique dopé à l'erbium*. Ce sont des dispositifs comprenant dans un seul boîtier compact la fibre spéciale constituant le milieu amplifiant, Le laser de pompe qui produit un signal lumineux des très hautes puissances et les composants passifs nécessaires. [21] [23]

L'amplificateur contient une fibre optique spécialement dopée à l'erbium, excitée à une certaine fréquence avec une lumière provenant d'une pompe laser, l'erbium agit comme un réactif qui aura comme effet d'amplifier le signal entrant.

L'Erbium est un composant chimique qui peut être excité en contact d'une source lumineuse d'une longueur d'onde spécifique. Ce sont les signaux de longueur d'onde de 800, 980, 1480 nm qui font réagir les ions et va dégager une énergie nécessaire à l'amplification des signaux lumineux. La fibre optique est dopée en ion Erbium sur une certaine distance. Un signal pompe d'une des longueurs spécifiques à l'excitation des ions erbium va être introduit dans la fibre à l'aide d'un coupleur. Lorsque que ce signal est en contact avec les ions, une énergie photonique va être dégagée. [22]

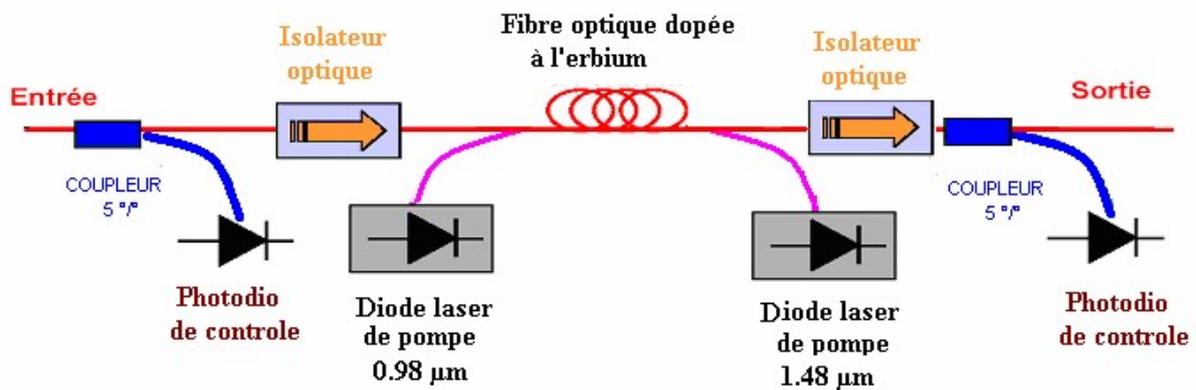


Fig.2.11.principe de l'amplification optique

Afin de ne pas polluer la transmission d'information dans la fibre, le signal pompe est retiré de la fibre.

En général, les EDFA possèdent un gain de 25 à 45 dB et des puissances de saturation allant de 1 à 10 mW (0 à 10 dBm). Enfin, les EDFA ont une large bande passante (1530-1560 nm) pour laquelle le gain est quasiment identique, ce qui rend intéressant ces amplificateurs quand on veut amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueur d'onde.

La Fig.2.11 donne un exemple de configuration de ce type d'amplificateur. L'EDFA consiste en un morceau de fibre optique monomode dopée, de longueur d'environ 10 - 20 m et d'un laser de pompe. La lumière provenant de la pompe excite les ions d'Erbium au

niveau d'énergie supérieur, ce qui permet de réaliser l'inversion de population. Le multiplexeur optique sélectif en longueur d'onde effectue le couplage dans la fibre dopée à l'erbium du signal à transmettre et du signal de pompe; celui-ci doit présenter une perte d'insertion faible aux deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. Les isolateurs optiques permettent d'éviter les oscillations et d'assurer la stabilité des caractéristiques de gain en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval. Le signal de pompe peut être couplé dans la fibre en contre-propagation. [18]

### **2.6.3. Comparaison des amplificateurs optiques**

Les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium fonctionnent mieux que leurs homologues à semi-conducteurs et présentent plusieurs caractéristiques qui les rendent plus attrayants quant à leur utilisation dans les systèmes de transmission optique à grandes distances et à débits élevés. Ils introduisent de faibles pertes d'insertion et ils ont une très faible distorsion du signal. En effet, le signal à l'entrée est presque similaire à celui qui en sort. La diaphonie et le bruit sont faibles et de plus, ils sont insensibles à la polarisation de la lumière incidente. [24][18]

La supériorité du gain et de la puissance de saturation, les faibles pertes d'insertion et la réduction du facteur de bruit conduisent à préférer les EDFAs aux amplificateurs optiques à semi-conducteurs pour les applications de post-amplification, d'amplification en ligne et de pré-amplification. Cependant, les EDFAs sont limités à l'amplification du signal autour de 1550 nm, ce qui constitue leur principale limitation intrinsèque. Les amplificateurs à semi-conducteurs présentent quant à eux l'avantage d'amplifier des signaux sur une plus grande gamme de fréquences. De plus, les amplificateurs à semi-conducteurs se prêtent à l'intégration monolithique, ce qui est difficilement réalisable avec les EDFAs.

## **2.7. Utilisation de l'amplificateur optique**

L'amplification optique est à l'origine d'une véritable révolution dans le domaine des télécommunications, vu les avantages que cette technologie procure en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM). En effet, cette amplification peut intervenir sur l'ensemble des N longueurs d'onde d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Il évite donc une conversion optoélectronique et une amplification électrique sur chaque canal, donc N amplificateurs électriques.

Dans une ligne de transmission, le choix d'un amplificateur optique doit cependant se faire en fonction de son rôle. Il peut servir d'amplificateur de puissance en émission, de préamplificateur en réception ou d'amplificateur en ligne. Selon l'utilisation qui en est faite, les paramètres diffèrent. On demandera par exemple à un amplificateur de puissance d'être capable de délivrer une puissance de sortie élevée et ses caractéristiques de bruit seront assez peu critiques, tandis qu'un préamplificateur doit être le moins bruyant possible. L'amplificateur en ligne sera un compromis à tout cela afin à la fois de ne pas dégrader la qualité du signal transmis et allonger la distance de transmission. [7]

## 2.8. Les Isolateurs

La plupart des éléments optiques passifs sont réciproques, c'est à dire qu'il est possible d'introduire aussi bien le signal en entrée qu'en sortie pour obtenir un même effet. Certains systèmes ont besoin de dispositif non réciproque, par exemple un isolateur. Sa fonction est de laisser passer la transmission dans un sens et de la bloquer dans la direction opposée. De tels isolateurs sont placés devant des amplificateurs optiques et les lasers pour prévenir d'éventuelles réflexions à l'entrée du système, qui aurait comme conséquence une dégradation de performance. Un isolateur à deux paramètres :

- ✓ **Sa perte en insertion**, c'est à dire la perte dans la direction incidente, cette perte doit bien évidemment être la plus petite possible.
- ✓ **Son isolation**, qui est la perte dans la direction opposée à la transmission, c'est à dire la réflexion, celle-ci doit être la plus grande possible. Des valeurs classiques pour ces deux grandeurs sont 1dB pour l'insertion et 50db pour la réflexion. [21]

## 2.9. Les Coupleurs optique OXC (Optical cross connect)

Un coupleur optique permet de coupler les N signaux d'entrée en N signaux de sortie, c'est à dire d'extraire une longueur d'onde de la fibre, de convertir le signal en une autre longueur d'onde, puis de la réinjecter dans la fibre, la restriction d'un tel système est qu'une même longueur d'onde venant de deux entrées ne peut pas être routée vers la même sortie.

Un tel coupleur est indépendant du débit binaire et du format, c'est à dire qu'il peut coupler des canaux dont le signal provient de couches supérieures hétérogènes donc le débit est différent.

Ce type de coupleur supporte donc aisément une reconfiguration de réseau, et supporte toutes les modifications provenant des couches supérieures. [21]

## 2.10. Les Filtres optiques

Les filtres optiques sont des éléments essentiels dans les systèmes de transmission tout optique. On les retrouve au moins dans deux applications dans un système WDM, dans le multiplexage et le démultiplexage, en tant que filtre de longueur d'onde. Leur utilisation est également requise pour diminuer le bruit dans les amplificateurs optiques.

Le principe du filtre optique simple est de laisser une longueur d'onde et de retenir toutes les autres. [21]

## 2.11. Critère de qualité

### 2.11.1. Le facteur Q

Le facteur Q est défini par la relation

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (II.1)$$

$\mu_1$ : niveau moyen du signal, aux instants de décision, sur la transmission des 1.

$\mu_0$ : niveau moyen du signal, aux instants de décision, sur la transmission des 0.

$\sigma_1$ : écart-type du bruit sur le signal, aux instants de décision, pour la transmission des '1'.

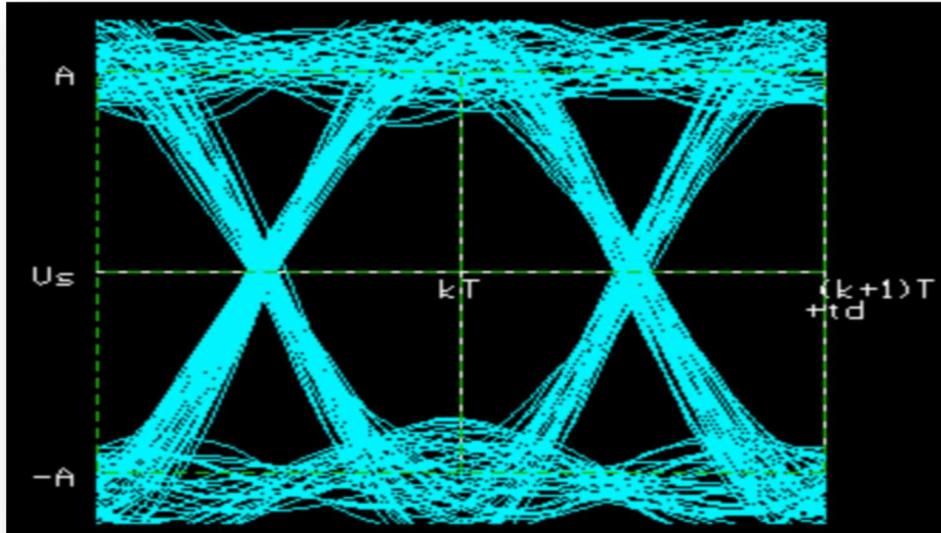
$\sigma_0$ : écart-type du bruit sur le signal, aux instants de décision, pour la transmission des '0'.

Les échantillons du signal considérés dans le calcul sont situés sur les fronts montants d'une horloge de décision. Celle-ci est synchronisée, soit sur une variable horloge simulée soit sur un signal généré en interne à partir de la connaissance du débit et du retard.

### 2.11.2. Diagramme de l'œil de la liaison optique point à point

Le diagramme de l'œil est, dans le domaine des télécommunications, un oscillogramme représentant des données numériques issues d'un récepteur. Celles-ci sont échantillonnées de manière répétitive et sont appliquées à l'entrée de déviation verticale, alors que le déclenchement (déviation horizontale) est synchronisé avec le débit du signal. Le nom de ce diagramme vient du fait que pour nombre de codage, le motif obtenu ressemble à une suite d'yeux encadrés par deux rails horizontaux.

- L'ouverture verticale renseigne sur la différence qui existe entre les niveaux logiques « 0 » et « 1 ». Plus l'œil est ouvert et plus la situation est favorable pour la discrimination des bits hauts et bas.
- L'ouverture horizontale renseigne sur le degré de « gigue » présent dans la liaison (toutes les communications synchrones sont très sensibles à ce défaut). Là il est souhaitable que l'ouverture de l'œil soit la plus grande possible.
- L'épaisseur des lignes au niveau de l'axe horizontal donne également une indication sur la présence de « gigue ».
- En dernier lieu, c'est tout simplement l'ouverture de l'œil elle-même qui renseigne sur la qualité de la liaison numérique, et donc sur la facilité qu'il y aura à interpréter le flux de bits reçu.
- La **Fig.2.12** représente un exemple de diagramme de l'œil regroupant sur une durée de 2 bits les changements d'amplitudes des "1 vers 0" (+A vers -A) et des "0 vers 1" (-A vers +A) pour une très longue suite (aléatoire) de symboles "1" et "0".



*Fig.2.12.*Exemple de diagramme de l'œil.

### 2.11.3. Rapport signal sur bruit

Dans les systèmes de télécommunications où le signal reçu peut être d'un niveau très faible, il est important de s'intéresser au bruit présent en chaque point de la chaîne de réception. Puisque le bruit varie à tout moment de façon imprédictible, on préfère l'analyser par le biais de sa puissance moyenne. C'est ainsi que l'on introduit la notion de rapport entre la puissance moyenne du signal et la puissance moyenne du bruit. [17]

$$\frac{S}{N} (\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{S}{n} \right) \quad (\text{II.2})$$

$S$ : La mesure en tension ou en intensité d'un signal reçu.

$N$ : La part de bruit dans ce signal.

### 2.11.4. Probabilité d'erreur (TEB, Taux d'erreurs Binaire)

Le canal de transmission optique, bien qu'il reste complexe à modéliser, peut être décrit comme un canal binaire asymétrique, *Fig.2.13*. Asymétrique en effet, car la probabilité

d'obtenir un « 1 » si un « 0 » est émis et un « 0 » si un « 1 » est émis, n'est pas équiprobable dans ce types de systèmes.

- ✓ P (0|1) est la probabilité de détecter un « 0 » si un « 1 » est transmis.
- ✓ P (1|0) est la probabilité de détecter un « 1 » si un « 0 » est transmis.

Le taux d'erreur binaire est le rapport de nombre de bit reçus en erreur, sur le nombre de bits transmis.

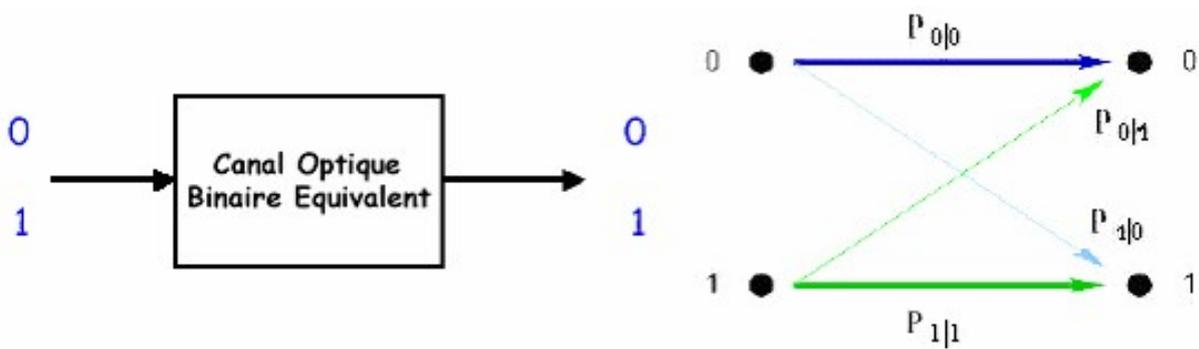


Fig.2.13. Canal Binaire Asymétrique

Dans tout système de transmission, un paramètre important permet de connaître la qualité du système, c'est le taux d'erreur binaire, permettant de quantifier de manière probabiliste les erreurs de l'information reçue qui a été dégradée lors de la transmission, comme cela a été expliqué plus haut, et bruitée lors de la détection. [25]

$$TEB = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \frac{I_1 - S}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \frac{S - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right] \quad (II.3)$$

$$TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \quad (II.4)$$

Tel que :

$$\operatorname{erfc}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}(X) \quad (II.5)$$

### 3.1. Présentation générale

Afin de pouvoir étudier des liaisons par fibres optiques haut débit, il est nécessaire de pouvoir les simuler à l'aide d'un logiciel approprié.

Le logiciel de simulation qui a été retenu, pour cette étude est le logiciel COMSIS. C'est un logiciel de simulation système développé par une société française, **IPSIS** (Ingénierie **P**our **S**ignaux et **S**ystèmes). L'acronyme de **COMSIS** signifie **COM**munication**S**ystem **I**nteractive **S**oftware. Son environnement de programmation se présente sous la forme d'une interface graphique de type schéma bloc. Sa bibliothèque de modèles ne se limite pas aux télécommunications optiques mais intègre les communications hertziennes de nouvelle génération (GSM, UMTS, GPRS, ...). Ce logiciel est un outil qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal allant du dispositif le plus élémentaire au système complet de communication.

COMSIS est un logiciel de simulation des systèmes de télécommunications.

Ses principales fonctionnalités sont :

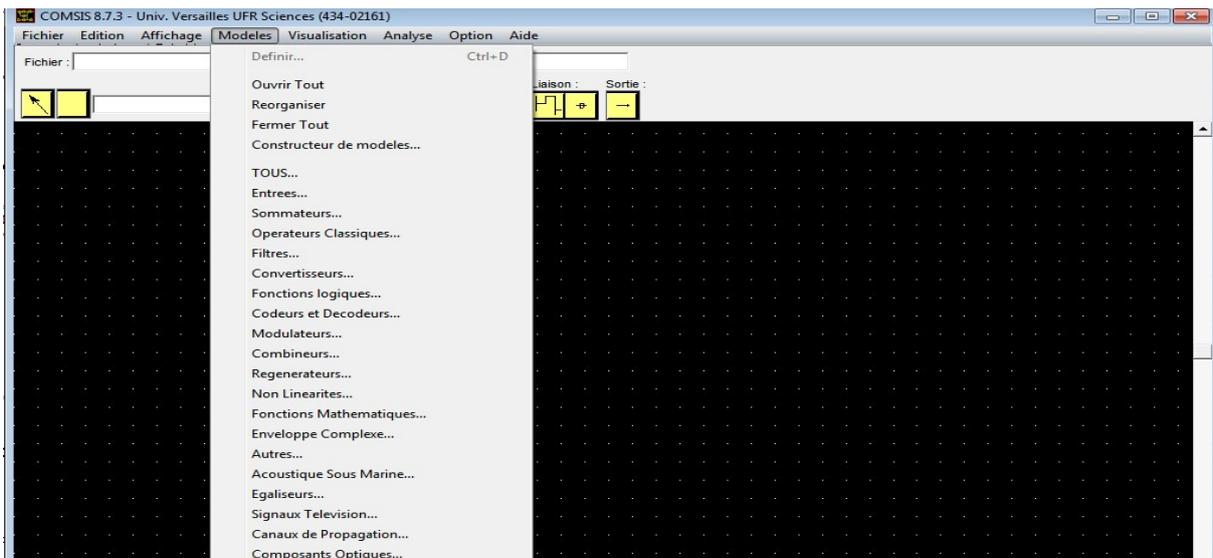
- Analyse statistique ;
- Analyse spectrale ;
- Synthèse de filtres analogiques et numériques ;
- Simulations linéaire et non linéaire
- Etudes paramétriques.

Les simulations que nous mettrons en œuvre comportent principalement les étapes suivantes :

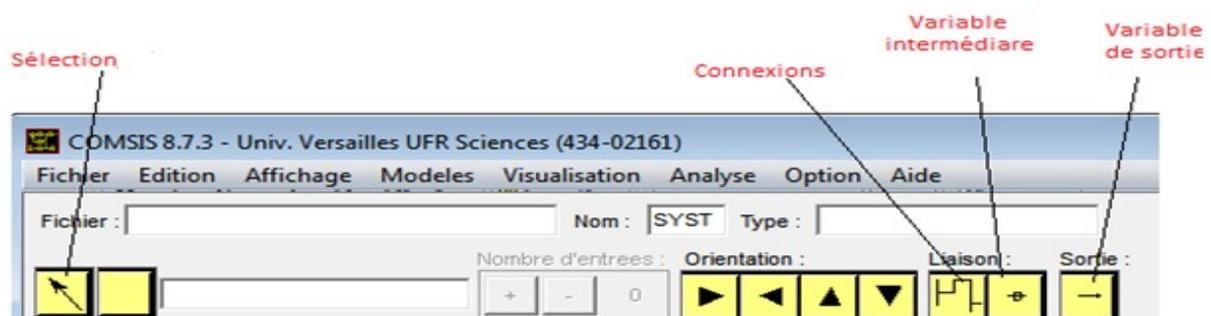
✚ Chaque élément du système étudié, par exemple une liaison point à point, est décrit Individuellement, soit par ses paramètres "système", soit par ses paramètres "physiques".

Par exemple, une diode laser peut être décrite par sa longueur d'onde, son courant de Seuil, son rendement, ..., soit par la durée de vie des photons, le volume de la couche active,...

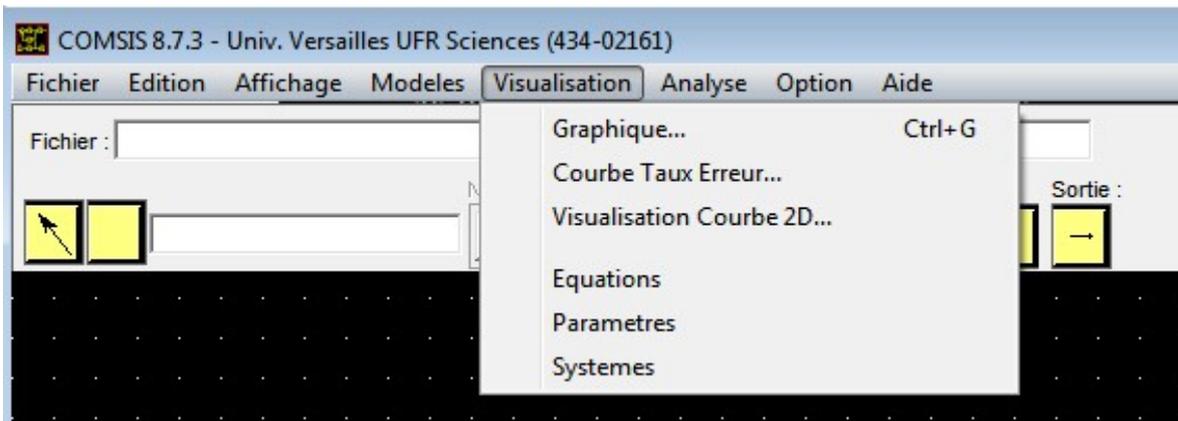
✚ On accède aux modèles (composants, sous-systèmes, canaux de propagation...) par le menu déroulant Modèle.



✚ On assemble les différents éléments au moyen de fils de connexion. On place des Variables intermédiaires pour la visualisation à la sortie de chaque module et on les Nomme. On spécifie une variable de sortie. Ces fonctions sont accessibles au niveau de la barre des tâches principale. La flèche de sélection/désélection permet de capturer une partie quelconque du schéma, de la déplacer, de la copier/coller, ou de la supprimer.



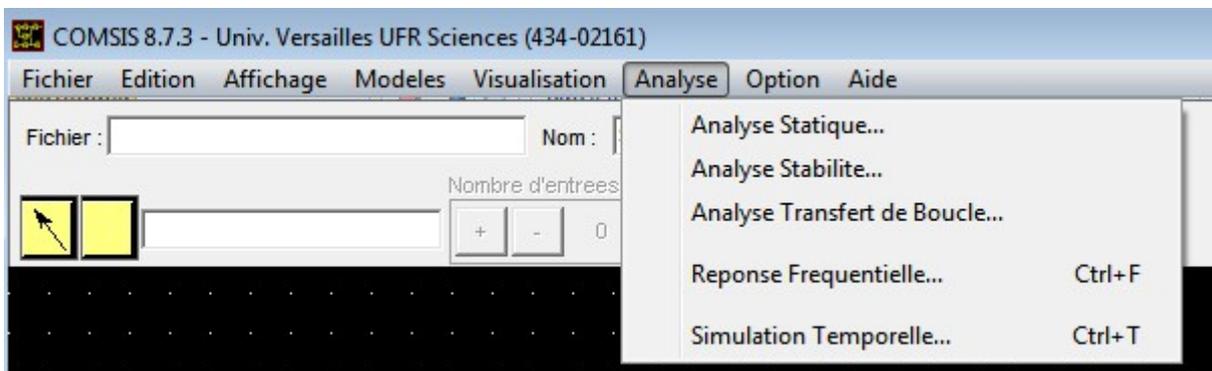
✚ A ce stade, il est possible de visualiser le système décrit lors des étapes précédentes.



Une fenêtre contextuelle, dite mode alphanumérique, permet de visualiser :

- Les équations du système ;
- Les paramètres du système ;
- La nature du système (continu ou échantillonné).

✚ La partie simulation proprement dite est accessible par le menu Analyse. Nous utiliserons principalement pour l'étude des chaînes de communications optiques, les options Analyse Statique et Analyse Temporelle.



✓ Analyse Statique : Cette fonctionnalité du logiciel permet l'étude des caractéristiques d'entrée-sortie des éléments individuels du système simulé. Par exemple, on visualise la caractéristique puissance optique/courant, la réponse en fréquence à une modulation d'amplitude d'une diode laser, l'atténuation ou la dispersion d'une fibre optique...

✓ Analyse Temporelle : Le système est simulé dans le temps. La pertinence de l'étude repose sur le choix et la description des différents éléments, ainsi que sur la nature de l'entrée et de l'ensemble des variables intermédiaires.

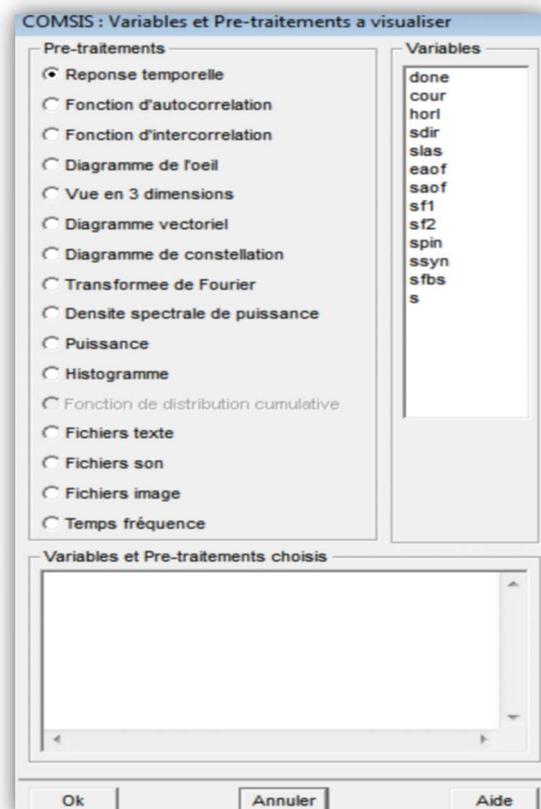
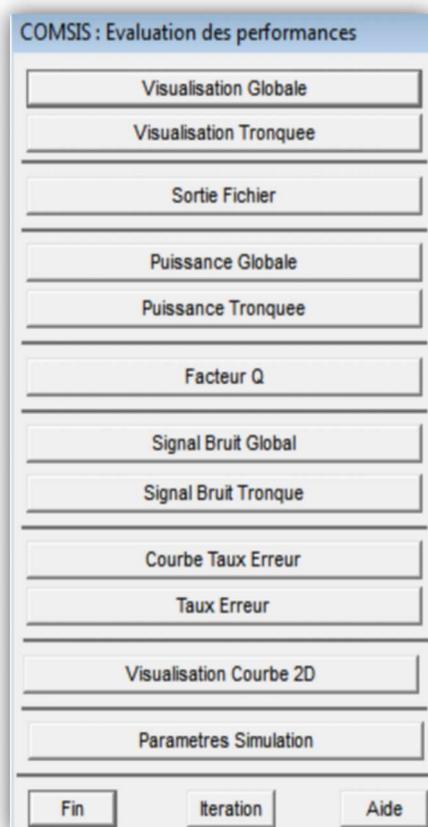
A ce stade, il n'est pas rare que l'on sache pas répondre d'emblée a toutes les questions : il est alors possible de faire appel à l'aide contextuelle de la fenêtre alphanumérique ou des fenêtres de définition des modèles .une explication sur la procédure a suivre ou la nature des paramètres a renseigner est alors fournie .

✚ La visualisation des résultats s'effectue au moyen d'une fenêtre graphique contextuelle qui offre des possibilités de configurations graphiques assez complètes. Un traitement des courbes et grandeurs visualisées est accessible par le menu Dialogue de la fenêtre graphique.

✚ Après l'étape de simulation temporelle, plusieurs options et outils sont disponibles pour l'évaluation des performances de l'ensemble :

✓ La fenêtre Evaluation des performances offre la possibilité de visualiser l'entrée, les variables intermédiaires et la sortie pendant la durée de simulation (Visualisation Globale) ou bien sur une fraction limitée de celle-ci (Visualisation tronquée), etc....

✓ Lorsque l'un des choix est effectué, par exemple Visualisation Globale, la fenêtre temporelle simple de la variable sélectionnée (Réponse temporelle), sa fonction d'autocorrélation, son diagramme de l'œil, sa puissance...



## 3.2. Schéma de liaison par fibre optique à haut débit

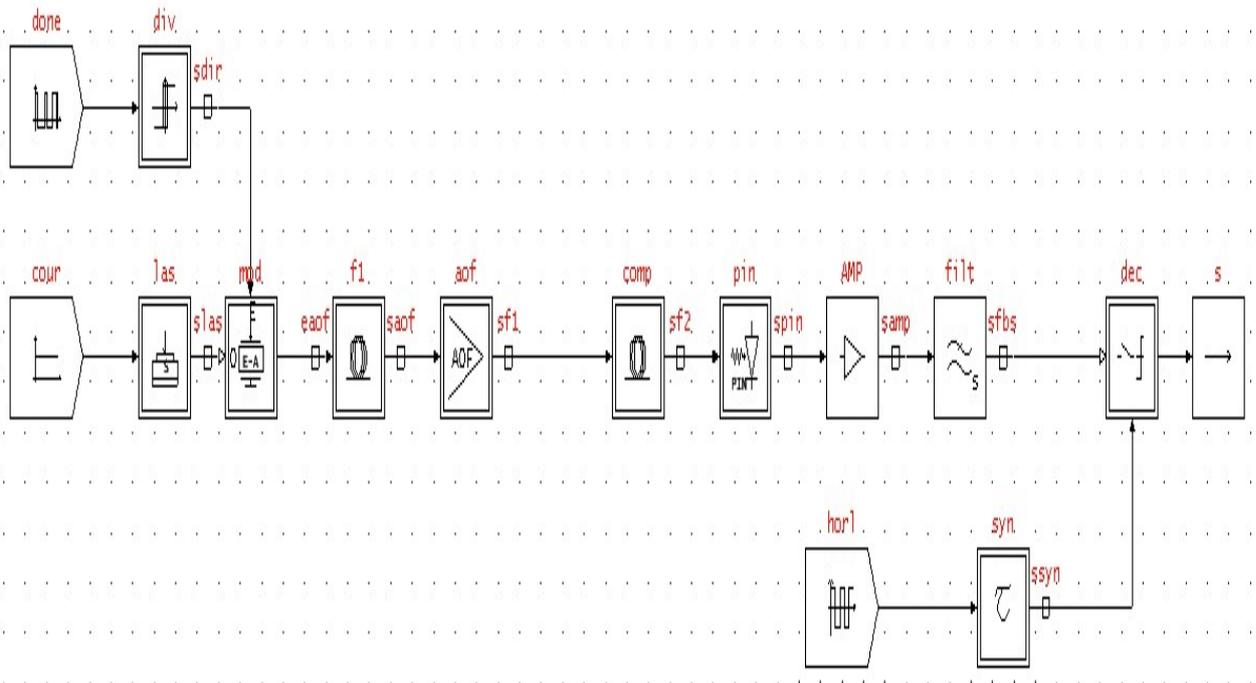


Fig. 3.1. Schéma de liaison de fibre optique à haut débit

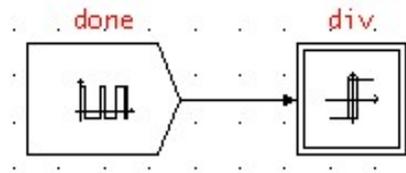
## 3.3. La partie d'émission

### 3.3.1. Les données électriques et le driver de modulateur

Les données électriques au format NRZ sont une succession de tensions de niveau haut et de niveau bas. L'opérateur du logiciel COMSIS permettant de les simuler se nomme *SEQUENCE-BINAIRE-PSEUDOALEATOIRE*.

Le modulateur électro-absorbant est tout d'abord configuré de telle sorte que la modulation d'amplitude soit maximale, afin de bien séparer les niveaux optiques pendant la transmission. Dans COMSIS, il existe un opérateur qui modifie les différents niveaux sans déformation du signal et qui jouera le rôle du driver idéal. Il s'agit du détecteur à seuils (DETECTION-SEUIL).

Les paramètres caractéristiques de cet opérateur sont présentés dans le *Tableau 3.1*:



**Fig. 3.2.** Modèle de simulation de la séquence de données avec les niveaux corrects

Generalites	
Nom :	done
Nature :	SEQUENCE-BINAIRE-PSEUDOALEATOIRE
Groupe :	Entrees
Type (en sortie) :	INDEFINI
Caracteristiques	
DEBIT BINAIRE (Mbits/s) :	1000
LONGUEUR DU REGISTRE :	12

**Tableau .3.1.** Paramètres caractéristiques de l'entrée représentant l'information à transmettre

Generalites	
Nom :	div
Nature :	DETECTION-SEUILS
Groupe :	Operateurs Classiques
Type (en sortie) :	INDEFINI
Caracteristiques	
NIVEAU BAS DE DETECTION :	-1
NIVEAU HAUT DE DETECTION :	+1
NIVEAU BAS DE SORTIE :	-4
NIVEAU HAUT DE SORTIE :	0

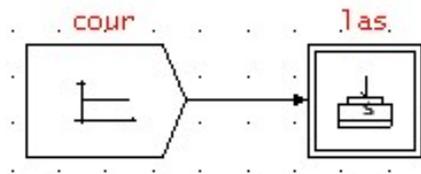
**Tableau .3. 2.** Paramètres caractéristiques du driver de modulateur.

### 3.3.2. Le LASER

L'entrée optique du MEA doit recevoir une onde optique pure. Ce modèle permet de simuler une diode laser DFB à semi-conducteur. Il est possible de le décrire soit par ses paramètres physiques internes (coefficient de gain différentiel, facteur de compression de gain, durée de vie des photons ...), soit par des grandeurs "système" ou mesurables, souvent plus accessibles, notamment par les constructeurs (courant de seuil, RIN, rendement ...). Nous utilisons donc un laser de la bibliothèque optique de COMSIS (LASER-SYSTEME).

L'entrée optique du MEA doit recevoir une onde optique pure. Nous utilisons donc un laser de la bibliothèque optique de COMSIS (LASER-SYSTEME) (*Fig.3. 3*).

Mais la puissance du signal de sortie du laser dépend du niveau du courant de commande du laser. Un bloc d'entrée (CONSTANTE) pour simuler le courant de commande du laser sera utilisé (*Fig.3. 3*).



*Fig.3. 3.* Modèle de simulation du laser avec son courant de commande.

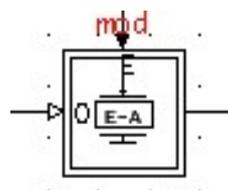
Les paramètres du laser simulé sont résumés dans le *Tableau .3. 3*:

Generalites	
Nom :	las
Nature :	LASER-SYSTEME
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	INDEFINI
Caracteristiques	
Type de definition :	<input checked="" type="radio"/> Systeme <input type="radio"/> Physiques
Longueur d'onde (nm) :	<input type="text" value="1550"/>
Courant de seuil (mA) :	<input type="text" value="25"/>
Rendement Puissance/Courant (W/A) :	<input type="text" value="0.25"/>
Largeur de raie (MHz) :	<input type="text" value="5"/> pour le courant (mA) : <input type="text" value="60"/>
Taux d'amortissement (MHz) :	<input type="text" value="2000"/> pour le courant (mA) : <input type="text" value="100"/>
Bande a -3 dB (MHz) :	<input type="text" value="10000"/>
Donnees physiques modifiables :	<input type="button" value="Donnees..."/>
Parametres Facultatifs	
<input type="checkbox"/> Espacement entre modes (nm) :	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Chirp (MHz/mA) :	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Bruit RIN (dB/Hz) :	<input type="text"/> pour le courant (mA) : <input type="text"/>
<input type="button" value="Parametres physiques..."/>	

**Tableau .3. 3.** Les paramètres du laser simulé

### 3.3.3. Le modulateur externe

Le modèle de modulateur externe de type électro-absorbant disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appelle MODULATEUR-ELECTRO-ABSORPTION. Il est représenté (*Fig.3.4*).



**Fig.3.4.** Modèle de simulation du MEA.

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

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

Les paramètres caractéristiques du MEA sont résumés dans le **Tableau .3.4** :

-Generalites-	
Nom :	mod
Nature :	MODULATEUR-ELECTRO-ABSORPTION
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	INDEFINI
-Caracteristiques-	
GAIN (OU PERTES) (dB) :	13
TENSION D'OFFSET (V) :	4
COEFFICIENT DE L'EXPOSANT DE LA FONCTION D'ABSORPTION (-) :	2
FACTEUR DE COUPLAGE PHASE-AMPLITUDE (-) :	0.5

**Tableau .3.4.** Paramètres caractéristiques du modulateur externe électro-absorbant.

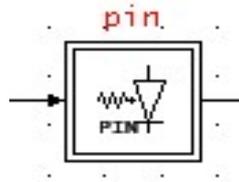
### 3.4. La partie réception

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.

#### 3.4.1. La photodiode

Le modèle disponible dans COMSIS (PHOTODIODE-PIN) (**Fig.3.5**) est un opérateur représentant une photodiode PIN.

Les paramètres caractéristiques de la photodiode sont présentés dans le **Tableau.3.5**:



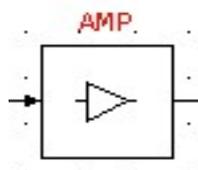
**Fig.3.5.** Modèle de simulation de la photodiode PIN

Generalites	
Nom :	pin
Nature :	PHOTODIODE-PIN
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	CONTINU
Caracteristiques	
SENSIBILITE (A/W) :	0.8
COURANT D'OBSCURITE (nA) :	5

**Tableau.3.5.** Paramètres caractéristiques de la photodiode PIN.

### 3.4.2. L'amplificateur électrique

Le signal optique a été fortement atténué durant sa propagation dans la fibre optique, et la photodiode PIN n'émet pas un courant très élevé. Une amplification du signal est donc souhaitable avant la prise de décision. Le modèle d'amplificateur électrique, disponible dans COMSIS, est un opérateur de gain, nommé GAIN (**Fig.3.6**). Ce modèle permet de multiplier le signal d'entrée par une constante.

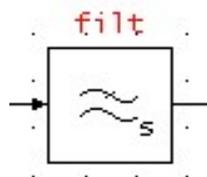


**Fig.3.6.** Modèle de simulation de l'amplificateur électrique.

Le gain de l'amplificateur électrique a été choisi de telle sorte que le signal à l'entrée du bloc de décision soit normalisé autour de ce seuil. Il est important de noter que le modèle ne prend pas en compte les contributions au bruit de l'amplificateur. Ainsi, le signal de sortie est de qualité identique au signal entrant. La valeur du gain est un paramètre formel. Pour notre simulation, il sera fixé pour avoir un diagramme de l'œil normalisé autour du seuil avant l'opérateur de décision.

### 3.4.3. Le filtre

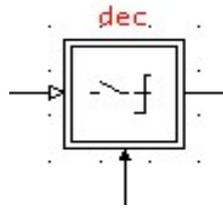
Tout au long de sa propagation, le signal a engrangé du bruit en traversant divers composants. Afin de le réduire en sortie du récepteur, il faut filtrer le signal numérique dans une bande  $0 - \Delta F$  qui soit la plus petite possible, tout en ne créant pas d'interférences inter-symboles (IES). Pour cela, nous insérons en bout de chaîne, un filtre passe-bas. Le modèle disponible dans COMSIS se nomme *FILTRE PASSE-BAS CONTINU* (**Fig.3.7**)



**Fig.3.7.** Modèle de simulation du filtre de réception.

### 3.4.4. Le régénérateur

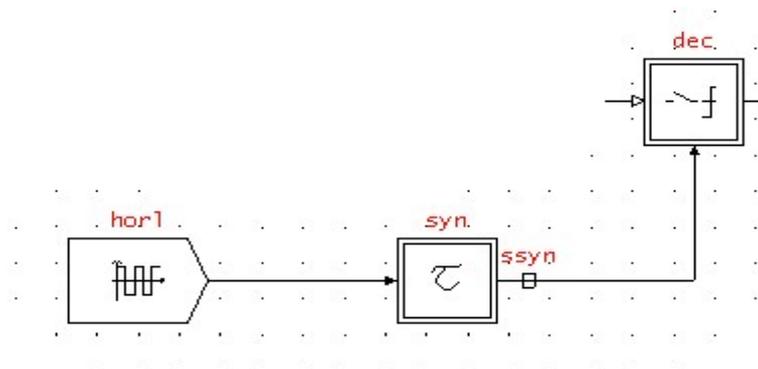
L'opérateur de décision (modèle DECISION **Fig.3.8**) disponible dans COMSIS appartient à la classe des organes de régénération. Pour notre simulation, le seuil de décision est fixé à 1,5.



**Fig.3.8.** Modèle de simulation de l'organe de décision.

La décision s'effectue sur les fronts montants de l'horloge, et doit être prise au centre du bit du signal à régénérer, lieu où les interférences entre symboles sont minimales. Ceci permet de diminuer les possibilités d'erreurs de décision. Il faut donc synchroniser l'horloge pour que les fronts montants tombent au milieu des bits du signal. Nous utilisons une horloge (HORLOGE) suivi d'un opérateur de retard (RETARD-CONTINU) et la synchronisation est effectuée visuellement, sur le diagramme de l'œil. Le circuit de régénération est représenté **Fig.3.9** :

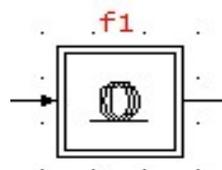
Pour notre simulation, la fréquence est fixée à 1GHz.



**Fig.3.9.** Modèle de simulation du circuit de régénération.

### 3.5. La partie transmission

#### 3.5.1. La fibre optique



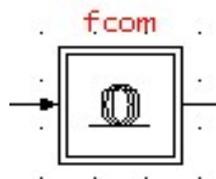
**Fig.3.10.** Modèle de simulation de la Fibre Optique.

Les paramètres caractéristiques de la fibre optique sont résumés dans le **Tableau.3.6** :

Generalites	
Nom :	f1
Nature :	FIBRE-OPTIQUE-MONOMODE
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	INDEFINI
Caracteristiques	
Longueur de la fibre (km) :	53
Coefficient d'attenuation (dB/km) :	0.25
Dispersion chromatique (ps/nm/km) :	Constante 17
Effet Kerr :	<input checked="" type="radio"/> Oui <input type="radio"/> Non
Effet Raman :	<input type="radio"/> Oui <input checked="" type="radio"/> Non
Coefficient de non linearite de la fibre (m <sup>2</sup> /W) :	2.7e-20
Gain Raman (m <sup>2</sup> /W) :	7.48e-21
Frequence de resonance (THz) :	12
Demi-largeur de raie Raman (THz) :	6.432
Aire effective de la section de la fibre (micro m <sup>2</sup> ) :	80
Type de discretisation de la longueur :	<input checked="" type="radio"/> Fixe <input type="radio"/> Variable
Valeur du pas (km) :	5
Valeur initiale du pas (km) :	
Dispersion Modale de Polarisation :	<input type="radio"/> Oui <input checked="" type="radio"/> Non
Birefringence lineique (ps/km) :	
Longueur de couplage (km) :	
Etat de la fibre	
Retard introduit par la fibre (ns) :	0

**Tableau.3.6** Les paramètres de la fibre optique

### 3.5.2. La fibre optique compensatrice



**Fig.3.11.** Modèle de simulation de la F.O de Compensation.

Les paramètres caractéristiques de la fibre optique sont résumés dans le **Tableau.3.7**:

Generalites	
Nom :	comp
Nature :	FIBRE-OPTIQUE-MONOMODE
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	INDEFINI
Caracteristiques	
Longueur de la fibre (km) :	11.25
Coefficient d'attenuation (dB/km) :	0.6
Dispersion chromatique (ps/nm/km) :	Constante -80
Effet Kerr :	<input checked="" type="radio"/> Oui <input type="radio"/> Non
Effet Raman :	<input type="radio"/> Oui <input checked="" type="radio"/> Non
Coefficient de non linearite de la fibre (m <sup>2</sup> /W) :	7e-20
Gain Raman (m <sup>2</sup> /W) :	7.48e-21
Frequence de resonance (THz) :	12
Demi-largeur de raie Raman (THz) :	6.432
Aire effective de la section de la fibre (micro m <sup>2</sup> ) :	30
Type de discretisation de la longueur :	<input checked="" type="radio"/> Fixe <input type="radio"/> Variable
Valeur du pas (km) :	5
Valeur initiale du pas (km) :	
Dispersion Modale de Polarisation :	<input type="radio"/> Oui <input checked="" type="radio"/> Non
Birefringence lineique (ps/km) :	
Longueur de couplage (km) :	
Etat de la fibre	
Retard introduit par la fibre (ns) :	0

**Tableau.3.7** Les paramètres de la fibre optique compensation

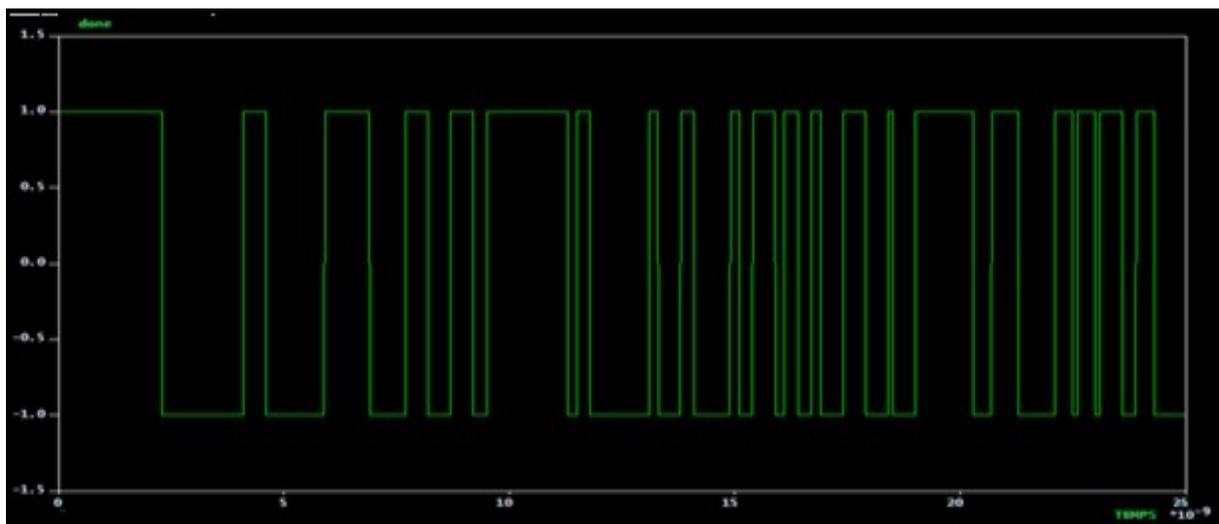
### 3.6. Résultats de la simulation

Dans un premier temps, nous avons considéré une liaison ayant les caractéristiques suivantes :

- Débit (40 Gbit/s).
- La longueur. (50 km)

#### Signal d'entrée

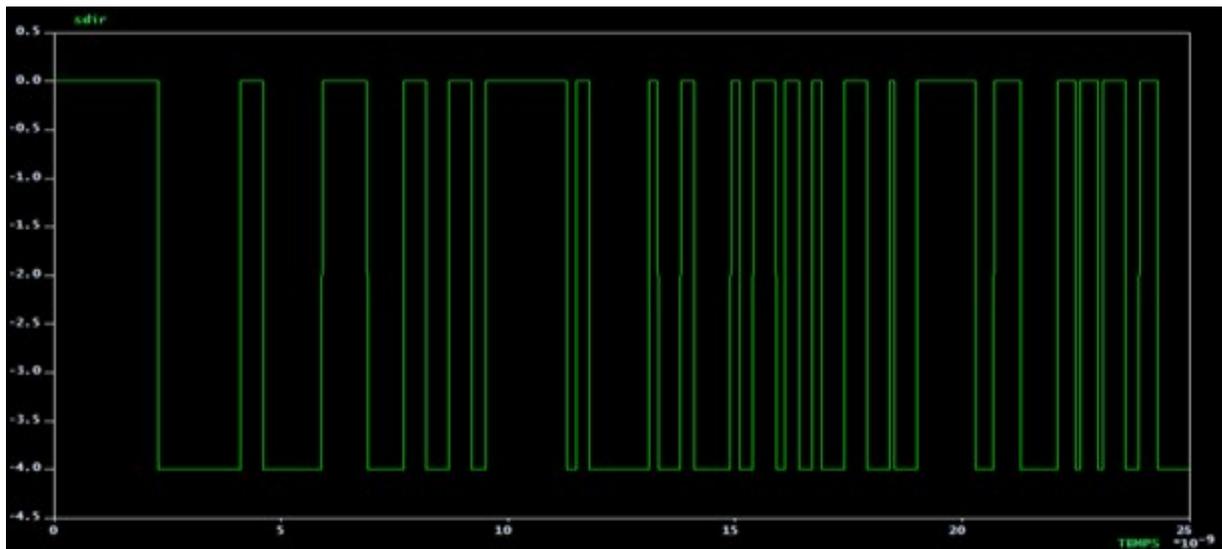
Nous avons noté à partir de la *Fig.3.12* que La SEQUENCE-BINAIRE-PSEUDOALEATOIRE délivre une séquence de créneaux d'amplitude  $\pm 1$ .



*Fig.3.12.* représentation du séquence-binaire-pseudoaléatoire.

#### Sortie de détection-seuil

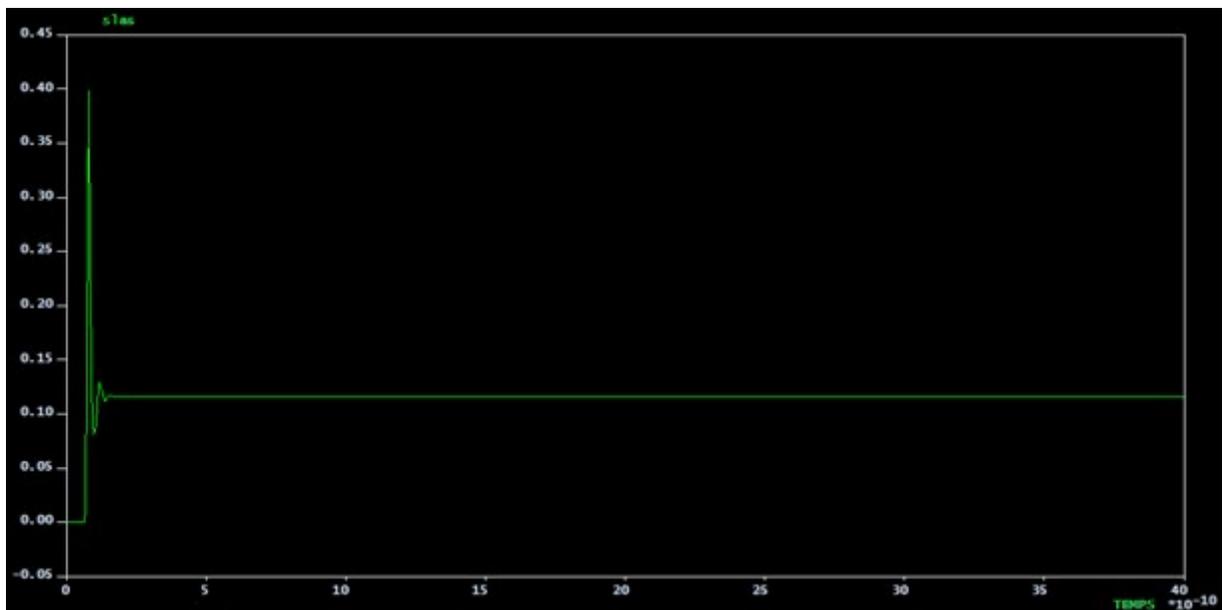
Nous avons noté à partir de la *Fig.3.13* que le driver idéal fait passer le niveau bas de -1 V à -4 V et le niveau haut de +1 V à 0 V, sans perturber l'allure du signal.



*Fig.3.13.*représentation de la sortie de détection-seuil.

### Sortie du laser

A partir de schéma suivant (*Fig.3.14*), on remarque que la puissance de sortie du laser est continue.



*Fig.3.14.*représentation de la sortie du laser.

### Sortie du modulateur

La Fig.3.15 Indique que le signal lumineux modulé et atténué à la sortie du modulateur

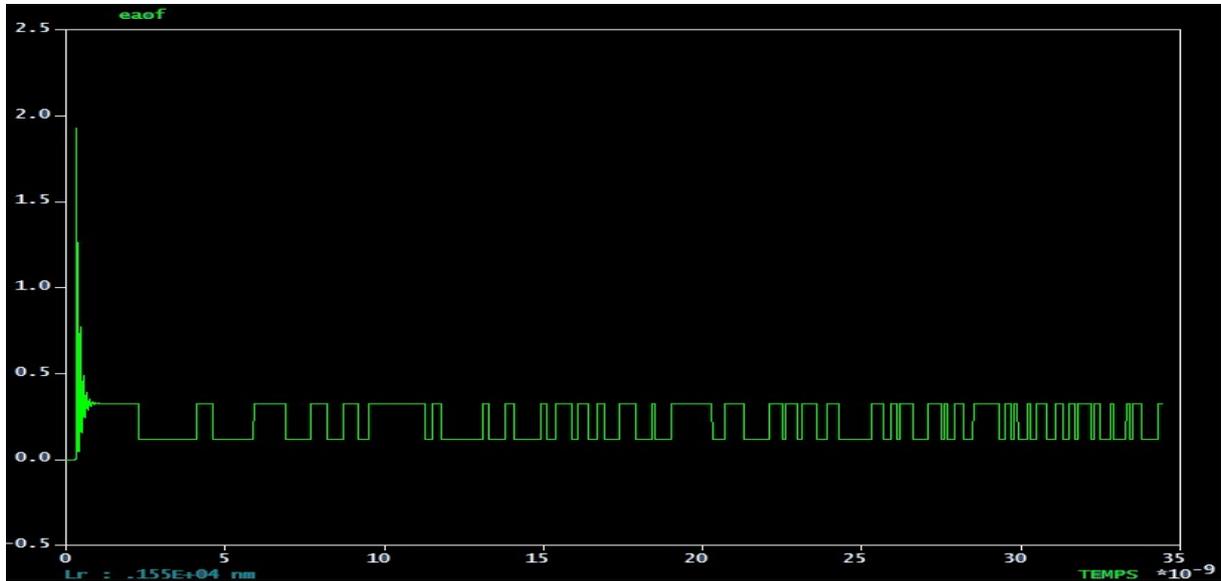


Fig.3.15.représentation de la sortie du modulateur.

### Sortie de la fibre de transmission

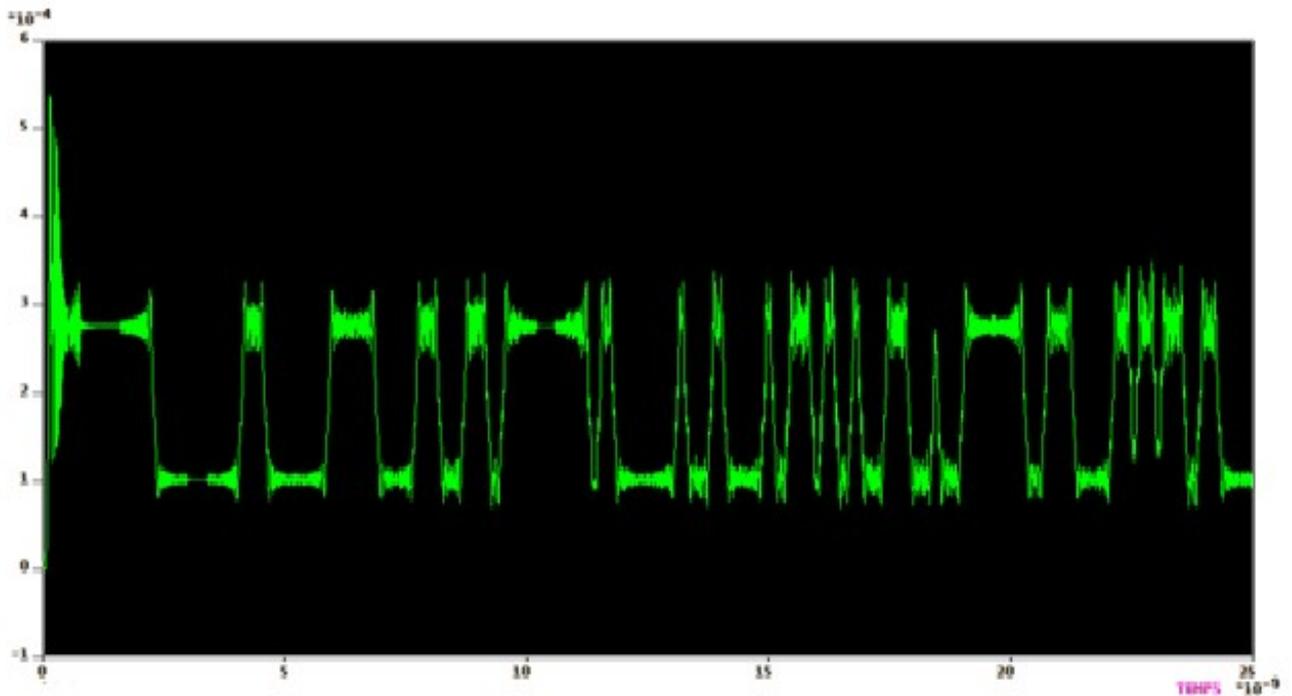
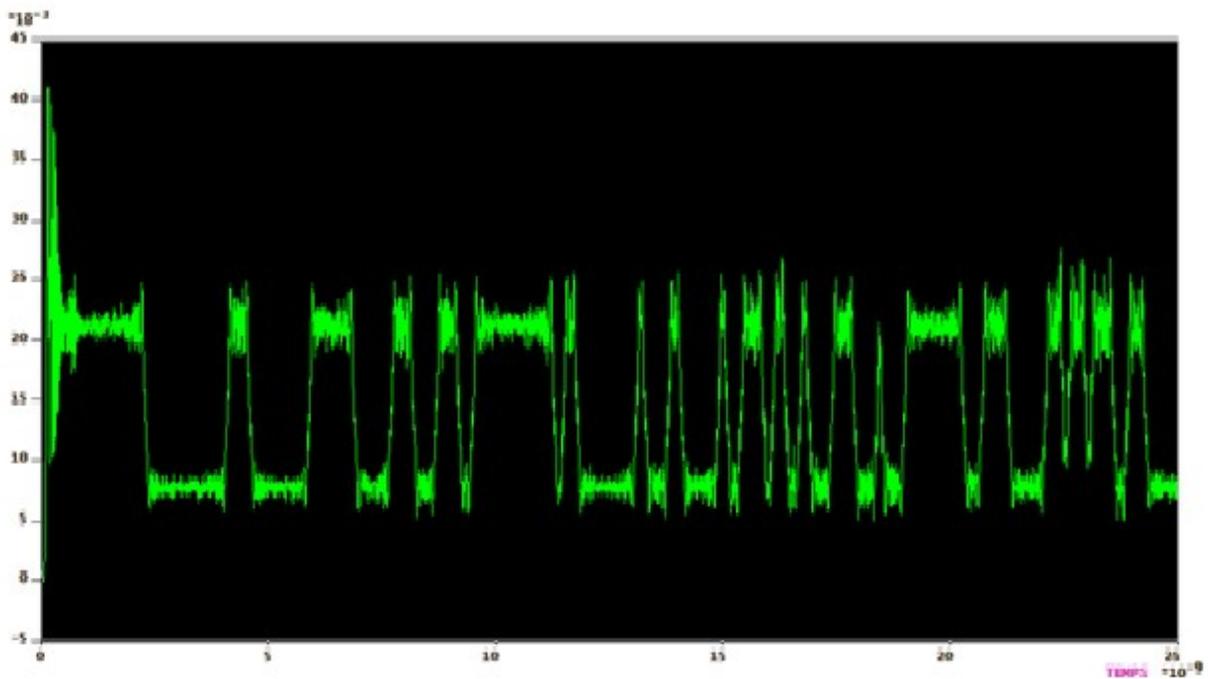


Fig.3.16.représentation de la sortie de fibre de transmission.

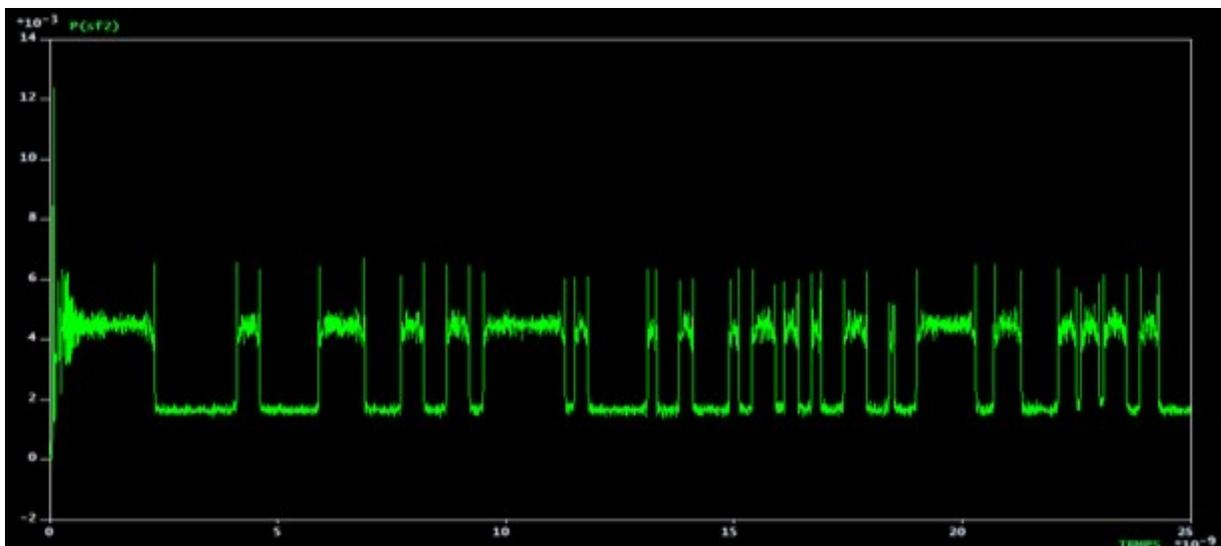


 **Sortie de l'amplificateur**

*Fig.3.17.*représentation de la sortie de l'amplificateur.

 **Sortie de la fibre de compensation**

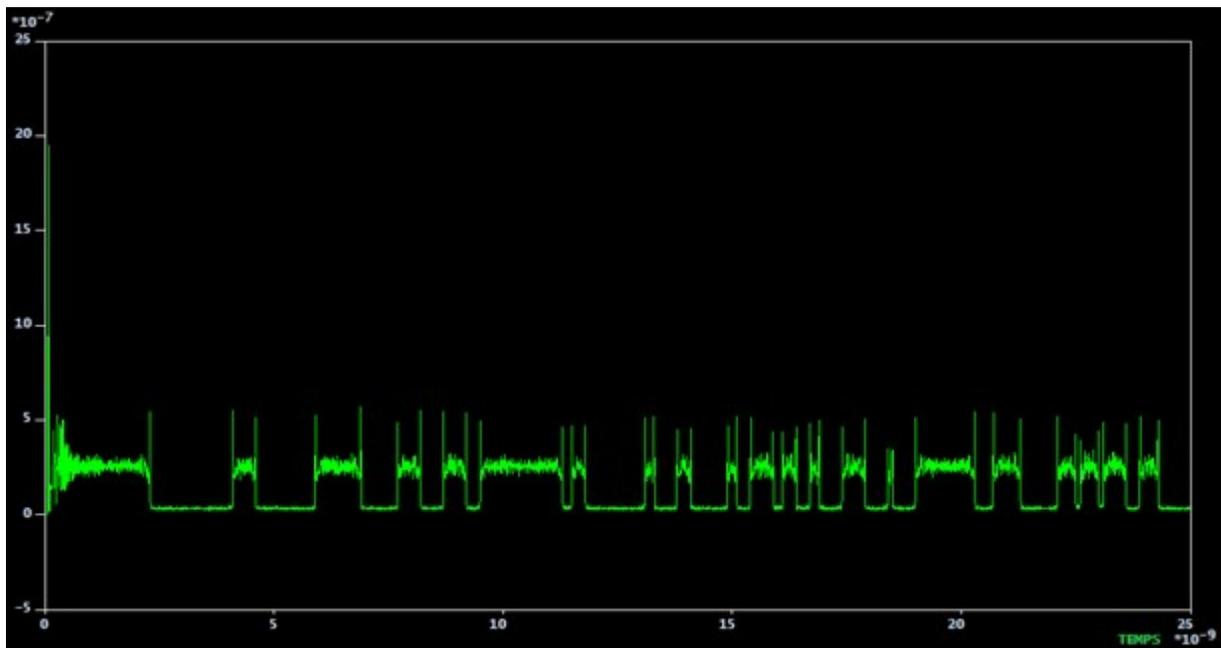
Sur la représentation graphique ci dessous, nous avons noté que la fibre de compensation de dispersion assure bien la mise en forme des données .



*Fig.3.18.*représentation de la sortie de la fibre de compensation.

### Sortie de la photodiode

On remarque que le signal lumineux modulé par les données électriques a fait un parcours acceptable jusqu'à sa détection par la photodiode PIN qui délivre un courant faible (*Fig.3.19*).



*Fig.3.19.*représentation de la sortie de la photodiode.

### Sortie d'amplificateur

Le signal de sortie de l'amplificateur est amplifié.

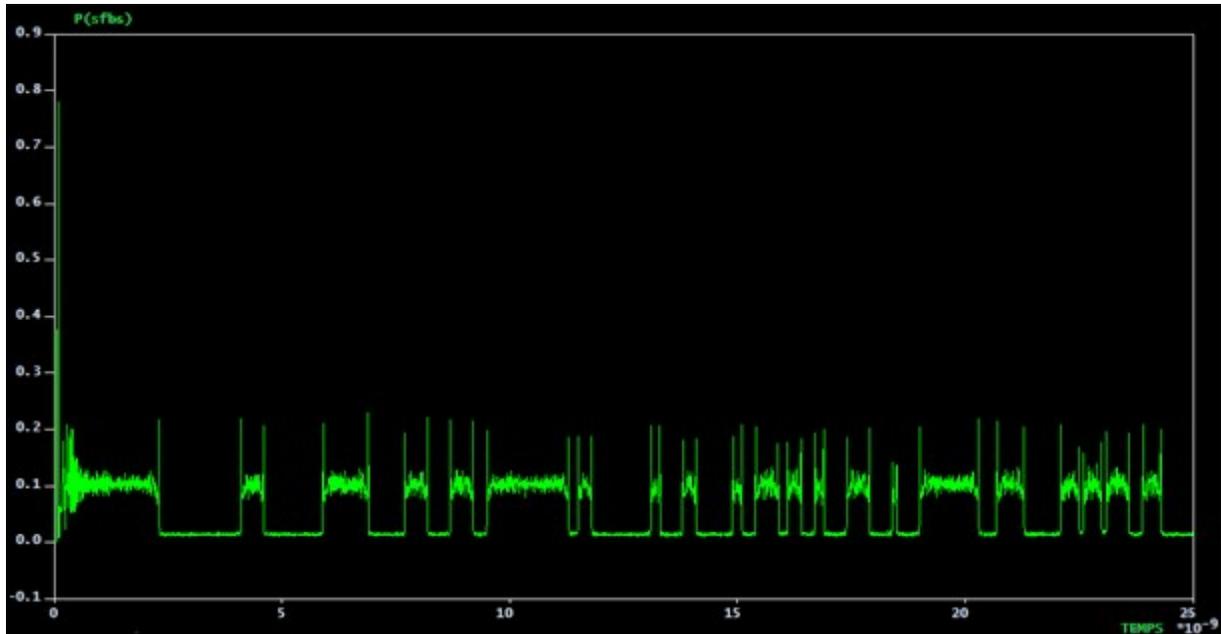
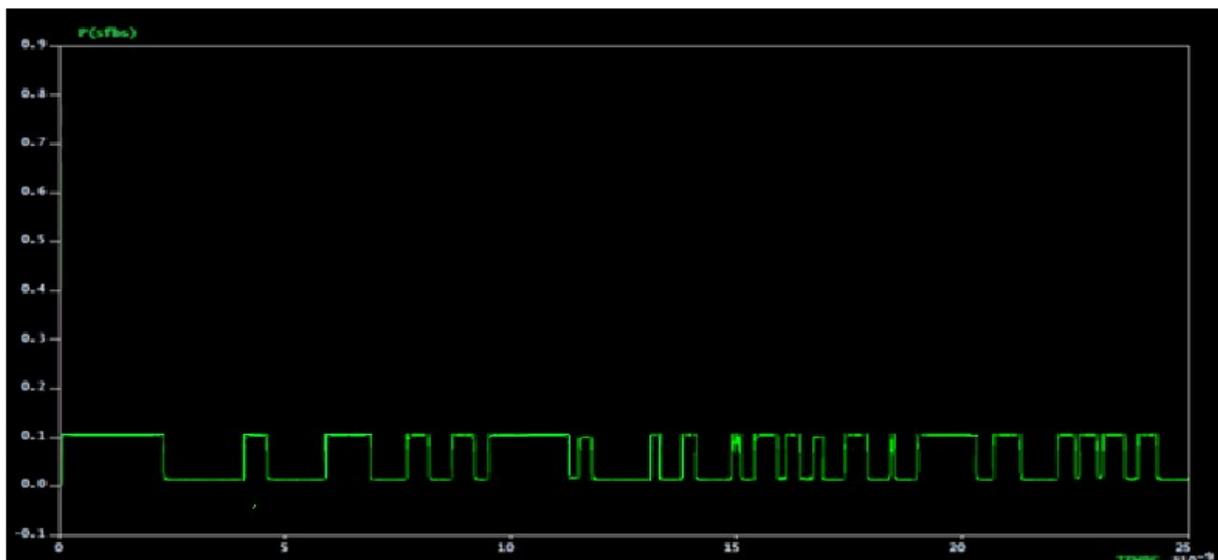


Fig.3.20.représentation de la sortie d'amplificateur.

### Sortie du filtre de réception

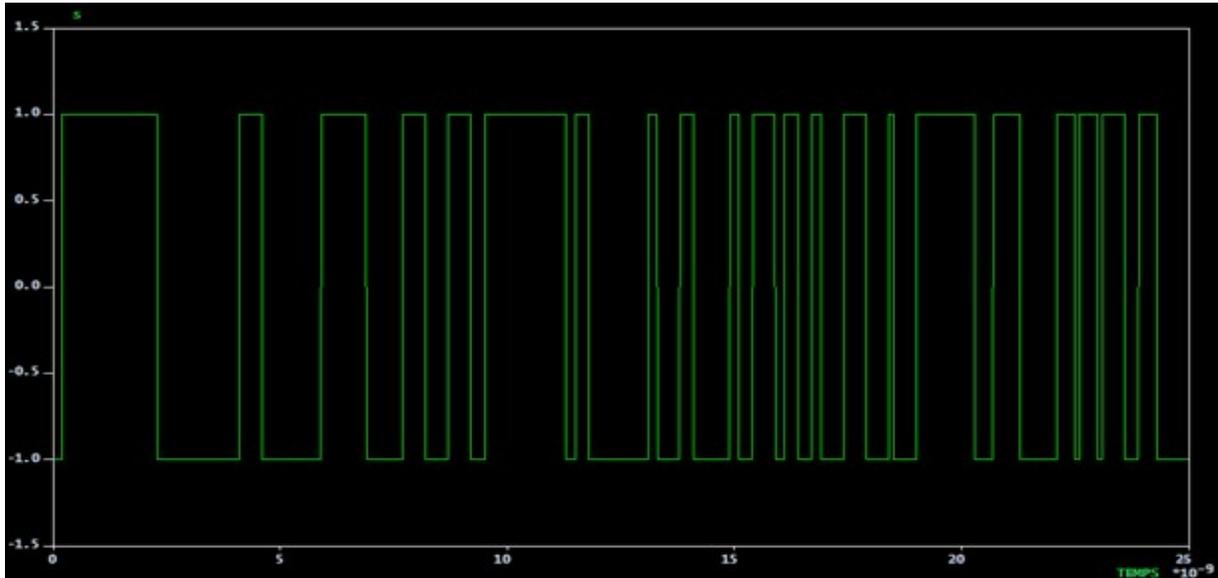
A partir de Fig.3.21 on remarque qu'à la sortie du filtre de réception, le signal est amplifié et bien filtré.



*Fig.3.21.*représentation de la sortie du filtre de réception.

 **Signal de sortie**

On observe qu'il n'y a pas d'erreurs à la sortie de la liaison.



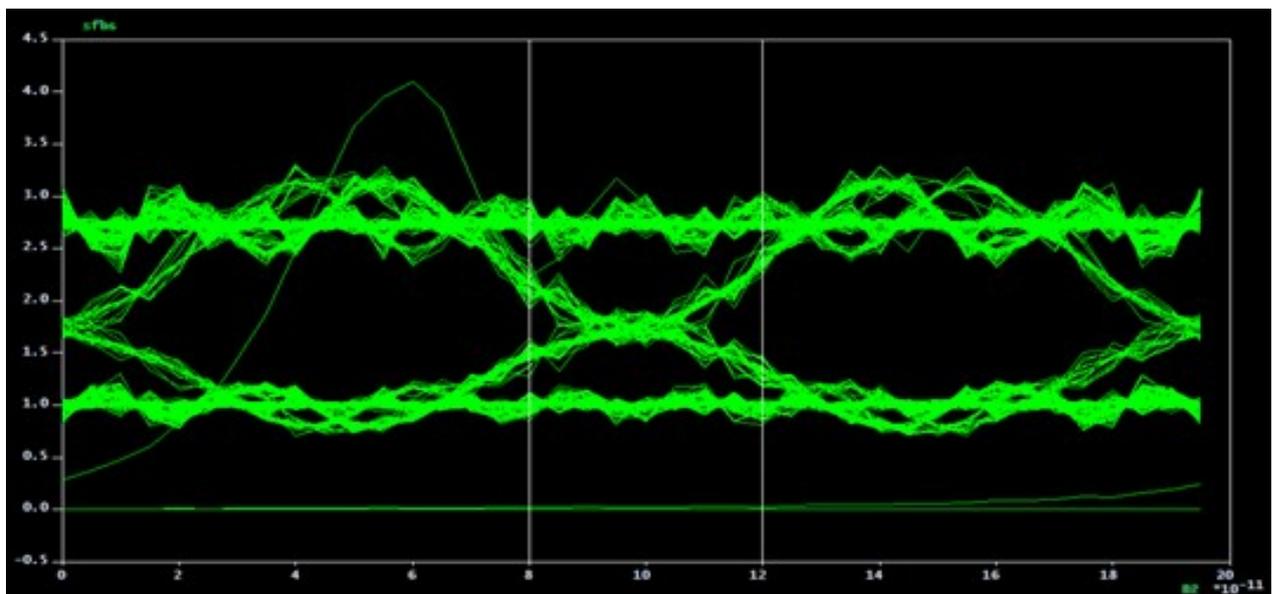
*Fig.3.22.*représentation du signal de sortie.

### 3.7.1 Influence du débit sur les caractéristiques de la liaison

Dans cette simulation on va étudier le signal de sortie S en fonction du débit, en fixant la longueur de la liaison à 50 Km.

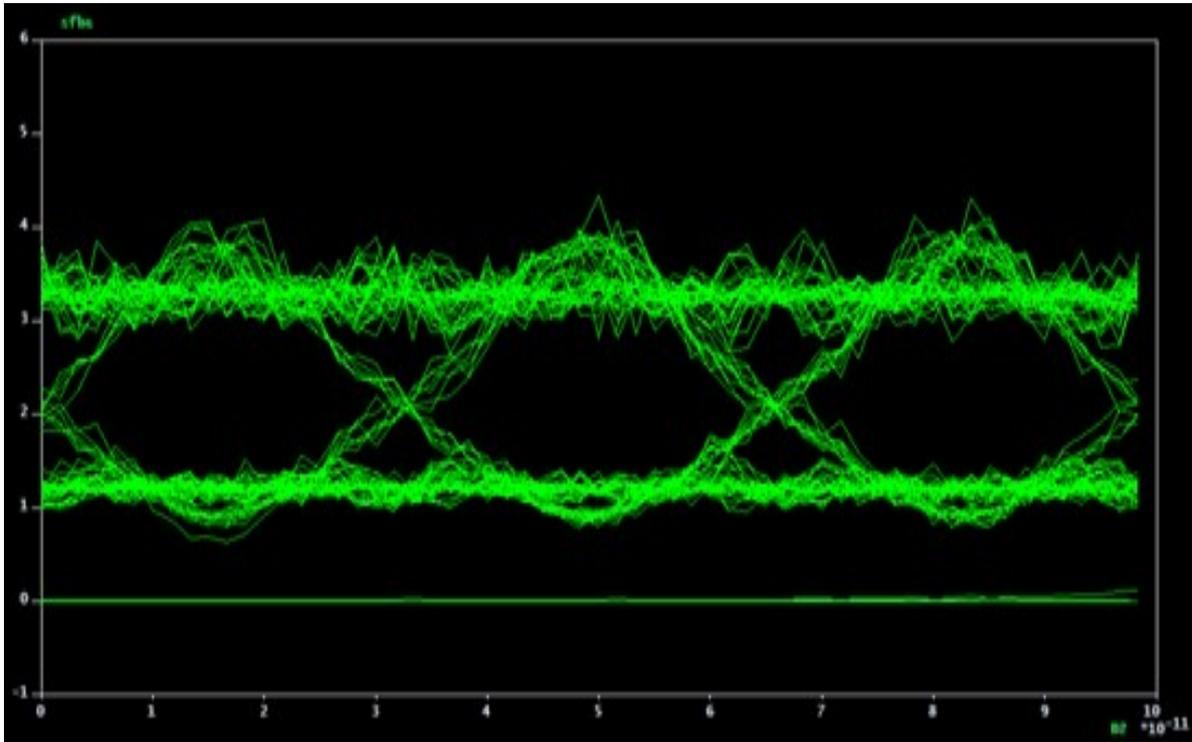
Le diagramme de l'œil est visualisé en sortie du filtre de réception, juste avant la prise de décision.

#### a. Une liaison de 10 Gbits/s



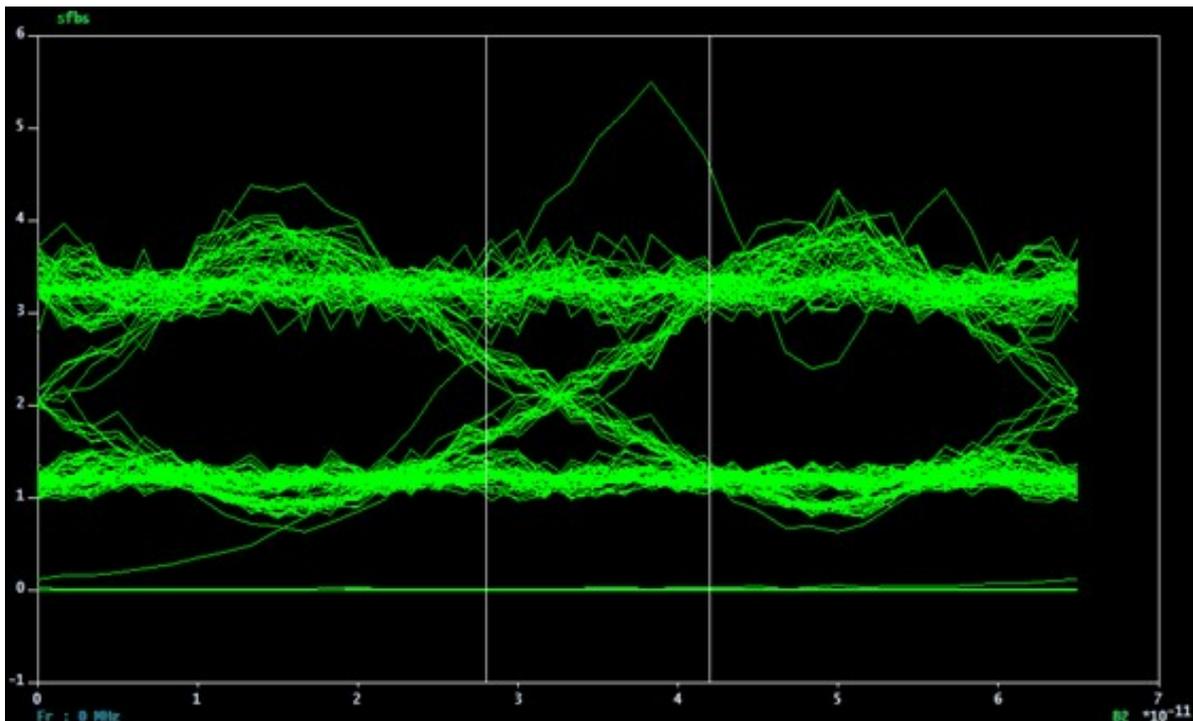
*Fig.3.23.*Diagramme de l'œil de la sortie S pour d=10Gbits/s

**b. Une liaison de 20 Gbits/s**



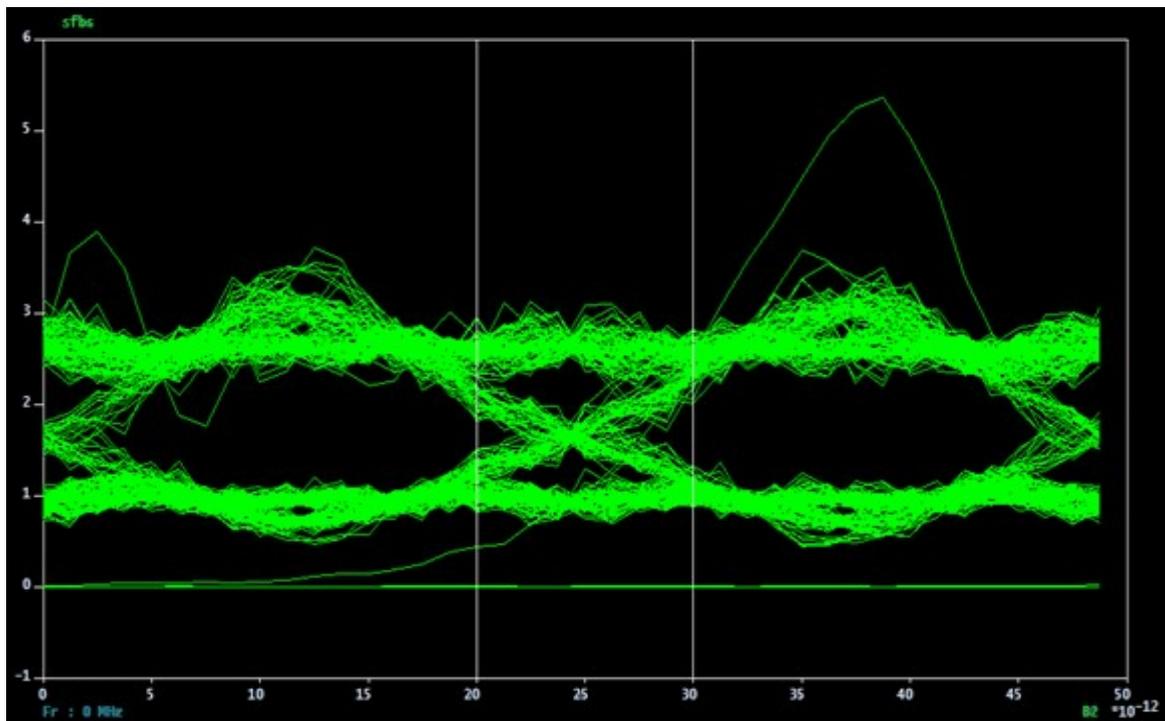
*Fig.3.24.* Diagramme de l'œil de la sortie S pour d=20Gbits/s

**c. Une liaison de 30 Gbits/s**



**Fig.3.25.**Diagramme de l'œil de la sortie S pour d= 30Gbits/s

**d. Une liaison de 40 Gbits/s**



**Fig.3.26.**Diagramme de l'œil de la sortie S pour d= 40Gbits/s

Débit Binaire (Mhz)	Facteur Q	TEB
10000	4.77	9.62 E-07
20000	3.40	3.60 E-04
30000	2.66	4.32 E-03
40000	2.02	2.54 E-02

**Tableaux.3.8.** Représente les valeurs de TEB et facteur Q de signal de sortie S en fonction du débit

A partir de ces quatre figures et avec l'analyse du facteur Q et du TEB, on remarque que le signal de sortie a subi une déformation lors de l'augmentation du débit et l'ouverture

verticale du diagramme de l'œil se dégrade à cause de l'interférence inter-symboles, et les grandeurs facteur Q et le TEB confirment cette affaiblissement de qualité du signal.

### 3.7.2. Influence de la longueur de la fibre sur les caractéristiques de la liaison

Dans cette simulation on va étudier le signal de sortie S en fonction de la longueur de la fibre, et on fixe le débit à 40 GHz.

Le diagramme de l'œil est visualisé en sortie du filtre de réception, juste avant la prise de décision.

#### a. Une liaison de 10km

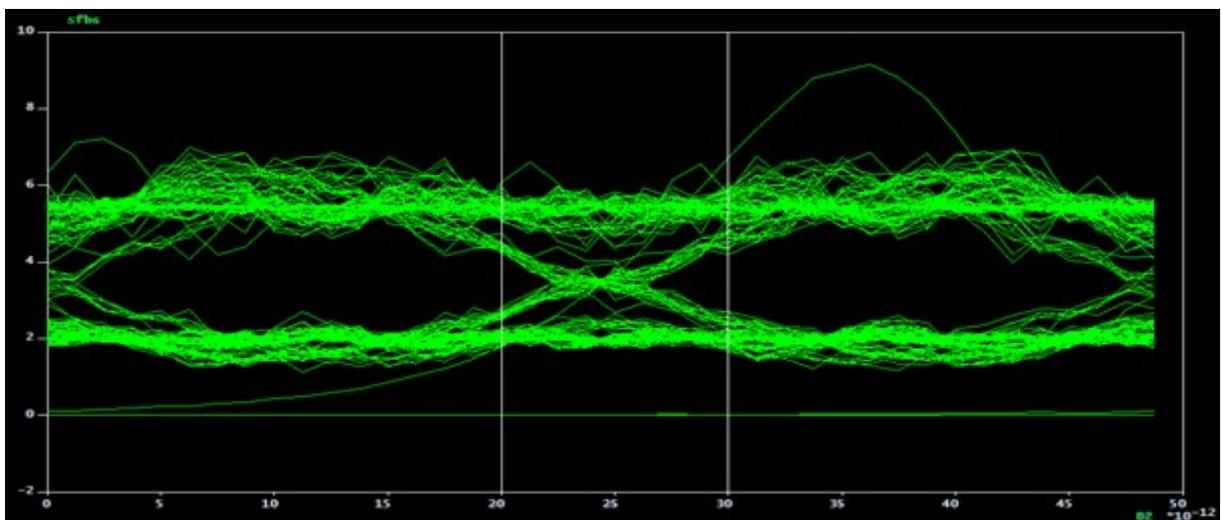
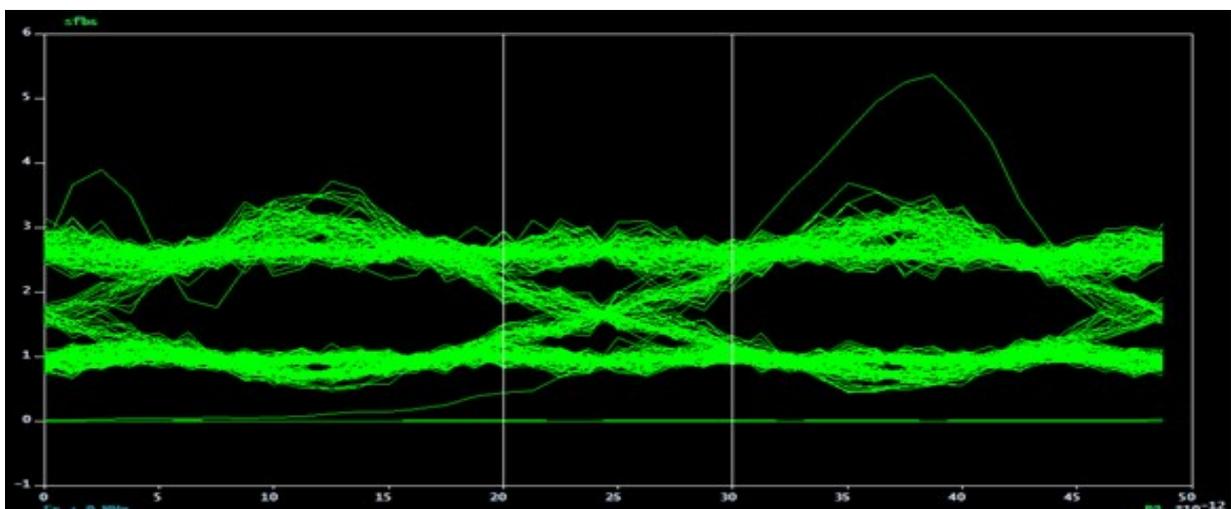


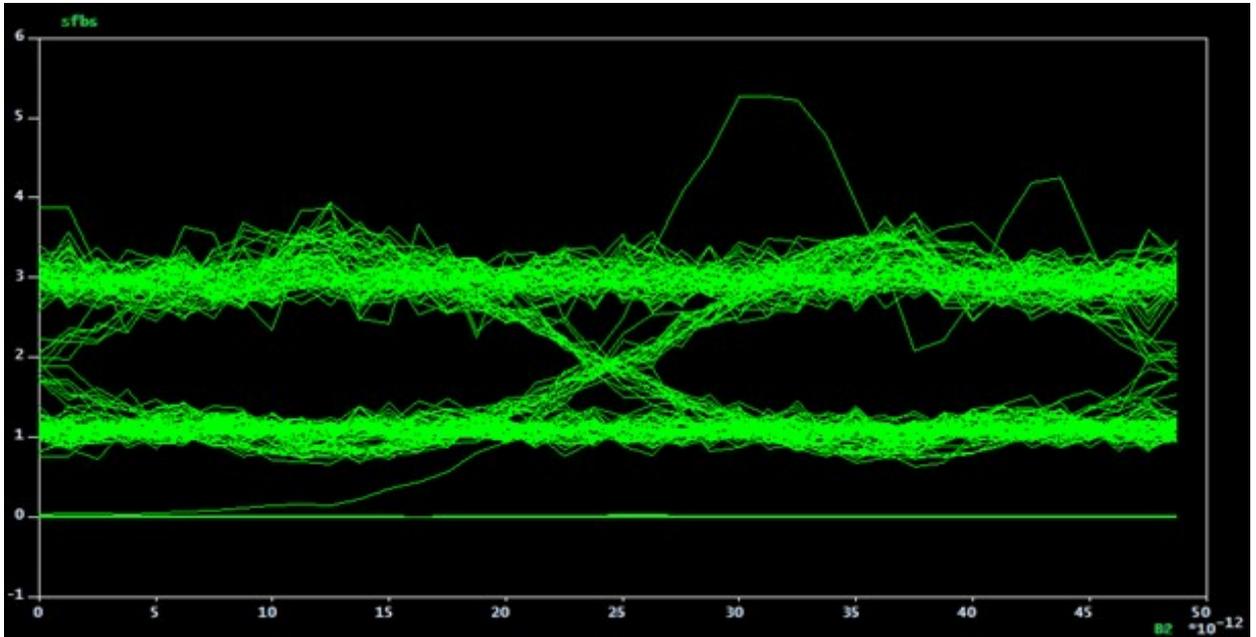
Fig.3.27. Diagramme de l'œil de la sortie S pour L=10km

#### b. Une liaison de 50km



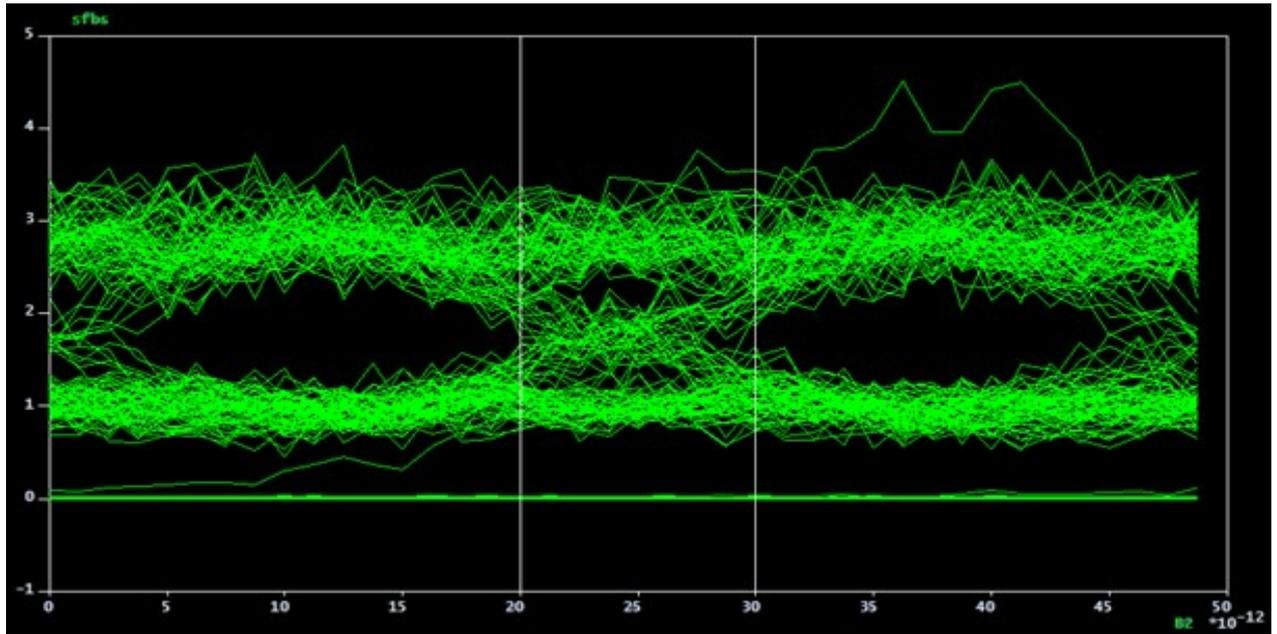
*Fig.3.28.* Diagramme de l'œil de la sortie S pour L=50km

c. Une liaison de 80km



*Fig.3.29.* Diagramme de l'œil de la sortie S pour L=80km

d. Une liaison de 100km



**Fig.3.30.**Diagramme de l'œil de la sortie S pour L=100km

**Tableaux.3.9.** Représente les valeurs de TEB et facteur Q de signal de sortie S en fonction de la longueur de la fibre

L'augmentation de la longueur influe en sens inverse sur la qualité du signal à la sortie, en comparant les quatre figures de cette liaison, on observe que l'ouverture verticale a diminué à cause de l'interférence inter-symbole, et les grandeurs facteur Q et le TEB confirment cette affaiblissement de qualité du signal.

## Listes des acronymes et abréviations

LED	Light Emitting Diode
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
DFB	Distributed Feed Back
PDA	PhotoDiode à avalanche
TDM	Time Division Multiplexing
OTDM	Optical Time Division Multiplexing
E TDM	Electronic Time Division
WDM	Wavelength Division Multiplexing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
UDWM	Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing
CDMA	Code Division Multiple Access
AOSC	Amplificateur optique à semi-conducteurs
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
OXC	Optical cross connect
TEB	Taux d'Erreur Binaire
COMSIS	COMmunication System Interactive Software



# Liste des figures

## CHAPITRE I

<i>Fig. 1.1</i> système de communication à fibre optique.....	3
<i>Fig. 1.2</i> répéteur optique.....	4
<i>Fig. 1.3</i> système générale de communication à fibre optique avec connecteurs.....	4
<i>Fig.1.4.</i> structure d'une fibre optique.....	5
<i>Fig.1.4 a)</i> Réfraction d'un rayon lumineux pour $\theta_1 < \theta_c$ .....	6
<i>Fig.1.4 b)</i> rayon critique lorsque $\theta_1 = \theta_c$ .....	6
<i>Fig.1.4 c)</i> réflexion totale interne pour $\theta_1 > \theta_c$ .....	6
<i>Fig. 1.5.</i> Coupe longitudinale d'une fibre optique.....	7
<i>Fig.1.9</i> Fibre monomode.....	9
<i>Fig.1.10</i> Fibre multimodes à saut d'indice.....	10
<i>Fig.1.11</i> Fibre multimodes à gradient d'indice.....	10
<i>Fig.1.6</i> Atténuation spectrale d'une fibre optique.....	11
<i>Fig.1.8</i> intensité relative en fonction de longueur d'onde.....	13
<i>Fig.1.12.</i> LED (Diode électroluminescente).....	16
<i>Fig.1.13.</i> Spectre d'émission d'une diode électroluminescente.....	18
<i>Fig.1.14</i> Digramme de rayonnement.....	18
<i>Fig. 1.12</i> Un laser est un oscillateur composé d'un milieu amplificateur (A) et d'une boucle de contre réaction (CR).....	19
<i>Fig.1.16</i> .Diode LASER.....	19
<i>Fig. 1.17</i> Dans le cas d'un semi-conducteur, les niveaux E2 et E1 appartiennent à des continuums situés dans les bandes de conduction et de valence.....	20
<i>Fig. 1.18</i> : Absorption.....	21
<i>Fig. 1.19</i> : Emission stimulée.....	21
<i>Fig.1.20.</i> Spectre d'émission d'une diode laser.....	23

<b>Fig. 1 .21 a)</b> évolution de la puissance optique avec l'angle dans les directions Ox et OY	24
<b>Fig. 1 .21 b)</b> Diagramme de rayonnement .On a seulement représenté la zone active et le lobe est mesuré à mi puissance.....	24
<b>Fig.1.22.</b> Coefficient et longueur d'absorption des matériaux semi-conducteurs.....	28
<b>Fig.1.23.</b> Courbes de sensibilité et de rendement selon les longueurs d'onde pour divers matériaux.....	30
<b>Fig.1.24.</b> Photodiode PIN.....	31
<b>Fig.1.25.a)</b> Diode PIN comme détecteur de lumière. b) Diagramme d'énergie correspond	31
<b>Fig.1.26.</b> Photodiode à avalanche ( <i>PDA</i> )	32
<b>Fig.1.27 .</b> Multiplication par avalanche des paires électron-trou dans la région intrinsèque dans une diode PIN polarisée dans le sens bloquant.....	33
<b>Fig.1.28.</b> Photodiode à avalanche $p^+n^+i$ comme détecteur de lumière et diagramme d'énergie des électrons correspondant.....	34

## CHAPITRE II

<b>Fig.2.1.</b> Synoptique de la modulation direct.....	36
<b>Fig.2.2</b> Synoptique de la modulation externe.....	37
<b>Fig.2.3</b> Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder.....	38
<b>Fig.2.4.</b> Structure d'un guide d'onde en arête contenant un matériau électro-absorbant.....	39
<b>Fig. 2.5.</b> Répartition des périodes dans le cas du TDM.....	40
<b>Fig. 2.6.</b> Synoptique d'un multiplexage OTDM.....	41
<b>Fig.2.7.</b> Synoptique d'un multiplexage ETDM.....	42
<b>Fig. 2 .8.</b> Schéma de principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre optique (avec 3 longueurs d'ondes).....	43
<b>Fig. 2 .9.</b> Utilisation du WDM couplé avec l'amplification optique.....	44
<b>Fig. 2 .10.</b> Schéma d'un amplificateur à semi-conducteur.....	45
<b>Fig.2.11 .</b> principe de l'amplification optique.....	46
<b>Fig.2.12.</b> Exemple de diagramme de l'œil.....	52
<b>Fig.2.13.</b> Canal Binaire Asymétrique.....	53

### Chapitre III

<i>Fig. 3.1.</i> Schéma de liaison de fibre optique à haut débit.....	58
<i>Fig. 3.2.</i> Modèle de simulation de la séquence de données avec les niveaux corrects	59
<i>Fig.3. 3.</i> Modèle de simulation du laser avec son courant de commande.....	60
<i>Fig.3.4.</i> Modèle de simulation du MEA.....	61
<i>Fig.3.5.</i> Modèle de simulation de la photodiode PIN.....	63
<i>Fig.3.6.</i> Modèle de simulation de l'amplificateur électrique.....	63
<i>Fig.3.7.</i> Modèle de simulation du filtre de réception.....	64
<i>Fig.3.8.</i> Modèle de simulation de l'organe de décision.....	65
<i>Fig.3.9.</i> Modèle de simulation du circuit de régénération.....	65
<i>Fig.3.10.</i> Modèle de simulation de la Fibre Optique.....	65
<i>Fig.3.11.</i> Modèle de simulation de la F.O de Compensation.....	66
<i>Fig.3.12.</i> Représentation du séquence-binaire-pseudoaléatoire.....	68
<i>Fig.3.13.</i> Représentation de la sortie de détection-seuil.....	69
<i>Fig.3.14.</i> Représentation de la sortie du laser.....	69
<i>Fig.3.15.</i> Représentation de la sortie du modulateur.....	70
<i>Fig.3.16.</i> Représentation de la sortie de fibre de transmission.....	70
<i>Fig.3.17.</i> Représentation de la sortie de l'amplificateur.....	71
<i>Fig.3.18.</i> Représentation de la sortie de la fibre de compensation.....	71
<i>Fig.3.19.</i> Représentation de la sortie de la photodiode.....	72
<i>Fig.3.20.</i> représentation de la sortie d'amplificateur.....	73
<i>Fig.3.21.</i> Représentation de la sortie du filtre de réception.....	73
<i>Fig.3.22.</i> Représentation du signal de sortie.....	74
<i>Fig.3.23 :</i> Diagramme de l'œil de la sortie S pour d=10Gbits/s.....	75
<i>Fig.3.24.</i> Diagramme de l'œil de la sortie S pour d=20Gbits/s.....	76
<i>Fig.3.25.</i> Diagramme de l'œil de la sortie S pour d= 30Gbits/s.....	76
<i>Fig.3.26.</i> Diagramme de l'œil de la sortie S pour d= 40Gbits/s.....	77

**Fig.3.27.** Diagramme de l'œil de la sortie S pour L=10km..... 78

**Fig.3.28.** Diagramme de l'œil de la sortie S pour L=50km..... 78

**Fig.3.29.** Diagramme de l'œil de la sortie S pour L=80km..... 79

**Fig.3.30.** Diagramme de l'œil de la sortie S pour L=100km..... 79

## Liste des tableaux

<b>Tableau.1.1.</b> caractéristique de laser DFB utilisés dans les transmissions optiques.....	25
<b>Tableau.3.1.</b> Paramètres caractéristiques de l'entrée représentant l'information à transmettre.....	59
<b>Tableau .3. 2.</b> Paramètres caractéristiques du driver de modulateur.....	59
<b>Tableau .3. 3.</b> Les paramètres du laser simulé.....	62
<b>Tableau .3.4.</b> Paramètres caractéristiques du modulateur externe électro-absorbant..	62
<b>Tableau.3.5.</b> Paramètres caractéristiques de la photodiode PIN.....	63
<b>Tableau.3.6</b> Les paramètres de la fibre optique .....	66
<b>Tableau.3.7</b> Les paramètres de la fibre optique compensation.....	67
<b>Tableaux.3.8.</b> Représente les valeurs de TEB et facteur Q de signal de sortie S en fonction du débit .....	77
<b>Tableaux.3.9.</b> Représente les valeurs de TEB et facteur Q de signal de sortie S en fonction de la longueur de la fibre.....	80

## Conclusion générale

---

Les capacités gigantesques des nouveaux systèmes de transmission optique laissent penser que les réseaux de télécommunications existants sont voués à l'abandon dans un avenir proche. Cette nouvelle technologie est en développement dans tous les pays industrialisés et on commence à imaginer un raccordement à l'utilisateur lui-même. Mais il est encore nécessaire, pour aboutir à cette réalisation, que les coûts du matériel lié à la conception des systèmes optiques diminuent. De plus, de nos jours, les transmissions optiques relient les grands nœuds des réseaux, qui sont électroniques. Il y a donc une limitation due à la vitesse d'exécution de ces composants et l'influence de leur bande passante qui freine la capacité de la fibre optique.

Les progrès réalisés dans le domaine des télécommunications sont tellement importants et rapides, que les structures des systèmes de transmission connaissent de véritables bouleversements. C'est pourquoi il nous a paru intéressant de choisir ce titre de mémoire. D'abord nous avons commencé par Une description de la plupart des composants présents dans cette liaison par fibre optique (la partie émission, le canal de transmission, la partie réception) ce qui complète les bases à posséder pour aborder cet mémoire et aide à la compréhension de la conception d'un système de transmission à haut débit, ensuite nous avons détaillé les caractéristique de cette liaison et les résultats obtenus ont été interprétés dans le dernier chapitre. Ils ont permis de visualiser le diagramme de l'œil de signal de sortie et évaluer les performances des liaisons à haut débit par la fibre optique.

Après cette étude, nous sommes sortis avec des résultats importants parmi lesquels :

- ✓ La fibre optique de base est constituée d'un cœur et d'une gaine ; une conception plus avancée peut ajouter d'autres couches de gaines. On a vu aussi l'évolution à travers le temps et le progrès énorme réalisé par ce guide qui, malgré ses performances technologiques réalisées en peu de temps et ses avantages économiques...; et de mise en œuvre, nous promet pleins d'autres progrès et devient déjà incontournable dans le domaine de transmission de l'information ou comme élément sensible (capteurs).
- ✓ La détection est un point clef des liaisons par fibre optique telle que les principaux paramètres qui interviennent pour caractériser la détection sont : la longueur d'onde de coupure, la sensibilité du détecteur  $S_{\lambda}(A/W)$  qui chiffre le rapport entre le photocourant recueilli et la puissance optique incidente, le rendement quantique.
- ✓ Dans le cas d'application à très haut débit, la lumière est modulée après être sortie de la source. Le laser est toujours en mode d'émission et un modulateur externe fait varier l'intensité du faisceau lumineux.
- ✓ Les performances des systèmes des communications optiques haut débit et longue distance se trouvent influencées par les effets linéaires (dispersion chromatique, dispersion modale de polarisation, atténuation). Des solutions proposées (fibres de compensation), sont apparues sur le marché depuis quelques années afin de les corriger et aussi des amplificateurs optiques pour remédier à l'atténuation du signal dans les fibres. Après un inventaire de quelques-uns de ces modèles, l'EDFA répond parfaitement aux besoins de l'étude. Les améliorations que l'on peut attendre se situent d'abord dans l'exploitation du maximum de bande passante de la fibre.
- ✓ Le développement des télécommunications à haut débit par fibre optique nécessite la mise au point de dispositifs de plus en plus rapides, à large bande et fonctionnant dans la plage spectrale des amplificateurs à Erbium.
- ✓ Dans tout système de transmission, un paramètre important permet de connaître la qualité du système, c'est le taux d'erreur binaire, permettant de quantifier de manière probabiliste les erreurs de l'information reçue qui a été dégradée lors de la transmission, et bruitée lors de la détection.

L'objectif principal de ce mémoire était de prouver l'utilité d'un logiciel de simulation système et son aide non négligeable à la conception des systèmes hauts débits. Les résultats obtenus ont permis de valider les choix des techniques et des composants utilisés pour développer une liaison par fibre optique à haut débit.

Néanmoins, les systèmes optiques à haut débit sont en pleine effervescence et ont de beaux jours devant eux.

# Bibliographie

---

- [1] Jean Pierre NEROU : 'Les fibres optiques, introduction aux télécommunications par fibres optiques', Centre spécialité de Technologie Physique Cégep de la Pocatière.1983.
- [2] <http://www.w3.org>
- [3] MADANI Soumeya : Etude et simulation des effets de la dispersion chromatique et de la dispersion model de polarisation dans les transmissions numériques optiques à haut débit, Projet de fin d'étude (IGE 25), 2005, institut de télécom ORAN.
- [4] *Adda Benziane Hadj et Benaissa Chrif Bouabdalh* : Etude de la dispersion chromatique et modale dans une fibre optique, Mémoire de fin d'étude (IGE 25), 2005. institut de télécom ORAN.
- [5] Degdag Abderrahmane et sayeh Hamadouche : Etude des différents formats de modulation dans une liaison optique à haut débit, Projet de fin d'étude (IGE 26) ,2006. institut de télécom ORAN.
- [6] Naufal M. SAAD : Contribution à l'étude de l'amplification de la technique CDMA aux systèmes de transmission optique, Thèse de doctorat de l'université de limoges 2005.
- [7] Sidick Haroun Ibrahim et Ould Med Mahmoud Mohamedou : Etude du budget optique d'une liaison à longue distance et à haut débit, mémoire de fin d'étude (IGE 26), 2004. institut de télécom ORAN.
- [8] Jean-Yves DUBOZ « Matériaux semi-conducteurs à grand gap III-V à base de GaN ». (Techniques de l'Ingénieur 1 995).

- [9] HABBAR Hamza et DJELIDI Khaled : Liaison Optique à haut débit, étude des liaisons point à point polychromatiques. Projet de fin d'étude (IGE 24), 2004. institut de télécom ORAN.
- [10] <http://www.chez.com>
- [11] GEOFFROY DELTEL : LASER ACCORDABLE ÉLECTRONIQUEMENT, Mémoire de maîtrise. FACULTE DES SCIENCES ET DE GENIE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2007.
- [12] B. de Crémeux « Les diodes laser : des principes aux développements récents » *Laboratoire Central de Recherches Thomson-CSF, Domaine de Corbeville, 91404 Orsay cedex, France*
- [13] <http://nobo728x.free.fr>
- [14] Mohamed Ikinen CHAIBATA et Souley Harouna MARIETOU : Transmission sur fibre optique haut débit, Mémoire de fin d'étude (IGE 25) ,2005. institut de télécom ORAN.
- [15] <http://www.abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs>.
- [16] AMMIALI Rabah : Etude du champ électromagnétique dans la fibre optique à l'aide des équations de maxwell, Projet de fin d'étude, 2005 institut de télécom ORAN.
- [18] Etude sur l'amplification en ligne des systèmes des communications optiques, Mémoire de fin d'étude (IGE 25), 2005. institut de télécom ORAN.
- [19] Nassima BOUDRIOUA : Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique, vers une compensation électronique de la PMD, Thèse pour obtenir le grade de docteur, 2007. Université de METZ
- [20] <http://web.univ-pau.fr>
- [22] Jérôme Laurent : 'Communications optiques à très haut débit ', Présenté au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris 'Département STIC '.2004.
- [21] <http://www.iict.ch/Tcom/Presentations/DWDM/DWDM.pdf>
- [23] DANIAL HARDY, GUY MALLEUS et JEAN-NOEL MEREUR : Réseaux « Internet. Téléphonie. Multimédia ». Convergence et complémentation. Google school.fr
- [24] <http://w3.gel.ulaval.ca/~fortier/publications/CCECE95c.pdf>
- [25] Eric Cassan et Stéphanie Cassan Université Paris-Sud Construction pas à pas d'une liaison par fibre optique longue distance, CETSIS'2005, Nancy, 25-27 octobre 2005



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
بَدَأَ خَلْقَ الْإِنسَانِ  
مِنْ طِينٍ مِمَّا يَخْتَارُ  
ثُمَّ جَعَلَهُ أَحْسَنَ الْبَرِّ  
ثُمَّ جَعَلَهُ أَجْسَادًا  
مُخْتَلِفًا أَلْوَانًا  
ثُمَّ جَعَلَ لِكُلِّ فِرْقٍ  
كَلِمَاتٍ وَمَوَاقِنَ  
مُتَنَبِّهَاتٍ لِيَذْكُرُوا  
لِقَائِهِ يَوْمَ يَأْتُوا  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
جَعَلَ الْقُرْآنَ آيَاتٍ  
لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ  
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
بَدَأَ خَلْقَ الْإِنسَانِ  
مِنْ طِينٍ مِمَّا يَخْتَارُ  
ثُمَّ جَعَلَهُ أَحْسَنَ الْبَرِّ  
ثُمَّ جَعَلَهُ أَجْسَادًا  
مُخْتَلِفًا أَلْوَانًا  
ثُمَّ جَعَلَ لِكُلِّ فِرْقٍ  
كَلِمَاتٍ وَمَوَاقِنَ  
مُتَنَبِّهَاتٍ لِيَذْكُرُوا  
لِقَائِهِ يَوْمَ يَأْتُوا



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

DJAHLAT Rachid

&

GUERDOUF Moussa

pour l'obtention du diplôme Master en Électronique option Réseaux et Télécommunication

---

Thème

---

# Etude et simulation d'une liaison par fibre optique à haut débit

---

Proposé par : Mr. NACER Saïd

# Plan

-  Introduction générale
-  Description des composants de la liaison
-  Caractéristiques de la liaison optique
-  Simulations et résultats obtenus
-  Conclusion générale

# Introduction générale

# Introduction générale

Les progrès réalisés dans le domaine des télécommunications sont tellement importants et rapides, que les structures des systèmes de transmission connaissent de véritables bouleversements. C'est pourquoi il nous a paru intéressant de choisir ce titre de mémoire.

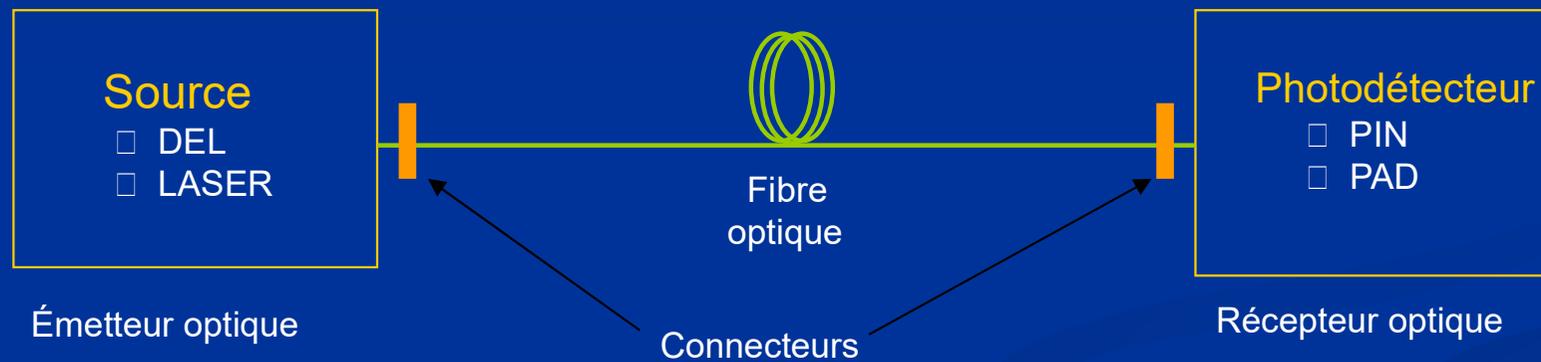
Ce travail porte sur l'étude des systèmes de transmission numériques optiques à haut débit . Ces systèmes font appel à une technologie souvent très complexe, pointue et très chère, d'où la simulation constitue un outil d'aide à la conception très important.

Dans cette étude, nous avons fait la simulation à l'aide du logiciel COMSIS et l'impact de différents paramètres (débits, longueurs) sur les performances de ce système a été étudié.

Les performances intrinsèques de la liaison et les dérives associées au vieillissement des dispositifs ont été évaluées sur le diagramme de l'œil, le taux d'erreur binaire et le facteur de qualité .

# Description des composants de la liaison

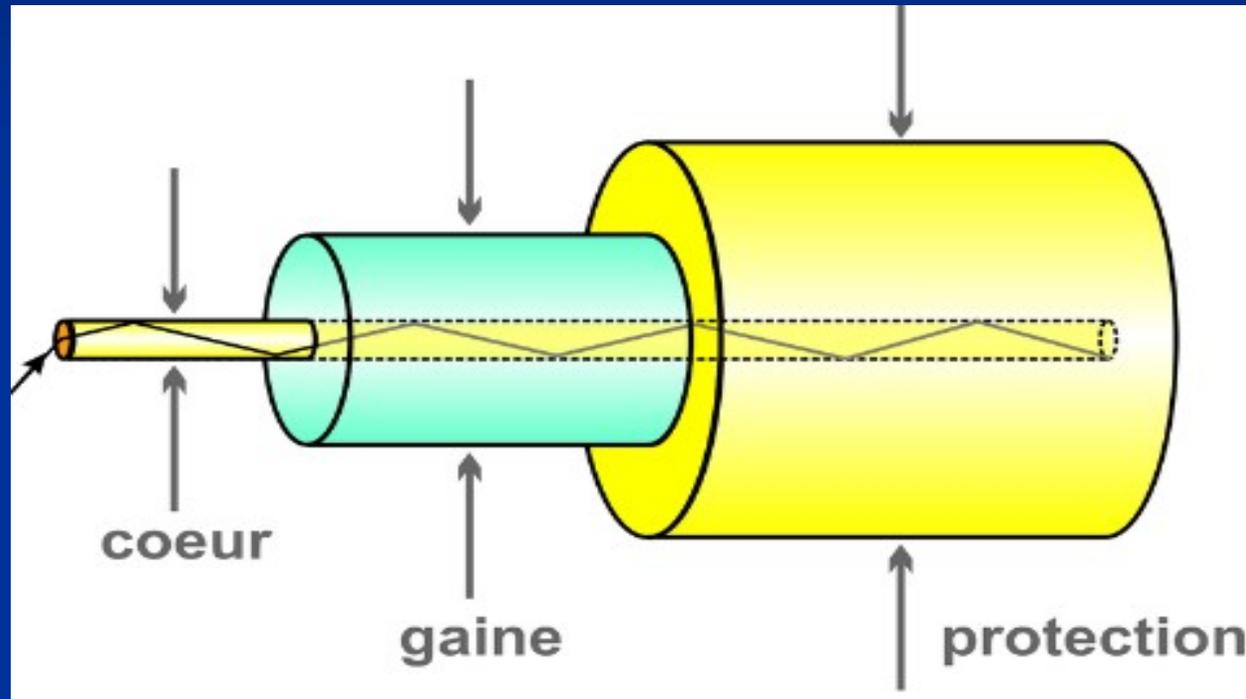
# □ Structure d'une chaîne de transmission sur fibre optique



**Fig.1.1:** Schéma simplifié d'une liaison optique.

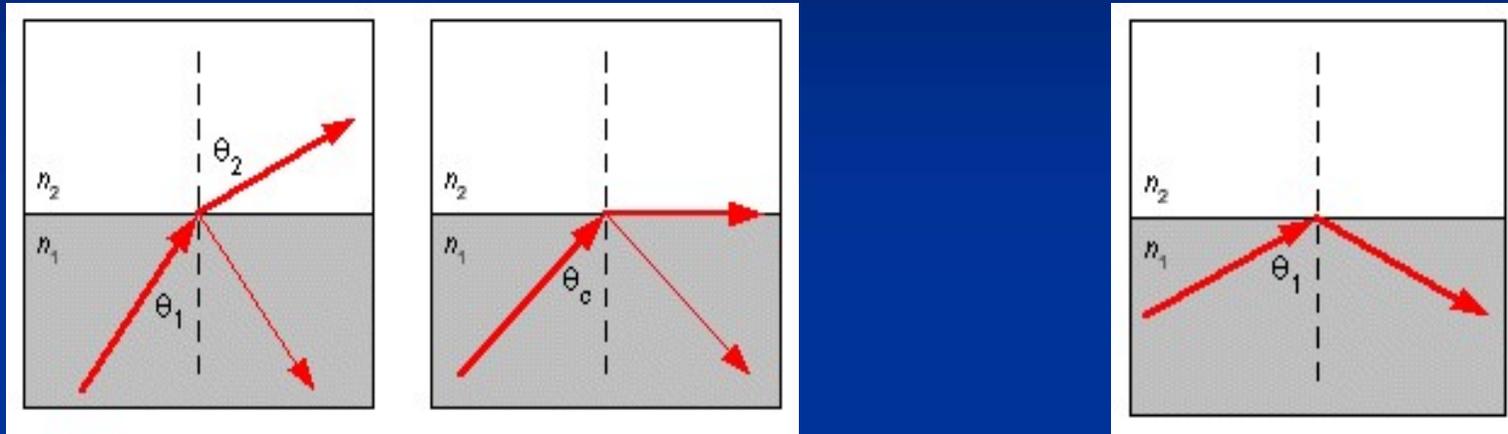
# 👉 Fibre optique

## 📄 Définition



*Fig.1.2* : Structure générale d'une fibre optique.

## □ La réflexion totale interne



$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

$n_1$ : L'indice de réfraction du cœur.

$n_2$ : L'indice de réfraction de la gaine.

$\theta_c$ : L'angle critique

## □ Le guidage de signal optique dans une fibre

### □ Angle d'acceptance ( $\theta_a$ )

C'est l'angle maximal que peut faire un rayon incident extérieur de la fibre avec l'axe de la fibre, de façon que le rayon réfracté soit guidé à l'intérieur de la fibre.

$$\sin \theta_a = \frac{1}{n} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$n$  : l'indice de réfraction du milieu extérieur,

$n_1$  : l'indice de réfraction du cœur,

$n_2$  : l'indice de la gaine,

## □ Le guidage de signal optique dans une fibre

### □ L'ouverture numérique:

L'angle d'acceptance permet de définir ce qu'on appelle **l'ouverture numérique** de la fibre optique, ouverture qui dépend bien évidemment des indices respectifs des deux couches optiques.

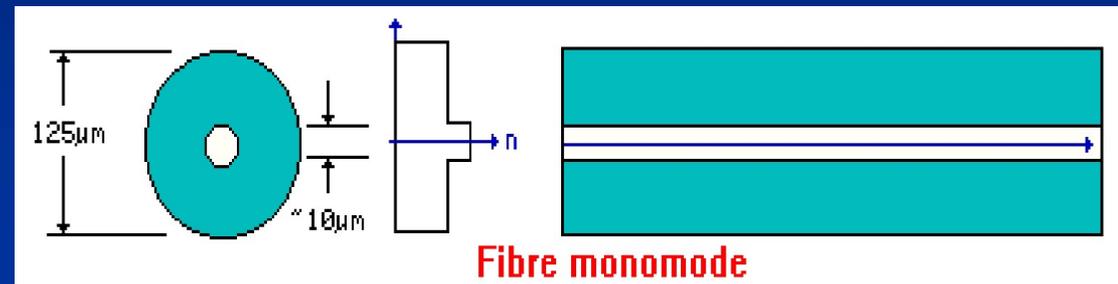
$$O.N = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong n_1 \sqrt{2\Delta}$$

$\Delta$  : c'est l'écart relatif d'indice donné par :

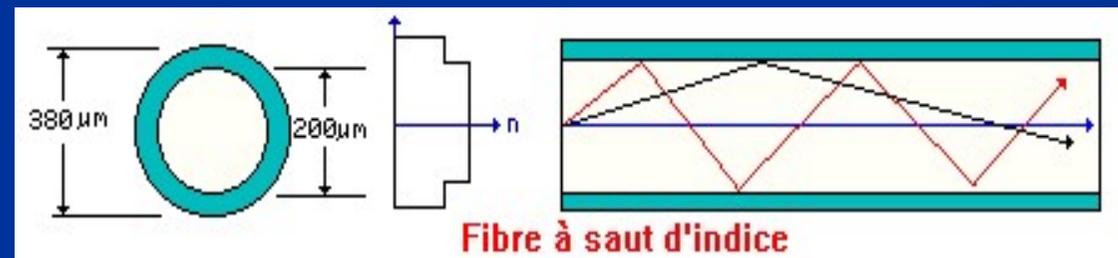
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

## □ Les différents types de fibre optique

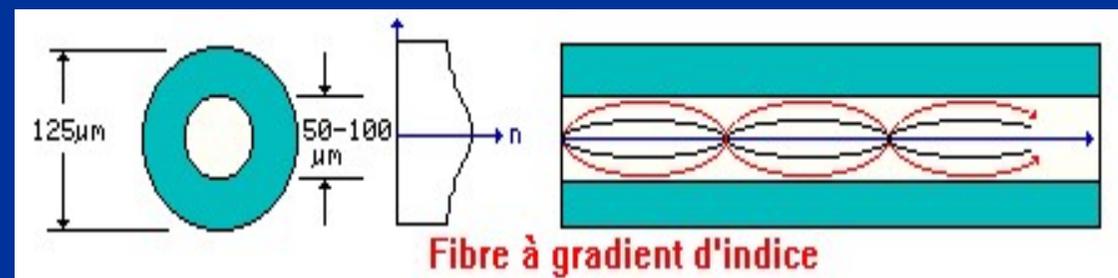
### Fibre monomode



### Fibre multimode à sous d'indice



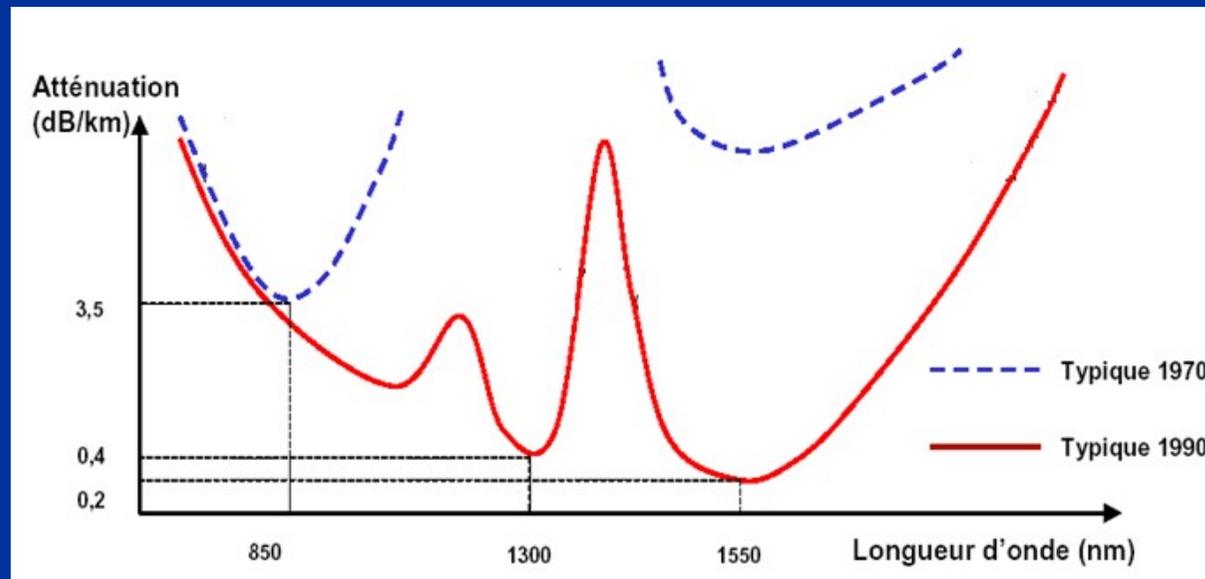
### Fibre multimode à gradient d'indice



## □ Caractérisation de la fibre

### □ L'atténuation

- ✓ C'est un affaiblissement du signal qui résulte de plusieurs phénomènes tels que l'absorption intrinsèque des matériaux, les impuretés, les courbures et les micro-courbures de la fibre de l'interface.



*Fig.1.5* Atténuation spectrale d'une fibre optique

## ❑ Les dispersions

### ❑ Dispersion modale

✓ C'est la différence des temps de propagation des différents modes qui se propagent dans une fibre multimode.

✓ A saut d'indice

$$\Delta T_m = \frac{(O.N)L}{2cn_1}$$

✓ A gradient d'indice

$$\Delta T_m = \frac{n_1 L \Delta^2}{8c}$$

**L** : la longueur de la fibre

**c** : vitesse de la lumière dans le vide.

## □ Dispersion chromatique

- ✓ Traduit la variation du temps de propagation de group en fonction de la longueur d'onde.
- ✓ Une impulsion comporte des composantes de fréquences différentes qui ne vont pas à la même vitesse provoquant la déformation de l'impulsion.

$$\Delta t_c = -\frac{\lambda_0 \Delta \lambda}{c} \left( \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right)_{\lambda_0} . L$$

 $\Delta \lambda$ 

Largeur spectral de la source.

 $\lambda_0$ 

Langueur d'onde centrale de la source.

## □ La bande passante

- ✓ La bande passante à -3dB d'une fibre optique correspond aussi à sa fréquence de coupure  $f_c$  à -3dB elle est donnée par :

$$BP(-3dB) = 0.35 / \Delta T_t$$

Tel que :

$$\Delta t_t^2 = \Delta t_c^2 + \Delta t_m^2$$

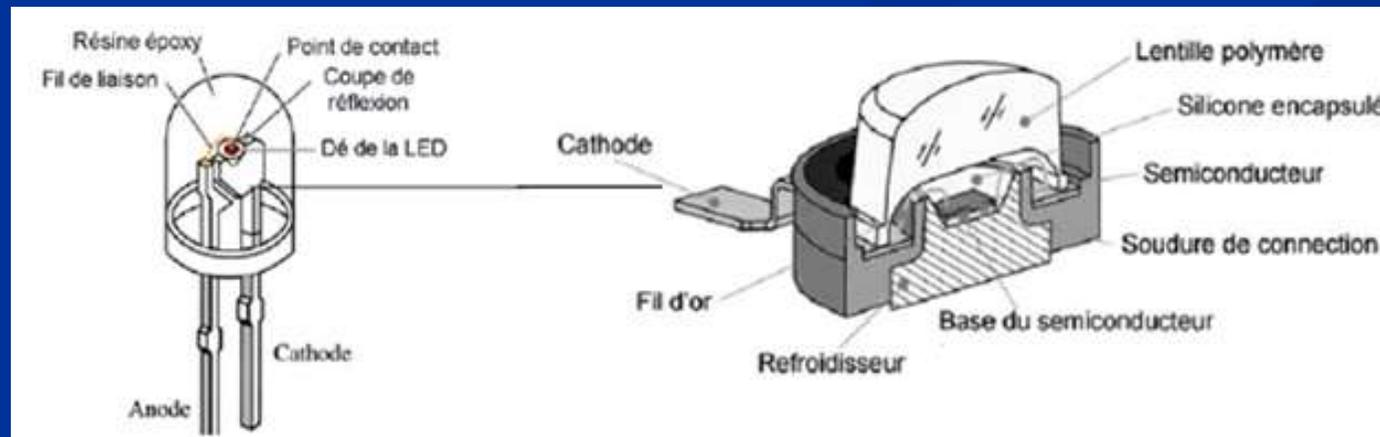
# □ Les avantages de la fibre optique

- Pertes très faibles .
- Résistance aux températures élevées ( pas d'échauffement)
- Insensibilité aux interférences extérieures.
- Vitesses de transmission très élevées.

## 👉 Module d'émission

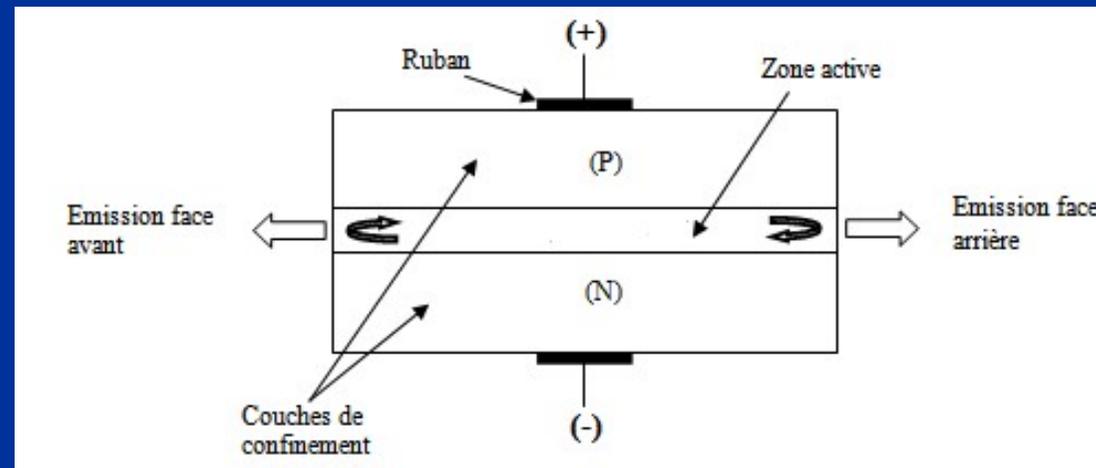
### ❑ La diode électroluminescente : LED

La **LED** (*Light Emitting Diode*) est une source incohérente, elle présente un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grande bande passante.



**Fig.1.6.** LED (Diode électroluminescente)

## □ Les Diodes lasers : DL



*Fig.1.7.*Diode LASER

# Module de réception

## Les photodétecteurs

### Le photodiode PIN

- ✓ Il s'agit d'un semi-conducteur intrinsèque, pris en sandwich entre un semi-conducteur de type n et un semi-conducteur de type p.
- ✓ La concentration de charges libres dans le semi-conducteur intrinsèque est très faible, ce qui lui procure une résistivité faible.

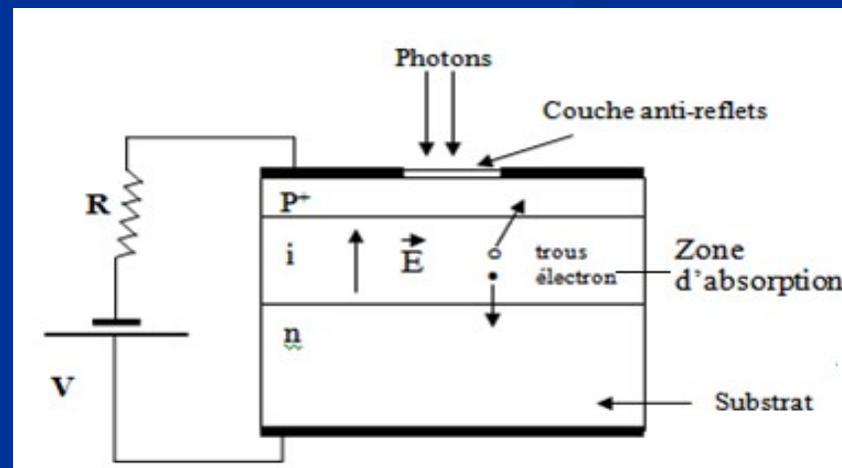


Fig.1.24. Photodiode PIN

## ❑ Le photodiode à avalanche (PDA)

- ✓ Une photodiode à avalanche est avant tout une structure PIN.
- ✓ Un photon absorbé dans la région **P**, il y'a création d'un électron et d'un trou.
- ✓ l'électron est dirigé vers la zone d'avalanche, et on va voir une multiplication d'électron par l'*effet d'avalanche* (multiplication de courant).

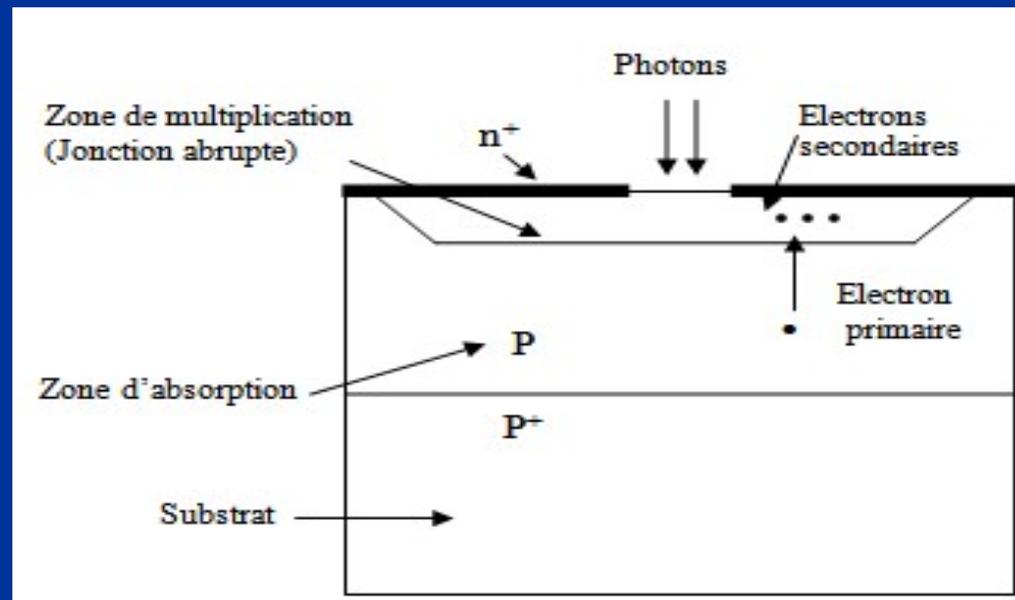


Fig.1.26. Photodiode à avalanche (PDA)

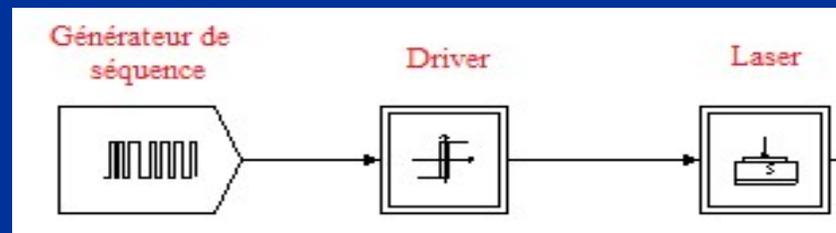
# Caractéristiques de la liaison optique

# 👉 Technique de modulation

## ☐ La modulation directe

C'est la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise.

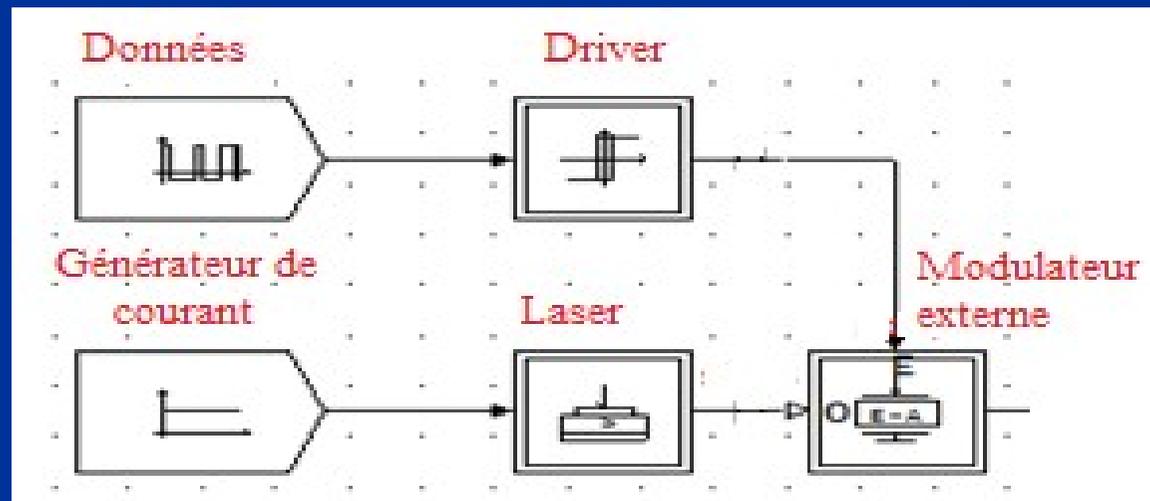
La modulation directe, plus simple et moins coûteuse est encore très utilisée si les données sont transmises à un débit de quelques gigabits/s, selon la qualité du laser.



**Fig.2.1.** Synoptique de la modulation direct.

## □ La modulation externe

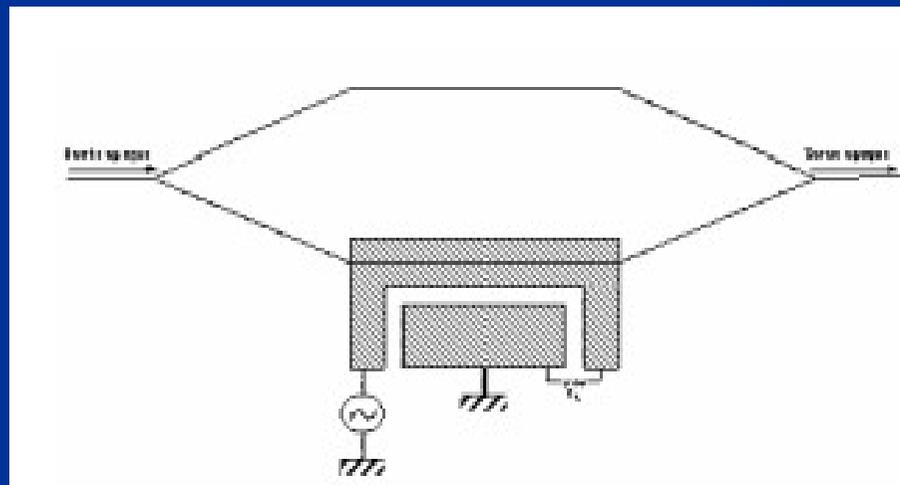
- ✓ La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu.
- ✓ Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser.



*Fig.2.2* Synoptique de la modulation externe.

## □ Le modulateur Mach-Zehnder

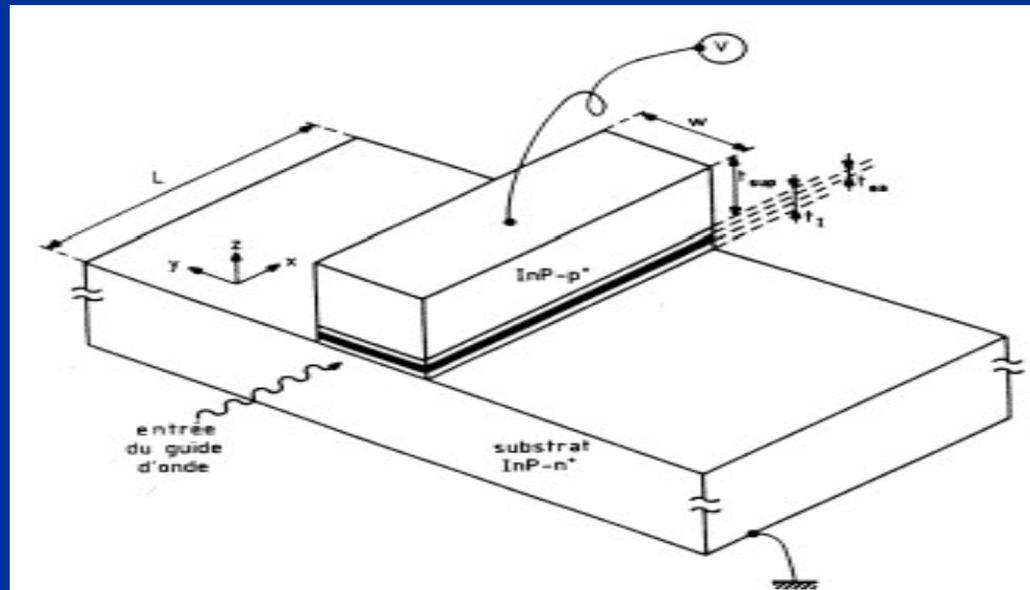
- ✓ Il est constitué de deux jonctions Y.
- ✓ Une tension est appliquée sur l'un des deux bras du Mach-Zehnder.
- ✓ L'application d'une tension sur une électrode permet de contrôler le déphasage induit par l'effet électro-optique et de coder l'information électrique sous forme optique.



**Fig.2.3** Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder

## □ Le modulateur électro-absorbant

- ✓ Ces modulateurs ont actuellement la même configuration géométrique qu'une diode laser.
- ✓ Il repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un semi-conducteur soumis à un champ électrique.



**Fig.2.4.** Structure d'un guide d'onde en arête contenant un matériau électro-absorbant

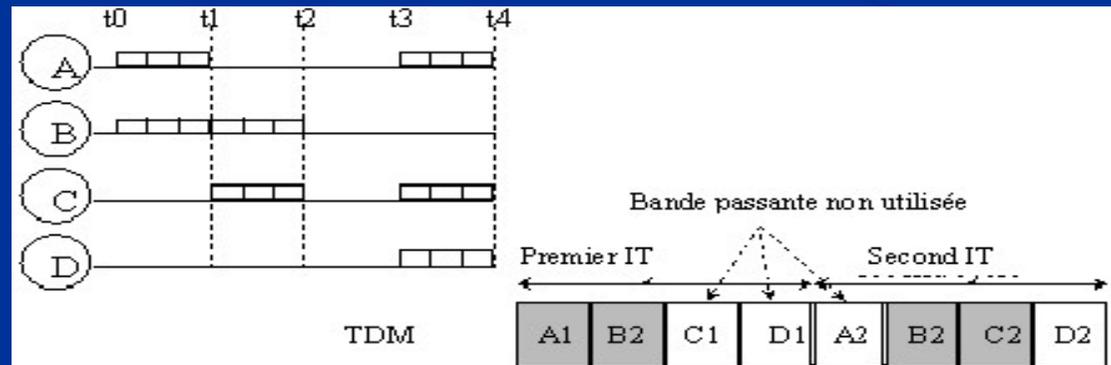
# 👉 Les techniques de transmission

## ❑ Le multiplexage temporel

Le multiplexage temporel (TDM=Time Division Multiplexing).

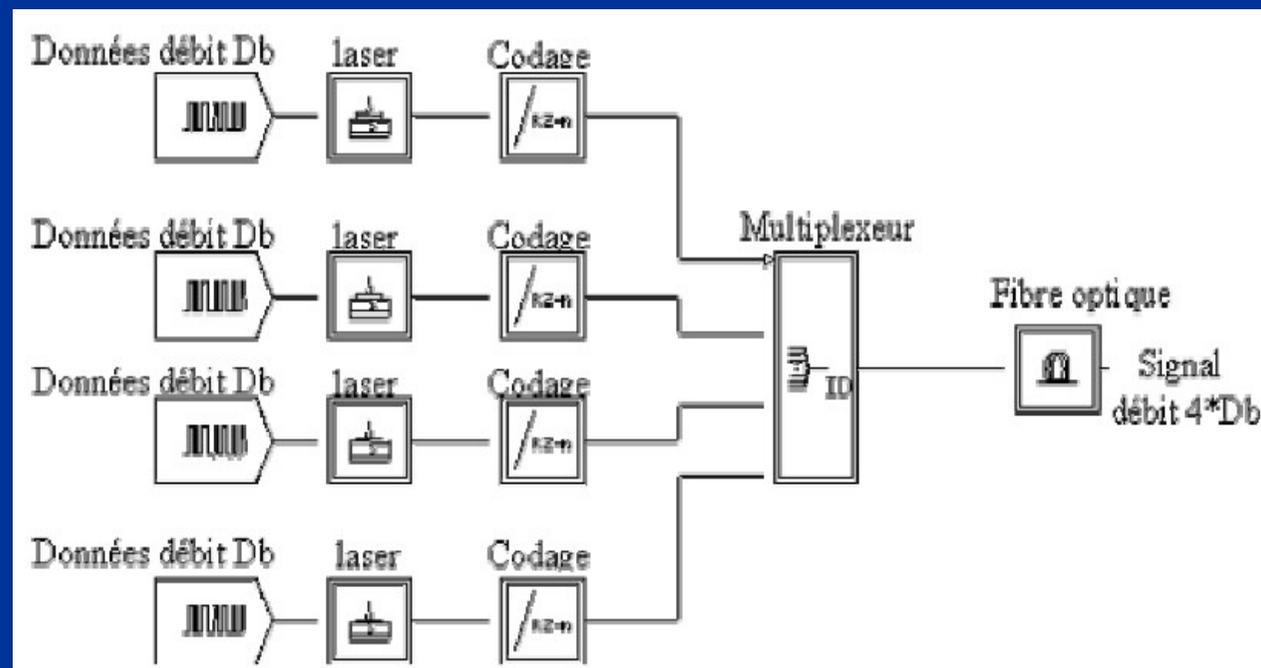
→ offrir à un utilisateur à la fois, la totalité de la bande passante pendant un court instant.

✓ L'allocation se fait en divisant l'axe du temps en intervalles de temps (IT), et chaque utilisateur ne pourra transmettre que pendant son intervalle de temps.



## □ Le multiplexage temporel optique

Le multiplexage **OTDM** (Optical Time Division Multiplexing) peut être réalisé de manière optique.

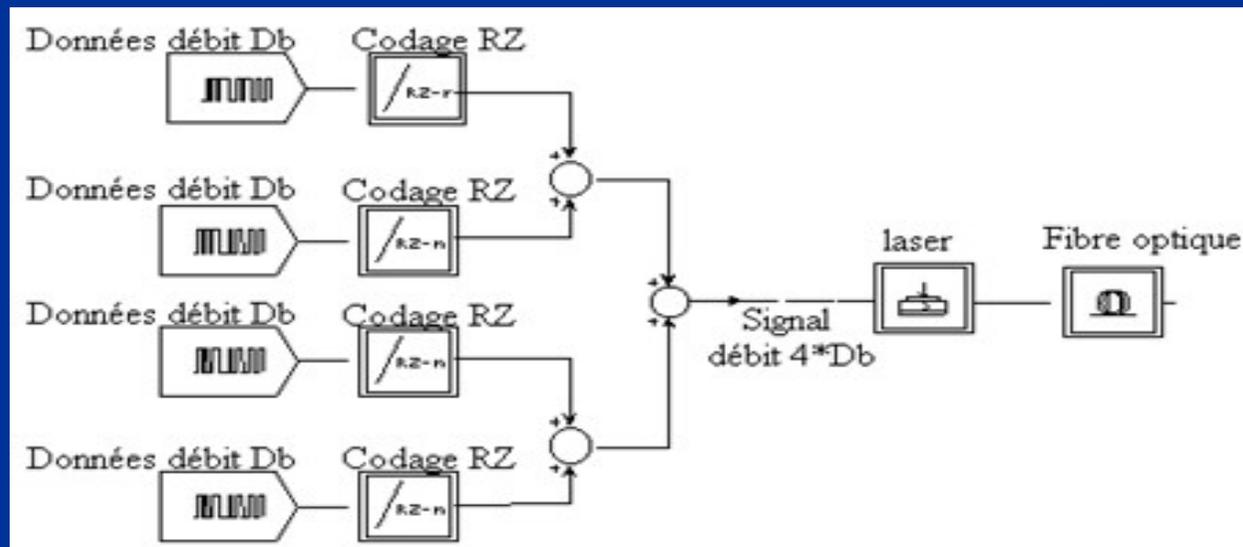


*Fig.2.6.* Synoptique d'un multiplexage OTDM.

## □ Le multiplexage temporel électronique

Dans le cas de l'**ETDM** (Electronic Time Division Multiplexing), le codage RZ et " l'assemblage " des données se font électriquement .

- ✓ Le signal de sortie du multiplexeur est appliqué à l'entrée d'un modulateur optique qui permet la transmission sur la fibre optique.

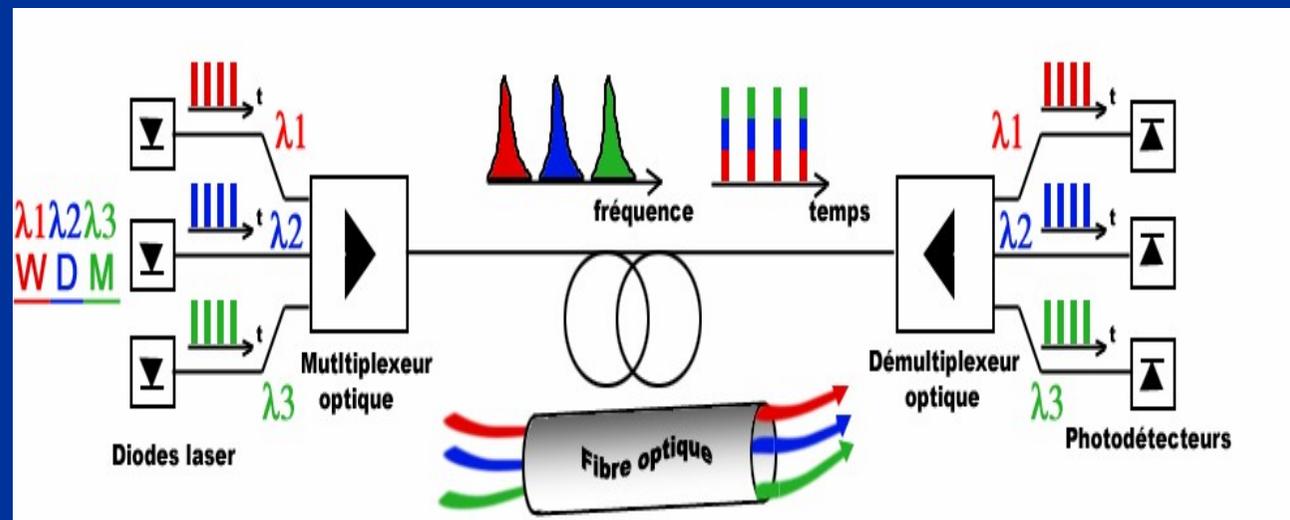


**Fig.2.7.** Synoptique d'un multiplexage ETDM.

## □ Le multiplexage en longueur d'onde

**WDM** (Wavelength Division Multiplexing):

- ✓ permet de faire passer plusieurs signaux de longueur d'onde différentes sur une seule fibre optique.



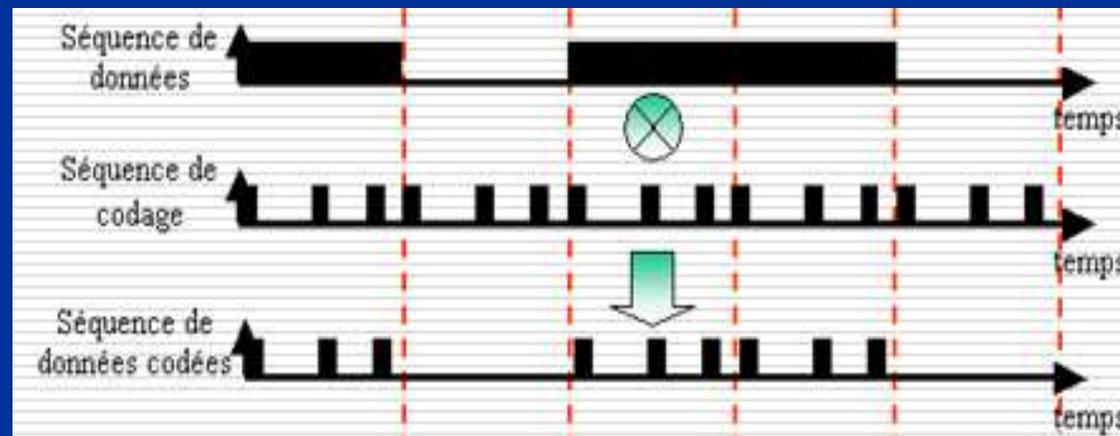
*Fig.2 .8.* Schéma de principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre optique

## □ Le multiplexage CDMA

CDMA (Code Division Multiple Access) :

→ affectation d'un code à chaque station ou utilisateur.

- ✓ Chaque bit est remplacé par une séquence différente pour chaque utilisateur et définie comme la signature (le code).

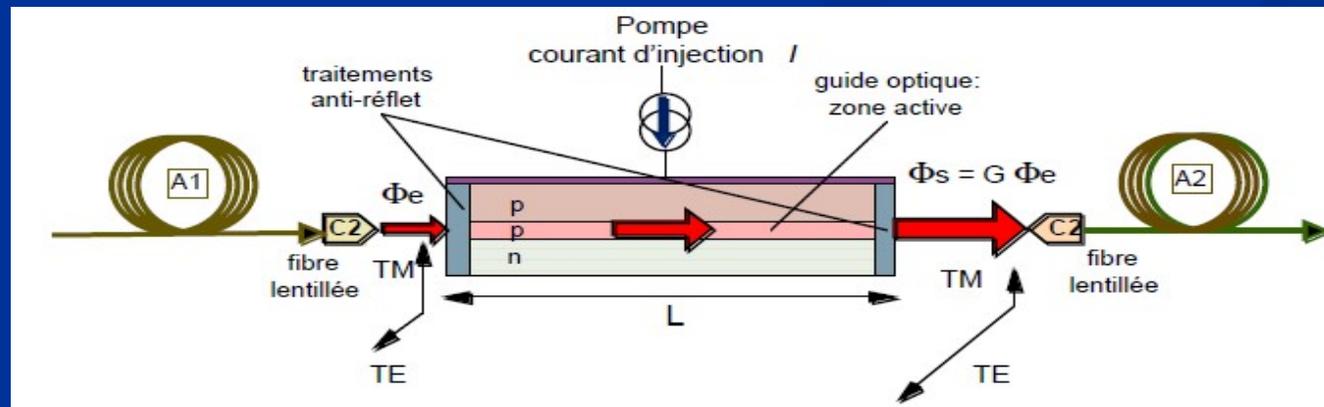


*Fig.2 .8.* Schéma de principe du multiplexage CDMA

# 👉 Les Amplificateurs optiques

## ❑ Les Amplificateur optique à semi-conducteurs (AOSC)

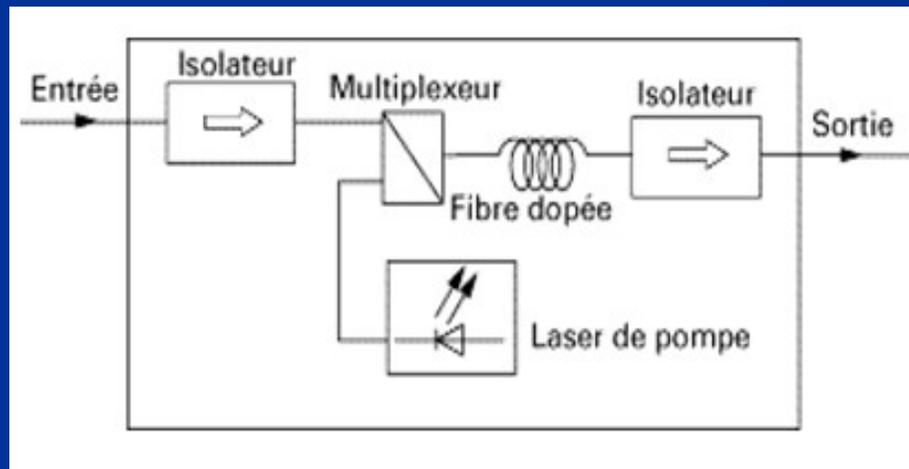
- ✓ C'est un dispositif contient un revêtement anti-reflets est déposé sur les faces afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit.
- ✓ La lumière incidente entrant dans le circuit, elle est amplifiée et sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre.



**Fig.2 .8.** Schéma d'un amplificateur à semi-conducteur

## ❑ Les Amplificateur Optique Dopé à Erbium l'EDFA

- ✓ Les Amplificateur **EDFA** sont des dispositifs comprenant dans un seul boîtier compact la fibre spéciale constituant le milieu amplifiant, Le laser de pompe qui produit un signal lumineux des très hautes puissances et les composants passifs nécessaires.
- ✓ l'erbium agit comme un réactif qui aura comme effet d'amplifier le signal entrant.



*Fig.2 .10.* Schéma d'un amplificateur EDFA

## □ Les Isolateurs

Sa fonction est de laisser passer la transmission dans un sens et de la bloquer dans la direction opposée.

## □ Les Coupleurs optique

Un coupleur optique permet de coupler les N signaux d'entrée en N signaux de sortie.

## □ Les Filtres

Le principe du filtre optique simple est de laisser passé une longueur d'onde et de retenir toutes les autres.

## ☞ Critère de qualité

❑ Le facteur  $Q$  : C'est le critère principale pour déterminer la qualité du signal

pour les niveaux hauts et les niveaux bas.

❑ Diagramme de l'œil : Dans le domaine des télécommunications , est un

oscillogramme représentant des données numériques issues d'un récepteur.

❑ Rapport signal sur bruit :

C'est le rapport entre la puissance moyenne du signal et la puissance moyenne du bruit.

Il vous permet de mesurer la qualité du signal perçu par le destinataire.

❑ Taux d'erreurs Binaire :

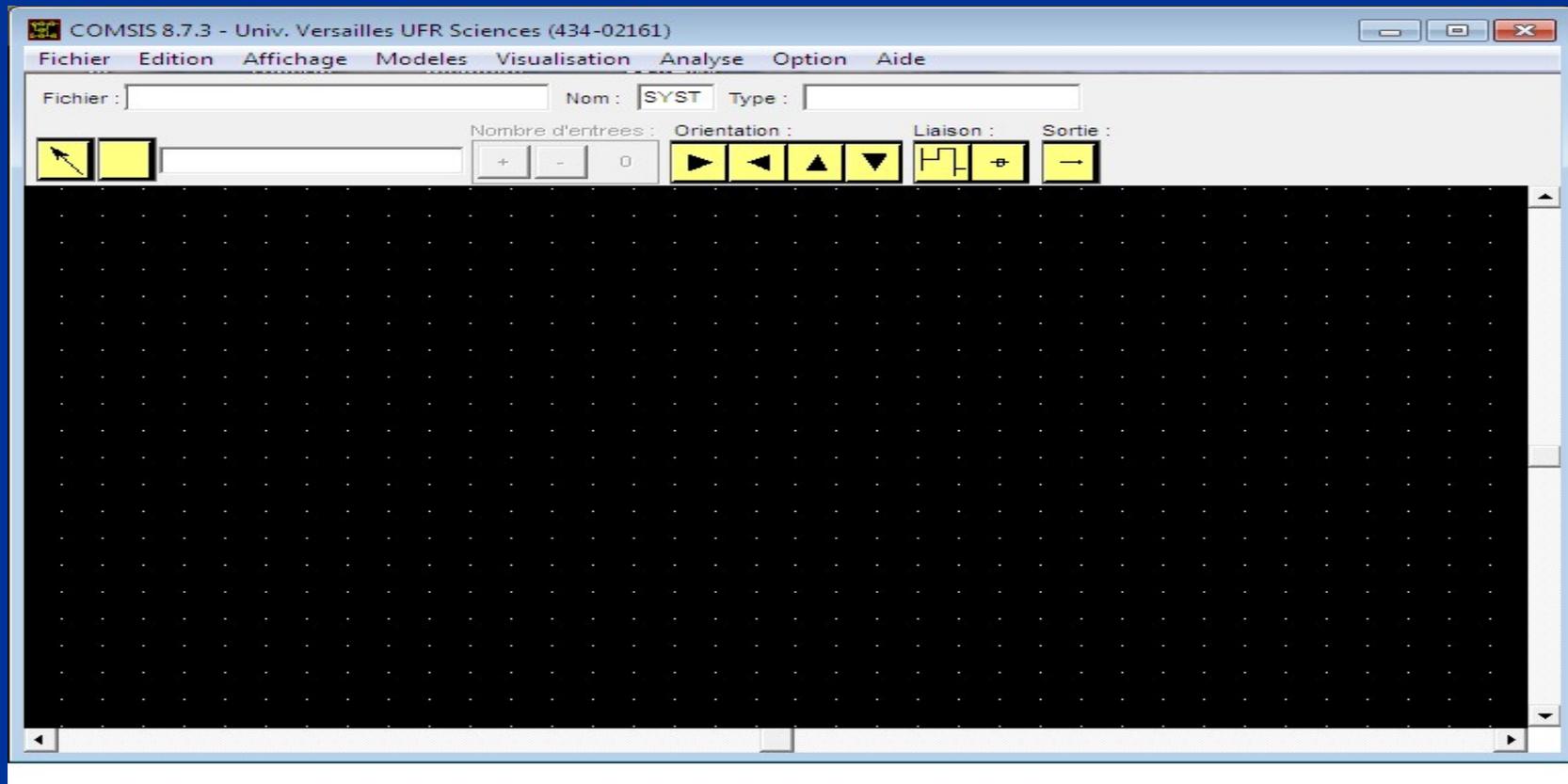
C'est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits transmis .

# Simulation et résultat obtenus



# Présentation générale

**COMSIS** est un outil qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal allant du dispositif le plus élémentaire au système complet de communication.



L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS

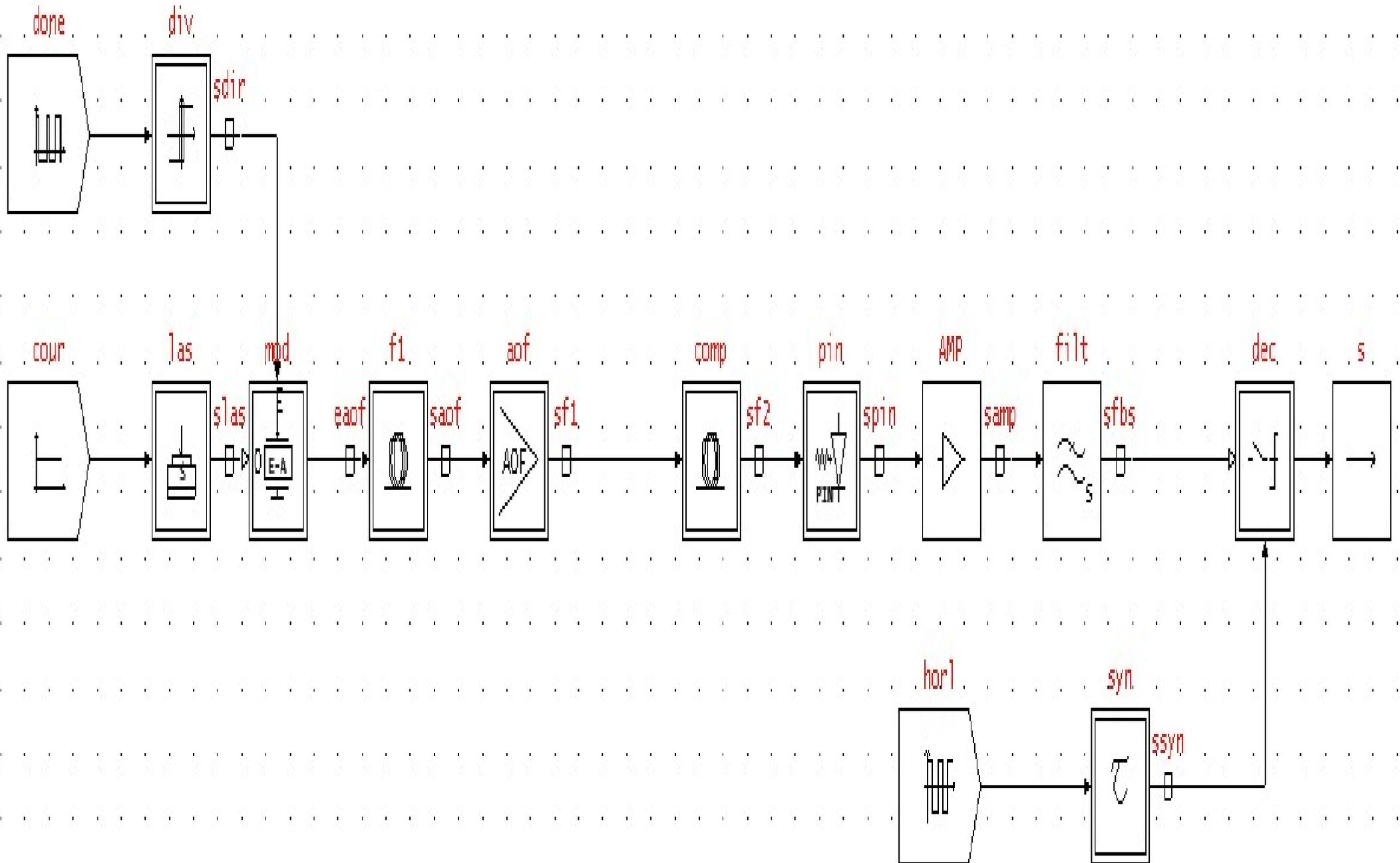
## □ Les outils d'analyse des performances

Logiciel COMSIS offre un ensemble complet de traitements permettant de :

- Visualiser les résultats de la simulation dans les domaines temporel et fréquentiel en n'importe quel point de la chaîne de transmission.
- Tracer le diagramme de l'œil.
- Effectuer un bilan de puissance.
- Calculer le rapport signal sur bruit.
- Calculer le facteur de qualité  $Q$ .
- Mesurer le taux d'erreur binaire.
- Tracer le diagramme de constellation.

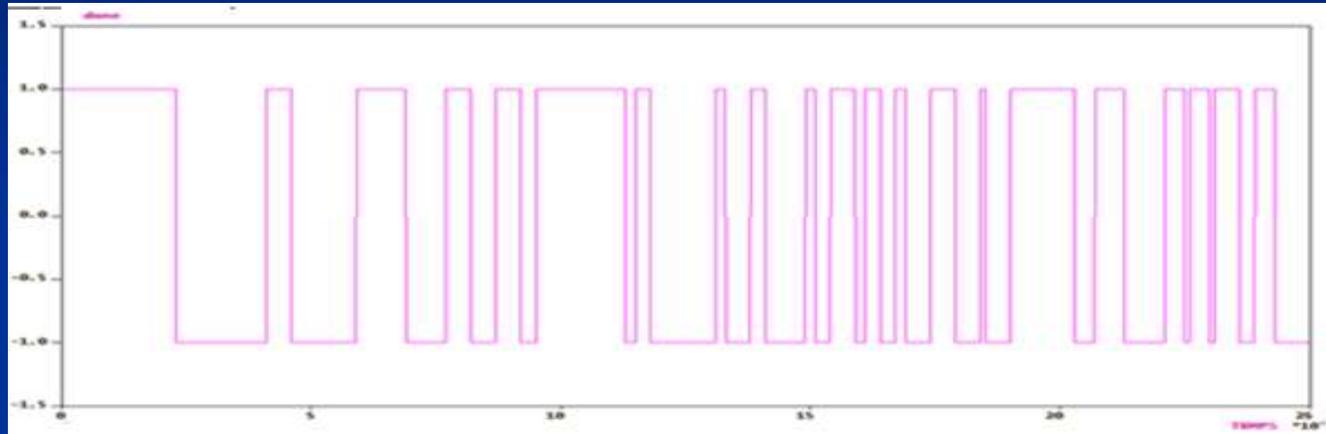


# Schéma de liaison par fibre optique à haut débit



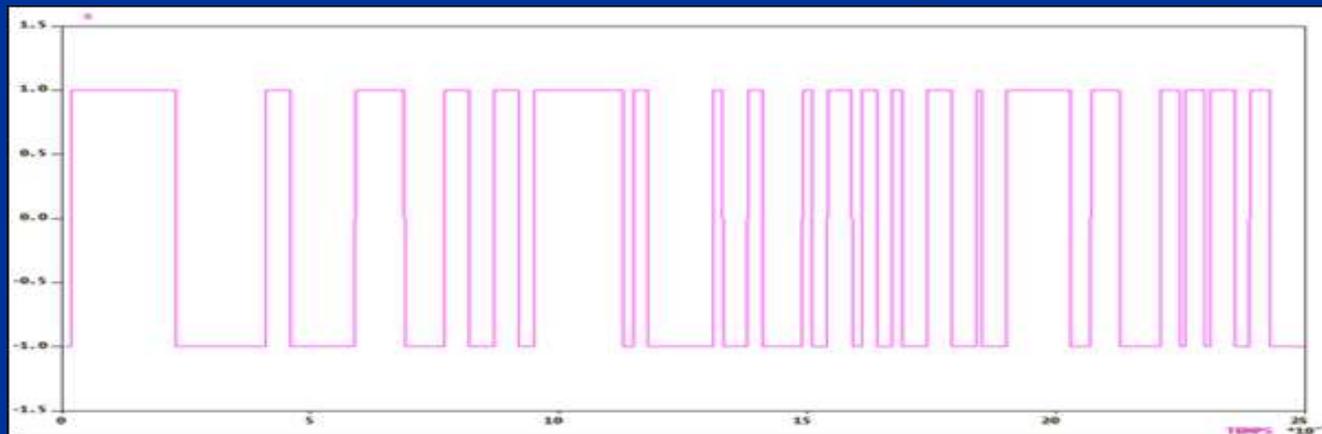
# 👉 Résultats de la simulation

## ☐ Signal d'entrée



*Fig.3.1.* représentation du séquence-binaire-pseudoaléatoire.

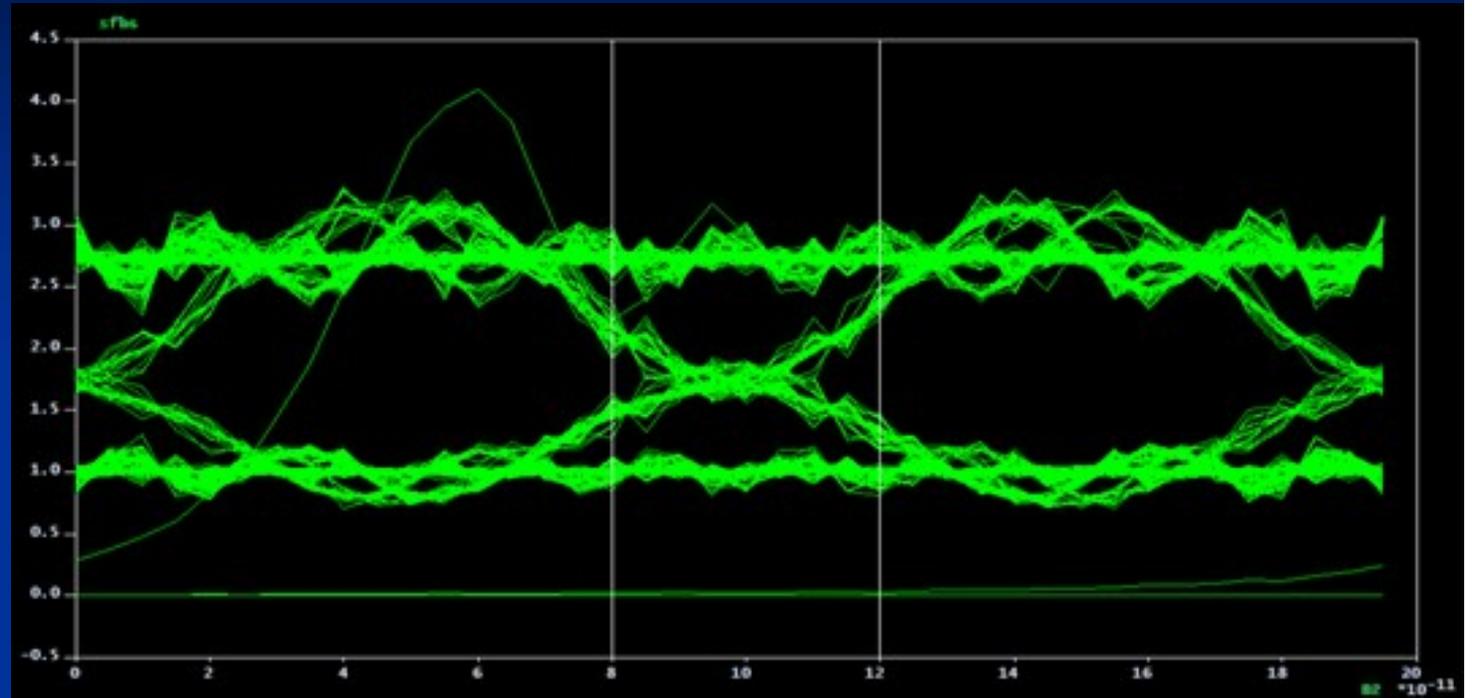
## ☐ Signal de sortie



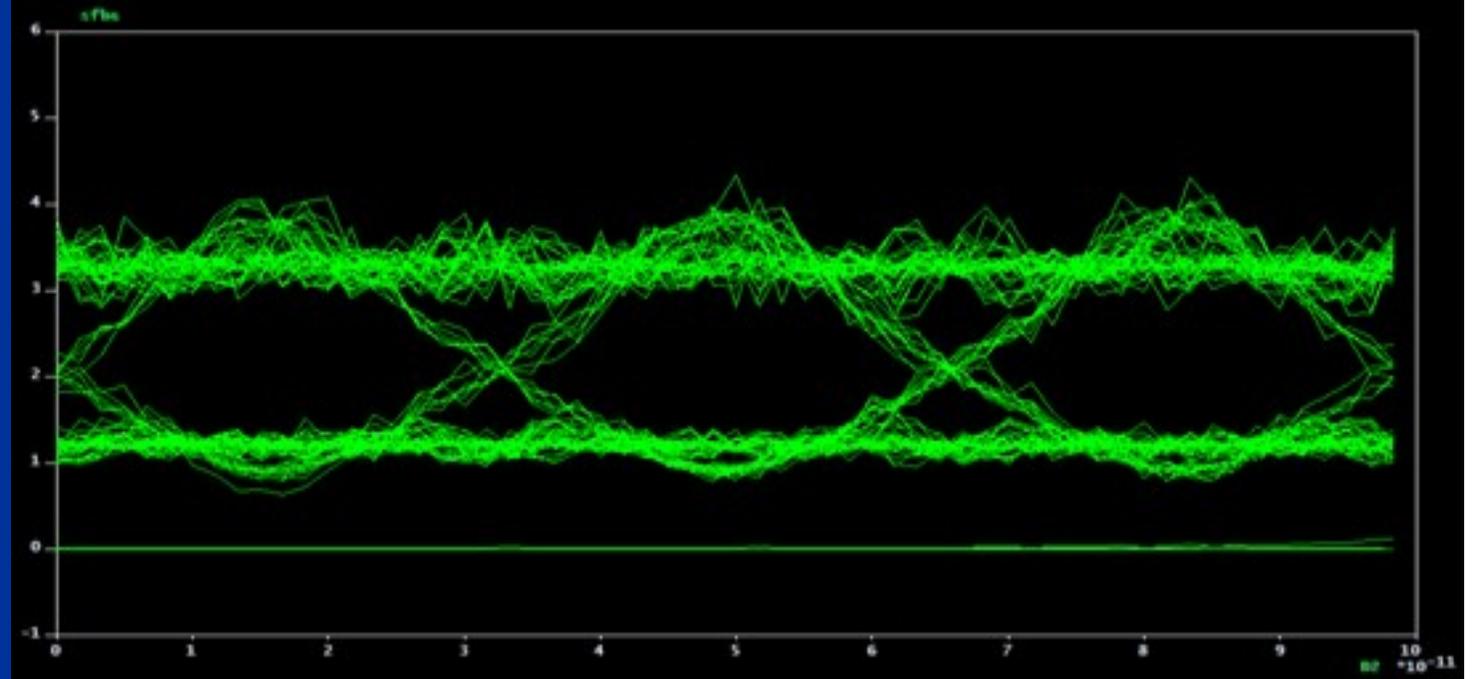
*Fig.3.2.*représentation du signal de sortie.

# 👉 Influence du débit sur les caractéristiques de la liaison

Une liaison de **10** Gbits/s

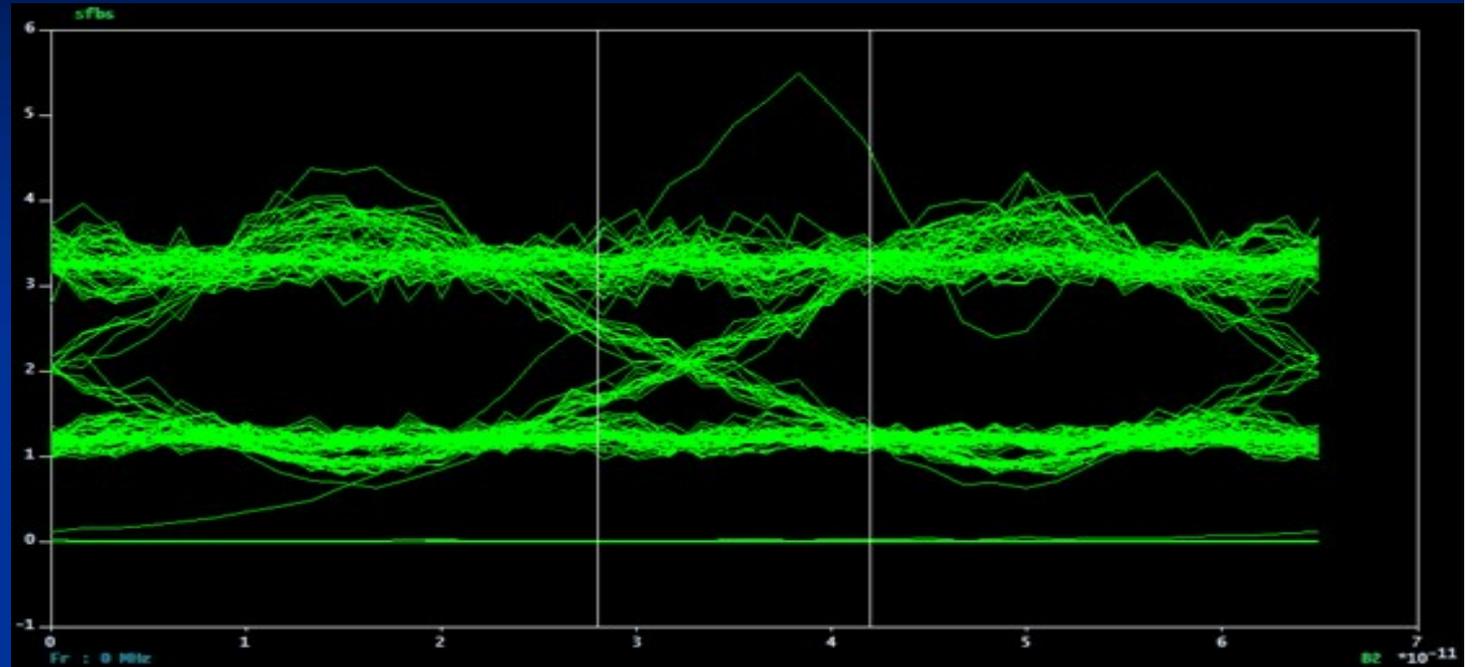


Une liaison de **20** Gbits/s

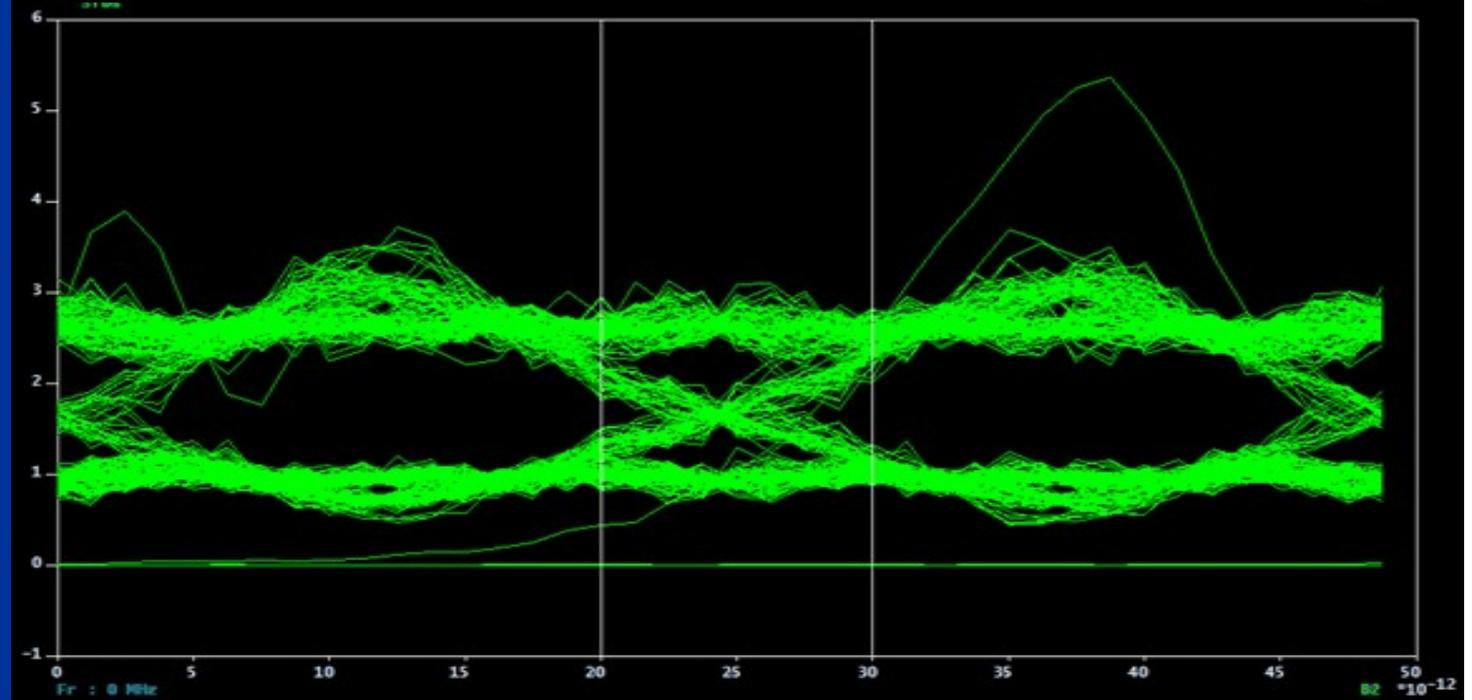


# 👉 Influence du débit sur les caractéristiques de la liaison

Une liaison de **30** Gbits/s



Une liaison de **40** Gbits/s



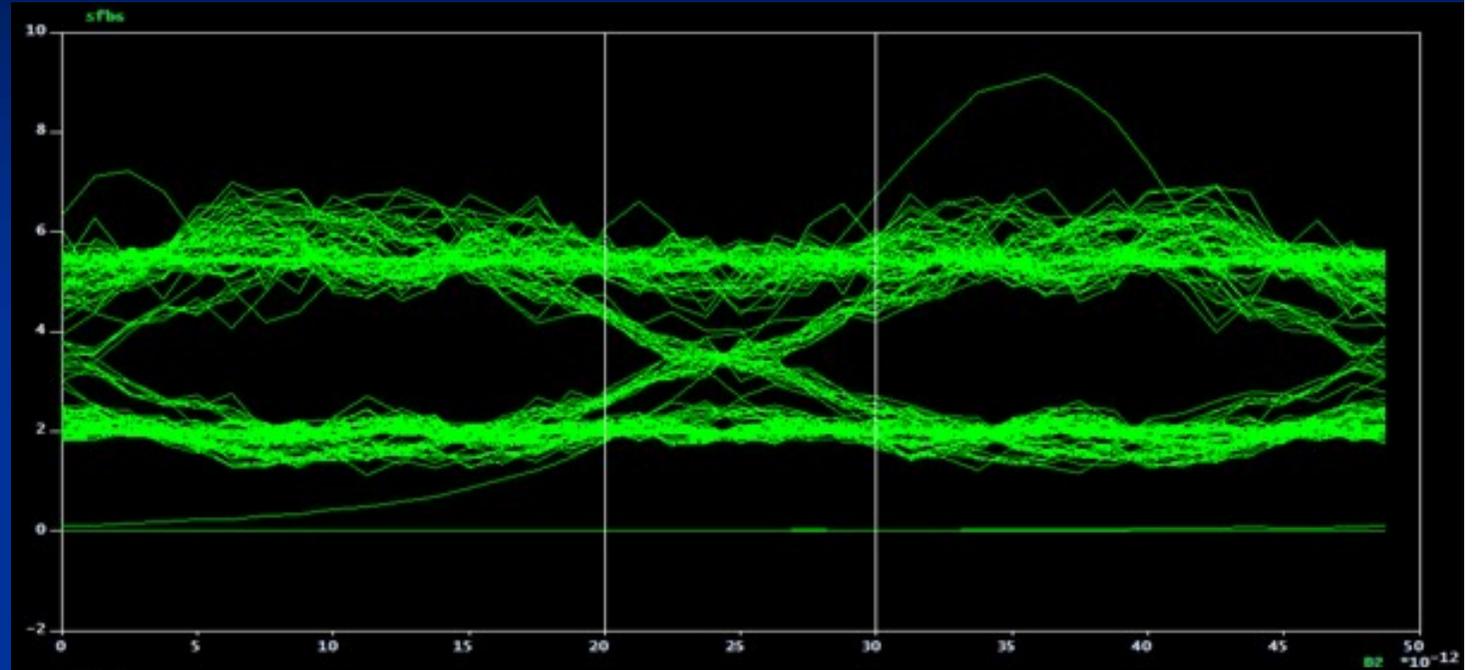
## 👉 Influence du débit sur les caractéristiques de la liaison

### ☐ Critères de qualité

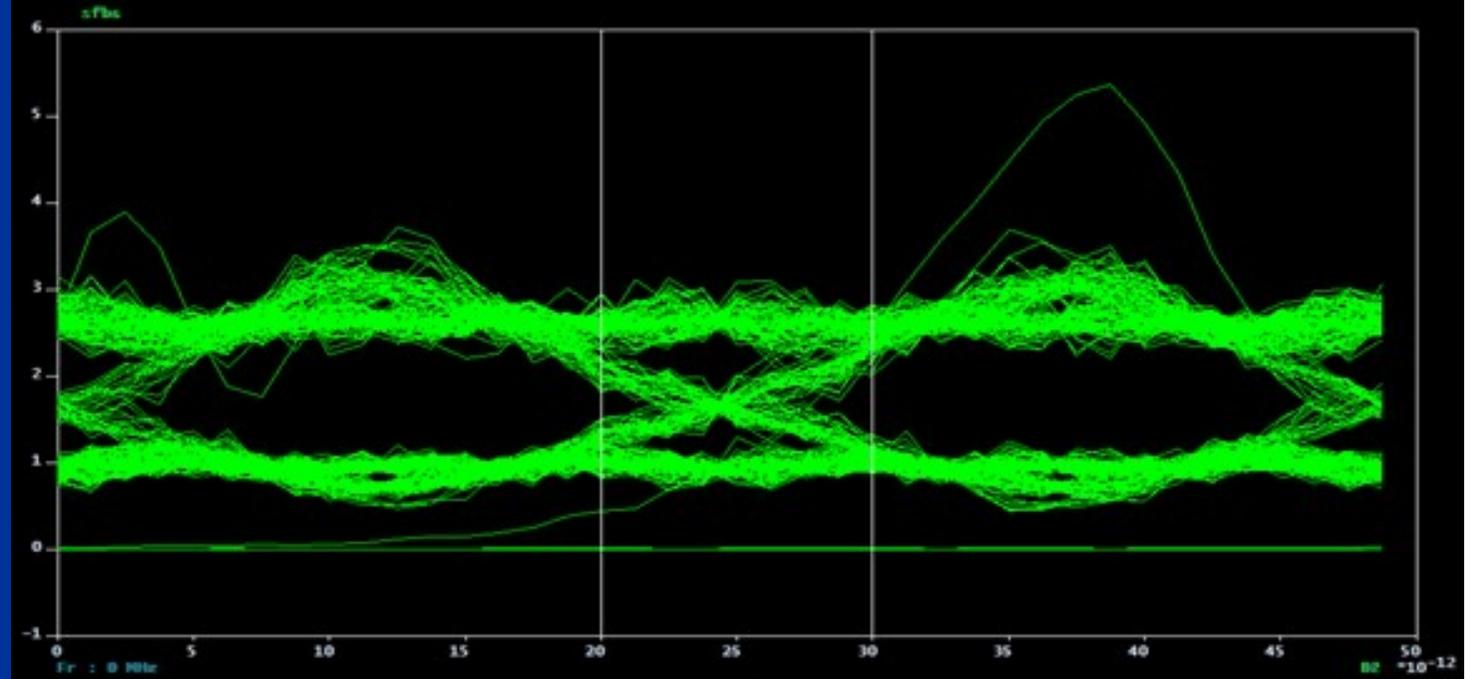
Débit Binaire (Mhz)	Facteur Q	TEB
10000	4.77	9.62 e-7
20000	3.40	3.60 e-4
30000	2.66	4.32 e-3
40000	2.02	2.54 e-2

# 👉 Influence de la longueur de la fibre sur les caractéristiques de la liaison

Une liaison de **10** km

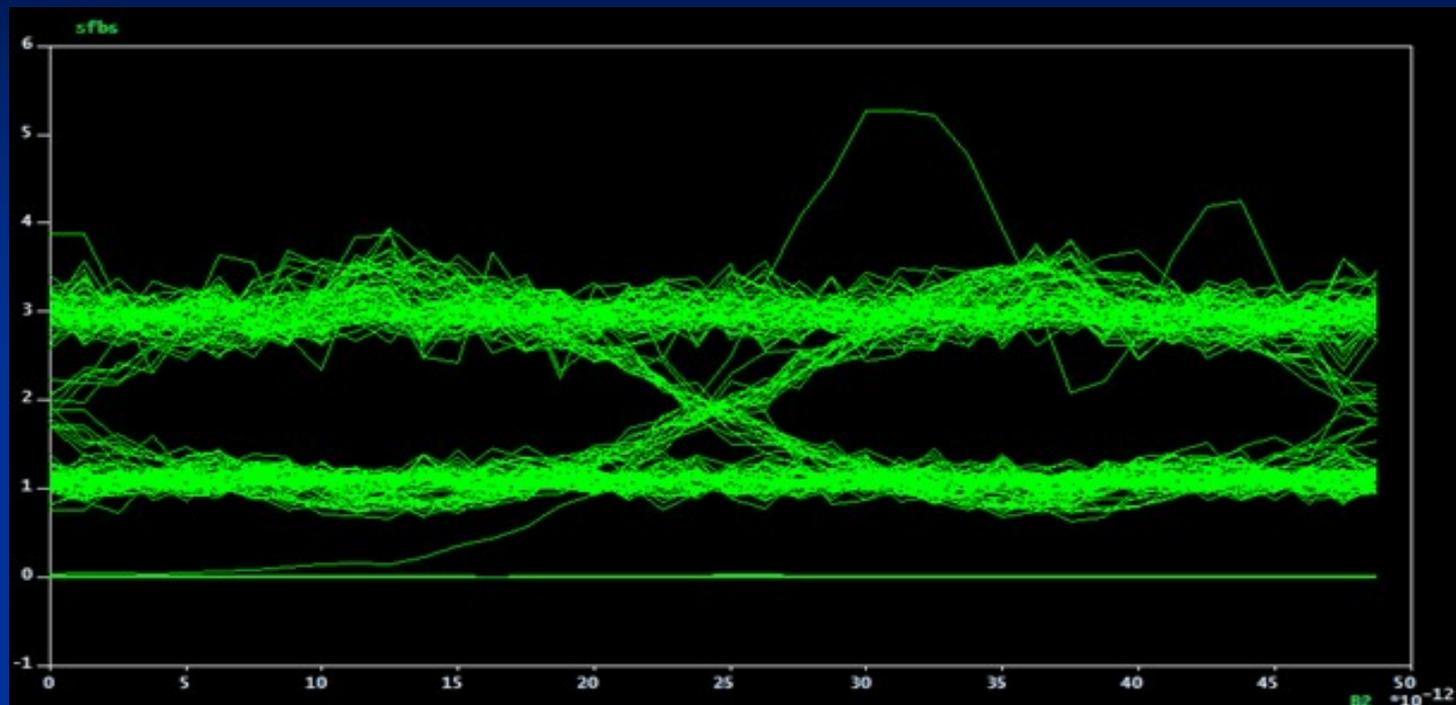


Une liaison de **50** Km

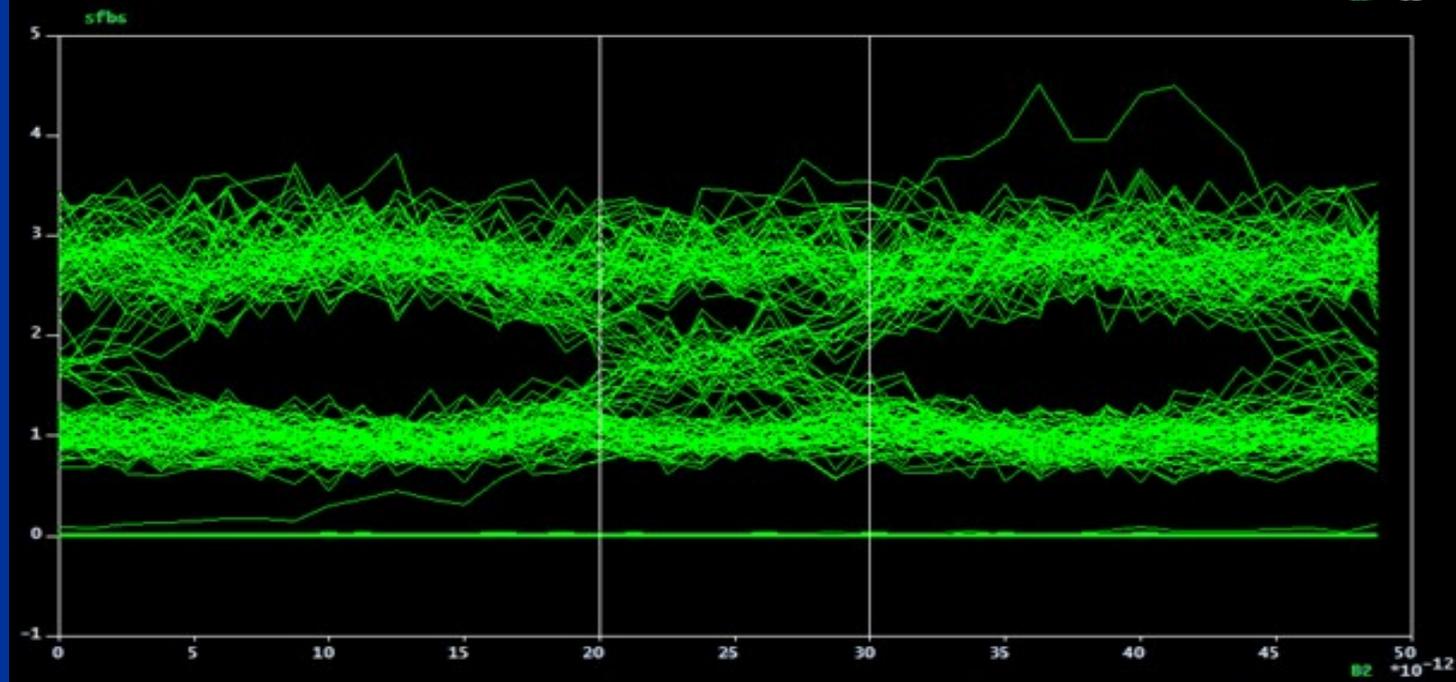


# 👉 Influence de la longueur de la fibre sur les caractéristiques de la liaison

Une liaison de **80** Km



Une liaison de **100** Km



## 👉 Influence de la longueur de la fibre sur les caractéristiques de la liaison

### ☐ Critères de qualité

Langueur de la fibre(Km)	Facteur Q	TEB
10	3.41	3.54 e-4
50	1.90	3.47 e-2
80	1.78	4.56 e-2
100	1.74	5.06 e-2

# Conclusion générale

Après cette étude, nous sommes sortis avec des résultats importants parmi lesquels :

- ✓ Les performances des systèmes des communications optiques haut débit et longue distance se trouvent influencées par les effets linéaires (dispersion chromatique, dispersion modale , atténuation).
  
- ✓ Dans le cas d'application à très haut débit, la lumière est modulée après être sortie de la source. Le laser est toujours en mode d'émission et un modulateur externe fait varier l'intensité du faisceau lumineux.
  
- ✓ Dans tout système de transmission, un paramètre important permet de connaître la qualité du système, c'est le taux d'erreur binaire, permettant de quantifier de manière probabiliste les erreurs de l'information reçue qui a été dégradée lors de la transmission, et bruitée lors de la détection.
  
- ✓ Néanmoins, les systèmes optiques à haut débit sont en pleine effervescence et ont de beaux jours devant eux.

*Merci pour  
votre  
attention*