

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen  
Faculté des Sciences  
Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études

pour l'obtention du diplôme de Master en télécommunication

*Option: PROTONS*

*Thème*

**Etude et comparaison d'un modulateur  
électro optique et un modulateur à électro  
absorption**

**Réalisé par :**

- Baioui Fatima zohra

*Présenté le .... Septembre 2015 devant le jury composé de MM.*

- |                   |     |             |
|-------------------|-----|-------------|
| - Merzougui .R    | MCA | (Président) |
| - Djelti.H        | MCB | (Examineur) |
| - Khelladi Mounir | MCA | (Encadreur) |

# *Remerciement*

Tout d'abord, je tiens à remercier le Tout Puissant pour tout: La santé, la volonté, le temps, la force, les moyens, le courage .....

J'adresse tout particulièrement à Mr « M. KHELLADI », Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaid, mes sincères reconnaissances et mes remerciements les plus vifs, de m'avoir dirigé et guidé tout le long de ce travail. Ses critiques constructives, remarques et précieux conseils ont contribué à faire progresser mes recherches.

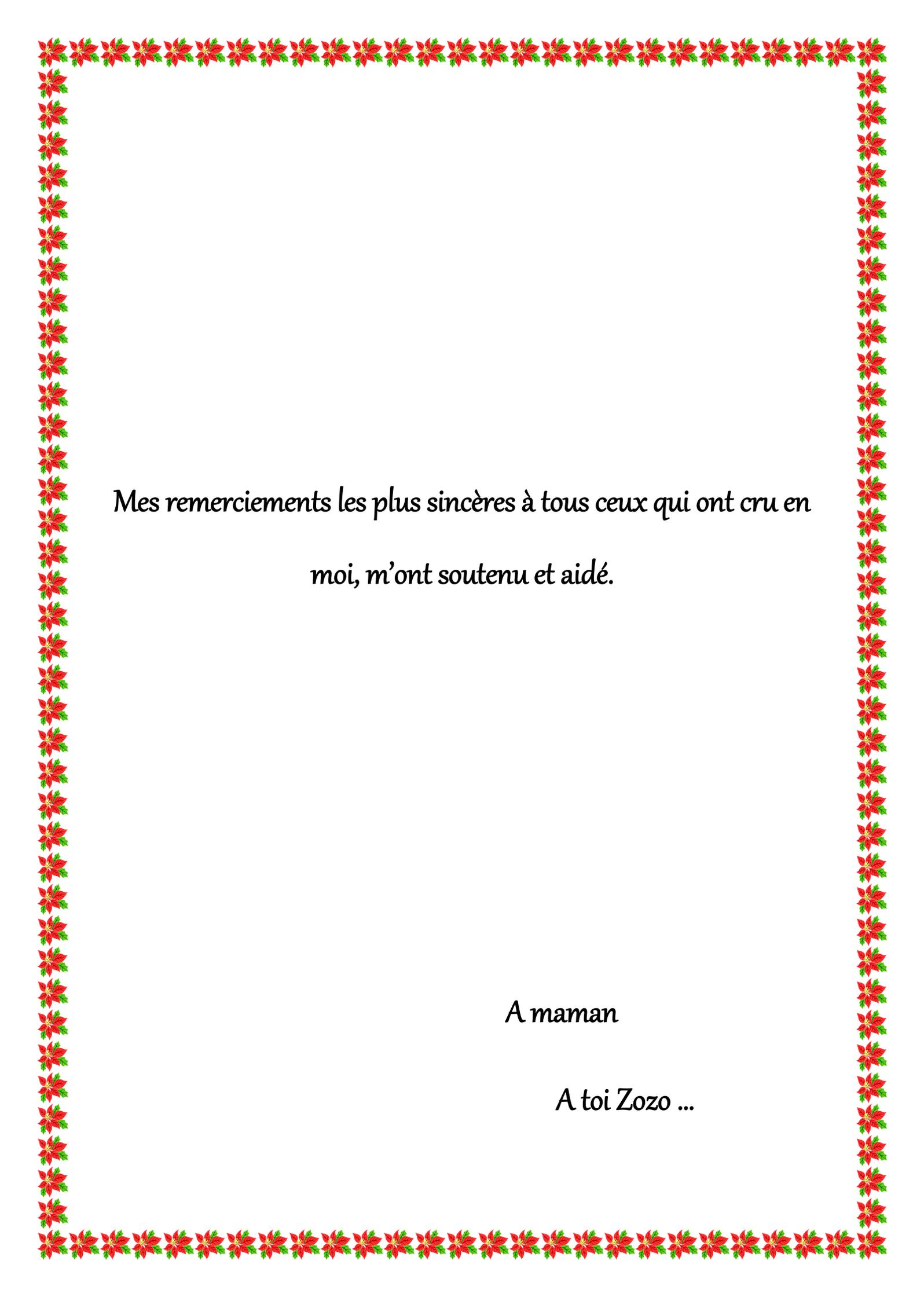
J'exprime ma gratitude à tous les Professeurs de l'Université Abou-Bakr Belkaid qui m'ont enseigné tout le long du parcours et spécialement à monsieur « SEDDIKI ».

J'adresse mes remerciements les plus distinguées à ma merveilleuse maman dont le soutien aussi bien moral que matériel ne m'a jamais fait défaut.

Je voudrais remercier du fond du cœur ma famille pour leur soutien et leur amour.

Enfin un merci pour mes amis qui m'ont soutenu, ceux qui on été présents dans ma joie et ma peine.

Enfin bonne lecture à ceux qui auront le courage d'aller plus loin.



Mes remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont cru en  
moi, m'ont soutenu et aidé.

A maman

A toi Zozo ...

# Table de matières

Introduction général .....	01
----------------------------	----

## **Chapitre 1**

I. Les techniques de transmission dans les systèmes de télécommunication optique .....	03
I.1. Introduction .....	03
I.2. Principe de base .....	03
II. Le module émission : La source optique .....	04
II.1. Diodes électroluminescentes (LED, Light Emission Diode) .....	05
II.2. Les diodes lasers .....	05
II.2.1. Principe de la diode Laser .....	05
II.3. Le codeur .....	07
II.4. Les modulateurs .....	07
II.4.1. Modulation directe .....	08
II.4.2. Modulation externe .....	09
III. Multiplexage .....	09
IV. Le canal de transmission .....	10
IV .1. La fibre optique .....	10
IV.1.1. Types de fibre .....	11
IV.1.1.1. Les fibres monomodes .....	11
IV.1.1.2. Les fibres multimode .....	12
IV.1.1.1.1 Les fibres optiques multimodes a saut d'indice .....	13
A- Gaine et Cœur .....	13
IV.1.1.1.2 Les fibres optiques multimodes a gradient d'indice .....	13
IV.1.2. Ouverture numérique .....	14
IV.1.3. L'atténuation .....	15
IV.1.4. La dispersion .....	16
IV.1.4.1. Dispersion modale .....	16
IV.1.4.2. Dispersion chromatique .....	17
A-Effet de la dispersion chromatique .....	18

IV.1.4.3. Dispersion de mode de polarisation (PMD, Polarization Mode dispersion).....	19
IV.1.5. Avantages et inconvénients .....	20
IV.2. Les dispositifs actifs pour la régénération 2R et 3R .....	20
a) La régénération 1R (Ré-amplification) .....	21
b) La régénération 2R (Ré-amplification et Remise en forme).....	21
c) La régénération 3R (Ré-amplification, Remise en forme et Resynchronisation).....	21
IV.3. L'amplificateur.....	22
IV.3.1. Amplificateur électrique .....	22
IV.3.2. Amplificateurs optiques .....	23
IV.3.3. Amplificateur Dopée Erbium .....	23
IV.3.4. Les amplificateurs à semi-conducteur (AOSC) .....	24
IV.3.5. Les amplificateurs Raman.....	25
V. Le module de réception .....	26
V.1. Démultiplexage .....	26
• Le démultiplexage temporel tout-optique .....	26
V.2. Le photodétecteur .....	26
A- Principe de fonctionnement de la photodétection .....	27
B- Caractéristiques de la photodétection.....	27
V.3. Les photodiodes PIN .....	28
V.3.1. Les photodiodes à avalanche .....	30
VI.4. Le filtrage.....	31
VII.5. Le Circuit de décision .....	31
VIII. Conclusion .....	32

## Chapitre 2

### **Modulateur Electro Optique**

II .1. Introduction à la modulation .....	33
II.1.1. Modulation directe et modulation externe.....	33
II.2. Modulateur électro optique .....	33
II.2.1. Définition .....	33
II.2.2. Théoriques .....	34

II.2.3. Les matériaux électro-optiques.....	35
II.2.4. Polarisation rectiligne de la lumière .....	35
II.2.4.1 La biréfringence.....	37
• Milieu isotrope .....	37
• Milieu anisotrope .....	37
• Biréfringence .....	37
II.3.Type de modulateur .....	38
• Le modulateur de Mach-Zehnder (MMZ) .....	38
▪ Modulation de phase .....	39
▪ Modulateur d'intensité de type Mach-Zehnder.....	40
• Modulateur par anti guidage.....	41
• Modulation par couplage.....	42
• Modulateur à ondes progressives .....	42
II.4. Applications industrielles .....	44
• Modulateurs à base de semi-conducteurs .....	44
• Modulateurs à base de LiNbO3 .....	45
• Modulateurs à base de polymères.....	47
Applications .....	47

## Chapitre 3

### Les modulateurs à électro absorption

III .1 . Introduction .....	49
III.2. Modulateurs à électro-absorptions .....	49
III.2.1. Introduction .....	49
III.2.2. Semi-conducteur .....	51
III.2.2.1. Rappel sur la structure de l'atome .....	51
III.2.2.2. Rappel sur la structure d'un cristal .....	52
III.2.2.3. Définition .....	57
III.2.2.4. Modèle de l'électron libre des S-C.....	58
III.2.3. Effet tunnel.....	59
III.2.3.1. Introduction .....	59

III.2.3.2. Définition .....	59
III.2.4. Caractéristiques d'un MEA .....	60
III.2.4.1. Facteur de confinement et taux d'extinction .....	60
III.2.4.2. Pertes internes d'atténuation .....	60
III.2.5. Rapidité de modulation .....	62
III.2.5.1. Tension de commande.....	63
III.2.5.2. Puissance de saturation.....	64
III.2.5.3. Temps d'échappement des porteurs .....	64
III.3. Principe de fonctionnement .....	66
III.3.1. L'effet Franz-Keldysh .....	68
III.3.2. L'effet Stark confiné dans les puits quantiques .....	68
III.4. Principe de l'électro absorption .....	69
III.5. Dynamique du modulateur .....	71
III.5.1. Relation entre l'absorption et l'indice de réfraction.....	71
III.5.2. Evolution de la phase et de l'amplitude .....	71
III.5.3. Forme du signal en sortie du modulateur .....	73

## Chapitre 4

### Simulation et comparaison

IV.1. Le simulateur système COMSIS .....	75
IV.2. Présentation du logiciel .....	75
IV.3. La simulation .....	76
1) L'éditeur de schéma-bloc .....	76
2) La bibliothèque .....	77
3) La simulation temporelle .....	78
IV.4. La simulation .....	78
IV.4.1. La partie émission .....	79
❖ Circuit de données électriques .....	79
❖ Courant du Laser .....	80

❖ Le laser .....	81
❖ Modulateur électro-absorbant .....	82
❖ Modulateur électro optique .....	83
❖ Fibre optique .....	83
❖ Amplificateur électrique .....	84
❖ Amplificateur optique .....	85
IV.4.2.La partie transmission .....	86
❖ La photodiode PIN .....	86
❖ La photodiode à avalanche .....	87
❖ Filtre .....	87
❖ Horloge .....	88
❖ Synchronisation ou retard .....	89
❖ Décision .....	89
IV.5.Résultats et discussion .....	90
<i>Résultats de simulations pour modulateur électro- absorption</i> .....	90
❖ Avec un débit =2048 Mbits/s .....	90
1) Avec une photodiode PIN .....	90
2) Avec une photodiode Avalanche .....	91
❖ Avec un débit de 3072 Mbits/s .....	92
1) Avec une photodiode PIN .....	92
2) Avec une photodiode à avalanche .....	93
❖ Avec un débit de 5120 Mbits/s .....	94
1) Avec une photodiode PIN .....	94
2) Avec une photodiode Avalanche .....	95
❖ Avec un débit =2048 Mbits/s .....	96
❖ La longueur de la fibre =1680 km.....	96
1) Avec une photodiode PIN .....	96

2) Avec une photodiode a avalanche .....	97
<i>Résultats de simulations pour modulateur électro-optique</i> .....	98
❖ Avec un débit =2048 Mbits/s .....	98
❖ Avec une longueur de fibre 1260 km.....	98
1) Avec une photodiode PIN .....	99
2) avec une photodiode Avalanche .....	99
❖ Avec un débit de 3072 Mbits/s .....	100
1) Avec une photodiode PIN .....	100
2) Avec une diode a avalanche.....	101
❖ Avec un débit de 5120 Mbits/s .....	102
1) avec une photodiode PIN .....	102
2) avec une photodiode avalanche .....	103
❖ Avec un débit de 2048 Mbits/s .....	104
❖ Une fibre de longueur de 1680 km.....	104
1) Avec une photodiode PIN .....	104
2) Photodiode a avalanche .....	105
3) Conclusion .....	105
 Conclusion générale .....	 106
 Résumé	

Le développement des télécommunications s'est caractérisé par l'utilisation d'un domaine de fréquences de plus en plus vaste, depuis les quelques kilohertz des premières lignes téléphoniques jusqu'aux quelques dizaines de gigahertz des liaisons radio. Il était donc a priori logique que la lumière puisse être utilisée afin de prolonger le spectre. Elle ne pouvait ce pendant devenir un moyen de télécommunication que dans la mesure où il était possible de moduler une source optique à des fréquences élevées et de transmettre les signaux sur un support stable et peu atténuant.

La télécommunication par fibre optique est enfin parvenue à pleine maturité. Elle constitue aujourd'hui une alternative rentable pour les transmissions de longue portée ou de portée moyenne. Elle tire avantage des propriétés de la transmission par fibre optique (bande passante plus importante, immunité accrue en regard des interférences électromagnétiques, avantages en matière de confidentialité et de sécurité, etc.). Les améliorations qui sont apportées à la technologie des transmissions par fibre optique sont telles que la communication par fibre optique n'est plus désormais le privilège des seules grandes entreprises transmettant des débits d'information très élevés mais aussi et surtout, le privilège du simple consommateur.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette mémoire s'inscrivent dans le contexte des télécommunications optiques à base des modulateurs électro optique et à électro absorption. Les recherches dans ce domaine sont motivées par une demande croissante en débit de la part des opérateurs de télécommunications. Depuis une vingtaine d'années, les laboratoires de recherches publique et privée ont développé les outils adaptés aux télécommunications sur fibre, comme les amplificateurs à fibre dopée et les réseaux de Bragg permettant d'améliorer les liaisons point à point. La technique de multiplexage en longueur d'onde a permis d'accroître la capacité des transmissions.

Le travail réalisé au cours de la cette mémoire relève de la première préoccupation citée, qui est la réalisation de fonctions tout-optiques fonctionnant à des débits de l'ordre de 5 Gbit/s. La caractéristique fondamentale de ces fonctions réside dans leur fonctionnement, basé sur un principe physique plus rapide que la vitesse de modulation des données, ce qui permet de traiter les données bit à bit.



Les systèmes de télécommunication optiques mettent en jeu un ensemble d'éléments, à commencer par les composants d'émission/réception de la lumière, le support de propagation qu'est la fibre optique, les amplificateurs optiques, ainsi que les composants spécifiques pour le WDM. À ces fonctions purement optiques et/ou optoélectroniques s'ajoutent des circuits électroniques rapides permettant de moduler et d'amplifier les signaux émis et recueillis, de récupérer les signaux de référence, ainsi que des organes de haut niveau de gestion du réseau. Ce travail a pour but de présenter l'utilisation qui peut être faite de la simulation de systèmes simples pour une introduction aux télécommunications par fibre optique. Il s'appuie sur une expérience menée utilisant le logiciel commercial COMSIS.

Le premier chapitre de ce mémoire est une description générale des composantes d'une liaison optique à très haut débit. La première partie de ce chapitre, décrit les caractéristiques fondamentales des blocs principaux des systèmes étudiés, tels que :

- L'émetteur : la diode laser à semi-conducteur
- Le modulateur
- Le récepteur du signal optique : la photodiode, l'amplificateur, le filtre.
- L'élément de connexion : la fibre optique, le régénérateur.

Dans le deuxième chapitre, nous développerons les modulateurs électro optiques et ses types. Nous visons à démontrer la faisabilité d'un modulateur Mach-Zehnder à effet électro-optique pour son multiple intérêt scientifique et technique.

Dans le troisième chapitre sera consacré sur l'étude et l'implémentation d'un modulateur à électro absorption. La première partie est portée sur un rappel théorique sur les semi-conducteurs qui est la base de ce type de modulateur. La deuxième partie est pour étudié et analyser les propriétés électro optique de ce dernier. Enfin

Le quatrième chapitre qui représente la touche personnelle pour ce travail qui est la simulation à laide du logiciel COMSIS avec des résultats pour les différents deux types de modulateurs : modulateurs électro optique et le modulateur électro absorbant.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale et la proposition de d'autres solutions.



## I. Les techniques de transmission dans les systèmes de télécommunication optique

### I.1. Introduction

Au cours du développement des dispositifs de télécommunication, il est rapidement apparu indispensable de coder l'information à transmettre, soit pour adapter l'information au canal de transmission (fibre optique, câble coaxial, faisceaux hertziens), soit pour transmettre simultanément plusieurs signaux informatiques sur un seul et même canal. De ce fait, le codage de l'information s'est révélé être un point-clef qui fait aujourd'hui encore l'objet de recherches et de normalisation.

Ce chapitre présente en une chaîne de transmission de signaux numériques, A fin de situer et préciser l'importance des fonctions de modulation et de démodulation, remplacées dans leur contexte. Ces deux éléments se situent à des positions déterminantes (aux deux extrémités d'un canal de transmission) ce qui implique qu'ils sont les plus sujets comme tous les systèmes de communications, les liaisons optiques se basent sur trois blocs fondamentaux pour effectuer le transfert de l'information: l'élément d'émission, le canal de communication et le récepteur. La particularité de ce système provient des éléments utilisés pour effectuer le transport de l'information.

### I.2. Principe de base

L'utilité de transmettre l'information de manière optique, est d'obtenir des débits de transmission très importants, et ceci sur les plus grandes distances possible. Les avantages de l'utilisation de la fibre optique sont par exemple: la large bande passante ( $15 THz$  à  $\lambda = 1,3$  et  $\lambda = 1,5 \mu m$ ), donc des débits binaires élevés, leurs affaiblissements minimisés, l'immunité électromagnétique, la faible sensibilité aux facteurs extérieurs (température, humidité..). Leurs faibles encombrements et leurs faibles poids... en font un support de transmission de premier choix.

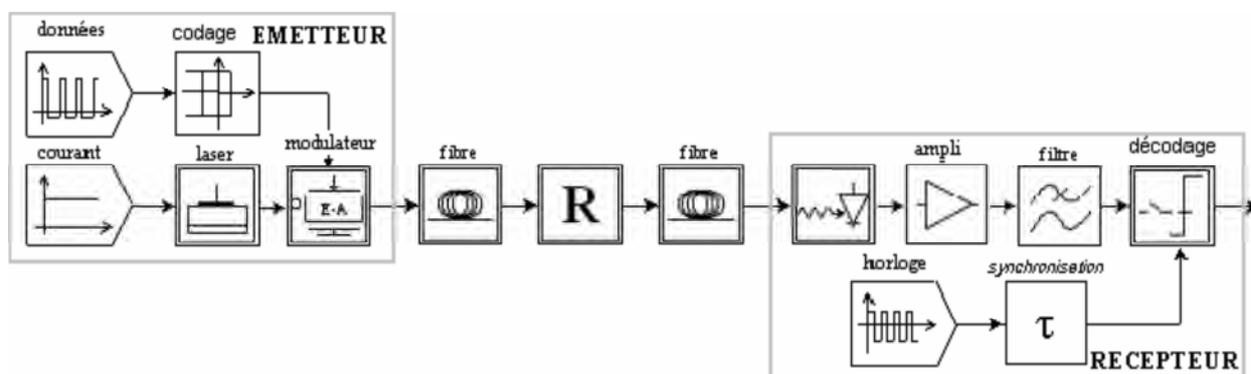


Fig. I. 1 Schéma de principe d'une ligne de transmission sur fibre optique



L'idée, pour transmettre l'information sur fibre optique, reste basée sur les principes, employés lors des transmissions en bande de base. Dans notre cas, le canal de transmission sera réalisé à l'aide de fibre optique.

L'information sera codée (pour augmenter le gain de transmission), convertie en signal lumineux, puis modulée avec une source optique cohérente monochromatique (diode laser). Permettant de porter le signal à  $\lambda = 1,55 \mu m$  (fenêtre de transmission des systèmes actuels), bande spectrale où se trouve l'atténuation minimale des fibres optiques, qui sera de type monomodes, dont la principale caractéristique est d'avoir une atténuation d'environ  $0,2 \text{ dB/km}$ , bien inférieure aux autres type de fibre (gradient d'indice, multimode,...).

Propagé sur des distances, le plus souvent importantes (milliers de km), atténué et dispersé, le signal optique aura besoin d'être régénéré (R), remis en forme (2R) voir re-synchronisé (3R), rôle que devront remplir les répéteurs placés tout au long de la ligne. Enfin l'information pourra être récupérée après conversion Optoélectronique (photodiode), remis en forme, démodulée (filtre passe-bas) ou ramenée en bande de base, re-synchronisée, puis décodée et corrigée (le taux d'erreur binaire accepté dans les systèmes actuels est un  $TEB < 10^{-12}$  (Taux d'erreur binaire) norme de l'UIT, Union International des Télécommunication)[1].

## II. Le module émission : La source optique

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs petites dimensions par rapport à celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique.

Dans le domaine des télécommunications optiques, deux types de sources lumineuses sont couramment utilisées : les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes lasers.

### II.1. Diodes électroluminescentes (LED, Light Emission Diode)

Une LED est une jonction PN polarisée en direct. Les électrons ou les trous qui constituent les porteurs majoritaires sont injectés dans le voisinage de la jonction. Leur recombinaison donne lieu à une émission de la lumière. Ces diodes sont généralement utilisées pour les applications bas débit. C'est pour ces raisons que nous ne parlerons dans la suite que des diodes lasers à semi-conducteurs [2].



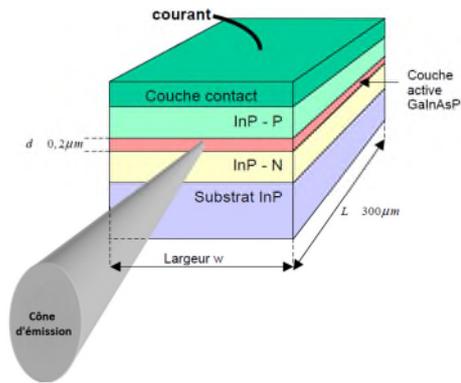


Figure I.2 : diode laser

- Principe : Création d'une différence de potentiel entre la partie N (chargée négativement) et la partie P (chargée positivement)
- Application d'une tension positive du côté N et négative du côté P : la jonction se creuse
- Emission de photon (atome de la lumière) au passage d'un électron dans la couche active

## II.2. Les diodes lasers

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*. En pratique il s'agit de faire passer un signal lumineux plusieurs fois dans un amplificateur grâce à une boucle de contre réaction [1].

### II.2.1. Principe de la diode Laser

Une diode Laser a la forme d'un parallèle de rectangle dont les deux faces clivées perpendiculairement au plan d'une jonction de semi-conducteurs émettrice, constituent un résonateur Fabry-Pérot. Ce résonateur est à l'origine de l'émission stimulée de photons caractéristique de l'émission laser.



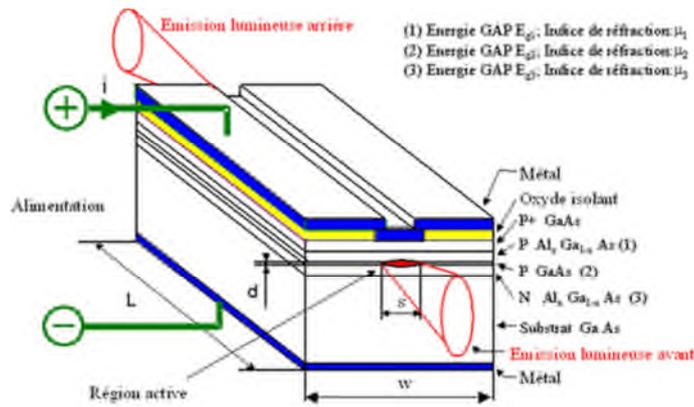


Figure I.3: Diode LASER type DH-OS ("Double HeterostructureOxide-isolatedStripe")

Afin d'obtenir une émission Laser continue et puissante à température ambiante, la jonction de semi-conducteurs sera une structure complexe telle que la double hétérojonction (DH) de la figure précédente. Cette dernière présente l'avantage de confiner les porteurs par une barrière de potentiel électrostatique dans un volume très réduit  $V = L \cdot d$ , s'appelé zone active. Ce confinement permet d'obtenir pour un faible courant d'injection, une densité de porteurs élevée et par conséquent un gain élevé. Pour fixer l'échelle de taille de la zone active, sachez que  $L \sim 100$  à  $500 \mu\text{m}$ ,  $d \sim 0,1$  à  $0,5 \mu\text{m}$ ,  $s \sim 2$  à  $5 \mu\text{m}$ .

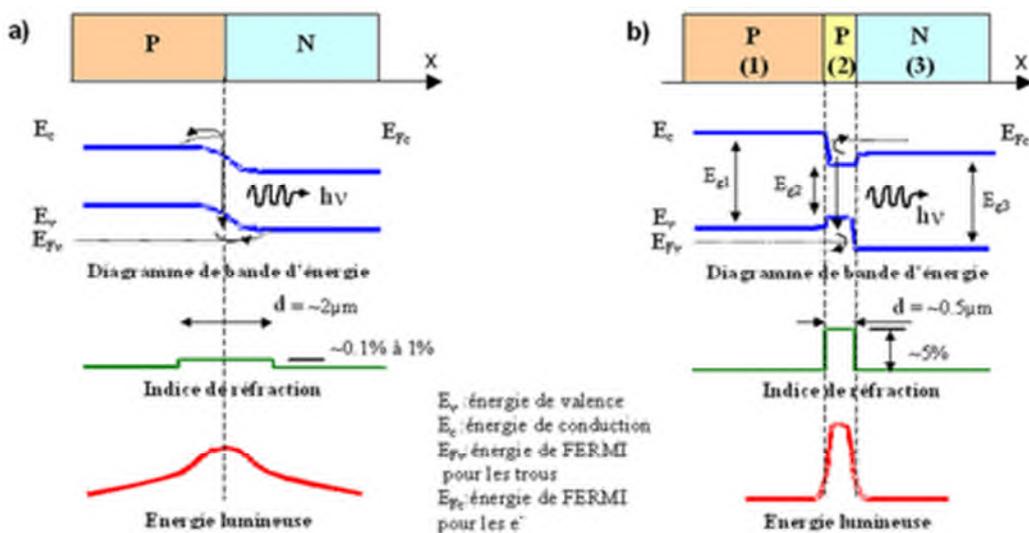


Figure I.4 : Jonctions émettrices. a) Homojonction. b) Double-hétérojonction.

Dans le cas d'une hétérojonction, nous obtenons un meilleur confinement des porteurs et des photons.



Retenons qu'une diode laser monomode est un émetteur de lumière intense (qqm mW à qqm 100 mW), quasi monochromatique (une seule longueur d'onde) et de grande cohérence temporelle (interférences avec différence de chemin optique de plusieurs mètres).

### II.3. Le codeur

On doit convertir tous les signaux analogiques en des signaux numériques en utilisant l'échantillonnage, la quantification,...avec un code de type NRZ, RZ, ...

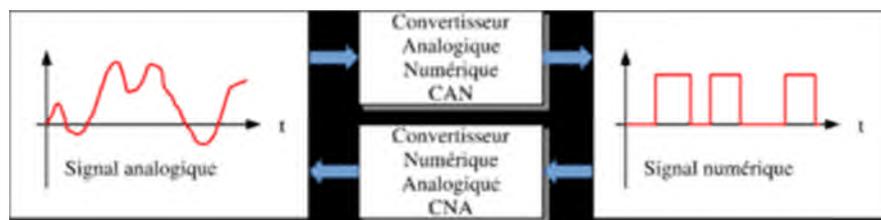


Figure I.5 : convertisseur analogique -numérique

### II.4. Les modulateurs

La modulation qui permet d'imprimer une information sur un signal physique, est une fonction essentielle de tout système de transmission.

Une technique appelée modulation directe, consiste à moduler directement le courant injecté dans le laser. Un inconvénient de ces méthodes est que lorsque l'on module en amplitude le courant d'injection d'un laser, Cela s'accompagne d'une modulation de fréquence parasite ou chirp. Ces effets, conjugués à la dispersion chromatique de la fibre, provoquent un élargissement de l'impulsion d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande.

La deuxième méthode qui permet de contourner cette difficulté, est la technique de modulation externe l'émetteur est alors constitué d'une source optique émettant une onde pure suivie d'un modulateur externe (comme par exemple le Niobate de Lithium  $\text{LiNbO}_3$ ).

Le courant d'injection du laser n'est plus modulé, le modulateur externe introduit beaucoup moins de conversion amplitude-fréquence et le signal modulé envoyé dans la fibre est nettement moins affecté par ce phénomène [1].

Dans le cadre de ce travail, on s'intéressera uniquement à la modulation optique dans les lasers à semi-conducteurs. Il existe deux méthodes pour moduler les ondes optiques pour les télécommunications : la modulation directe (ou interne) et la modulation externe.



Dans la modulation directe, on modifie le courant dans la diode laser (DL) ou dans la diode électroluminescente (DEL), tandis que pour la modulation externe, il faut un dispositif séparé appelé modulateur externe. La modulation directe offre l'avantage d'être simple et peu coûteuse, en plus elle nécessite une tension réduite (la tension appliquée n'est que de 2 à 3 Volts) et une puissance faible.

Cependant, elle présente des inconvénients liés aux oscillations de relaxation, chirp, bruit, ...

En effet, la modulation d'intensité s'accompagne d'une modulation parasite de fréquence optique (ou de longueur d'onde) désignée sous le nom de « chirp ».

Dans le cas de la modulation externe, divers types de modulation sont possibles : modulation d'amplitude, de phase, de polarisation, d'impulsion ... Ce type de modulation permet d'obtenir de très grands débits. Avant de décrire la modulation, examinons quelques particularités et/ou caractéristiques des différentes modulations [2].

#### II.4.1. Modulation directe : [3] [4]

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement. La modulation du courant qui traverse le laser entraîne directement la modulation de la lumière émise par celui-ci. Cette technique de modulation est appelée « modulation directe ». Il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser, c'est-à-dire sur le courant injecté dans le laser à semi-conducteur, pour moduler en amplitude le signal émis par celui-ci.

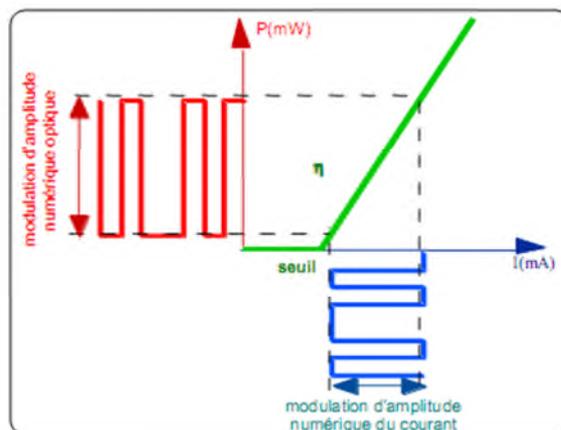


Figure I.6 : Modulation directe d'une diode laser

#### II.4.2. 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. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents dans le signal optique. La modulation externe est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable qui est 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 [5].

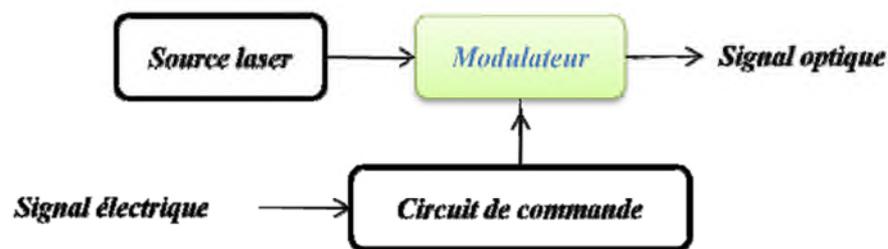


Figure I.7: synoptique d'un module d'émission en modulation externe

### III. Multiplexage

Le multiplexage en longueur d'onde consiste à utiliser des longueurs d'ondes distinctes pour transmettre différents signaux sur une même fibre. Cette technologie a permis d'élargir le débit de transmission dans les liens point à point. Plusieurs signaux générés indépendamment dans le domaine électronique sont convertis vers le domaine optique en utilisant des diodes lasers de différentes longueurs d'onde (modulation sur porteuse optique). Les signaux résultants sont ensuite multiplexés et couplés à une fibre optique.

Dans le récepteur, un démultiplexeur sépare les différentes longueurs d'ondes qui sont ensuite reconverties vers le domaine électronique au moyen de photodiodes. La capacité d'un système WDM peut être augmentée en jouant soit sur le débit de chaque canal, soit sur le nombre de canaux. La figure montre le schéma de principe DWDM avec trois longueurs d'ondes.



Cette technique de multiplexage optique a été rendue possible grâce au développement d'amplificateurs optiques qui eux aussi possèdent une très grande bande passante, et qui permet une régénérescence purement optique des signaux [1].

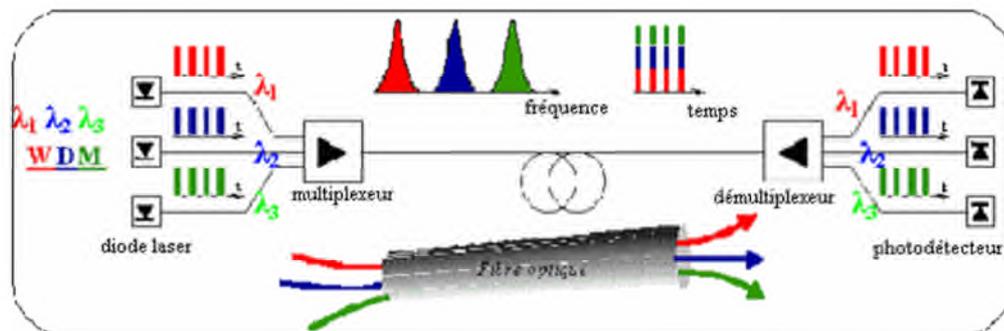


Figure I.8 : Schéma de principe du multiplexage WDM

#### IV. Le canal de transmission

##### IV.1. La fibre optique

Une fibre est un guide d'onde cylindrique et diélectrique. Elle est constituée de deux diélectriques de même axe, le cœur et la gaine, entourés d'une gaine de protection (Figure I.9) [7].

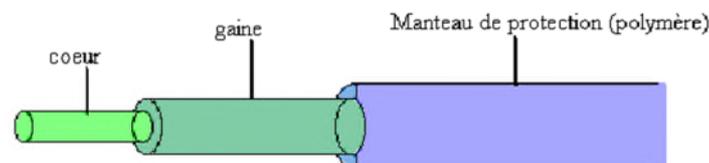


Figure I.9 : la fibre optique

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine. Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui du cœur (une différence de quelques % est suffisante). La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. L'ouverture numérique (ON) représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptré cœur - gaine de la fibre [5].



Il existe deux types de fibres optiques: les fibres monomodes et les fibres multimodes. En fonction de leurs géométries internes, on peut distinguer deux catégories de fibres multimodes : à saut d'indice, si le changement d'indice entre cœur et gaine est brusque, ou à gradient d'indice si l'indice de réfraction décroît graduellement à l'intérieur du cœur.

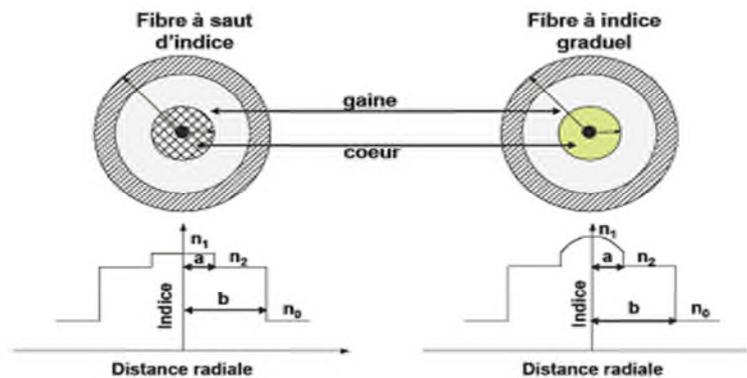


Figure 1.10: Section transversale d'une fibre à saut d'indice et d'une fibre à gradient d'indice

En effet, la fibre optique monomode classique  $9/125 \mu\text{m}$  présente des pertes en fonction de la longueur d'onde des photons qui se propagent à l'intérieur de sa structure. Ces pertes sont dues à des causes différentes. Comme il a été mentionné antérieurement, le minimum de pertes de la fibre se situe aux environs de  $1,55 \mu\text{m}$  ( $0,2 \text{ dB/km}$ ), qui est la longueur d'onde la plus utilisée dans le domaine des télécommunications moyennes et longues distances. Les performances en termes de faible atténuation et de large bande passante, nous amènent à utiliser des fibres monomodes à  $1,55 \mu\text{m}$ . [6]

#### IV.1.1. Types de fibre

##### IV.1.1.1. Les fibres monomodes

Ce sont des fibres dont la dimension du cœur est comprise entre 20 à  $50 \mu\text{m}$ . Elles sont conçues pour guider pratiquement sans perte la lumière à une longueur d'onde bien précise.

Dans ce cas il n'y a plus de dispersion modale. Pour les autres longueurs d'ondes il est difficile d'injecter de la lumière et il n'y a presque pas de guidage. La dispersion chromatique est donc marquée.

Une onde lumineuse, est une onde électromagnétique composée d'un champs électrique et un magnétique E et B, elle se propage aux vitesses



$$c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} = 3.10^8 \text{ m/s} \quad (\text{I.1})$$

Dans le vide et

$$v = \frac{c}{n} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{nf} \quad (\text{I.2})$$

Les fibres optiques sont des guides d'onde ou la propagation des signaux lumineux se décrit au moyen de modes de propagation, chaque mode étant une solution spécifique de l'équation d'onde.

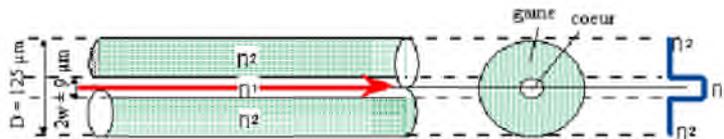


Figure I.11 : Topologie d'une fibre optique monomode

Au niveau des télécommunications, une autre caractéristique est essentielle : la propagation monomodes. En effet, pour éviter qu'un signal de longueur d'onde transmis par la fibre arrive en plusieurs temps, il ne doit se propager qu'avec une seule vitesse. Pour cela, la condition suivante sur le rayon du cœur  $a$ , doit être vérifiée [1]

$$\alpha \leq \frac{2,405 \lambda}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \Rightarrow \lambda_c = \frac{2\pi}{2,405} a. n_1 \quad (\text{I.3})$$

$\lambda_c$ : Longueur d'onde de coupure de la fibre

#### IV.1.1.2. Les fibres multimode

Les fibres multimodes sont de préférence employées pour les réseaux locaux, pour les bas débits ou encore pour des longueurs d'onde proches de 850 nm [8].



#### IV.1.1.1.1. Les fibres optiques multimodes à saut d'indice

Une fibre optique multimodes est une fibre en verre de section circulaire dont le cœur c'est-à-dire la partie centrale où se propage la lumière a un diamètre grand devant la longueur d'onde. On peut donc les étudier de façon simplifiée mais correcte par l'optique géométrique [9].

##### A- Gaine et Cœur

Le type le plus simple est la fibre optique à saut d'indice ou le cœur (la partie centrale de la fibre) d'indice de réfraction  $n_1$  est entouré d'une gaine optique d'indice  $n_2$  légèrement inférieur (Figure I.12). Le diamètre du cœur est  $2a=100\ \mu\text{m}$ , pour un diamètre total (gaine) de  $2b=150\ \mu\text{m}$ . L'ensemble est entouré d'un revêtement de protection généralement en matière plastique.

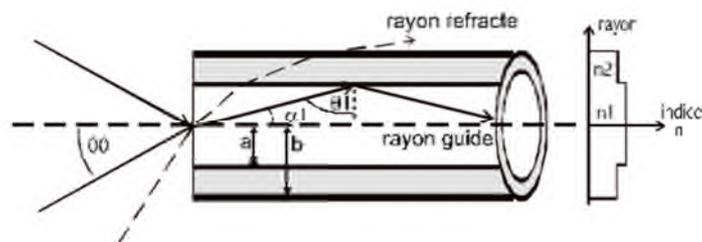


Figure I.12 : structure d'une fibre à saut d'indice

#### IV.1.1.1.2. Les fibres optiques multimodes à gradient d'indice

C'est la raison pour laquelle une seconde génération de fibre à vue le jour; Les fibres à gradients d'indice ont été spécialement conçues pour minimiser cet effet de dispersion modale.

Dans ce type de fibre, l'indice optique du cœur diminue de l'axe jusqu'à la gaine, suivant une loi parabolique comme indiqué sur la (Figure I.13).

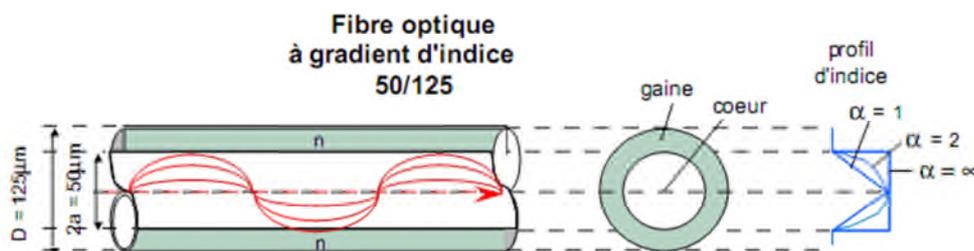


Figure I.13 : Fibre multimode à gradient d'indice

L'indice du cœur à une distance  $r$  de l'axe est la loi parabolique:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2} \text{ Avec } \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \text{ soit } \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (\text{I.4})$$

Les rayons lumineux suivent des trajectoires d'allure sinusoïdale, et ceux ayant le trajet géométrique le plus long passent par des milieux d'indice plus faible, donc de vitesses supérieures. Par ce procédé on égalise les temps de propagation [9].

#### IV.1.2. Ouverture numérique

L'ouverture numérique est un des paramètres les plus importants d'une fibre. Une forte ouverture numérique permet de coupler une grande quantité de lumière dans la fibre.

$$ON = \sin \alpha_{max} = n_1 \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_{lim} \right) = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (\text{I.5})$$

Par contre, elle introduit également un étalement des impulsions transmises par effet de dispersion modale [9].

Les principales caractéristiques qui déterminent le choix d'un type de fibre sont les Suivantes :  
L'atténuation et la dispersion [6]

Type de fibre	Diamètre Cœur/Gaine	Atténuation (dB/Km)			Bande Passante
		$\lambda = 850nm$	$\lambda = 1300nm$	$\lambda = 1550nm$	
Monomode	9/125 $\mu m$	2	0,4	0,2	>100 GHz.km à 1300 et 1550 $\mu m$
Multimode à gradient d'indice	50/125	2,5	0,72		200 à 400 MHz.km
	85 /125	3,5	2		100 à 500 MHz.km
	100/140	5			100 à 400 MHz.km
Multimode à saut d'indice	Diamètre du cœur : 200 à 600 $\mu m$	5 à 20 $\lambda = 850nm$			10 à 20 MHz.km

Tableau I.1 : Comparaison des différents paramètres qui caractérisent les différents types de fibre



### IV.1.3. L'atténuation

L'atténuation de la fibre optique dont les valeurs typiques vont de 10 dB/km pour une fibre multimode à saut d'indice à 850 nm, jusqu'à 0,2 dB/km pour une fibre monomode à 1550 nm (*Tableau I.1*). Les principales sources d'atténuations sont caractérisées par le phénomène de diffusion qui provoque un changement dans la direction de l'onde qui se propage et par le phénomène d'absorption qui conduit à une disparition progressive de l'onde [6].

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

$$\alpha(\lambda)_{(dB/km)} = -\frac{10}{L} \log \left[ \frac{P_S}{P_E} \right] \quad (I.6)$$

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

L'atténuation provient principalement de deux phénomènes : l'absorption et la diffusion de la lumière comme le montre la figure ci-dessus.

Selon l'atténuation les fibres peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux « fenêtres en longueur d'onde » : les fenêtres 1300 nm et 1500 nm. La fenêtre 800 nm étant pratiquement complètement abandonnée.

La fenêtre à 1300 nm a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne importante d'environ 0,4 dB/km ; mais les composants optoélectroniques à ces longueurs d'onde (lasers et récepteurs) sont peu coûteuses. Elle est utilisée pour les systèmes de télécommunications de courte distance (quelques dizaines de kilomètres) ou de faible capacité : réseaux urbains ...

La fenêtre à 1550 nm a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km ; Elle se divise en trois bandes S, C et L (*Figure I.14*). Elle est utilisée généralement pour les télécommunications longues distances et à haut débit car la faible atténuation dans cette fenêtre permet d'espacer bien davantage les coûteux régénérateurs et/ou amplificateurs nécessaires pour la compensation de l'atténuation dans la fibre de ligne [2].



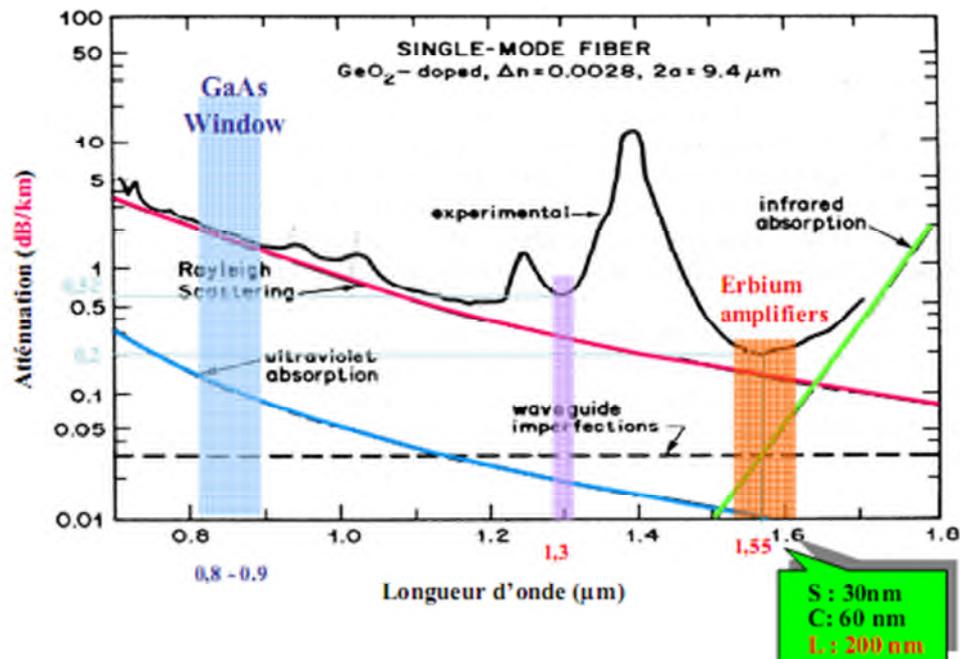


Figure 1.14: Profil spectral des pertes d'une fibre monomode

#### IV.1.4. La dispersion

La dispersion qui provoque l'élargissement des impulsions lumineuses le long du trajet dans la fibre d'où un risque de chevauchement des impulsions et donc une perte d'information. Cela détermine, en général, la capacité de transmission d'une fibre et donc sa bande passante (Tableau 1.1). En ce qui concerne la fibre monomode, elle est limitée par la dispersion chromatique (variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde, ce qui affecte la vitesse de l'onde) et la dispersion propre au mode qui se propage [6].

##### IV.1.4.1. Dispersion modale

Comparons deux impulsions présentes à  $t_0$  à l'extrémité d'une fibre de longueur  $L$ , et d'ouverture numérique  $ON$ . L'une des impulsions se propage suivant l'axe de symétrie de révolution de la fibre (angle nul), tandis que la deuxième arrive avec un angle égal à l'angle limite.

Ces deux impulsions vont donc avoir des trajets différents. Celle qui se propage suivant l'axe aura le trajet le plus court (longueur  $L$ , vitesse  $c/n_1$ ). En revanche, l'impulsion caractérisée

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left( \frac{n_1}{n_2} \right) (n_1 - n_2) \quad (I.7)$$



En sortie de fibre, chaque trajet lumineux caractérisé par un angle différent subit un retard différent compris entre 0 et  $\Delta t$ . L'impulsion de départ se trouve donc élargie de  $\Delta t$ , indépendamment de la largeur de son impulsion initiale. C'est cet étalement de l'impulsion qui est désigné par dispersion modale. Chaque trajet différent étant un mode.

Les conséquences sont énormes en termes de bande passante. En effet, supposons que chaque impulsion corresponde à un bit d'un signal à transmettre. La durée entre deux bits doit être au supérieure ou égale à  $\Delta t$ , sinon chaque impulsion se voit de toute façon élargie de  $\Delta t$  au bout d'une longueur de fibre  $L$ . Le risque est alors que les bits successifs se chevauchent et créent des erreurs dans la transmission. Le débit de la ligne de transmission est donc limité à  $1/\Delta t$  bits par secondes.

Le débit maximum est donc :

$$\Delta B_{dispersionmodale} = \frac{1}{\Delta t} = \frac{c n_2}{L n_1 (n_1 - n_2)} \quad (I.8)$$

Il est à noter que ce débit diminue lorsque la longueur de la fibre augmente. Ce qui signifie qu'il est difficile par ce procédé de transmettre des hauts débits sur des grandes distances [9].

#### IV.1.4.2. Dispersion chromatique

##### Dispersion chromatique (CD, Chromatic Dispersion)

Lorsqu'un signal lumineux se propage dans un milieu, il subit un élargissement dans le temps. Cet élargissement limite le débit dans un système de communication optique, car il oblige à augmenter le délai entre deux impulsions. Cet élargissement a plusieurs causes. Une première cause vient du fait que pour une longueur d'onde donnée (lorsque nous considérons la propagation dans une fibre multimode), les vitesses de groupe des différents modes ne sont pas égales les unes aux autres (on parle de dispersion intermodale). Une seconde cause de la dispersion vient du fait que l'indice de réfraction d'un milieu dépend de la longueur d'onde et que les sources utilisées pour transmettre le signal ne sont pas purement monochromatiques (on parle alors de dispersion intramodale ou chromatique).

Les différentes composantes spectrales d'une source ont donc des temps de propagation différents, ce qui provoque l'élargissement d'une impulsion. Dans ce travail on ne s'intéresse qu'à la dispersion chromatique.

Dans les fibres monomodes la dispersion chromatique provient de deux causes principales :



**La dispersion du matériau  $D_m$**  : elle est liée à la dépendance de l'indice de réfraction de la longueur d'onde (équation 1). Pour la silice,  $D_m$  varie d'environ -100 ps/km/nm à 0,85  $\mu\text{m}$  à +25 ps/km/nm à 1,55  $\mu\text{m}$  ; elle s'annule à 1,27  $\mu\text{m}$ .

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{coeur}}(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (\text{I.9})$$

**La dispersion du guide  $D_g$** : liée à la structure géométrique du guide d'onde, elle résulte de la variation de la constante de propagation  $\beta$  avec la fréquence normalisée  $V$  (qui dépend-elle même de la longueur d'onde  $\lambda$ ); la dispersion du guide est toujours négative et dépend des paramètres de la fibre.

La dispersion du guide  $D_g$  est donnée par :

$$D_g \approx -\frac{n_{\text{gaine}} - n_{\text{coeur}}}{c\lambda} \left[ V \frac{\partial^2}{\partial V^2} \right] \quad (\text{I.10})$$

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

$$D = D_m + D_g \quad (\text{I.11})$$

À cause de la dispersion chromatique la vitesse de groupe  $V_g$  à l'intérieur d'un mode de propagation varie en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  [2].

### A-Effet de la dispersion chromatique

La dispersion chromatique induit un élargissement temporel des impulsions se propageant dans la fibre.

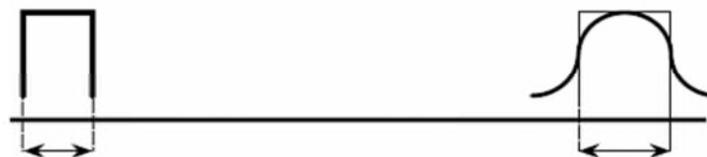


Figure I.15 : Effet de la dispersion chromatique

Le signal qui se propage s'élargit, cette dispersion limite aussi la distance sur laquelle un signal peut être transmis sans régénération électronique du signal numérique d'origine. Cette distance est appelée limite de dispersion ou longueur de dispersion chromatique  $L_D$ . Elle représente la



distance de transmission au bout de laquelle une impulsion s'élargira de l'intervalle d'un bit. La limite de dispersion estimée pour un signal de largeur spectrale  $\Delta\lambda$  est donné par

$$L_D \approx \frac{1}{2BD\Delta\lambda} \quad (\text{I.12})$$

Où B est le débit de transmission. Cela veut dire aussi que pour une longueur de transmission donnée L, la dispersion chromatique limite également le débit qu'on peut transmettre dans une liaison optique [2].

#### IV.1.4.3. Dispersion de mode de polarisation (PMD, Polarization Mode Dispersion)

La PMD résulte de la propagation anisotrope du signal lumineux dans la fibre. Ce phénomène de PMD représente une autre cause de l'élargissement temporel d'une impulsion à la traversée de la fibre, il est décrit par le changement de l'état de polarisation du mode électromagnétique. Idéalement, une fibre possède une parfaite symétrie de révolution. De plus la silice est un matériau amorphe, donc isotrope, ce qui fait que le mode fondamental possède deux polarisations orthogonales qui se propagent avec la même vitesse. Sauf que, lors de la fabrication de la fibre, celle-ci peut présenter certains défauts tels qu'une ellipticité du cœur ou alors des contraintes résiduelles. De plus, les fibres déjà installées peuvent aussi subir des contraintes mécaniques. Tous ces phénomènes se manifestent pour induire ce qu'on appelle la biréfringence dans la fibre optique.

$$\text{Avec } |\Delta n| = |n_x - n_y|$$

Dans une liaison longue distance la biréfringence induit une dispersion PMD entre les composantes principales de la polarisation, cet effet se traduit par un élargissement  $\tau$  qui varie avec la racine de la longueur de la fibre. La dispersion PMD s'exprime donc en  $Ps/\sqrt{Km}$ .

Si l'anisotropie de la fibre est uniforme, l'impulsion se propagera suivant deux axes, qui possèdent deux vitesses de groupe différentes, créant ainsi le dédoublement de l'impulsion initiale équivalent à un élargissement temporel (c'est la PMD au premier ordre)[2].



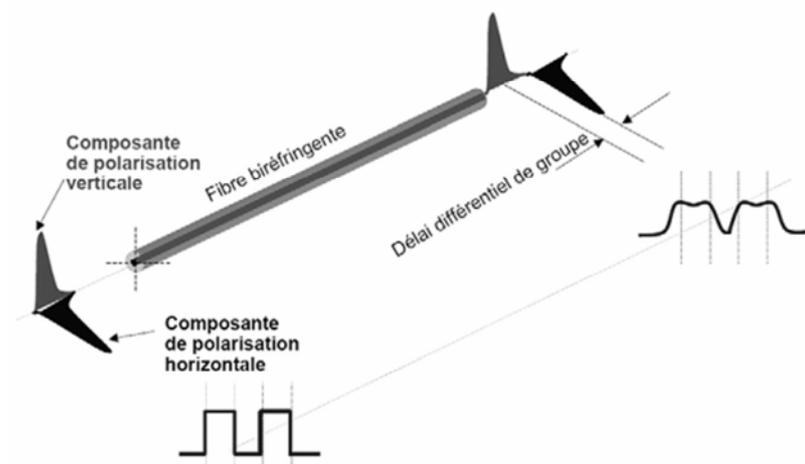


Figure I.16 : Effet de la PMD au 1<sup>er</sup> ordre dans les transmissions optiques

La PMD fluctue aléatoirement en fonction du temps à cause de la variation permanente des contraintes mécaniques ce qui rend son étude particulièrement complexe.

#### IV.1.5. Avantages et inconvénients [5]

- **avantages**

Performances de transmission : Très faible atténuation, très grande bande utilisable, multiplexage possible.

Avantages de mise en œuvre : Très petite taille, grande souplesse, faible poids.

Sécurité électrique : Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous de fortes tensions.

Sécurité électromagnétique : Insensible aux parasites et n'en crée pas, inviolabilité presque totale.

Avantage économique: Moindre coût, en comparaison avec d'autres supports.

- **Inconvénient**

L'interconnexion entre les fibres.

#### IV.2. Les dispositifs actifs pour la régénération 2R et 3R

Nous allons rappeler les étapes de fonctionnement d'un répéteur optoélectronique. Tout d'abord, il transforme le signal optique en signal électrique. Cette opération, dans le contexte des télécommunications, nécessite une discrimination des « 1 » et des « 0 » via un circuit électronique réalisant une prise de décision (le signal électrique en sortie est supposé parfait).

Ensuite, le signal électrique est codé sur la porteuse optique à l'aide d'un modulateur électro-optique (généralement en intensité).



Ainsi, le signal en sortie possède les mêmes caractéristiques physiques que le signal à l'origine de la transmission (taux d'extinction, rapport signal sur bruit optique, gigue). Par contre, en termes d'information, le dispositif de prise de décision non idéal a inévitablement commis des erreurs, dues d'une part à la dégradation des données lors de la propagation et d'autre part à la nature de la prise de décision électrique.

Lorsqu'on parle de régénérateur on a :

Un seuil de décision « optique » qui va séparer l'intensité des « 1 » des « 0 » via une fonction de transfert non-linéaire ». A la différence du traitement électrique, le signal de sortie n'est pas parfait. Le bruit optique n'est pas enlevé mais simplement transformé.

#### a) La régénération 1R (Ré-amplification)

Nous avons vu que l'amplification dégradait le rapport signal sur bruit. Néanmoins, cette opération permet au signal de se propager plus loin, ce qui correspond bien à une première étape de régénération tout-optique du signal. On peut donc qualifier cette opération d'étape préliminaire à une régénération du signal.

#### b) La régénération 2R (Ré-amplification et Remise en forme)

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

(La Figure 1.17) présente le schéma de principe du régénérateur 2R (pour le cas particulier d'une inversion de polarité des données).

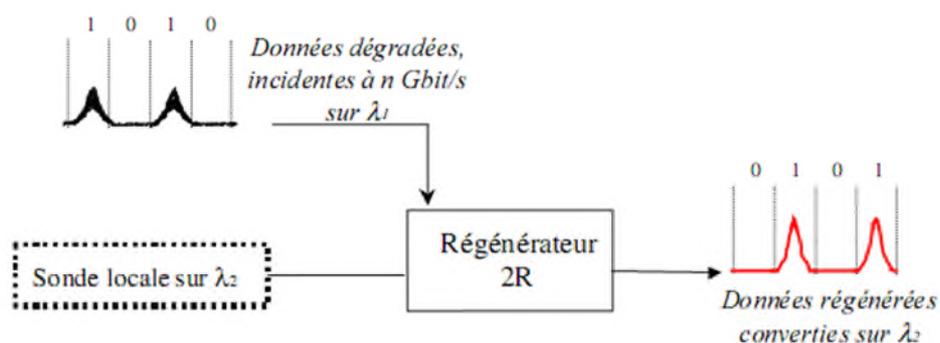


Figure 1.17 : Principe de la régénération 2R avec conversion de longueur d'onde



### c) La régénération 3R (Ré-amplification, Remise en forme et Resynchronisation)

La différence fondamentale avec la régénération 2R, est que dans le cas de la régénération 3R la sonde locale est une horloge optique synchrone avec les données en entrée du régénérateur.

Nous pouvons rappeler que l'augmentation des débits par canal, conjuguée à l'augmentation du nombre de canaux, tend à favoriser l'efficacité des effets non-linéaires sur le signal. L'effet le plus pénalisant qui en résulte est la présence de gigue temporelle sur le signal, non compensable avec une régénération 2R.

Le schéma de principe de la régénération 3R est présenté sur la Figure I.18 (toujours pour le cas particulier d'une inversion de polarité des données).

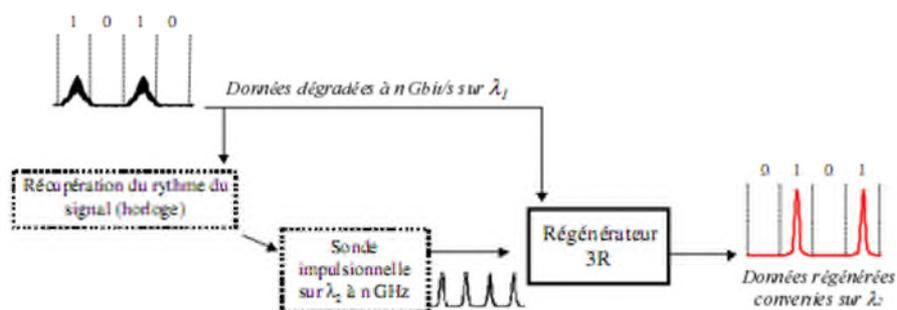


Figure I.18 : Principe de la régénération 3R avec conversion en longueur d'onde

Ces fonctions optiques pour la régénération sont réalisées à partir de composants actifs à semi-conducteurs. Nous allons présenter les caractéristiques dynamiques des amplificateurs à semi-conducteurs qui restent les plus utilisés dans la littérature pour les applications de régénération active[10].

## IV.3. L'amplificateur

### IV.3.1. Amplificateur électrique

D'une part, une ligne de transmission optique comprend un amplificateur optique qui peut être utilisé de trois manières différentes :

- Comme amplificateur de puissance à l'émission (en anglo-américain booster),
- Comme amplificateur en ligne;
- Comme préamplificateur de réception.



D'autre part, le courant émis par la photodiode de réception, malgré la présence d'un préamplificateur, reste souvent assez faible. Il est donc nécessaire d'utiliser un amplificateur à la sortie du photorécepteur. Le gain adéquat peut être assez élevé. En effet, du fait de la détection

Actuellement on utilise les amplificateurs optiques [2]

### IV.3.2. Amplificateurs optiques

Les amplificateurs optiques sont destinés à amplifier les signaux optiques sans recourir à des solutions opto-électroniques basées sur des conversions de type optique/électronique et électronique/optique (photodétection, amplification électronique, puis émission laser à la même longueur d'onde à partir du signal amplifié électroniquement). Parmi les amplificateurs optiques, figurent principalement les amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA, de l'acronyme anglais Erbium Doped Fiber Amplifier), les amplificateurs à semi conducteurs et les amplificateurs Raman. Leur principe repose toujours sur la possibilité d'amplification optique par émission stimulée de lumière, de la même manière que pour les lasers [11].

### IV.3.3. Amplificateur Dopée Erbium

Le plus répandu des amplificateurs optiques à ce jour est l'amplificateur à fibre dopée Erbium EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Il est apparu dans le milieu des années 80. [5]

Un amplificateur à fibre dopée Erbium consiste en une courte section de fibre optique (typiquement quelques dizaines de mètres), possédant une fraction de l'élément terre rare Erbium sous la forme d'ions  $\text{Er}^{3+}$ .

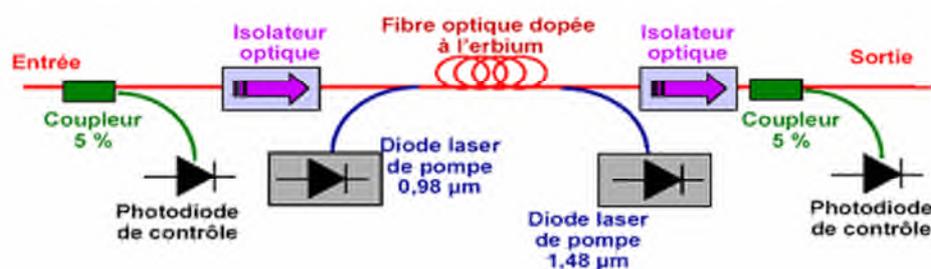


Figure I.19 : Exemple d'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium

L'amplification optique repose sur la possibilité d'amplification stimulée du signal. Les ions  $\text{Er}^{3+}$ , insérés dans la matrice amorphe de silice, matériau constituant la fibre optique, présentent un diagramme énergétique simplifié à trois niveaux.

Le principe de fonctionnement de l'EDFA est le suivant :



- Le signal à amplifier est mélangé à un signal de pompe de forte puissance (de 10 à 200 mW typiquement) grâce à un multiplexeur de longueurs d'onde, et le signal résultant est injecté dans la fibre dopée  $\text{Er}^{3+}$ .

Deux longueurs d'ondes sont disponibles pour le signal de pompe : 980 nm ou 1480 nm.

- Le signal de pompe provoque une inversion de population des ions  $\text{Er}^{3+}$  et le milieu devient amplificateur vis-à-vis du signal optique d'entrée.
- Lorsque l'émission stimulée domine, elle donne lieu à de l'amplification optique. Cela dit, trois phénomènes coexistent toujours : absorption, émission spontanée et émission stimulée.

Quantitativement, les caractéristiques techniques principales des EDFA sont les suivantes :

- le gain de l'amplificateur (rapport en décibels (dB) de la puissance de sortie sur la puissance en entrée) : typiquement 20 dB ;
- le niveau de puissance de saturation PS du gain de l'amplificateur, qui chiffre la puissance de sortie pour laquelle le gain de l'amplificateur sature déjà : typiquement 1 à 10 mW ;
- la bande spectrale d'amplification  $\Delta\lambda$  : typiquement 25 nm ;
- le facteur de bruit F, qui chiffre la dégradation du rapport signal à bruit à la traversée de l'amplificateur du fait de l'amplification de l'émission spontanée (ASE) : typiquement 6 à 8 dB.

Les applications se situent au cœur des domaines des télécommunications numériques ou analogiques : amplificateur de puissance (linéarité, puissance de sortie), amplificateur en ligne (linéarité, puissance de sortie, bruit), préamplificateur (bruit)[11].

#### IV.3.4. Les amplificateurs à semi-conducteur (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. Nous retrouvons l'inversion de population, l'émission spontanée et stimulée, les recombinaisons non radiatives, une source externe ... Contrairement aux lasers à semi-conducteur, il n'y a pas de miroirs aux extrémités mais un revêtement antireflets déposé sur les faces clivées afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit.



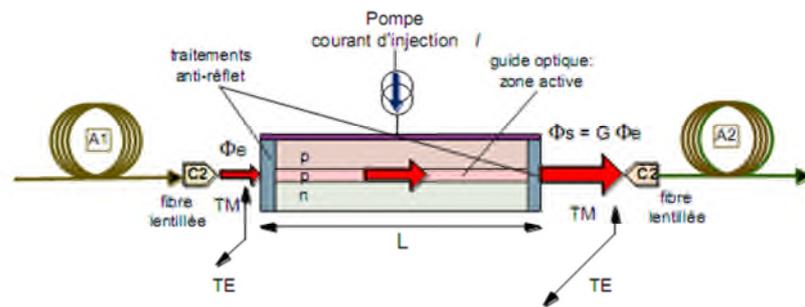


Figure I.20 : Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur.

La lumière incidente entre dans le circuit, est amplifiée et sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre. Idéalement, il n'y a pas de réflexion du signal dans l'amplificateur.

Les principales caractéristiques des AOSC sont :

- Un gain élevé (jusqu'à 30 dB) selon le semi-conducteur, la longueur d'onde, le courant injecté et la puissance du signal incident.
- Une puissance de saturation en sortie autour de 5 - 10 mW.
- Une bande passante optique importante, de l'ordre de 5 THz (soit environ 40 nm autour de 1550 nm).
- Les non-linéarités sont particulièrement importantes dans les conditions de saturation du gain.
- C'est de loin le dispositif amplificateur le plus compact qui existe, avec un rendement (rapport gain à la consommation électrique) record. De plus, sa technique de fabrication est compatible avec l'intégration monolithique de nombreux autres composants actifs et passifs, ce qui offre des perspectives attrayantes en matière de traitement optique du signal, et aussi probablement en termes de coût.
- Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont élevées, en raison de la supériorité du diamètre du faisceau sur l'épaisseur de la couche active du semi-conducteur.

#### IV.3.5. Les amplificateurs Raman

Avec l'accroissement des canaux dans la fibre, la bande spectrale offerte par les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium, limitée au maximum à 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant. Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale.

De nouveaux amplificateurs optiques tels que les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de télécommunications. Ils sont basés sur le principe de la



diffusion Raman, qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon.

Ce phénomène peut être spontané, s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal. Ainsi, dans le cas de l'amplificateur Raman, l'onde incidente, dite onde de pompe, stimulée par l'onde signal, va créer une autre onde signal, et un phonon. L'amplification est alors réalisée.

Comme pour les autres amplificateurs optiques, celui-ci a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG (ytterbium aluminiumgrenat) sont les plus souvent utilisés dans ce cas, en émettant une longueur d'onde inférieure à celle du signal. L'avantage principal de ces lasers est d'être accordable sur une très grande plage de longueurs d'onde.

Le gain obtenu peut atteindre quelques dizaines de décibels, mais une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître. La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman [12].

## V. Le module de réception

### V.1. Démultiplexage

Le système de démultiplexage qui permet de récupérer les données propres à chaque utilisateur avant qu'elles ne soient converties à nouveau dans le domaine électrique [13].

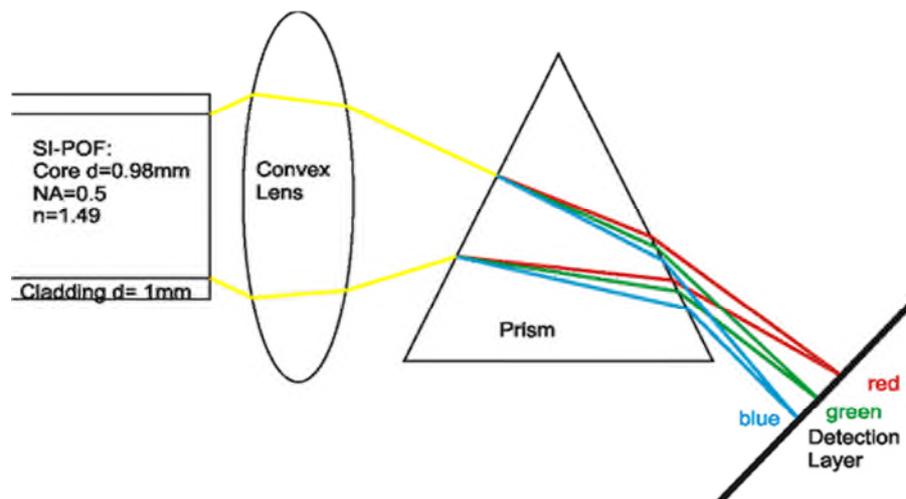


Figure I.21 : démultiplexage

### 🚦 Le démultiplexage temporel tout-optique

L'objectif est d'extraire les trains d'impulsions intercalés. Cette opération est réalisée canal par canal. Le principe de base va être d'utiliser une fenêtre de transmission optique sélective en temps et très rapide. Si l'on souhaite démultiplexer un canal à 10 Gbit/s



dans une transmission à 40 Gbit/s, il faut ouvrir une fenêtre d'une durée de 25 ps. Le schéma de principe du démultiplexeur optique est présenté sur la (Figure I.22).

La récupération de rythme peut se faire de manière électrique ou tout-optique (cette dernière solution étant la plus prometteuse pour les réseaux tout-optiques).

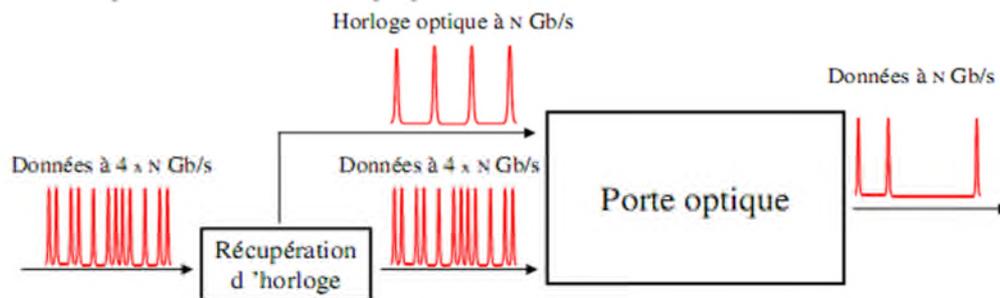


Figure I.22 : Principe du démultiplexage optique des canaux multiplexés en temps

## V.2. Le photodétecteur

### A- Principe de fonctionnement de la photodétection

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur constitué d'un matériau semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou. Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher les électrons de retomber dans leur état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbé.

### B- Caractéristiques de la photodétection

Un photodétecteur est caractérisé par:

- Le coefficient d'absorption  $\alpha$  : il détermine le rendement du photodétecteur. Ce coefficient dépend du matériau utilisé et de la longueur d'onde ;
- Le rendement quantique  $\eta$  qui est le rapport du nombre de paires de porteurs « photo créées et collectées » au nombre de photons incidents. Il ne peut être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante ;
- La sensibilité  $S$  de la photodiode exprimée en Ampère par Watt (A/W) et définissant le rapport du photo courant  $I_{ph}$  au flux énergétique (ou puissance optique  $P_{opt}$ ) reçu.



Ces grandeurs sont liées par les relations suivantes :

$$\eta = \frac{I_{ph} h \nu}{P_{opt} e} \quad (\text{I.13})$$

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \eta \cdot \frac{e \lambda}{h \cdot c} \quad (\text{I.14})$$

$e$  : représente la charge élémentaire de l'électron,

$h$  : la constante de Planck,

$\lambda$  : la longueur d'onde de la lumière utilisée et  $c$  la vitesse de la lumière.

Les fluctuations du photocourant autour de sa valeur moyenne constituent le bruit de grenaille qui résulte de la nature corpusculaire du photocourant. C'est un bruit blanc. Généralement, le photodétecteur est suivi d'un amplificateur électronique qui ajoute un courant de bruit thermique. Le bruit de grenaille et le bruit thermique contribuent ensemble à créer des erreurs, mais les photorécepteurs usuels sont essentiellement limités par le second, qui domine très largement le premier [2].

Il existe deux types de photo-détecteurs couramment utilisés : les photodiodes PIN et les photodiodes à avalanche (PDA).

### V.3. Les photodiodes PIN

Pour effectuer la photodétection, en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il faut que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. La zone de charge d'espace doit être large pour permettre un bon rendement quantique, d'où l'intérêt de la photodiode PIN (Figure VI.1), où une région intrinsèque est intercalée entre les régions de type P et de type N. La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque, où, lorsque la photodiode est polarisée, règne un champ électrique qui sépare les porteurs. La zone traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau.



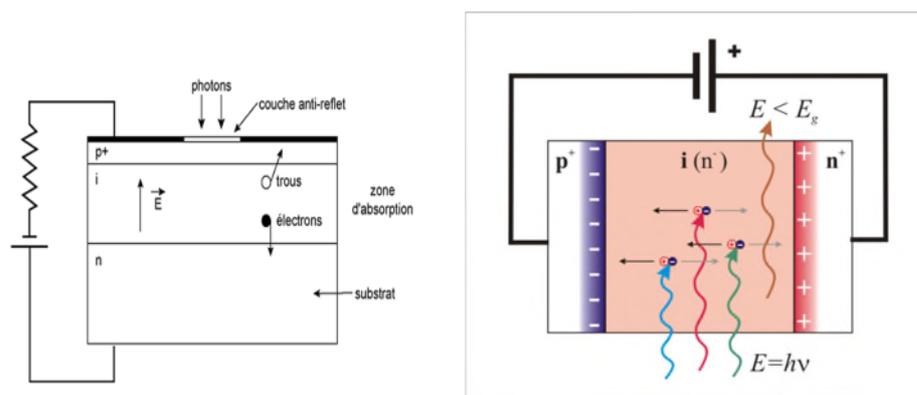


Figure I.23: Photodiode PIN

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

La sensibilité, qui relie la puissance lumineuse incidente au photocourant généré, varie suivant le coefficient d'absorption du matériau, et selon la largeur de la zone intrinsèque.

Le photocourant  $I_{ph}$  est directement proportionnel à la puissance optique incidente  $P_{opt}$  selon la relation :

$$I_{ph} = S P_{opt} + I_{obs} \quad (\text{I.15})$$

Où  $S$  est la sensibilité de la photodiode en A/W.  $S$  est typiquement proche de 0,9 A/W, mais peut-être un peu plus faible suivant le photodétecteur et la longueur d'onde d'attaque  $\lambda$ . En effet,  $S$  s'exprime en fonction du rendement quantique  $\eta$  :

$$S = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q}{hc} \lambda \quad (\text{I.16})$$

Dans la photodiode, en l'absence d'éclairage, circule un courant, appelé courant d'obscurité. Ce courant peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite...

Une autre caractéristique de la photodiode, est son temps de réponse, qui doit être très bref.

Lorsque la structure est verticale, c'est-à-dire que l'éclairage se fait par le haut, le temps de réponse limite l'utilisation de la photodiode aux systèmes à 10Gbit/s. Pour augmenter la



fréquence de coupure, il est nécessaire de travailler avec des photodétecteurs éclairés par la tranche.

Enfin, comme dans toute jonction PN polarisée en inverse, un bruit de grenaille (encore appelé bruit quantique ou bruit Schottky) apparaît dans la photodiode, du fait de la répartition aléatoire des instants de génération des paires électron-trou. Ce bruit, proportionnel à la puissance optique reçue, est inévitable, et se rajoute au bruit d'obscurité, dû au courant d'obscurité [8].

### V.3.1. Les photodiodes à avalanche

Afin d'augmenter le signal rapport à bruit, une idée est d'utiliser le phénomène d'ionisation par impact des porteurs. L'objectif est d'augmenter la puissance du signal électrique, correspondant à une puissance optique incidente donnée, par multiplication interne du nombre de porteurs. En faisant croître le champ électrique dans la jonction PN, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors, et les porteurs se multiplient. Ce photodétecteur à gain interne est appelé photodiode à avalanche (ou PDA).

Ce phénomène, aussi connu sous le nom d'avalanche, entraîne s'il n'est pas contrôlé, le claquage de la jonction et la destruction du matériau.

Tout comme pour les photodiodes PIN, il en existe plusieurs structures, à base essentiellement de silicium ou de germanium. La (Figure I.20) montre une structure  $P^+PN$  en silicium, qui résulte d'un compromis entre une zone d'absorption large, et une jonction très abrupte pour obtenir un très fort champ électrique.

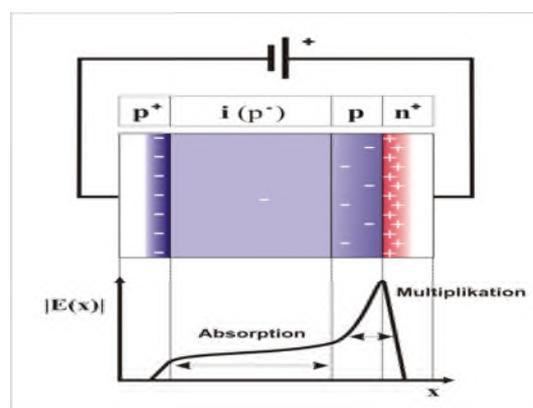


Figure I.24 : photodiode

L'absorption a lieu dans une zone large et peu dopée, dite  $\pi$  est la multiplication a lieu dans la jonction abrupte  $PN^+$ . En outre, pour une tension inverse élevée, la zone de charge d'espace



s'étend dans la zone  $\pi$  résistivité va augmenter avec la tension. Ce phénomène introduit un effet stabilisateur : le champ électrique et le gain augmentent lentement, ce dernier pouvant atteindre de fortes valeurs tout en étant contrôlé avec précision.

Concernant le courant d'obscurité, il est plus important dans une photodiode à avalanche, mais n'est pas autant multiplié que le signal, car toutes les composantes de ce courant ne subissent pas le phénomène d'avalanche. Le bruit quantique quant à lui est bien multiplié par le gain interne de la photodiode.

Le temps de réponse de ces photodiodes est affecté par le phénomène d'avalanche, et ces photodiodes sont donc un peu moins rapides que les photodiodes PIN[8].

#### VI.4. Le filtrage

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

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

On utilise donc le "filtre pratique de Nyquist" (Figure I.25) dont la largeur de bande de bruit, dans les conditions habituelles, vaut approximativement  $\Delta F = 0,8 \times Fr$ . [8]

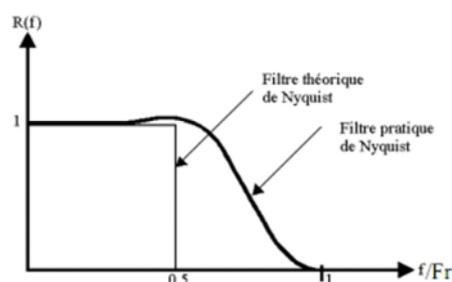


Figure I.25 : Réponses fréquentielles du filtre théorique et du filtre pratique de Nyquist.

#### VII.5. Le Circuit de décision

Pour une récupération parfaite des données transmises, une remise en forme du signal détecté est donc nécessaire en utilisant un bloc de décision composé d'un détecteur à seuil et d'un circuit de



récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation. Leur tâche est de comparer le signal de données à un certain seuil d'amplitude, puis de décider le niveau correspondant du signal (« bit 1 » ou « bit 0 »), et ceci à chaque front d'horloge. Ainsi, le signal d'entrée de la bascule, qui est en réalité le signal de sortie après la détection par le photodétecteur, doit avoir une amplitude assez élevée pour la fonction de « décision ». L'horloge doit être synchronisée sur le signal incident. Cette récupération de rythme est effectuée grâce à une boucle à verrouillage de phase classique.

### VIII. Conclusion

Une description fonctionnelle des chaînes de communication par fibre optique, est utilisée au cours de ce chapitre. Permettant une étude globale des liaisons simples ou multiplexées en longueur d'onde (WDM), en mettant l'accent sur les principales limitations introduites par les différents composants optiques (fibre, source laser, amplificateur optique, etc.).

Dans un domaine disciplinaire, faisant intervenir l'optique, les communications numériques, la physique des dispositifs à semi-conducteurs, des lasers et des amplificateurs optiques, et où le matériel est extrêmement coûteux, ce type d'outil nous est apparu intéressant.

Le chapitre suivant fera l'objet sur le modulateur électro optique.



## II .1. Introduction à la modulation

La possibilité de transmettre un message a toujours été d'une importance essentielle ; l'idée n'est pas récente. Un grand pas a été effectué durant les derniers siècles avec le développement des systèmes de transmission sur câble ; sur onde hertziennes et satellites et sur fibre optique [2].

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques. Il existe principalement 2 types : la modulation directe et la modulation externe [1].

### II.1.1. Modulation directe et modulation externe

Les systèmes micro-ondes de communication par fibre optique nécessitent des circuits intégrés haut débit qui permet de convertir un signal micro-onde en signal optique modulé.

Les propriétés des diodes lasers vues précédemment font que la modulation directe est satisfaisante jusqu'à 15 GHz environ mais qu'au delà, cette méthode n'est plus applicable. Trop de dégradations (oscillations de relaxation, chirp, bruit, ...) apparaissent et limitent les capacités de transmission.

La modulation externe est une bonne alternative, le laser émettant dans ce cas un simple signal constant, tous les défauts dus à la modulation du courant de polarisation seront éliminés.

De plus, la bande passante des modulateurs externes est beaucoup plus élevée (80 GHz) que celle d'une modulation directe (15 GHz) qui est limitée par la fréquence de relaxation des diodes laser. Plusieurs types de modulateurs sont disponibles, en particulier nous nous intéresserons au modulateur de type Mach-Zehnder [5].

## II.2. Modulateur électro optique

### II.2.1. Définition

Les modulateurs électro-optiques sont l'un des piliers du développement de la communication moderne à travers fibres optiques ou en espace libre. Le champ électrique appliqué à un matériau dont la convergence en dépend à pour effet d'agir sur l'intensité ou la phase d'un rayon de lumière le traversant, le rendant ainsi le porteur d'informations par excellence grâce à des fréquences de transmission dépassant largement plusieurs dizaines de Ghz.



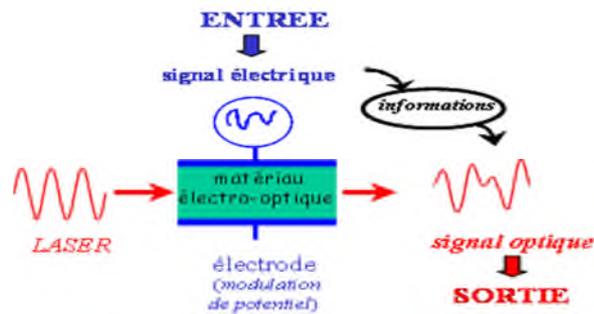


Figure 1 : Schéma de principe d'un modulateur électro-optique

Sa réalisation la plus directe est donc un modulateur de phase. On peut transformer la modulation de phase en une modulation d'amplitude à l'aide d'un interféromètre de Mach-Zehnder.

## II.2.2. Théoriques

Les milieux dits «anisotropes» sont des matériaux dont l'indice de réfraction est sensible à l'application d'un courant électrique continu ou à un champ électrique basse fréquence. Cette sensibilité électrique modifie l'effet du matériau sur un faisceau de lumière polarisée le traversant.

La dépendance entre l'indice de réfraction et le champ électrique peut prendre deux formes:

..L'indice de réfraction est proportionnel au champ électrique appliqué, on a alors affaire à un effet électro-optique linéaire mieux connu sous l'appellation «Effet Pockels».

..L'indice de réfraction est fonction du carré du champ électrique appliqué, on dit dans ce cas de figure que c'est un effet électro-optique non linéaire ou quadratique, aussi vulgarisé comme «Effet Kerr».

$$\vec{P} = \varepsilon(\chi^{(1)}E + \underbrace{\chi^{(2)}EE^*}_{\text{effet pockels}} + \underbrace{\chi^{(3)}EE^*E}_{\text{effet kerr}}) \quad (\text{II.1})$$

$\vec{P}$  : La polarisation

$\varepsilon$  : La permittivité

$\chi^{(1)}$  : La Susceptibilité

E : Le champ électrique

Les deux effets tiennent leurs noms respectifs des deux scientifiques les ayant découverts, à savoir *Frederich Pockels* (1865-1915) and *John Kerr* (1824-1907).



Le changement dans l'indice de réfraction n'est pas vraiment notable mais son incidence sur une onde se propageant sur une distance supérieure à la longueur de l'onde du faisceau est significative.

Les applications théoriques de cet effet sont multiples :

..Une lentille anisotrope dont l'indice de réfraction est variable est une lentille à distance focale contrôlable.

..Un prisme dont la déflexion est manipulable peut agir comme un scanner optique.

..Les dispositifs de transmission optique de l'information tirent bénéfices de cet effet.

### II.2.3. Les matériaux électro-optiques

Pour ces matériaux, une biréfringence accidentelle apparaît lorsqu'ils sont placés dans un champ électrique. L'effet électro-optique (EO) est défini comme la dépendance de l'indice de réfraction (ou de la biréfringence) d'un milieu matériel avec le champ électrique externe appliqué à ce milieu. Les axes rapide et lent sont alors perpendiculaires et parallèles à la direction du champ.

L'effet électro-optique est utilisable pour modifier la phase, la polarisation ou l'amplitude de l'onde traversant le milieu électro-optique. Il fournit donc un moyen de modifier l'état de polarisation d'un faisceau grâce à un champ électrique. En particulier, il permet de transcrire une information électrique sur un faisceau lumineux : c'est le rôle d'un modulateur électro-optique.

### II.2.4. Polarisation rectiligne de la lumière

Considérons une **onde lumineuse** créée par une source supposée monochromatique. Elle est caractérisée par un **vecteur champ électrique E** perpendiculaire à la direction de propagation du rayon lumineux. En chaque point du rayon lumineux, la norme du vecteur varie sinusoidalement au cours du temps, à une fréquence qui est celle de la lumière monochromatique.

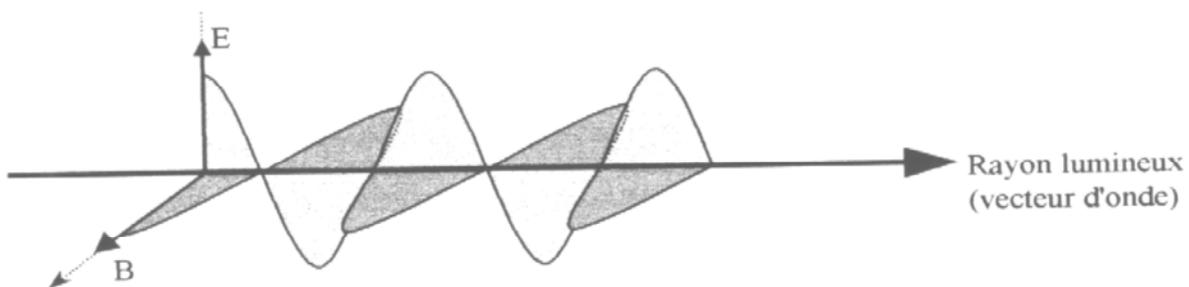
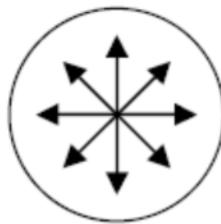


Figure II.2 : propagation des champs électromagnétique

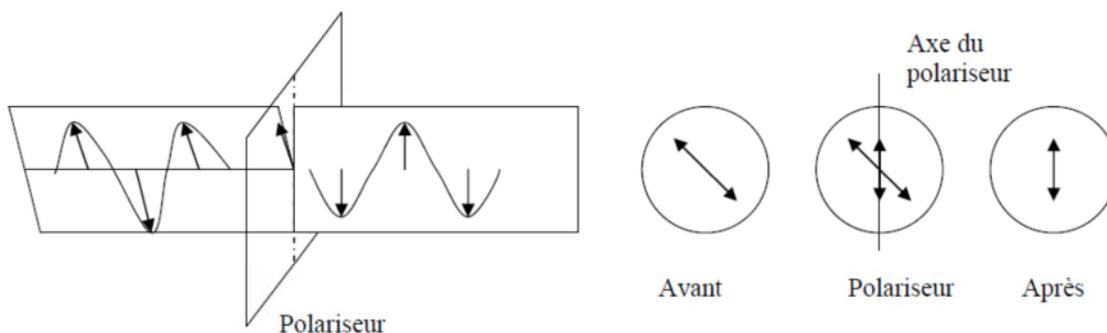


Si la lumière est non polarisée (dite naturelle), la **direction** du vecteur E change à chaque instant et de façon aléatoire. En effet, la lumière naturelle résulte des émissions aléatoires des différents atomes de la source, chaque onde émise ayant sa propre direction de propagation, sa propre direction de champ, son propre début d'émission. Malgré l'addition instantanée de tous ces vecteurs on ne peut définir de direction pour un champ caractérisant l'émission globale dans une direction donnée car cette direction qui existe à un instant donné, change l'instant d'après du fait de l'émission d'autres atomes. Il est d'usage de représenter un rayon de lumière naturelle par le schéma ci –contre.



Dans le cas d'une lumière **polarisée rectilignement** (ou linéairement), la direction de E reste fixe au cours du temps. La direction de E et la direction de propagation définit le plan de polarisation de cette onde, représenté ci-dessous.

Un **polariseur** (ou filtre polarisant), **d'axe** de direction donnée, ne laisse passer que la composante de E ayant la direction de l'axe.



Après traversée d'un polariseur par la lumière naturelle chaque onde élémentaire (émise par les différents atomes de la source) fournit une composante suivant la direction du polariseur et l'onde résultante a donc la direction du polariseur. Une source lumineuse classique émet de la lumière non polarisée. Il existe des dispositifs, comme par exemple les polariseurs, qui



permettent de polariser cette lumière. Le Laser vert utilisé n'est pas polarisé. Pour les études proposées par la suite, il est nécessaire de disposer d'une source polarisée : c'est à dire que son champ électrique  $E$  est constant (en amplitude et direction) tout au long de la propagation.

*Remarque* : Deux polariseurs traversés successivement par un faisceau de lumière ne laissent plus passer de lumière si leurs directions privilégiées sont perpendiculaires.

#### II.2.4.1 La biréfringence

- **Milieu isotrope**

La matière constituant ce milieu ne possède pas de directions privilégiées du point de vu de la propagation de la lumière (pour un milieu isotrope optiquement).

- **Milieu anisotrope**

La matière constituant ce milieu possède des directions privilégiées; ainsi dans certains cristaux les atomes sont plus espacés les uns des autres dans une direction que dans une autre. Cette anisotropie peut être naturelle (cristaux) mais peut avoir pour cause une action extérieure (action mécanique, action d'un champ électrique, magnétique, etc. ...) on parle d'anisotropie accidentelle.

- **Biréfringence**

Elle apparaît dans des milieux anisotropes particuliers dits uniaxes car ils ont un axe de symétrie dans la disposition des atomes. Cet axe est appelé axe optique (à ne pas confondre avec la direction de propagation de la lumière). La traversée d'un échantillon biréfringent par de la lumière polarisée dépend de l'orientation de la polarisation par rapport aux directions privilégiées du milieu.

Une lame biréfringente présente deux directions privilégiées. L'une est celle de l'axe optique et l'autre lui est perpendiculaire. La polarisation du faisceau incident peut se décomposer en deux composantes se propageant chacune suivant un des axes du matériau. Une lumière polarisée dans la direction de l'axe optique traverse la lame à une vitesse différente d'une lumière polarisée dans la direction perpendiculaire.



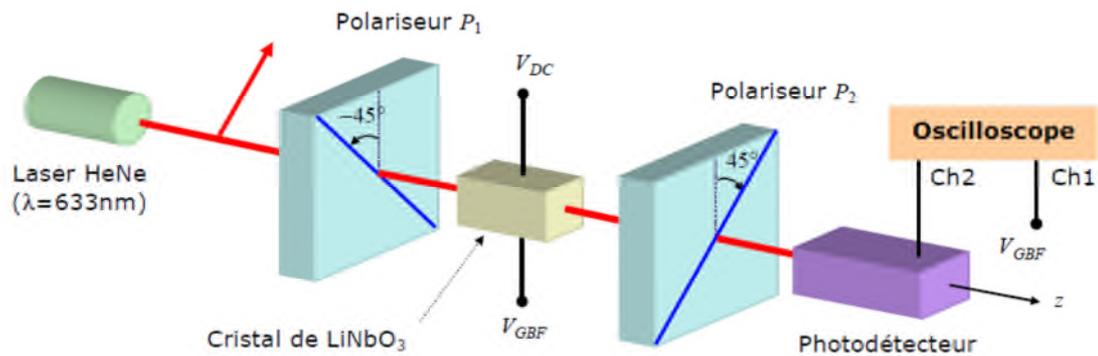


Figure II.3 : principe de la polarisation à base de lame

On peut donc définir deux indices de réfraction pour ces deux polarisations, d'où le nom «biréfringence». La biréfringence naturelle d'un cristal anisotrope uniaxe est représentée par la différence de ces deux indices :  $\Delta n = (n_e - n_o)$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{lente} - n_{rapide}) L \quad (\text{II.2})$$

On utilise la biréfringence pour modifier l'état de polarisation de la lumière, ce qui est utile dans de nombreuses situations. Les composants optiques qui permettent de modifier la polarisation s'appellent des lames retard ou lames à retard de phase ou encore lames biréfringentes.

### II.3. Type de modulateur

- **Le modulateur de Mach-Zehnder (MMZ)**

Les modulateurs de Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques que l'on place directement en sortie du laser (figure). Ils sont fréquemment utilisés pour les applications de télécommunication large bande. En réalité, les effets électro-optiques sont à la base de ce type de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique.

Ce phénomène est appelé effet *Pockels* si les effets électro-optiques sont linéaires, c'est-à-dire que la variation d'indice est proportionnelle au champ appliqué, et effet *Kerr* quand elle est proportionnelle au carré du champ. L'effet *Pockels* est prépondérant dans certains matériaux et permet des modulations de phase et d'amplitude de la lumière. Un des principaux impératifs est d'utiliser des matériaux transparents à la longueur d'onde de fonctionnement et présentant des coefficients électro-optiques aussi élevés que possible. De tels modulateurs fonctionnant à 1,5



μm ont été réalisés sur substrat de Niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) ainsi que dans des matériaux semi-conducteurs (GaAs, ...).

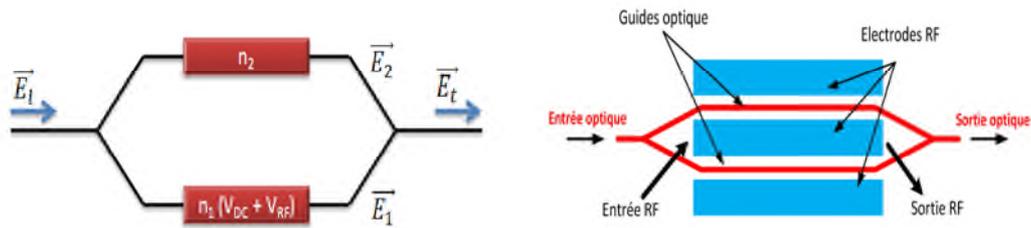


Figure II.4 : schéma simplifié d'un modulateur de Mach-Zehnder

▪ **Modulation de phase**

Le modulateur de phase est constitué d'un guide d'onde optique monomode, dont le cœur est constitué d'un matériau électro – optique. (Voir figure II.5) une électrode placée au dessus du guide permet d'appliquer un signal électrique de commande.

$$\varphi_z = k_0 L \left( n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} \frac{V_0}{e} \right) \tag{II.3}$$

$\varphi_z$  : La phase de l'onde

$k_0$  : La constante de propagation

$L$  : La longueur des milieux

$n_e$  : L'indice extra ordinaire

$r_{33}$  : Le coefficient électro optique

$V_0$  : La tension appliquée

$e$  : L'épaisseur

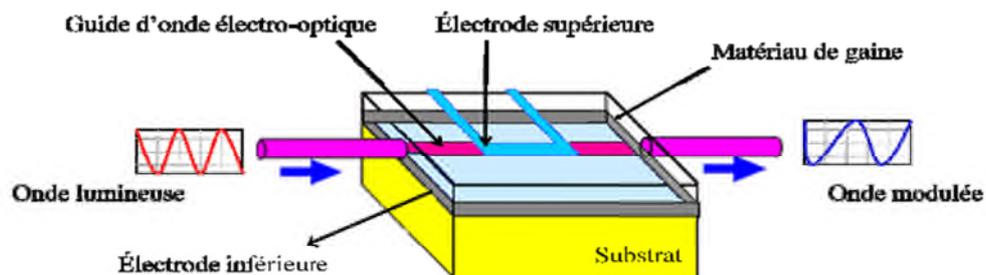


Figure II.5 : schéma d'un modulateur de phase



Le champ électrique appliqué change l'indice de réfraction du matériau, ce qui a pour conséquence de faire varier la phase de l'onde guidée et d'engendrer un retard variable de l'onde optique. Un déphasage dépendant de la tension électrique est ainsi créé (modulation de phase en alternatif).

#### ▪ Modulateur d'intensité de type Mach-Zehnder

La figure ci dessus montre l'architecture d'un modulateur d'intensité de type Mach-Zehnder. Il est composé d'une jonction Y en entrée permettant de séparer le faisceau incident en deux ondes de puissances égales sur les deux bras du modulateur. Sur l'un des bras de l'interféromètre, l'électrode permet d'appliquer un champ électrique modifiant ainsi la phase de l'onde lumineuse dans ce bras comme un modulateur de phase. A la sortie de l'interféromètre, une autre jonction Y combine les deux ondes déphasées. Celles-ci interférant en fonction du déphasage optique introduit, l'amplitude de l'onde optique en sortie est alors modulée [3].

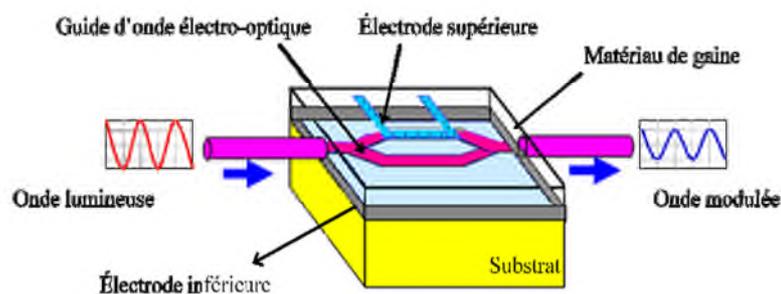


Figure II.6 : schéma d'un modulateur d'intensité de type Mach-Zehnder

Grâce à ce modulateur on peut obtenir une modulation d'amplitude à travers une modulation de phase à l'intérieur du composant.

$$\begin{aligned}
 P_s &= \frac{1}{2} E_s \cdot E_s^* & (II.4) \\
 &= \frac{1}{2} (E_0 e^{j\theta} + E_0 e^{j(\theta+\Delta\varphi)})(E_0^* e^{-j\theta} + E_0^* e^{-j(\theta+\Delta\varphi)}) \\
 &= E_0 E_0^* (1 + \cos(\Delta\varphi)) \\
 &= 2P_0 \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)
 \end{aligned}$$

$P_s$  : Puissance de sortie.



$E_s$  : Le champ appliqué.

$E_0$  : amplitude.

$\Delta\varphi$  : Le déphasage entre les deux bras.

Cela consiste à réaliser un interféromètre dans le quel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras par l'application d'une tension contrôlée sur le matériau électro-optique.

Plusieurs dispositifs de nature différente exploitent la variation d'indice sous champ électrique afin de moduler l'amplitude du signal optique : modulateur par antiguidage, modulateur par couplage et interféromètre de Mach-Zehnder.

- **Modulateur par anti guidage**

Pour ce type de modulateur, le choix des matériaux de confinement et de cœur doit être judicieux.

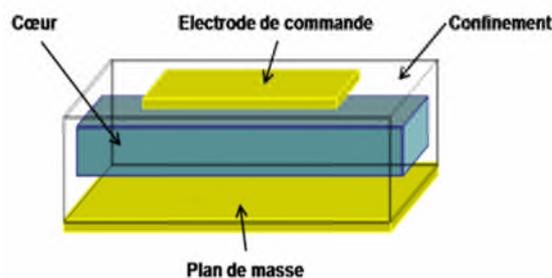


Figure II.7 : Modulateur par anti guidage

En effet sous le champ électrique de modulation, il est possible de passer d'une situation de guidage ( $n_{\text{cœur}} > n_{\text{conf}}$ ) à une situation d'anti guidage ( $n_{\text{cœur}} < n_{\text{conf}}$ ).

Dans le cas anti guidage, l'énergie optique dans le guide diminue progressivement au cours de la propagation. L'intensité du signal reproduit l'amplitude du signal modulant. Ceci reste un concept simple mais avec des difficultés énormes dans le choix des matériaux (paramètres opto-géométriques). Malgré des efforts pour proposer des solutions innovantes pour améliorer le rapport d'intensité, ce dispositif n'a pas été utilisé à cause des pertes intrinsèques très élevées [18].



- **Modulation par couplage**

Une autre variante consiste à l'aide de l'effet électro-optique à modifier la valeur du couplage entre deux guides. La structure de (la *figure II.8*) comporte deux guides assez proches pour que le couplage entre les deux guides ne soit plus négligeable. Le couplage va dépendre principalement des variables  $d$  et  $Le$ . Grâce à l'effet électro-optique, la longueur de couplage  $Le$  varie, l'intensité de sortie évolue en fonction du champ appliqué sur l'électrode. Cette méthode présente, entre autre~ 1 l'avantage de fournir le signal modulé en sortie d'un guide et son complémentaire sur l'autre, utilisable pour des applications de traitement du signal (intercorrélacion, asservissement de la modulation, ...) [18].

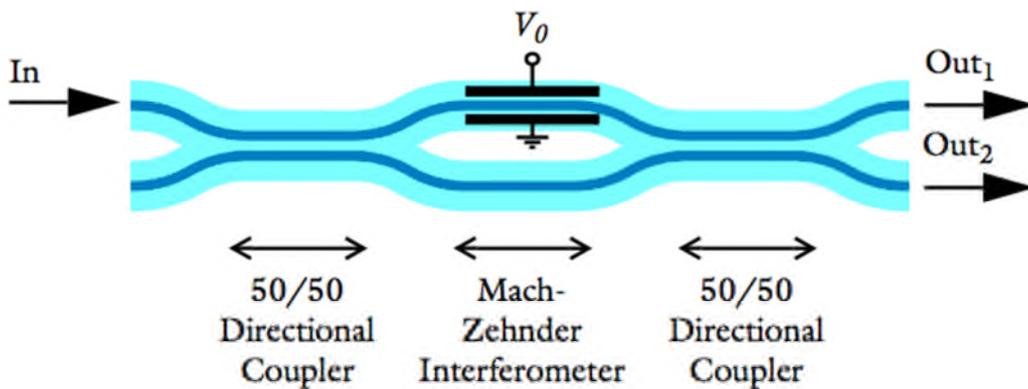


Figure II.8 : Modulateur par couplage

- **Modulateur à ondes progressives**

Le modulateur électro-optique à ondes progressives est composé de deux guides (*Figure II.9*) l'un optique et l'autre hyperfréquence. Les deux guides sont disposés de manière à ce que le champ électrique du signal modulant recouvre le champ électrique optique. Les deux ondes se propagent dans la même direction avec des vitesses de phases  $v_{\sim}$  et  $v_{\sim}$  respectivement pour l'onde hyperfréquence et pour l'onde optique. On peut aussi définir les indices effectifs hyperfréquence  $n_{eff}^e$  et optique  $n_{eff}^0$  par les relations:

$$v_{\varphi}^e = \frac{c}{n_{eff}^e} \quad (II.5)$$



$$v_{\varphi}^0 = \frac{c}{n_{eff}^0} \tag{II.6}$$

Modulation à très haute fréquence

Les deux ondes se propagent sans réflexion le long des guides, l'impédance caractéristique de la ligne est adaptée au générateur et à la charge. La tension le long de la ligne et en fonction du temps s'exprime alors par:

$$V(z, t) = V_0 \sin\left(\frac{2\pi n_{eff}^e}{\lambda_e} z - 2\pi f t\right) \tag{II.7}$$

Avec  $f$  la fréquence du générateur:

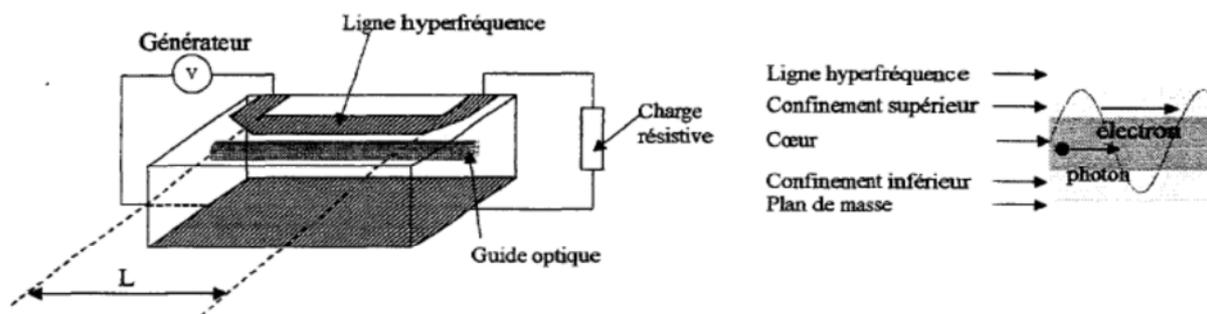


Figure II.9 : Modulateur à ondes progressives

Pour simplifier l'analyse, on considère que la ligne hyperfréquence est sans pertes, l'amplitude de la tension ne décroît pas avec la propagation. Imaginons qu'un photon entre dans le guide optique à l'instant  $t_0$ . Ce photon se propage avec une vitesse  $v_{\sim}$  et voit le potentiel en fonction de sa différence de vitesse avec l'onde hyperfréquence:

$$V(z, t) = V_0 \sin\left(\frac{2(n_{eff}^e - n_{eff}^0)}{\lambda_e} z - 2\pi f t_0\right) \tag{II.8}$$

La variation de phase est la somme des déphasages sur toute la longueur  $L$  d'interaction:



$$\Delta\beta = \frac{\overline{\Delta\beta} \sin\left(\frac{\pi L(n_{eff}^e - n_{eff}^o)}{\lambda_e}\right)}{\left(\frac{\pi L(n_{eff}^e - n_{eff}^o)}{\lambda_e}\right)} \sin\left(2\pi f t_0 - \frac{\pi L(n_{eff}^e - n_{eff}^o)}{\lambda_e}\right) \quad (II.9)$$

Avec :

$$\overline{\Delta\beta} = - \frac{\beta_0 r n^3 V_0 L}{2} \quad (II.10)$$

La différence de phase est une fonction en  $\frac{\sin x}{x}$  de la différence des vitesses. Si les deux signaux se propagent avec la même vitesse de phase ( $n_{eff}^e = n_{eff}^o$ ), le rapport  $\frac{\sin x}{x}$  est égal à l'unité et la variation de phase ne dépend plus que du produit  $V_0 L$ . Pour le modulateur à ondes progressives, la tension d'extinction  $V_\pi$  n'est plus une grandeur significative des performances du modulateur, mais il faut considérer le produit  $V_\pi$ . Le rapport  $\frac{\sin x}{x}$  est approximativement de 1/2 lorsque  $x = 2$  rad. On trouve alors la largeur de la bande passante du modulateur  $\Delta f$ , le déphasage est diminué de moitié lorsque la : fréquence passe de  $f = 0$  à  $\Delta f$  telle que:

$$\Delta f \cdot L = \frac{2c}{\pi(n_{eff}^e - n_{eff}^o)} \quad (II.11)$$

Pour une longueur d'électrode donnée, la largeur de bande maximale dépend de la différence des vitesses de phase des ondes optiques et hyperfréquences. C'est ici un point critique du modulateur: Pour avantager les performances du dispositif: indépendamment de sa structure, il est préférable que la permittivité soit constante du domaine de l'hyperfréquence jusqu'aux longueurs d'ondes optiques afin d'avoir des vitesses de phase très voisines. Dans la recherche de nouveaux matériaux, en vue de réaliser des modulateurs à ondes progressives, la caractérisation hyperfréquence sur toute la largeur de bande et aux longueurs d'ondes optiques est nécessaire à la détermination d'un candidat.

#### II.4. Applications industrielles

- **Modulateurs à base de semi-conducteurs**

A l'heure actuelle, des modulateurs à base de GaAs sont commercialisés et exploitables pour la transmission sur longues distances. Le GaAs possède un coefficient électro-optique faible avec un indice de réfraction élevé.





### Specifications:

Optical	MIN	Typical	MAX
La bande passante	-	40 GHz	-
Le taux d'extinction	20 dB	-	-
Le parametre Chirp	- 0.1	-	+0.1
La longueur d'onde	1530 nm	-	1610 nm
Pertes d'insertion	-	4.0 dB	-

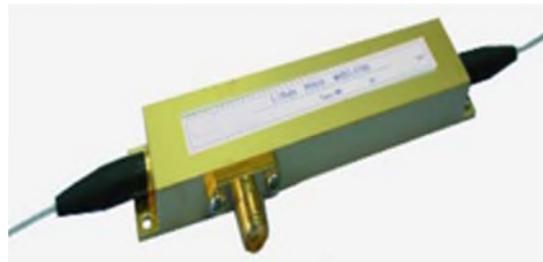
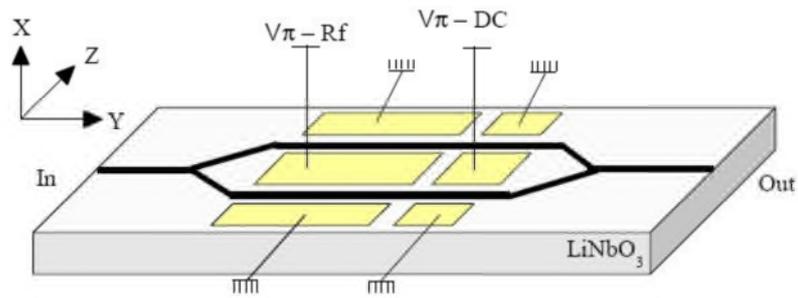
Electrical	MIN	Typical	MAX
La tension	-	3.3 V	-
Impedance	-	50 $\Omega$	-
Alimentation	-12 V	-	+12 V

Actuellement, les modulateurs commerciaux à base de GaAs ont une bande passante de 30 GHz pour une tension de commande de l'ordre de 9 V.

- **Modulateurs à base de LiNbO<sub>3</sub>**

L'un des matériaux électro-optiques le plus connus sur le marché est le Niobate de lithium. Les modulateurs à base de LiNbO<sub>3</sub> sont industrialisés depuis les années 1980.





**Specifications techniques:**

Parametre		Unité	Valeurs
<b>Optique</b>	La longueur d'onde utilisée	nm	1550
	Les pertes	dB	≤3.5
	La puissance optique d'entrée	mW	≤200(APE process)
			≤50(Ti process)
Intensite de modulation	-	≤0.3%	
<b>Electrique</b>	La tension demi onde	V	≤5.0
	La puissance RF appliqué	dBm	≤30
	La bande passante	GHz	≥6
<b>Mécanique</b>	Pigtail type	-	PM or SM Fibre
<b>Environment</b>	Temperature utilisée	°C	0~+70
	Temperature de stockage	°C	-40~+85

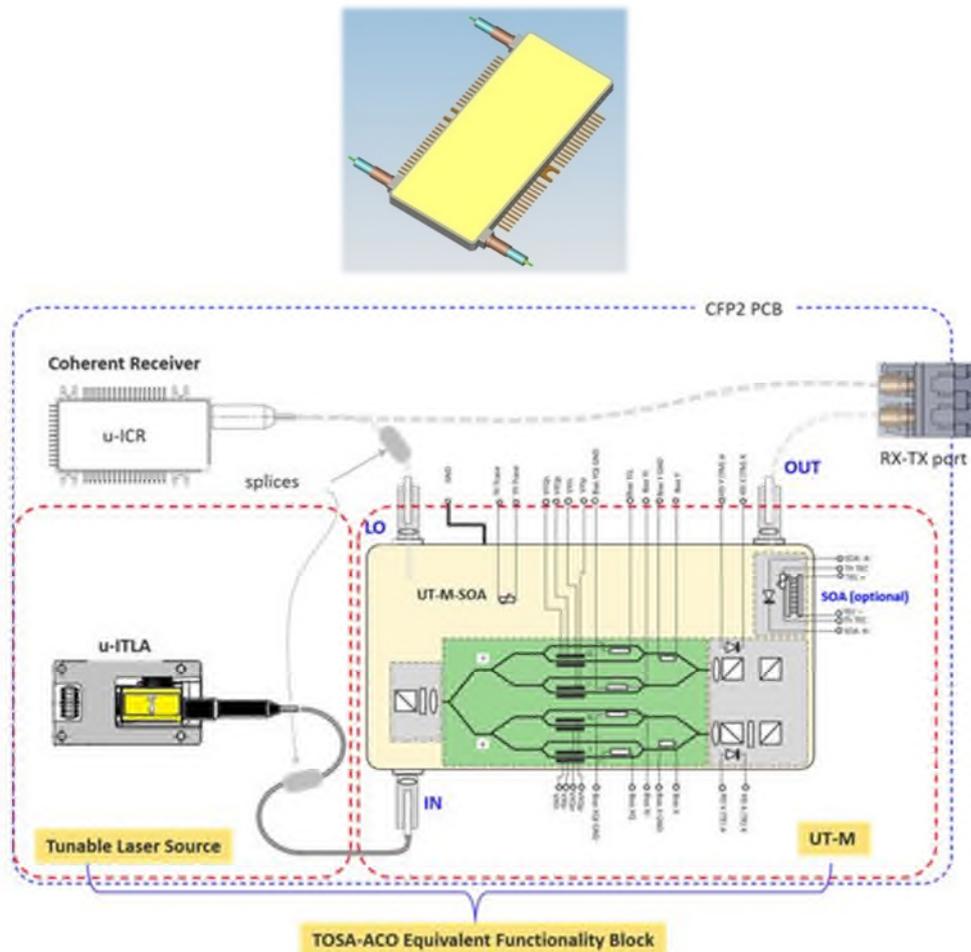
La tension de commande typique est de l'ordre de 6 V, avec une longueur d'électrode de quelques centimètres. La bande passante peut atteindre 40 GHz. Pour ce type de modulateur, la principale limitation provient de la longueur d'interaction nécessaire pour réduire la tension de commande à des valeurs raisonnables (< 10 V).



- **Modulateurs à base de polymères**

Grâce aux polymères, il est possible de franchir la limite en bande passante des 40 GHz tout en ayant une tension de commande de quelques volts .Pour cela, il faut des matériaux avec un coefficient électro-optique fort et présentant de faibles pertes optiques et électriques.

Les polymères semblent satisfaire un certain nombre de ces critères.



## Applications

- système optique cohérent
  - 100 Gb/s DP-QPSK
  - 200 Gb/s DP-16QAM

Actuellement, on peut trouver sur le marché des modulateurs de bande passante qui dépasse 110 GHz avec une tension de commande de l'ordre de 4 - 5 V. La faiblesse se situe dans la fiabilité très limitée des modulateurs, liée à la tenue dans le temps du matériau. C'est pourquoi des travaux se poursuivent sur cet axe de recherche.



### III .1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les propriétés générales des systèmes que nous allons étudier (le modulateurs électro absorbant). Dans un premier temps, nous faisons des rappels sur les semi-conducteurs qui sont à la base des nano structures étudiées. Dans un deuxième temps, Nous allons tout d'abord décrire les différentes structures permettant de réaliser des modulateurs électro absorbants et ensuite nous présenterons les différents paramètres caractérisant les modulateurs à électro absorption.

### III.2. Modulateurs à électro-absorptions

#### III.2.1. Introduction

Dans les systèmes de télécommunications, l'information est transmise numériquement dans des formats NRZ (*non return to zero*) ou RZ (*return to zero*). Divergentes variables physiques peuvent être modulées pour coder les données numériques sur la porteuse optique.

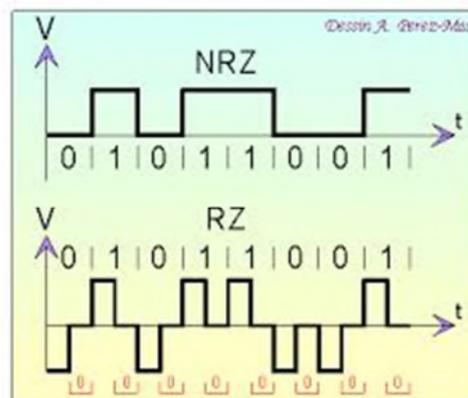


Figure III.1: modulateurs numériques NRZ, RZ

On peut ainsi moduler l'amplitude (ASK *amplitude-shift keying*), la fréquence (FSK *frequency-shift keying*) ou encore la phase (PSK *phase-shift keying*) du signal optique.



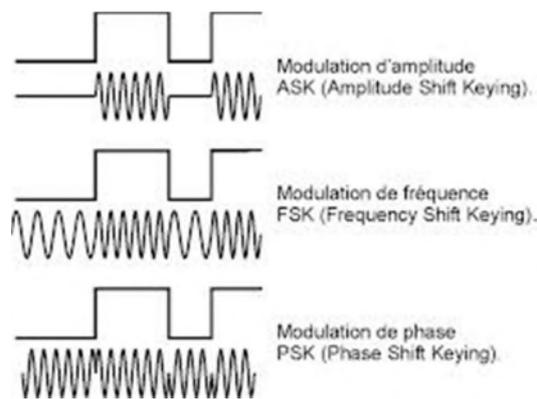


Figure III.2 : modulateurs numériques ASK, FSK, PSK

La technique de modulation ASK est la plus simple. Elle consiste à changer l'intensité du signal entre deux niveaux et est souvent appelée OOK (*on-off keying*) pour illustrer la nature "on-off" du signal optique résultant. Dans cette technique, le bit "0" correspond à un minimum d'intensité et le bit "1" à un maximum d'intensité (logique "positive").

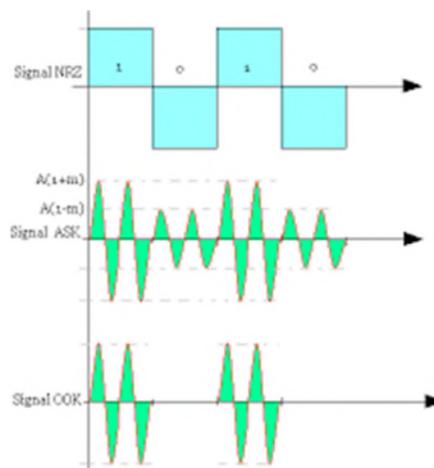


Figure III.3 : modulateurs numériques OOK

Contrairement, à la modulation optique ou le modulateur est basé sur l'effet électro optique c'est-à-dire basé sur la variation de l'indice de réfraction en fonction du champ électrique appliqué.

La modulation du signal optique peut se faire en modulant directement la densité de photons du laser par l'injection du courant. Cependant, cette méthode ne peut s'appliquer que pour des courtes longueurs de transmission à des débits limités. En effet, la modulation de la densité de porteurs dans la cavité induit une variation du gain matériau et donc une variation de l'indice



de réfraction. Cette variation décale la longueur d'onde d'émission et entraîne un élargissement dynamique de la raie laser (chirp en anglais) qui s'associe à la dispersion chromatique des fibres optiques et pénalise largement le système pour les transmissions longues distances. La modulation externe présente de nombreux avantages par rapport à la modulation directe du laser. Ces avantages sont un faible facteur de chirp (ou alors un facteur de chirp négatif), un grand taux d'extinction et une grande bande passante. On distingue deux types de modulateurs externes. Le premier type utilise les effets électro-optiques pour faire varier l'indice effectif d'un guide d'onde et ainsi moduler la phase du signal optique.

En général, le dispositif est un interféromètre Mach-Zehnder qui permet de convertir la modulation de phase en modulation d'intensité. La deuxième catégorie de modulateurs utilise les effets électro absorbants des semi-conducteurs. Dans ce deuxième cas, c'est l'intensité lumineuse qui est directement modulée. Différents effets d'électro absorptions sont observables suivant les hétéro structures considérées: effet *Franz Keldysh* dans les matériaux massifs, effet *Stark* confiné dans les puits quantiques ou encore effet *Wannier Stark* dans les super réseaux [14].

### III.2.2. Semi-conducteur

#### III.2.2.1. Rappel sur la structure de l'atome

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons de charge électrique  $q$  négative ( $-1.6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb). Le noyau contient deux types de particules :

-  Les neutrons qui ne sont pas chargés
-  Les protons qui portent une charge électriques  $+q$

L'atome étant électriquement neutre, le nombre de protons est égal au nombre d'électron.

Les électrons d'un atome gravitent autour du noyau sont assujettis à occuper des niveaux d'énergie discrets  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , définissant chacun une couche électronique plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si l'on choisit comme origine énergétique ( $E=0$  eV) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est à dire porté à une distance infinie). Toutes les valeurs des niveaux d'énergies  $E_n$  sont négatives ( $1\text{eV}$  représente  $1.6 \cdot 10^{-19}$  Joule).



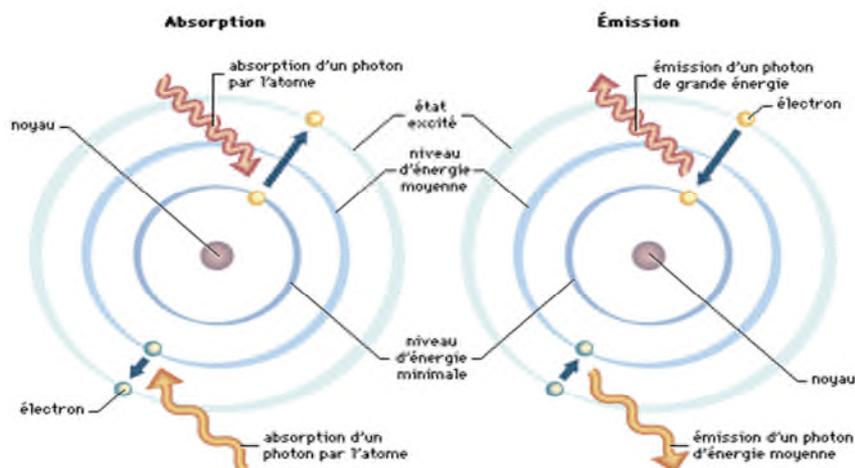
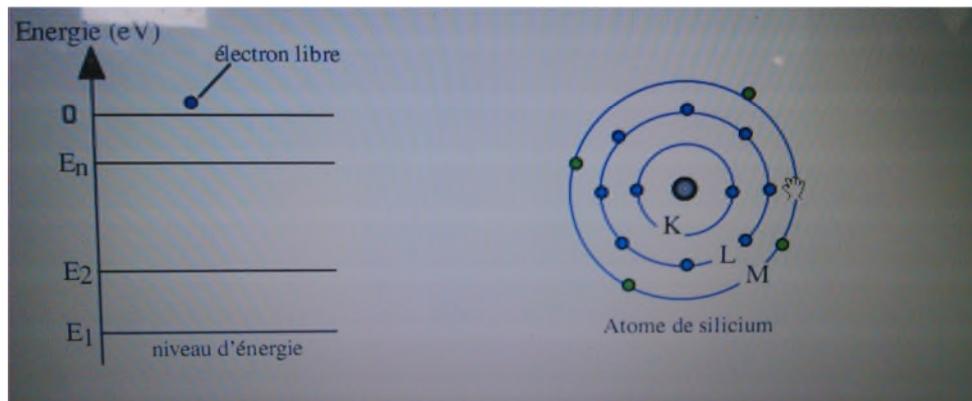


Figure III.4 : la structure de l'atome

On distingue :

- ✚ Les électrons internes qui occupent les premières couches. Ils sont alors très fortement liés au noyau
- ✚ Les électrons de valence (ou périphériques) qui occupent la couche la plus externe.

Ces électrons de valence sont peu liés au noyau. Contrairement aux deux premières, la couche(M) est incomplète, elle peut accueillir 4 électrons supplémentaires. En effet, il faut savoir que tous les atomes tendent à avoir 8 électrons sur leur couche périphérique.

### III.2.2.2. Rappel sur la structure d'un cristal

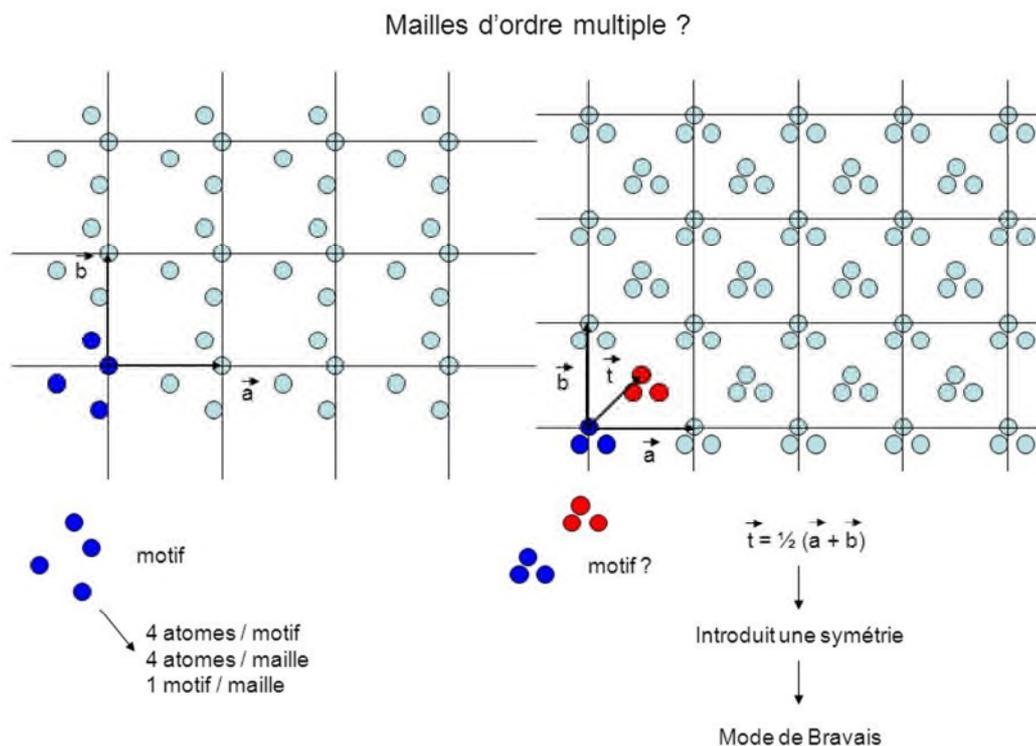
Un cristal est un solide dont les constituants (atomes, molécules ou d'ions) sont assemblés de manière régulière, par opposition au solide amorphe. Par « *régulier* » on veut généralement dire qu'un même motif est répété à l'identique un grand nombre de fois selon un réseau régulier, la plus petite partie du réseau permettant de recomposer l'empilement étant appelée une maille.



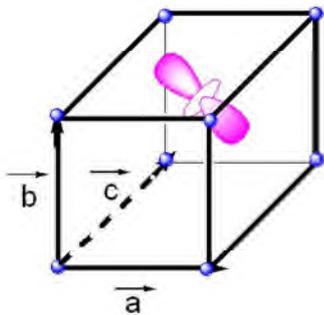
Un cristal idéal ne comporte pas de défauts cristallins, mais les cristaux réels sont loin de cette perfection. Au-delà d'une certaine concentration des défauts, le concept de structure cristalline cesse d'être utile et l'on considère que c'est un matériau amorphe tel que le verre. L'état amorphe s'apparente fortement à l'état liquide mais il existe aussi des cristaux liquides.

Un cristal est dit cubique à faces centrées (CFC) lorsque les nœuds de son réseau sont situés :

- aux 8 sommets d'un cube .
- au centre de chacune des faces de ce cube.



### Maille élémentaire tridimensionnelle



**Maille** : volume parallélépipédique défini par des vecteurs **a**, **b** et **c**.

**Système cristallin** : forme de la maille (ex. cube, prisme, etc.)

La juxtaposition de mailles identiques engendre le **réseau cristallin**.

Les **sommets** sont les **nœuds** du réseau. Une particule y est *souvent* placée.

Chaque maille contient *un ou des motifs* constitué de une ou plusieurs particules.

En cristallographie, une **maille** est une partie finie de l'espace par translation de laquelle le motif cristallin infini peut être obtenu à nouveau.

La **structure cristalline** (ou **structure d'un cristal**) donne l'arrangement des atomes dans un cristal. Ces atomes se répètent périodiquement dans l'espace sous l'action des opérations de symétrie du groupe d'espace et forment ainsi la structure cristalline. Cette structure est un concept fondamental pour de nombreux domaines de la science et de la technologie. Elle est complètement décrite par les paramètres de maille du cristal, son réseau de Bravais, son groupe d'espace et la position des atomes dans l'unité asymétrique la maille.

La plupart des matériaux III-V cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure III.3. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée (cfc), l'un d'éléments III et l'autre d'éléments V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de  $a\sqrt{3}/4$  [111], où  $a$  représente le paramètre de maille du matériau.



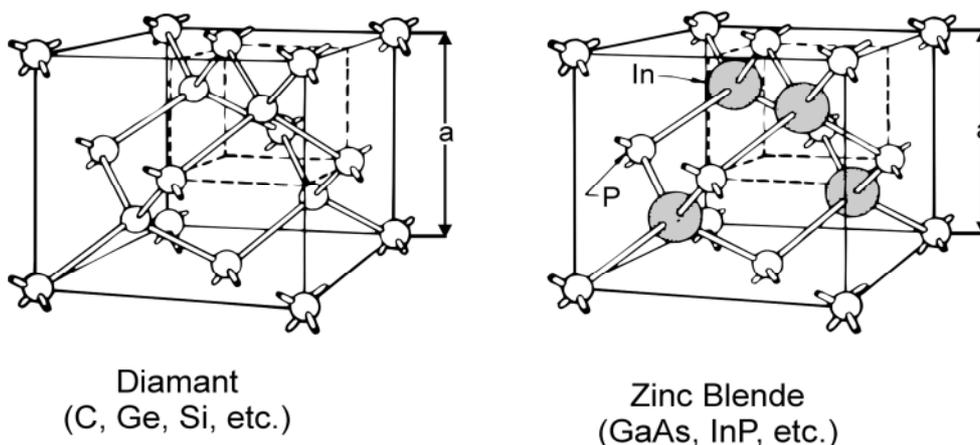


Figure III. 5 : mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende.

De ce fait, dans les matériaux III-V, les liaisons atomiques ne sont pas simplement covalentes comme dans le silicium. Elles reposent sur le transfert d'électrons des atomes du groupe V sur ceux du groupe III. Dans le cas du phosphore d'indium, le phosphore possède cinq électrons périphériques et l'indium trois. Dans le cristal, chaque atome de phosphore est entouré de quatre atomes d'indium, et chaque atome d'indium est entouré de quatre atomes de phosphore. Il se produit alors un échange d'électrons, et le cristal se construit avec les ions  $P^+$  et  $In^-$ , qui ont tous quatre électrons périphériques. Cette répartition est à l'origine du caractère partiellement ionique et partiellement covalent des liaisons (semi-conducteurs polaires), qui sont orientées dans l'espace suivant les axes de symétrie d'un tétraèdre régulier.

Un cristal est constitué d'un ensemble d'atomes dont les noyaux sont repartis dans l'espace de façon régulière à cohésion des atomes est assurée par la mise en commun des électrons de valence pour former des liaisons dites de covalence.

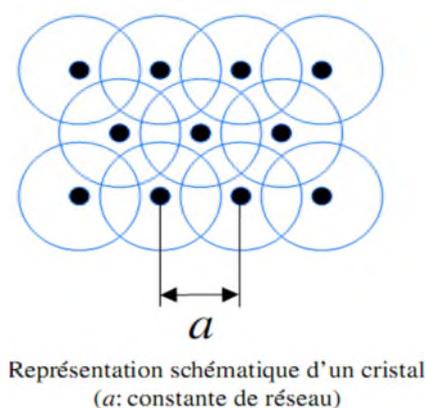


Figure III.5 : représentation schématique d'un cristal



Les états énergétiques possibles des électrons du cristal sont représentés par un diagramme analogue à celui de l'atome. Mais du fait de l'interaction des atomes entre eux, les niveaux d'énergie se transforment en bandes d'énergie séparées par des bandes interdites (ou il n'y a pas d'état permis).

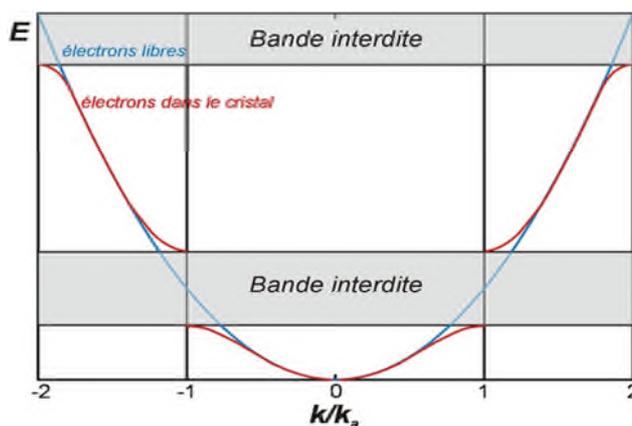


Figure III.6 : diagramme de bande d'énergie

Cristal	Gap	$E_g, eV$		Cristal	Gap	$E_g, eV$	
		0K	300K			0K	300K
Diamant	i	5.4		HgTe <sup>a)</sup>	d	-0.30	
Si	i	1.17	1.11	PbS	d	0.286	0.34-0.37
Ge	i	0.744	0.66	PbSe	i	0.165	0.27
$\alpha$ Sn	d	0.00	0.00	PbTe	i	0.190	0.29
InSb	d	0.23	0.17	CdS	d	2.582	2.42
InAs	d	0.43	0.36	CdSe	d	1.840	1.74
InP	d	1.42	1.27	CdTe	d	1.607	1.44
GaP	i	2.32	2.25	ZnO		3.436	3.2
GaAs	d	1.52	1.43	ZnS		3.91	3.6
GaSb	d	0.81	0.68	SnTe	d	0.03	0.18
AlSb	i	1.65	1.6	ACI		—	3.2
SiC	i	3.0	—	AgI		—	2.8
Te	d	0.33	—	Cu <sub>2</sub> O	d	2.172	—
ZnSb		0.56	0.56	TiO <sub>2</sub>		3.03	—

Tableau III.1 : Largeur de la bande interdite. i correspond à un "gap" indirect et d à un "gap" direct.



Chaque type de matériau présente une hauteur de bande interdite qui lui est propre, cette différence d'énergie, qui joue un rôle fondamental, permet de distinguer les matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs [16].

### III.2.2.3. Définition

Les semi-conducteurs sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants. On entend par là que lorsqu'ils se trouvent dans un état d'équilibre, ils sont isolants, mais qu'une excitation soit un apport d'énergie procuré de l'extérieur comme le passage d'une impulsion laser ou un apport calorifique permet au matériau de conduire l'électricité. Comme tout autre matériau, les semi-conducteurs ont aussi la propriété de pouvoir absorber les ondes électromagnétiques. L'absorption d'un matériau est caractérisée par son coefficient d'absorption  $\alpha$  exprimé en  $m^{-1}$ .

L'absorption dans les semi-conducteurs présente deux régimes de fonctionnement suivant l'intensité de l'onde absorbée. Aux faibles intensités, l'absorption est linéaire et dépend uniquement de la longueur d'onde.

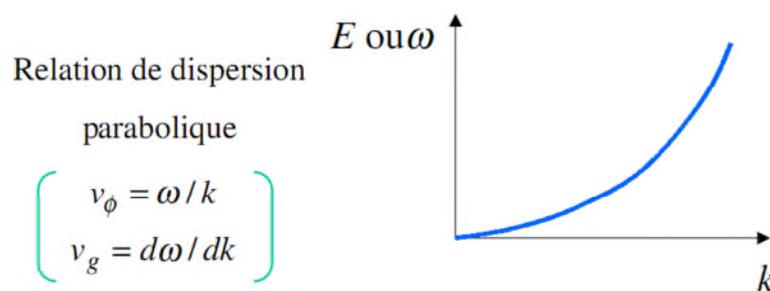
Par contre, aux fortes intensités l'absorption devient non-linéaire, c'est-à-dire qu'elle est dépendante de la longueur d'onde mais aussi de l'intensité. Le seuil de passage du régime linéaire au régime non-linéaire dépend principalement du matériau et de l'onde appliquée.

Pour comprendre les propriétés optiques des S-C abordées dans notre chapitre il nous suffira de nous rappeler qu'en mécanique quantique l'électron est décrit comme étant une onde. Dans le cas particulier de l'électron libre il s'agit d'une onde plane dont le vecteur d'onde est proportionnel à la quantité de mouvement de l'électron. La constante de proportionnalité étant la constante de Planck divisée par  $2\pi$ . La fréquence de l'onde est donnée par l'énergie de l'électron; celui-ci étant libre, il s'agit de son énergie cinétique proportionnelle au carré de la quantité de mouvement. La relation entre la fréquence (énergie) et le vecteur d'onde (quantité de mouvement) s'appelle la relation de dispersion. Dans le cas de l'électron libre, nous avons donc une relation de dispersion parabolique.



<p>Électron libre (classique)</p> <p style="color: red;">particule</p> $\begin{cases} p = m_e v \\ E = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{1}{2m_e} p^2 \end{cases}$	→	<p>Postulats de la M.Q.</p> <p style="color: red;">onde</p> $\begin{cases} p = \hbar k \\ E = \hbar \omega = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \end{cases}$
--	---	--

Nous représentons ici la relation de dispersion parabolique car on verra qu'elle joue un rôle central dans la description des semi-conducteurs. La courbe de dispersion permet d'obtenir la vitesse de phase de l'onde associée à l'électron ainsi que sa vitesse de groupe (à partir de la pente de la courbe). C'est la vitesse de groupe qui représente la vitesse physique réelle de l'électron (on trouve en effet la relation classique  $v_g = p/m_e$ )



#### III.2.2.4. Modèle de l'électron libre des S-C

Les semi-conducteurs sont des matériaux cristallins. Les électrons des couches périphériques des atomes du cristal sont libérés et peuvent se déplacer, ce qui conduit à la conductivité électrique, propriété physique essentielle des semi-conducteurs. La description la plus simple des propriétés électroniques d'un cristal est obtenue à l'aide du modèle de l'électron libre.

Pour décrire cette situation, il suffit donc de considérer l'équation de *Schrödinger* de l'électron en l'absence de potentiel (on retrouve alors le cas de l'électron libre vu ci-dessus). Considérons un électron d'énergie  $E$  donnée. La fonction d'onde de cet électron sera une onde plane de fréquence  $\omega$  déterminée par l'énergie  $E$ . La fréquence étant donnée, l'équation de Schrödinger devient l'équation de Schrödinger stationnaire dont la solution, en l'absence de potentiel, est  $\phi = e^{ikx}$

(Où  $k$  est lié à l'énergie  $E$  par la relation de dispersion parabolique).



$$\text{Eq. de Schrödinger stationnaire : } \psi = \phi e^{-i\omega t} , \quad E = \hbar\omega$$

### III.2.3. Effet tunnel

#### III.2.3.1. Introduction

La physique quantique est la théorie fondamentale décrivant les phénomènes se produisant au cœur de la matière. Elle a permis de nombreuses applications technologiques Maser, Laser, microscope à effet tunnel, supraconducteurs - mais elle est, avant tout, à l'origine d'une révolution complète dans notre conception du monde, notre rapport à la réalité et à notre définition même de "soi".

L'effet tunnel désigne la propriété que possède un objet quantique de franchir une barrière de potentiel, franchissement impossible selon la mécanique classique. Généralement, la fonction d'onde d'une particule, dont le carré du module représente l'amplitude de sa probabilité de présence, ne s'annule pas au niveau de la barrière, mais s'atténue à l'intérieur de la barrière, pratiquement exponentiellement pour une barrière assez large. Si, à la sortie de la barrière de potentiel, la particule possède une probabilité de présence non nulle, elle peut traverser cette barrière. Cette probabilité dépend des états accessibles de part et d'autre de la barrière.

#### III.2.3.2. Définition

L'effet tunnel est l'une des conséquences les plus spectaculaires de la mécanique ondulatoire introduite dans les années 1923-1927 essentiellement par *Louis De Broglie* et *Erwin Schrödinger* l'origine de cet effet provient de ce qu'on a appelé dualité onde corpuscule. A toute onde on peut associer des particules: par exemple, la lumière peut se décrire comme des ondes électromagnétiques ou se comporter comme un flux de photons, et inversement toute particule matérielle peut avoir des comportements relevant plutôt du domaine des ondes.

L'effet tunnel désigne la propriété que possède un objet quantique de franchir une barrière de potentiel même si son énergie est inférieure à l'énergie minimale requise pour franchir cette barrière. C'est un effet purement quantique, qui ne peut pas s'expliquer par la mécanique classique. Pour une telle particule, la fonction d'onde, dont le carré du module représente la densité de probabilité de présence, ne s'annule pas au niveau de la barrière, mais s'atténue à l'intérieur de la barrière, pratiquement exponentiellement pour une barrière assez large. Si, à la



sortie de la barrière de potentiel, la particule possède une probabilité de présence non nulle, elle peut traverser cette barrière. Cette probabilité dépend des états accessibles de part et d'autre de la barrière ainsi que de l'extension spatiale de la barrière.

### III.2.4. Caractéristiques d'un MEA

#### III.2. 4.1. Facteur de confinement et taux d'extinction

De la même manière que pour le laser MQW, on définit le facteur de confinement comme le rapport de la fraction du signal qui est guidé, avec la fraction du signal qui est à l'extérieur du guide. Le nombre et la dimension des barrières et des puits restent les facteurs principaux car ils fixent la taille de la structure guidante du modulateur. Le taux d'extinction est le rapport des intensités lumineuses lorsque le composant n'est pas soumis à un champ électrique, l'état passant, et lorsqu'il est soumis à un champ électrique et donc non passant. Ce taux d'extinction caractérise l'aspect statique (SER) de l'absorption de la lumière par le modulateur et il est défini par :

$$SER = e^{\Gamma\Delta\alpha L} \quad (\text{III.1})$$

Le taux d'extinction statique, s'exprimant le plus souvent en dB, va donc dépendre de la longueur d'interaction  $L$  tout au long de la structure du guide, et de la variation d'absorption du composant entre l'état passant et non passant. Cette variation est notée ici  $\Delta\alpha$ ,  $\alpha$  étant le coefficient d'absorption.

#### III.2.4.2. Pertes internes d'atténuation

L'atténuation induite à l'état passant est due à différentes origines. Des pertes par réflexion existent par exemple aux interfaces air-semiconducteur. Des pertes de couplage résultant des différences de taille de mode entre la fibre monomode et le guide. Des pertes de propagation dues à la diffusion de la lumière aux interfaces et sur d'éventuels défauts.

De plus il existe un phénomène d'absorption par les porteurs libres dans les régions dopées P et N, ainsi qu'une absorption bande à bande du matériau. En effet la propagation d'une fraction non négligeable de l'énergie lumineuse dans les couches dopées P induisent ce phénomène d'absorption qui peut avoir une grande proportion si le facteur de confinement est peu élevé. Les pertes d'absorption inter-bandes dépendent du positionnement de la longueur



d'onde de fonctionnement par rapport à la raie du pic excitonique. La majeure contribution aux pertes du modulateur est due à ces pertes intra-bandes car les modulateurs fonctionnent au voisinage du bord de bande d'absorption d'où l'intérêt de réduire au maximum la taille des modulateurs qui est également un paramètre clé pour leur rapidité de fonctionnement dans un régime dynamique de modulation. Si l'on définit l'absorption bande à bande du matériau par  $\alpha_0$ , les pertes du modulateur en fonction de la longueur  $L$  du composant et du facteur de confinement sont :

$$\alpha_T = e^{\Gamma\alpha_0 L} \quad (\text{III.2})$$

On peut alors définir l'efficacité de modulation par :

$$m = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} \quad (\text{III.3})$$

Ce paramètre que l'on retrouve dans les équations régissant de manière générale la modulation d'amplitude de ces modulateurs, est ici un critère physique du matériau lie directement à la conception des structures à puits quantiques. L'optimisation de l'électro-absorption en faisant varier ce rapport entre la variation d'absorption et l'absorption à l'état passant a fait l'objet de nombreuses études. La *figure III.7* illustre l'impact de l'efficacité de modulation résultant d'un compromis entre les pertes d'absorption à l'état passant, et la variation de modulation lorsque la structure à puits quantique est soumise à un champ électrique.

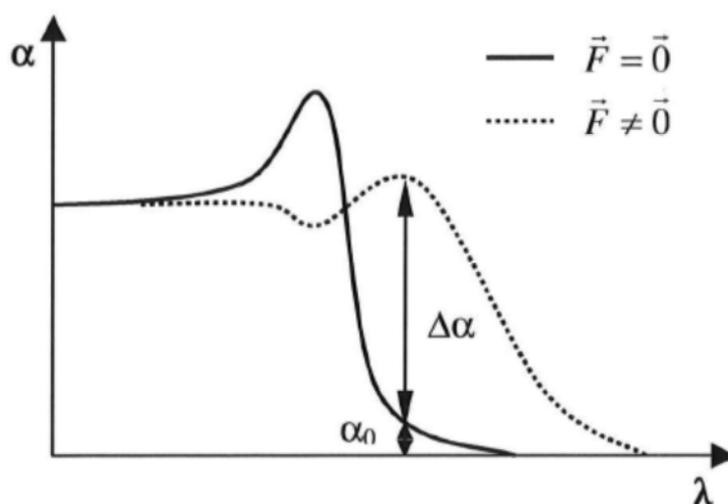


Figure III.7: Dépendance de l'efficacité de modulation ( $F$  : champ électrique)



### III.2.5. Rapidité de modulation

Le modulateur est une diode fonctionnant dans le régime de polarisation inverse, son schéma électrique (*figure III.8*) est équivalent à un condensateur plan d'épaisseur égale à celle de la région de déplétion. Comme pour les diodes lasers, il existe une résistance série  $r_s$  venant des couches dopées N et suivi des contacts ohmiques, elle est de quelques ohms.

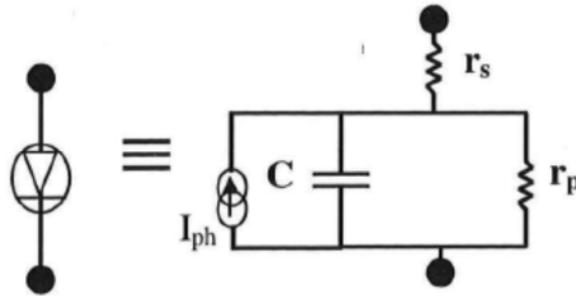


Figure III.8 : Schéma électrique équivalent d'un modulateur à électro-absorption

Le signal de commande est une tension variable équivalant à un générateur de tension en série comme l'illustre le schéma de la *figure III.9*. La ligne d'accès hyperfréquence reliant le composant à l'embase (support de la puce) est une inductance ( $L$  sur le schéma), cette ligne correspond dans la réalité à un fil d'or soudé de part et d'autre de l'électrode du modulateur et de l'embase.

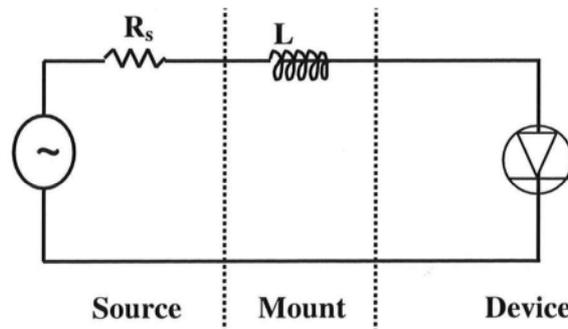


Figure III.9 : Schéma électrique équivalent du circuit de commande d'un modulateur (EAM=diode)

Dans un régime de fonctionnement en absorption, le modulateur se comporte comme une photodiode en générant du photocourant,  $I_{ph}$ . On peut schématiser ce courant par une source de courant en parallèle avec une charge,  $R_p$  sur le schéma. Pour des puissances optiques de la lumière absorbée de l'ordre de plusieurs  $mW$ , le photocourant est de l'ordre de quelques  $mA$ .



En négligeant les capacités, résistances et inductances parasites du montage, la fréquence de coupure est reliée à la constante de temps RC caractéristique des condensateurs ( $R = r_p$  : résistance de charge en parallèle du modulateur). La capacité correspond à la zone de déplétion de la diode PIN en négligeant la contribution du plot de contact. L'épaisseur de la région de déplétion peut être approximée à l'épaisseur de la région intrinsèque sachant que les zones N et P sont fortement dopées. La fréquence de coupure du modulateur est alors donnée par l'expression :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC_{PIN}} \quad (\text{III.4})$$

Avec  $C_{PIN}$  la capacité de la diode que l'on définit par :

$$C_{PIN} = \frac{\varepsilon S}{t_1} \quad (\text{III.5})$$

$\varepsilon$  est la constante diélectrique de la région non dopée,  $S$  est la surface de la diode, et  $t_1$  est l'épaisseur de la région non dopée.

On peut également améliorer la bande passante du composant en diminuant les dimensions du modulateur pour réduire la capacité. Pour garder une absorption conséquente, une longueur suffisante pour un fort taux d'extinction, il est préférable de diminuer la largeur du dispositif tout en prenant en compte les problèmes de guidage latéral. La région intrinsèque peut également être épaissie mais il faudra une tension inverse plus élevée pour appliquer le même champ électrique. A l'inverse, la recherche d'une polarisation inverse minimale correspondant à une zone de charge d'espace faible, ce qui provoque une augmentation de la capacité et donc une diminution de la fréquence de coupure du modulateur.

### III.2.5.1. Tension de commande

La tension de commande va fixer le champ électrique appliqué à la diode PIN. Elle est composée d'un signal continu de polarisation inverse et de valeur constante, ainsi que d'un signal variable dans le temps dont l'excursion varie autour de la composante continue. Il en résulte une tension de commande variable autour du signal continu permettant ainsi de greffer sur le signal optique (porteuse optique) traversant le modulateur, l'information véhiculée par le



signal de tension variable (signal modulant). Si  $V$  est la tension de commande, le champ électrique  $F$  résultant s'exprime par :

$$F = \frac{V + V_{bi}}{t_1} \quad (\text{III.6})$$

$V_{bi}$  est le potentiel auto-construit.

Cette expression permet retrouver le lien de la tension de commande avec l'épaisseur de la zone intrinsèque qui a un impact de grande importance sur la bande passante car agissant directement sur la capacité de la jonction PIN.

### III.2.5.2. Puissance de saturation

La puissance de saturation est la puissance optique en entrée du modulateur à partir de laquelle l'absorption du modulateur décroît de 3 dB. Dans cet état de saturation de l'absorption, le modulateur est dans un régime non-linéaire. Différents mécanismes sont à l'origine de ce phénomène qui dans le cas des MEA à MQW, l'effet de saturation s'explique tout d'abord par l'effet de remplissage des bandes. A ce stade, tous les états excitoniques sont remplis et aucune absorption de photons à ces énergies n'est possible. L'autre mécanisme à l'origine de la saturation de l'absorption est l'effet d'écrantage du champ électrique dû à la densité de charge positive générée par l'accumulation des trous dans la couche active du fait du temps d'échappement des trous étant plus long que celui des électrons. On peut exprimer, la fraction de la saturation de l'absorption excitonique, par :

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha_0} = \frac{I}{I_S} = \frac{N_e}{N_{Se}} + \frac{N_h}{N_{Sh}} \quad (\text{III.7})$$

$I$  est l'intensité de la lumière incidente et  $I_S$  l'intensité de la lumière à la saturation,  $N_e$  et  $N_h$  sont les densités de charge d'un électron et d'un trou, et  $N_{Se}$  et  $N_{Sh}$  sont les densités de charge de ces mêmes particules à la saturation.

### III.2.5.3. Temps d'échappement des porteurs

Ce temps correspond au temps nécessaire à l'évacuation des porteurs photo-générés de la zone active. Lorsque le temps d'échappement des porteurs est long, la puissance de saturation est faible et le composant est très vite altéré sur ces performances de modulation. Le temps



d'échappement dépend fortement de la discontinuité énergétique des bandes, car il est principalement lié à l'émission thermoïonique à l'échappement par effet tunnel à travers les barrières.

Pour utiliser les modulateurs à des débits très élevés, il est donc important de diminuer le temps d'échappement qui à l'état passant (sans présence d'un champ électrique) est de l'ordre de 100 ps.

L'application d'une tension inverse fait décroître ce temps d'échappement exponentiellement. Il faut tout de même optimiser la puissance du signal appliqué pour éviter l'effet d'écrantage du champ électrique. Le temps d'échappement peut être diminué également en utilisant de faibles hauteurs de barrières ainsi que de faibles épaisseurs de puits et de barrière.

La hauteur des barrières est la principale contribution au taux d'émission thermoïonique  $\tau_E$  défini par :

$$\frac{1}{\tau_{E(e,h)}} = \left( \frac{K_B T}{2\pi m_{e,h}} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[ -\frac{H_{e,h}(F)}{K_B T} \right] \quad (\text{III.8})$$

Un modulateur électro-absorbant est caractérisé par un taux d'extinction lié à l'absorption en fonction de la tension appliquée, une atténuation en mode passant, une bande passante et un facteur de couplage phase-amplitude (facteur de *Henry*).

Il faut noter qu'il est possible d'obtenir un coefficient d'extinction de 10 dB/V pour un dispositif de longueur standard de 250  $\mu\text{m}$  et une puissance à l'entrée inférieure à 10 mW. Ce coefficient est plus faible lorsque le dispositif est court, par exemple 4 dB/V pour une longueur de 100  $\mu\text{m}$  dans ce cas les pertes d'insertion sont de l'ordre de 10 dB et les pertes dépendantes de la polarisation de l'ordre de 0,2 à 0,3 dB pour des valeurs de la tension inférieures à -3V.

La bande passante dépend de la longueur du dispositif. Par exemple elle est de l'ordre de 13 GHz pour une longueur de 250  $\mu\text{m}$  et de 20 GHz pour une longueur de 100  $\mu\text{m}$  lorsque la tension appliquée est de -1V. Cependant, des modulateurs sont en développement pour leur utilisation à des débits plus élevés.

Une modification de l'absorption d'un matériau affecte obligatoirement l'indice de réfraction et donc la partie imaginaire de l'indice complexe ( $n_i$ ) et sa partie réelle ( $n_r$ ) ne sont plus indépendantes mais liées par les relations de *Kramers-Kroning*. Le facteur de couplage phase

amplitude qui en résulte dépend de la tension appliquée et de la longueur d'onde et peut même s'annuler pour certaines valeurs [5].

$$\varepsilon_1(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \varepsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

$$\varepsilon_2(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon_1(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

*P* means "principal part"

Kramers-Kronig Relation

(III.9)

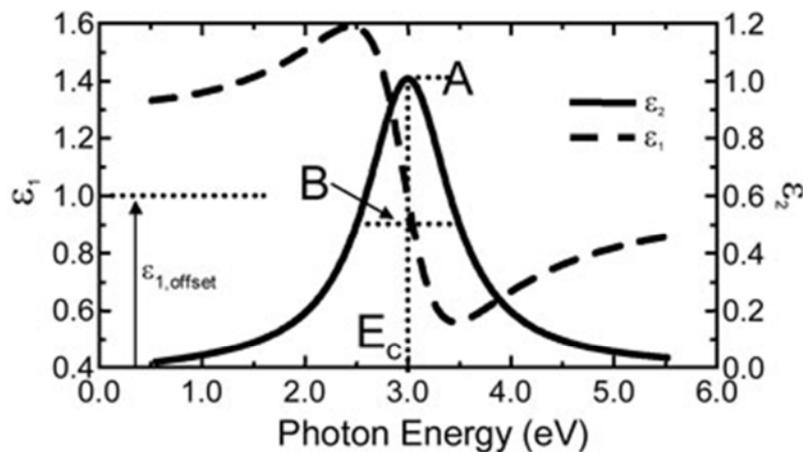


Figure III.10 : variation de l'indice de réfraction ---- partie réel et - partie imaginaire

### III.3. Principe de fonctionnement

Le rôle de l'EAM est d'absorber ou de laisser passer la lumière incidente émise par un laser ou n'importe quel composant d'extrémité. La fonction absorption est obtenue par l'application d'un champ électrique qui permet de déplacer vers les grandes longueurs d'onde le spectre d'absorption du matériau par effet *Stark*. La (figure III.11) ci-dessous décrit le principe de fonctionnement.

A champ électrique nul ( $F=0$ ), la longueur d'onde  $\lambda_{laser}$  n'est pas absorbée, le modulateur est à l'état ouvert. A champ électrique non nul ( $F \neq 0$ ), la longueur d'onde  $\lambda_{laser}$  est absorbée, le modulateur est à l'état fermé. Le dispositif fonctionne donc sur une simple modulation de l'amplitude de l'onde lumineuse incidente.

Ceci facilite grandement la réception du signal lumineux à l'autre bout de la chaîne de Transmission car la photodiode peut travailler en détection directe. A fin d'obtenir un bon

contraste entre l'état ouvert et l'état fermé, il est nécessaire d'avoir un décalage entre la longueur d'onde incidente et le pic d'absorption du matériau à champ électrique nul [14].

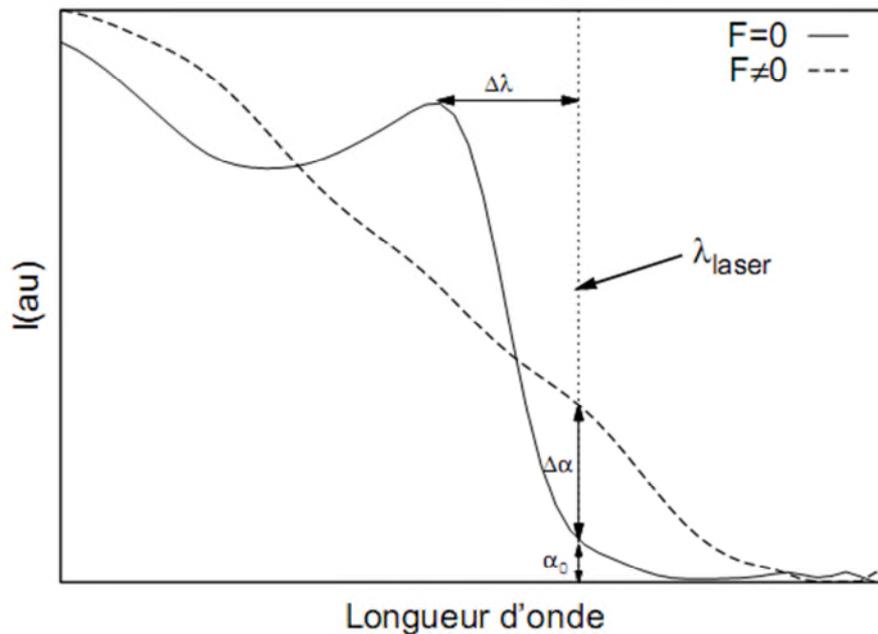


Figure III.11: Principe du modulateur électro absorbant. À champ électrique nul ( $F=0$ ), l'EAM est l'état ouvert et à champ non nul ( $F \neq 0$ ), il est à l'état fermé.

Pour cela, on définit, pour une longueur d'onde donnée, deux paramètres donnant la variation d'absorption  $\Delta\alpha$  et l'absorption en mode passant  $\alpha_0$ .  $\Delta\alpha$  doit être le plus grand possible afin d'éviter les erreurs de détection à la réception du signal optique modulé.  $\alpha_0$  doit au contraire être le plus faible possible afin de limiter les pertes du composant. Le contraste de fonctionnement (ou profondeur de modulation) est défini par la relation entre ces deux paramètres :

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} \quad (\text{III.10})$$

Et doit être le plus grand possible. Les deux paramètres  $\Delta\alpha$  et  $\alpha_0$  sont illustrés sur la figure pour la longueur d'onde  $\lambda$  laser. Clairement, le décalage  $\Delta\lambda$  (Figure III.8) entre le pic d'absorption à champ nul et la longueur d'onde incidente aura une très forte influence sur le contraste de fonctionnement. Lorsque ce décalage est trop faible,  $\Delta\alpha$  augmente mais l'atténuation en mode passant est trop grande. Au contraire, lorsque le décalage est trop grand,  $\alpha_0$  est nul mais le taux d'extinction devient très faible.

Le taux d'extinction du modulateur ER et l'atténuation en mode passant **att** dépendent de la longueur du modulateur  $L$  et du facteur de confinement  $\Gamma$ . Ils sont donnés en dB Par les formules exponentielles suivantes:



$$ER (dB)=10 \log (\exp (-\Gamma \Delta \alpha L)) \quad (\text{III.11})$$

$$att(dB) = 10 \log (\exp (-\Gamma \alpha_0 L)) \quad (\text{III.12})$$

### III.3.1. L'effet Franz-Keldysh

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

### III.3.2. L'effet Stark confiné dans les puits quantiques

Un nouveau type de matériau apparaît avec les progrès des technologies d'épitaxie de couches minces de semi-conducteurs. Il est en effet possible de faire croître successivement de très fines couches (quelques épaisseurs atomiques) de semi-conducteurs III–V d'énergies de bande interdite différentes. En alternant des strates de semi-conducteurs de petite et grande énergie de bande interdite, les électrons et les trous sont piégés dans les puits ainsi constitués *figure III.12*.

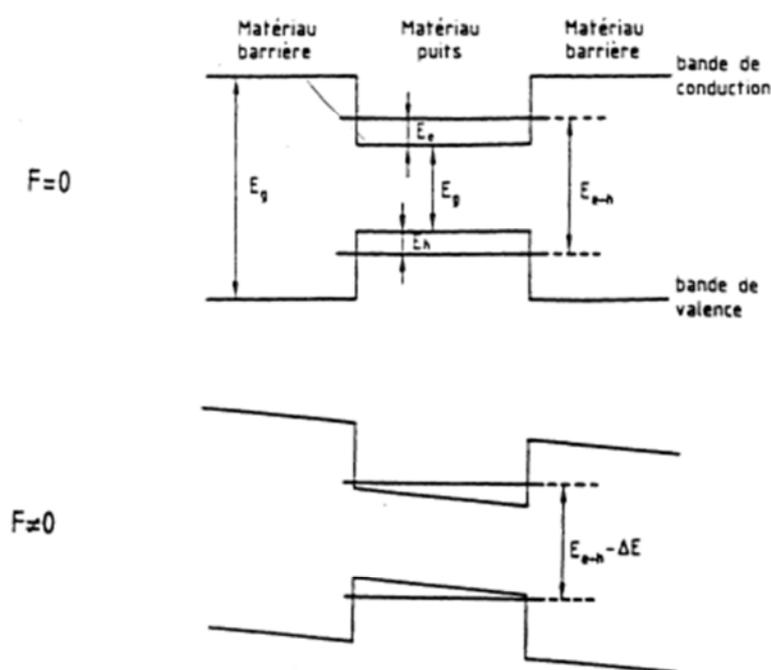


Figure III.12 : Diagramme des niveaux d'énergie d'un puits quantique

avec ou sans l'application d'un champ électrique  $F$

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

L'énergie de transition fondamentale n'est plus  $E_g$ , l'énergie de bande interdite du matériau puits, mais

$$E_{e-h} = E_e + E_g + E_h \quad (\text{III.13})$$

Où  $E_e$  et  $E_h$  sont les énergies de quantification respectives des électrons et des trous piégés. Quand un champ électrique est appliqué perpendiculairement par rapport à la direction de croissance des couches, la forme du puits varie progressivement du rectangle au trapèze. Les porteurs piégés peuvent sortir moins difficilement du puits.

L'incertitude sur leur position augmente, les énergies de quantification  $E_e$  et  $E_h$  diminuent en conséquence et le bord d'absorption se décale vers le rouge, comme l'illustre le spectre typique d'effet *Stark* confiné (*Figure III.12*).

Pour bien comprendre ce spectre, il faut aussi ajouter le rôle joué par les excitons. A champ nul, la force d'oscillateur de l'exciton est considérablement renforcée à cause du confinement des porteurs dans les couches puits. Le pic excitonique est clairement visible sur le spectre d'absorption à température ambiante. Quand le champ électrique est appliqué, les électrons et les trous tendent à se séparer, ce qui diminue la force d'oscillateur de l'exciton. Ce décalage vers le rouge du bord d'absorption est mis à profit pour fabriquer des modulateurs électro-absorbants efficaces [8].

#### III.4. Principe de l'électro absorption

Le fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption de matériaux semi-conducteurs soumis à un champ électrique. L'effet électro-absorption est connu sous différents noms selon le type de matériau utilisé : effet *Franz-Keldysh* dans les matériaux semi-conducteurs massifs et effet *Stark* confiné quantique dans les structures à puits quantiques.



Les modifications du spectre d'absorption sont bien plus prononcées dans une structure quantique que dans un matériau massif [12].

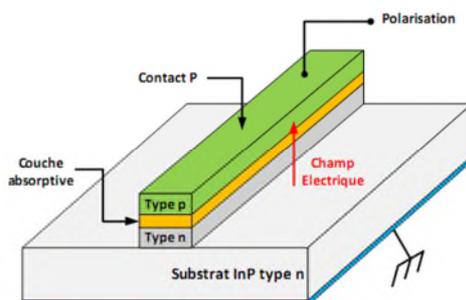


Figure III.13 : schéma simplifié d'un modulateur à électro-absorption

Du point de vue structure, ces 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 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 (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.

Les faces clivées sont recouvertes de couches anti-réfléchissantes afin de diminuer les pertes par réflexion. Malgré la sensibilité à la polarisation provenant de la différence des facteurs de confinement des modes TE et TM dans le guide, l'avantage de cette structure est de permettre d'associer sur un même substrat d'InP une diode laser fonctionnant en continu et un modulateur d'intensité [5].

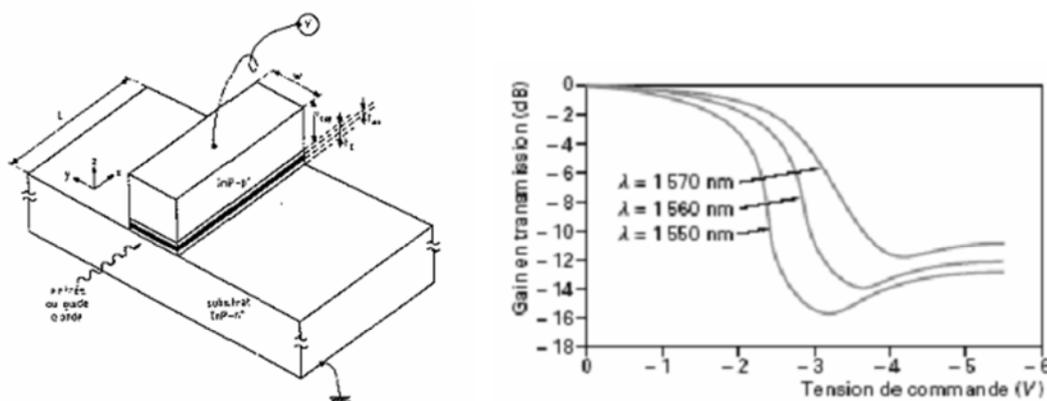


Figure III.14 : (a) Structure d'un guide d'onde en arête contenant un matériau électro-absorbant.

(b) Transmission d'un modulateur en fonction de la tension de commande, pour différentes longueurs d'ondes

L'inconvénient de ce composant est que le signal passe deux fois à travers le matériau absorbant et que les pertes sont donc très importantes. Il faut donc obligatoirement associer le modulateur à électro-absorption réfléchitif à un amplificateur à semi-conducteur [15].

### III.5. Dynamique du modulateur

#### III.5.1. Relation entre l'absorption et l'indice de réfraction

Les variations du spectre d'absorption induisent une variation d'indice, On caractérise ce couplage à une longueur d'onde donnée par le paramètre de Henry du modulateur. Ce mécanisme est identique que celui décrit pour le couplage phase-amplitude d'un laser.

Pour un modulateur on prend en compte l'absorption a la place du gain et on définit de manière similaire a un laser, le coefficient de couplage phase-amplitude :

$$\alpha_{H,MEA} = \frac{\Delta n_r}{\Delta n_i} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\Delta n_r}{\Delta \alpha} \quad (\text{III.14})$$

$n_r$  et  $n_i$  sont les parties réelles et imaginaires de l'indice de réfraction complexe dans le guide, et  $\Delta \alpha$  est la variation d'absorption.

On peut écrire sous une forme différente, la relation de dispersion de Kramers-Kronig définie par l'équation III.15, cette fois-ci en fonction de l'absorption et de la variation du champ électrique appliqué  $\Delta F$

$$\Delta n_r(\Delta F, \lambda) = \frac{\lambda^2}{2\pi^2} P \int_0^\infty \frac{\Delta \alpha(\Delta F, \lambda')}{\lambda'^2 - \lambda^2} d\lambda' \quad (\text{III.15})$$

#### III.5.2. Evolution de la phase et de l'amplitude

Si l'on exprime la phase du champ optique en sorti du modulateur, en fonction de son indice de réfraction  $n_r$  (partie réelle) et de sa longueur  $L$ , par :

$$\Phi_{MEA} = -\frac{2\pi}{\lambda} n_r L \quad (\text{III.16})$$

Alors la variation de phase en sortie due au couplage phase-amplitude sera exprimé en fonction de l'intensité lumineuse  $I$  par :



$$\frac{\partial \phi_{MEA}}{\partial t} = \frac{\alpha_{H,MEA}}{21} \frac{\partial I}{\partial t} \quad (\text{III.17})$$

A l'instar des lasers à semi-conducteurs, les modulateurs à électro-absorption sont également soumis au phénomène de couplage phase-amplitude. Son origine physique est peu différente car elle concerne l'effet couple d'une variation d'absorption (ou de gain) sur les partie réelles et imaginaires de l'indice de réfraction et donc sur la phase du signal traversant la zone active du modulateur. De manière générale, l'amplitude du champ en sortie du modulateur EA excite par un signal d'amplitude  $E_{in}$  constant ainsi que la variation de phase relative sont données par

$$|E_{out}(t)| = |E_{in}| e^{-k_0 n''(t)L} \quad (\text{III.18})$$

$$\phi(t) = -k_0 n'(t)L \quad (\text{III.19})$$

Ou  $L$  est la longueur du modulateur,  $k_0$  la constante de propagation dans le vide correspondant à la pulsation  $\omega_0$  de l'onde optique, et  $n'$  et  $n''$  les partie réelles et imaginaires de l'indice de réfraction dans la région active du composant. Ce dernier permet de relier la phase, due à  $n'$ , et l'amplitude, due à  $n''$  (pertes par absorption) [19]

$$\alpha = \Delta n' / \Delta n'' \quad (\text{III.20})$$

On retrouve alors notre coefficient de couplage phase-amplitude introduit précédemment dans le paragraphe consacré à la modulation des lasers semi-conducteurs. En combinant les équations III.18 et III.19, la variation de phase est décrite en fonction de l'intensité du signal en sortie par rapport au temps :

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\alpha}{21} \frac{dI}{dt} \quad (\text{III.21})$$

$$I = |E_{out}(t)|^2 \quad (\text{III.22})$$

Maintenant, la dépendance du signal traversant le modulateur, i.e. sa fonction de transfert notée  $T(V)$ , par rapport au signal modulant, qui est caractérisé par une variation de tension, peut être définie par

$$A_{out}(t) = A_{in}(t) \cdot T(V(t)) \cdot \exp \left[ j \int_0^{V(t)} \frac{\alpha(V)}{T(V)} \frac{dT(V)}{dV} dV \right] \quad (\text{III.23})$$

$A_{out}(t)$  est l'amplitude complexe du signal émis par le modulateur en réponse du signal  $A_{in}(t)$  à son entrée. L'évolution du signal traversant le composant étant gouvernée par la variation de tension à ses bornes, le coefficient de couplage phase-amplitude est directement relié aux variations de tension.

Les modulateurs à électro-absorption sont de manière générale dépendants de la longueur d'onde du fait de différences dans la fonction de transfert. Le modèle représenté par l'équation III.23 peut être enrichi, toujours d'après, par la prise en compte de cette dépendance à la longueur d'onde, qui dans un EML est fortement dépendant du courant de polarisation statique du laser. Soit donc l'expression du signal en sortie du modulateur prenant en considération la réponse spectrale du matériau [19]

La variation d'amplitude du modulateur soumis à une variation de tension est donnée au chapitre I par l'équation III.24.

$$A_{out}(t) = \int \tilde{A}_{in}(f) e^{2j\pi f t} \cdot T(V(t), f) \cdot \exp \left[ j \int_0^{V(t)} \frac{\alpha(V, f)}{T(V, f)} \frac{dT(V, f)}{dV} dV \right] df \quad (\text{III.24})$$

### III.5.3. Forme du signal en sortie du modulateur

D'après les relations exprimées sur la section laser, et compte tenu du comportement du modulateur, on peut exprimer la puissance à la sortie du composant intégré en fonction de la contribution de chacune des fonctions:

$$P_{out} = \frac{\delta P}{\delta N} + \frac{\delta P}{\delta V} \quad (\text{III.24})$$



On retrouve la contribution due au laser  $\frac{\delta P}{\delta N}$  qui dépend de la variation des porteurs liée au courant injecté dans le laser, et la contribution du modulateur  $\frac{\delta P}{\delta V}$  qui dépend de la tension de commande.

$$\delta\phi_{out} = \frac{\delta\phi_{DFB}}{\delta t} + \frac{\delta\phi_{MEA}}{\delta t} \quad (\text{III.25})$$

De même pour l'évolution de la phase au cours du temps, on peut considérer la contribution du laser tout d'abord, puis celle du modulateur [19].



#### IV.1. Le simulateur système COMSIS

Le développement des télécommunications par fibres optiques a multiplié les architectures des réseaux. La conception des systèmes associés est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. De plus, il est demandé à ces derniers à la fois de transporter des capacités d'informations de plus en plus importantes, et de se renouveler très rapidement. La méthode expérimentale, qui consiste en des mesures itératives sur un banc de test, est très coûteuse en temps et en argent. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance intéressante pour trouver des solutions, aussi bien au niveau du composant que du système. Les logiciels peuvent être une aide à la conception et à la prise de décision, tout en évitant la multiplication d'essais compliqués et onéreux. Ils permettent de prendre en compte les améliorations technologiques des composants, parfois même avant qu'ils ne soient disponibles sur le marché. Non seulement ils vont mesurer la qualité de transmission d'une liaison, mais aider à en optimiser les performances.

En plus de l'aide précieuse qu'ils sont à même d'apporter pour le développement des systèmes actuels, les simulateurs de systèmes de transmissions optiques peuvent être d'une grande utilité pour la recherche et l'investigation des futurs systèmes. Ils sont pour la plupart très ouverts et offrent la possibilité d'introduire de nouveaux modèles au sein du programme.

Cependant, contrairement à l'électronique et aux micro-ondes, il n'existe pas d'outils standards et bien admis dans le domaine des transmissions optiques. Il est apparu, récemment, sur le marché, un certain nombre de logiciels permettant la simulation des systèmes de communications optiques. Le laboratoire GESTE a testé quelques-uns de ces simulateurs et a retenu le logiciel COMSIS. Une présentation de ce dernier est effectuée ci-après [12].

#### IV.2. Présentation du logiciel

COMSIS est un logiciel de simulation système développé par une société française, IPSIS (Ingénierie Pour Signaux et Systèmes), basé sur la technopole de Rennes. L'acronyme de COMSIS signifie Communication System Interactive Software.



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. C'est un environnement interactif qui allie des outils numériques à des fonctionnalités graphiques et une interface utilisateur. Il permet d'analyser des systèmes analogiques ou numériques décrits sous la forme de schémas-blocs.

### IV.3. La simulation

Une fois le schéma construit, la simulation peut être lancée. La première phase que réalise le logiciel COMSIS est la modélisation du système. Puis une analyse de la liaison est réalisée. Ces deux opérations exécutées, la simulation pourra enfin s'effectuer [8].

#### 1) L'éditeur de schéma-bloc

COMSIS offre un environnement intègre où toutes les fonctions d'éditations et de traitements s'articulent autour de l'éditeur de schéma-bloc (Figure IV.1).

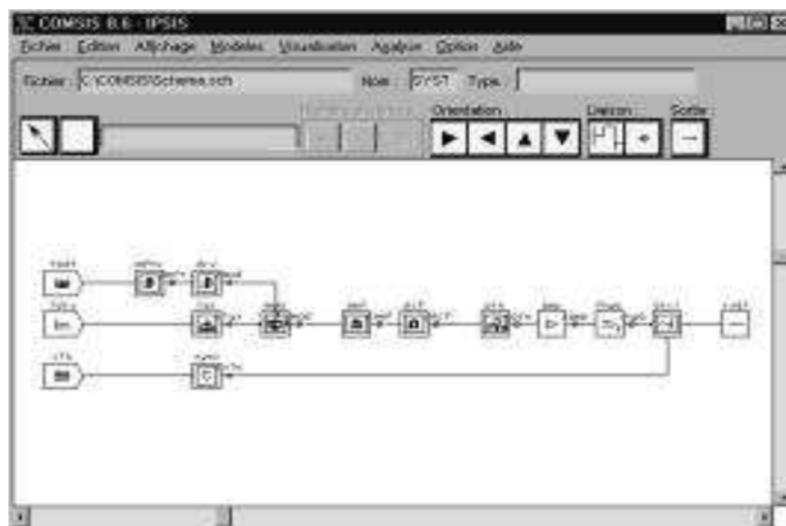


Figure IV.1: L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS

Avec ce logiciel assez convivial, la construction d'un schéma-bloc est assez facile. Il suffit de sélectionner, à l'aide de la souris, des objets disponibles dans la bibliothèque et de les déposer sur la feuille de dessin. Ces objets représentent des modélisations d'opérateurs,



d'entrées et de sorties et doivent être interconnectés et nommés. Une fois ces modèles positionnés, reliés et nommés, leurs paramètres caractéristiques doivent être définis, sous forme numérique ou à l'aide d'un paramètre formel, avant de lancer l'analyse du système. Il faut encore insérer des variables intermédiaires (correspondant aux grandeurs d'entrée et de sortie des opérateurs) et les nommer. Ainsi, le simulateur a accès aux signaux en chaque point du schéma.

COMSIS dispose d'une aide en ligne contextuelle et hypertexte, constituée du manuel d'utilisation accessible dans son intégralité.

## 2) La bibliothèque

La bibliothèque de COMSIS a été développée en collaboration avec France TelecomR&D.

Parmi les modèles disponibles dans la bibliothèque de COMSIS, citons, par exemple, les codes en ligne, les codes correcteurs d'erreurs, les fonctions logiques, les modulations, les démodulations, les filtres, les perturbations, le GSM, l'UMTS, les composants optiques...

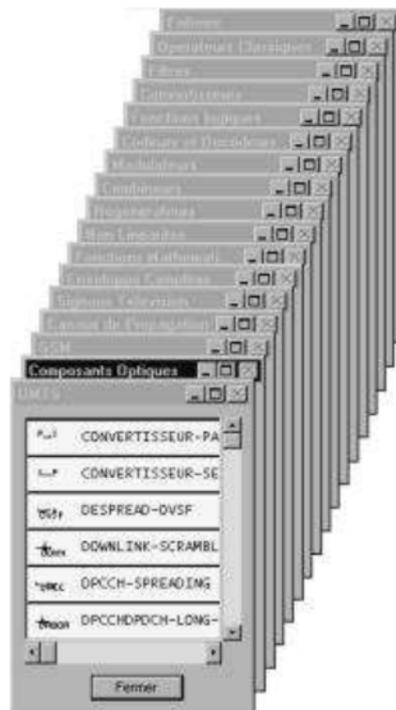


Figure IV. 2 : La bibliothèque de modèles de COMSIS



La bibliothèque est assez étendue et continue régulièrement de s'enrichir. De plus, COMSIS offre la possibilité de développer et d'intégrer nos propres modèles écrits en langage C ou FORTRAN, grâce au Builder de COMSIS.

Dans notre mémoire on s'intéresse uniquement à la réponse temporelle

### 3) La simulation temporelle

La commande Simulation Temporelle du menu Analyse permet de déterminer la réponse d'un système à des signaux dans le domaine temporel. Cette analyse est légèrement différente car ne concerne plus l'analyse d'un opérateur mais plutôt l'analyse du signal envoyé pendant sa transmission. A l'issue de la simulation, la fenêtre d'Evaluation des Performances propose différents traitements sur les variables simulées [8].

## IV.4. La simulation

La chaîne de transmission que nous avons simulée avec le logiciel COMSIS est schématisée sur la figure

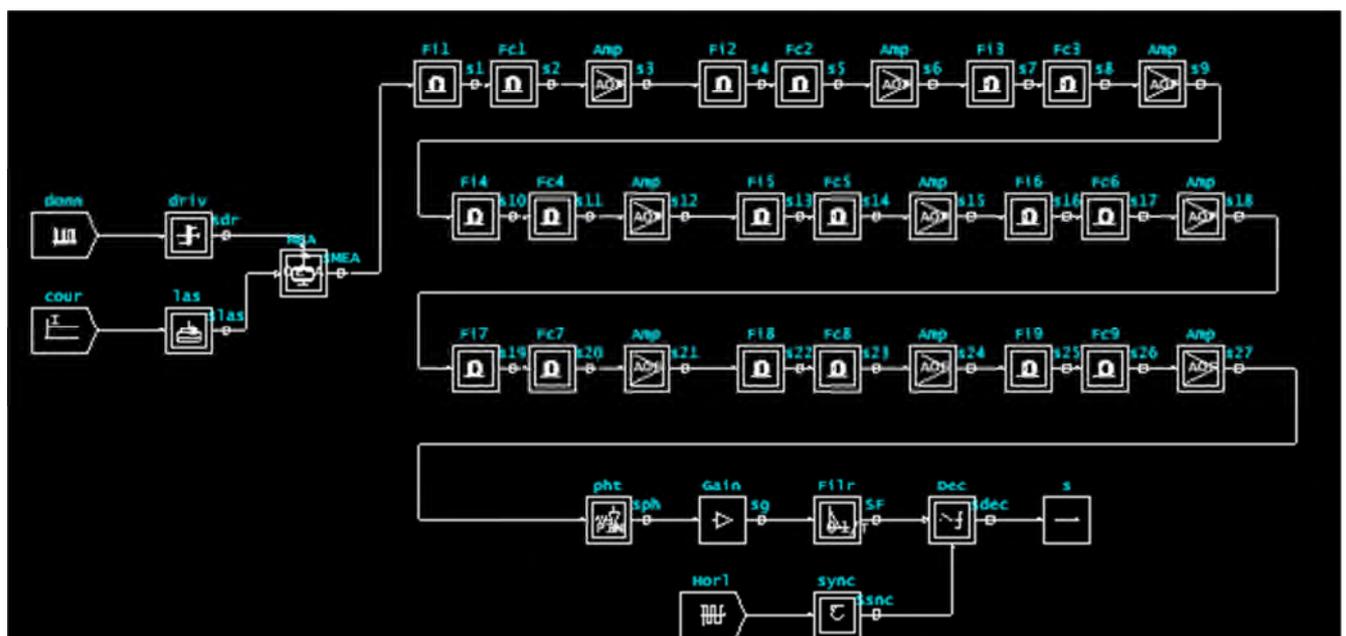


Figure IV.3 : montage final de l'émetteur au récepteur

Cette chaîne est constituée des éléments suivants (de gauche à droite) :

- Un laser de la bibliothèque de COMSIS nommé Laser- Système émettant à  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,
- Une séquence binaire pseudo-aléatoire ;

- Un modulateur externe de type électro-absorbant (MEA) ;
- Un driver qui commande les niveaux de tension du modulateur ;
- Une fibre optique monomode ayant une DC de 17 ps/nm/km, et une atténuation de 0,2 dB/km. Au vu de la puissance considérée dans nos simulations les effets nonlinéaires ont été négligés, une longueur de 80 km ; une 2eme fibre de longueur de 60 km, DC de -20 ps/nm/km
- Une photodiode PIN, caractérisée par sa sensibilité et son courant d'obscurité;
- Un amplificateur électrique, permettant de multiplier le signal d'entrée par une constante ;
- Un filtre passe-bas,
- Un régénérateur qui fait apparaître une sortie constituée du signal binaire régénéré, une première entrée destinée au signal issu du filtre et une seconde entrée à un signal d'horloge synchronisée à la fréquence rythme du signal.

Dans la suite, nous allons décrire les principales caractéristiques de ces éléments.

#### IV.4.1. La partie émission

Son rôle consiste à délivrer à la fibre optique un signal sur lequel sont inscrites les données. Elle comprend notamment une source lumineuse (généralement un laser) et un système de modulation.

##### ❖ Circuit de données électriques

L'opérateur du logiciel COMSIS permettant de simuler les données électriques se nomme Séquence-Binaire-Pseudoaléatoire. Il est montré sur la figure ci-dessous.

Les Paramètres caractéristiques de l'entrée représentant l'information à transmettre sont donnés sur le Tableau.

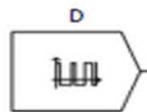


Figure IV.4 : Modèle de simulation des données aléatoires



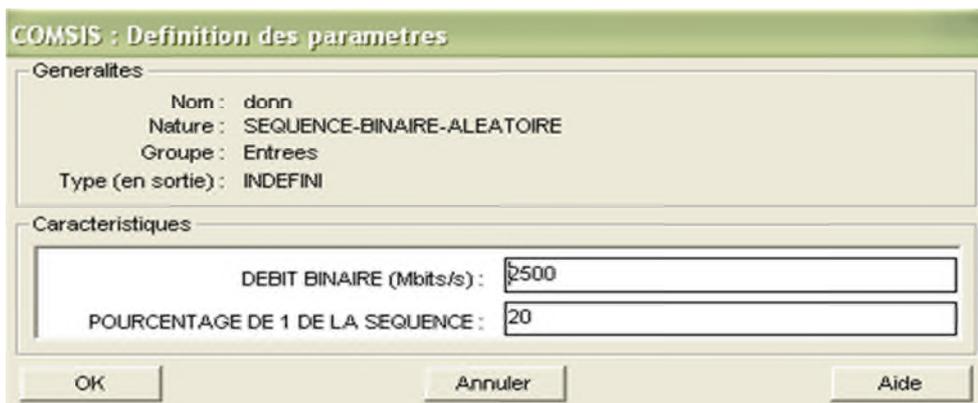


Tableau IV.1: Paramètres caractéristiques de l'entrée représentant l'information à transmettre

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 (Détection-Seuil). Les paramètres caractéristiques de cet opérateur sont présentés dans le Tableau.

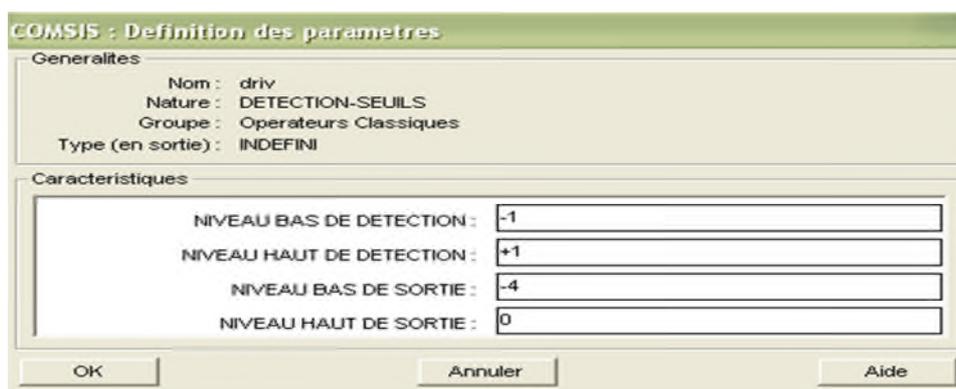


Tableau IV.2 : Paramètres caractéristiques du driver de modulateur

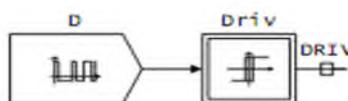


Figure IV.5 : Modèle de simulation de la séquence de données avec les niveaux corrects

❖ **Courant du Laser**

Il assure l'alimentation du laser. Le courant qu'il délivre est spécifié par les caractéristiques du laser. Ce dernier est choisi en fonction des caractéristiques de la fibre de transmission. La



puissance du signal de sortie du laser dépend du niveau du courant de commande du laser. Pour une puissance émise de 40 mW, on trouve que le courant qui doit être injecté au laser est  $I=201,74$  mA.

❖ **Le laser**

Le modèle utilisé dans COMSIS s'appelle Laser-System, est illustré par :

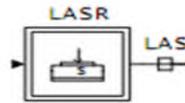


Figure IV.6 : Modèle de simulation du laser

Ce modèle permet de simuler une diode laser DFB. Il est possible de le décrire soit par ses paramètres physiques internes, soit par des grandeurs « systèmes » ou mesurables, souvent plus accessibles, notamment par les constructeurs. Ce sont ces derniers qui seront utilisés.

Generalités		
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) :	1550	
Courant de seuil (mA) :	15	
Rendement Puissance/Courant (W/A) :	0.25	
Largeur de raie (MHz) :	5	pour le courant (mA) : 60
Taux d'amortissement (MHz) :	2000	pour le courant (mA) : 100
Bande à -3 dB (MHz) :	10000	
Donnees physiques modifiables :	Donnees...	
Parametres Facultatifs		
<input checked="" type="checkbox"/> Espacement entre modes (nm) :	1	
<input type="checkbox"/> Chirp (MHz/mA) :		

Tableau IV.3 : Paramètres caractéristiques du laser simulé

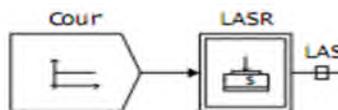


Figure IV.7 : Modèle de simulation du laser avec son courant de commande





Tableau IV.4 : Paramètres caractéristiques du courant continu

❖ **Modulateur électro-absorbant**

Le modèle de modulateur externe de type électro-absorbant disponible dans la bibliothèque de COMSIS s'appelle Modulateur Electro-Absorption. Il est représenté sur la Figure.

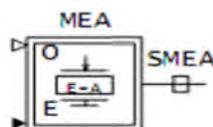


Figure IV.8 : Modèle de simulation du MEA



Tableau IV.5 : Paramètres caractéristiques du modulateur externe électro-absorbant

La puissance de sortie du laser est continue, lors d'une modulation externe. Ce signal lumineux est ensuite modulé par le 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 :

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

❖ **Modulateur électro optique**

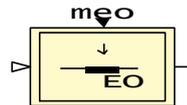


Figure IV.9 : Modèle de simulation du MEO

Generalites	
Nom :	meo
Nature :	MODULATEUR-ELECTRO-OPTIQUE
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	INDEFINI
Caracteristiques	
TENSION D'OFFSET (V) :	15
TENSION D'OUVERTURE (V) :	5
TAUX D'EXTINCTION (dB) :	20
GAIN (OU PERTES) (dB) :	2
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Annuler"/> <input type="button" value="Aide"/>	

Tableau IV.6 : Paramètres caractéristiques du modulateur externe électro-absorbant

❖ **Fibre optique**

Pour la partie transmission de la chaîne nous insérons une fibre dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau.

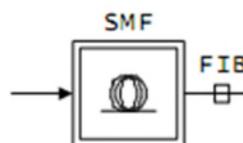


Figure IV.10 : Modèle de simulation de la partie transmission



Generalites	
Nom :	F11
Nature :	FIBRE-OPTIQUE-MONOMODE
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	INDEFINI
Caracteristiques	
Longueur de la fibre (km) :	80
Coefficient d'attenuation (dB/km) :	0.2
Dispersion chromatique (ps/nm/km) :	Constante 17
Effet Kerr :	<input type="radio"/> Oui <input checked="" type="radio"/> Non
Effet Raman :	<input type="radio"/> Oui <input checked="" type="radio"/> Non

Tableau IV.7 : Paramètres caractéristiques de la fibre 1 de transmission

Generalites	
Nom :	Fc1
Nature :	FIBRE-OPTIQUE-MONOMODE
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	INDEFINI
Caracteristiques	
Longueur de la fibre (km) :	60
Coefficient d'attenuation (dB/km) :	0.2
Dispersion chromatique (ps/nm/km) :	Constante -20
Effet Kerr :	<input type="radio"/> Oui <input checked="" type="radio"/> Non
Effet Raman :	<input type="radio"/> Oui <input checked="" type="radio"/> Non

Tableau IV.8 : Paramètres caractéristiques de la fibre 2 de transmission

### ❖ Amplificateur électrique

Le modèle d'amplificateur électrique, disponible dans COMSIS, est un opérateur de gain, nommé Gain, il permet de multiplier le signal d'entrée par une constante.

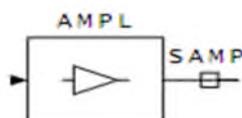


Figure IV.11 : Modèle de simulation de l'amplificateur électrique



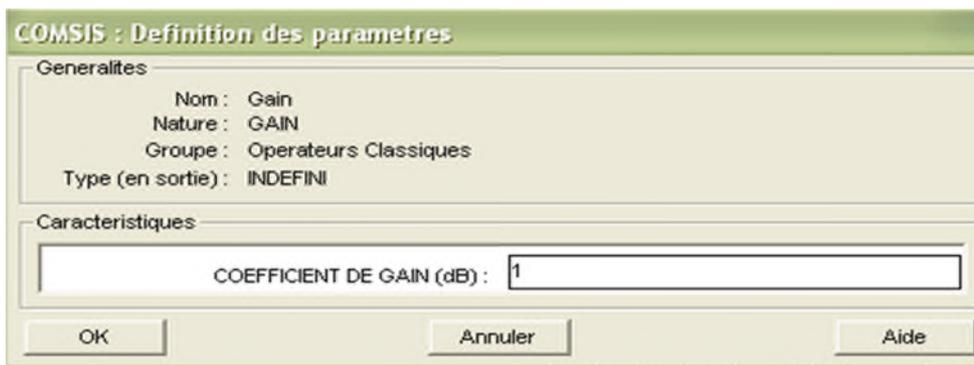


Tableau IV.9 : Paramètres caractéristiques de l'amplificateur électrique

❖ Amplificateur optique

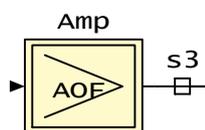


Figure IV.12 : Modèle de simulation de l'amplificateur optique

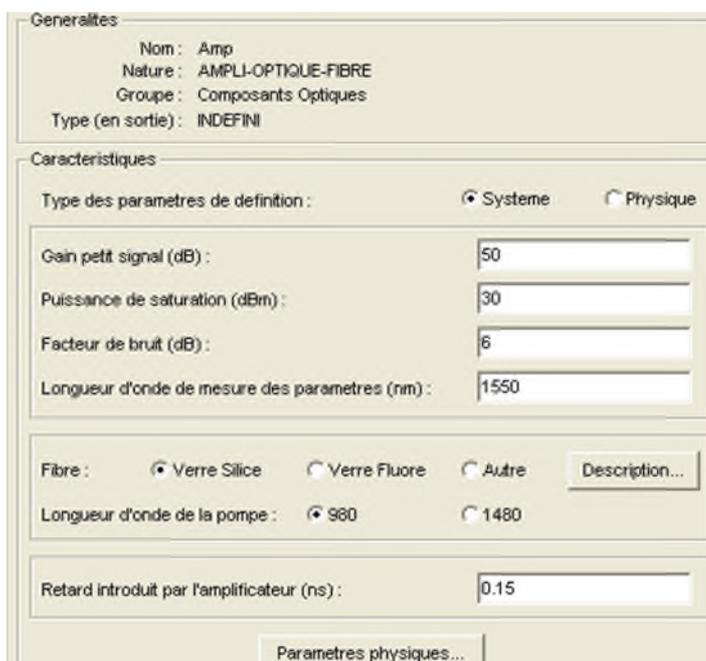


Tableau IV.10 : Paramètres caractéristiques de l'amplificateur optique



#### IV.4.2. La partie transmission

##### ❖ La photodiode PIN

Le modèle disponible dans COMSIS (Photodiode-Pin) est un opérateur représentant une photodiode PIN. Ses paramètres caractéristiques sont présentés dans le tableau.

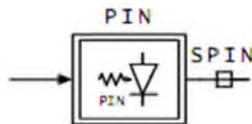


Figure IV.13 : Modèle de simulation de la photodiode PIN

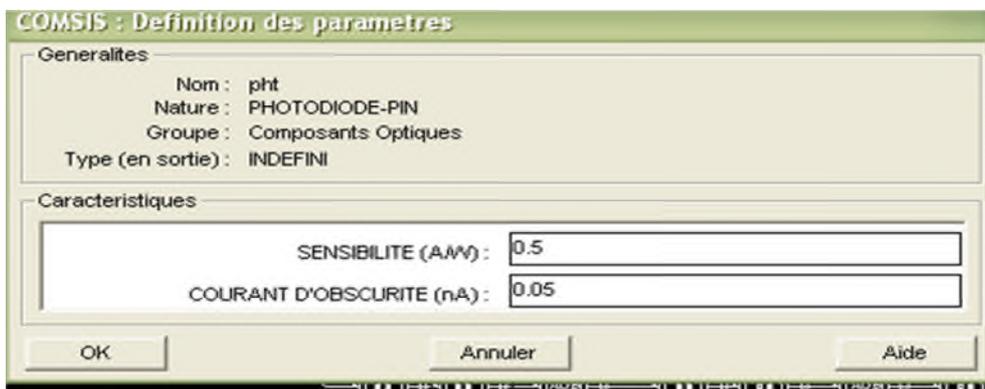


Tableau IV.11 : Paramètres caractéristiques de la photodiode PIN

Le courant d’obscurité,  $I_{obs}$  est le courant qui circule dans la jonction PN ou PIN en l’absence d’éclairement. L’expression du courant total dans la photodiode est donnée par l’équation

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

##### ❖ la photodiode a avalanche

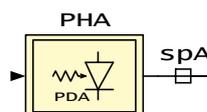


Figure IV.14 : Modèle de simulation de la photodiode a avalanche.





Tableau IV.12 : Paramètres caractéristiques de la photodiode a avalanche.

❖ **Filtre**

Le modèle disponible dans COMSIS est nommé Filtre Passe-Bas Continu.



Figure IV.15 : Modèle de simulation du filtre de réception



Tableau IV.13 : Paramètres caractéristiques du filtre



❖ **Horloge**

La fréquence de l'horloge est calculée en tenant compte du temps bit  $T_b$  (ces grandeurs sont inversement proportionnelles).



Figure IV.16: Modèle de simulation de l'Horloge de synchronisation

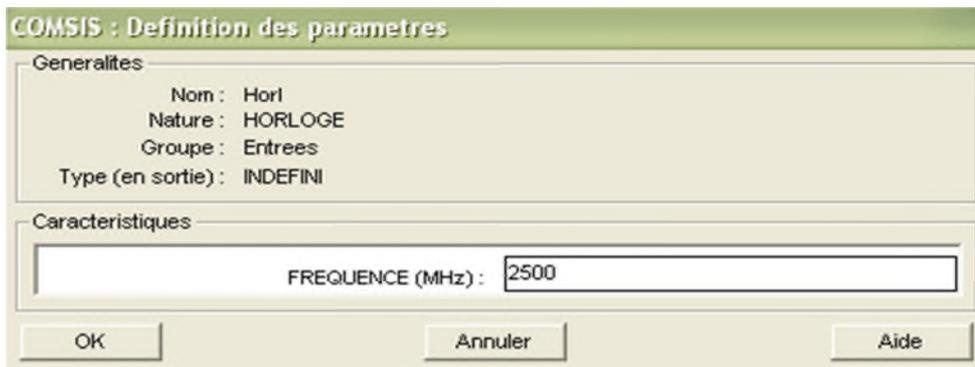


Tableau IV.14 : Paramètres caractéristiques de l'horloge

❖ **Synchronisation ou retard**

Son modèle de simulation est présenté sur la Figure :

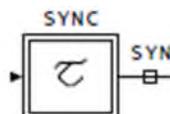


Figure IV.17: Modèle de simulation du retard de synchronisation



❖ **Décision**

L'opérateur de décision disponible dans COMSIS appartient à la classe des organes de régénération.

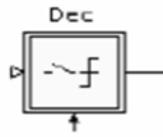


Figure IV.18: Modèle de simulation de l'opérateur

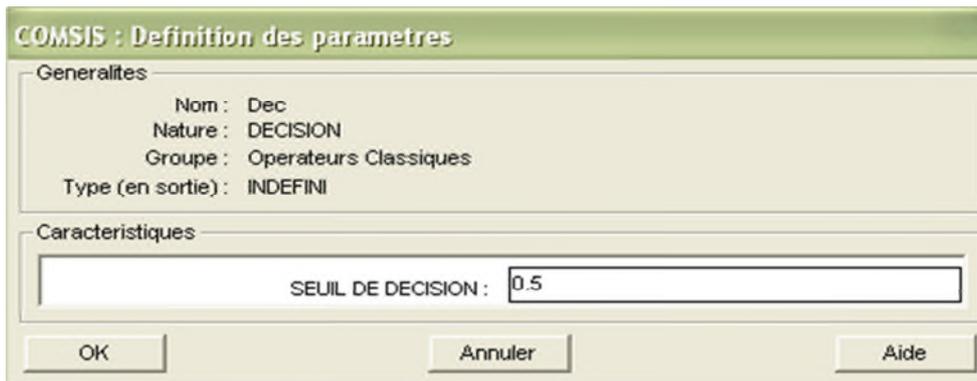


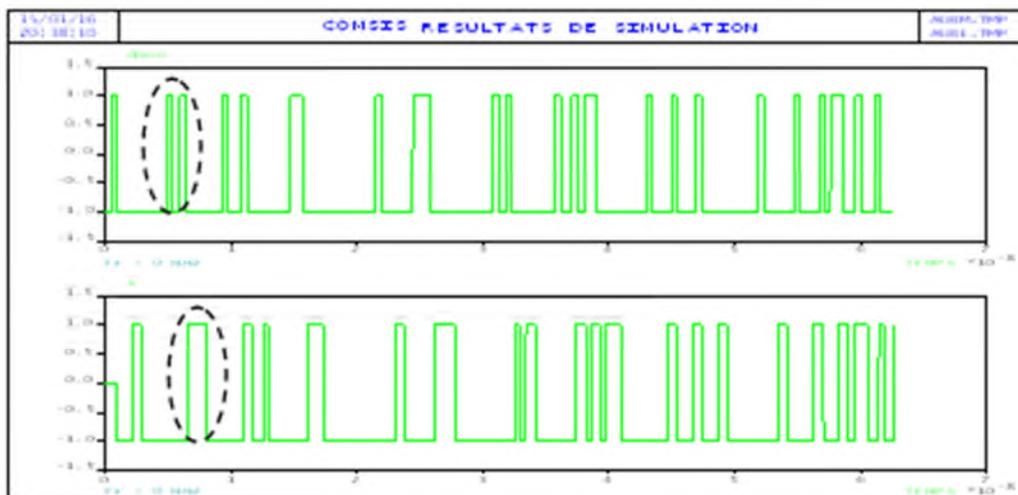
Tableau IV.15 : Paramètres caractéristiques de l'opérateur de décision

**IV.5. Résultats et discussion**

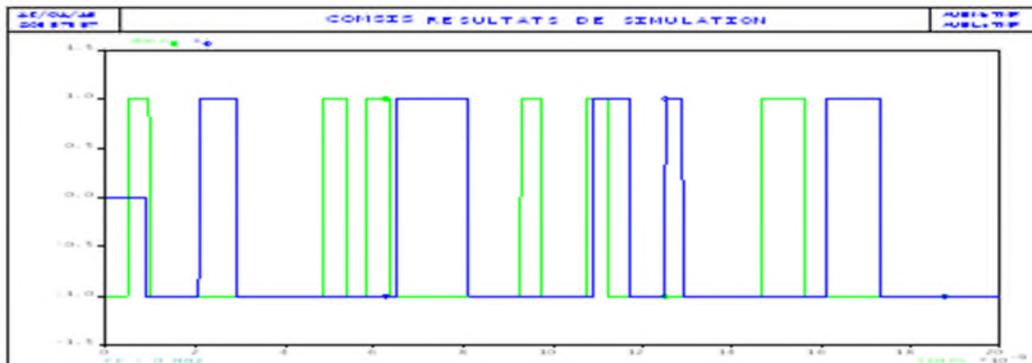
*Résultats de simulations pour modulateur électro- absorption*

❖ Avec un débit =2048 Mb/s

1) Avec une photodiode PIN



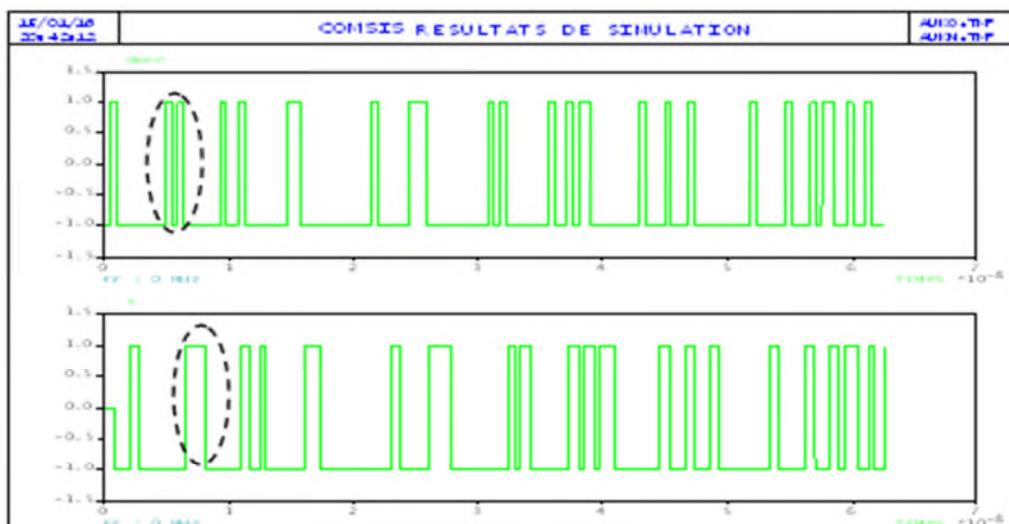
Pour les photodiodes PINs les paramètres importants sont la sensibilité et le courant d'obscurité, la figure nous montre que les photodiodes PIN fonctionnent à faible sensibilité.

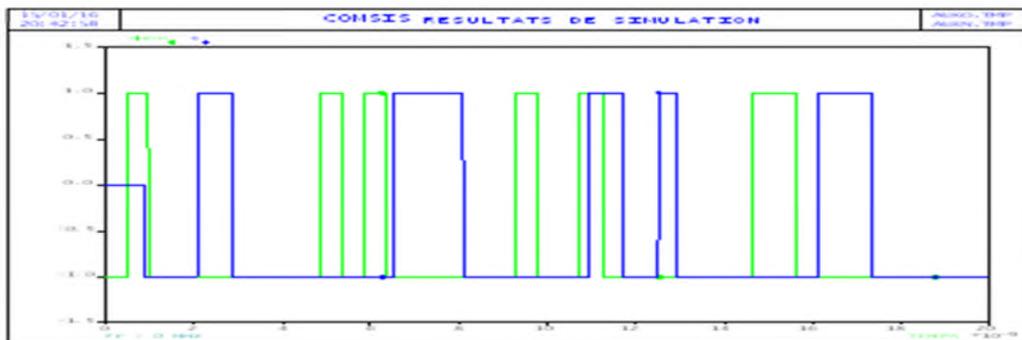


Pour la première simulation on a injecté un débit de 2Gbit/sà travers une fibre de longueur de 1260 km (une fibre SMF suivie d'une fibre DCF).

- ✚ On observe qu'il y a la présence de quelques erreurs présenté au niveau du récepteur qui est traduit par le taux d'erreur binaire.
- ✚ La deuxième observation on voit un retard qui est introduit par les composantes spécialement la fibre.

## 2) Avec une photodiode à avalanche



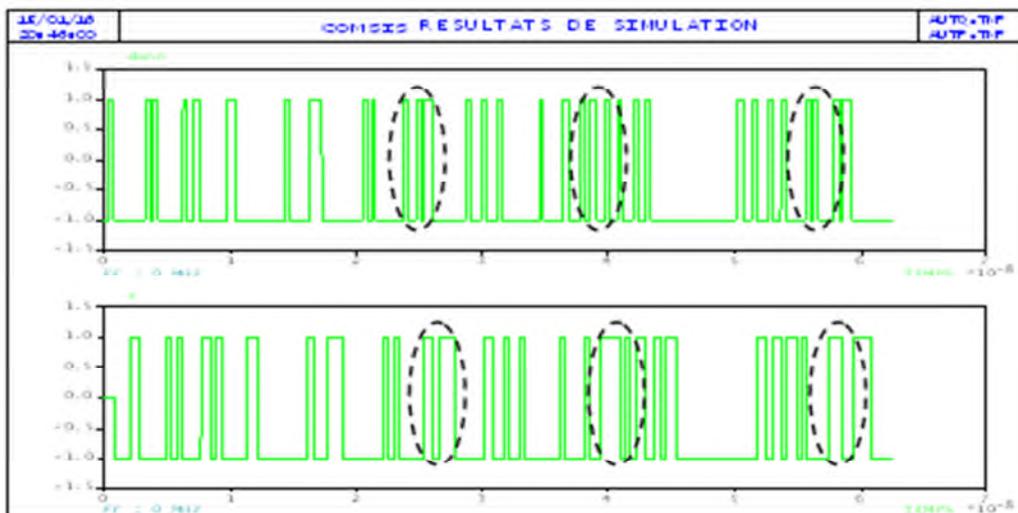


Avec la photodiode à avalanche on aura le même résultat qu’avec la photodiode PIN

Pour la photodiode à avalanche qu’elle a une technologie complexe et une tension de polarisation très élevée (quelque centaines de volts), malgré ses inconvénients, la PDA fonctionne bien dans notre travail.

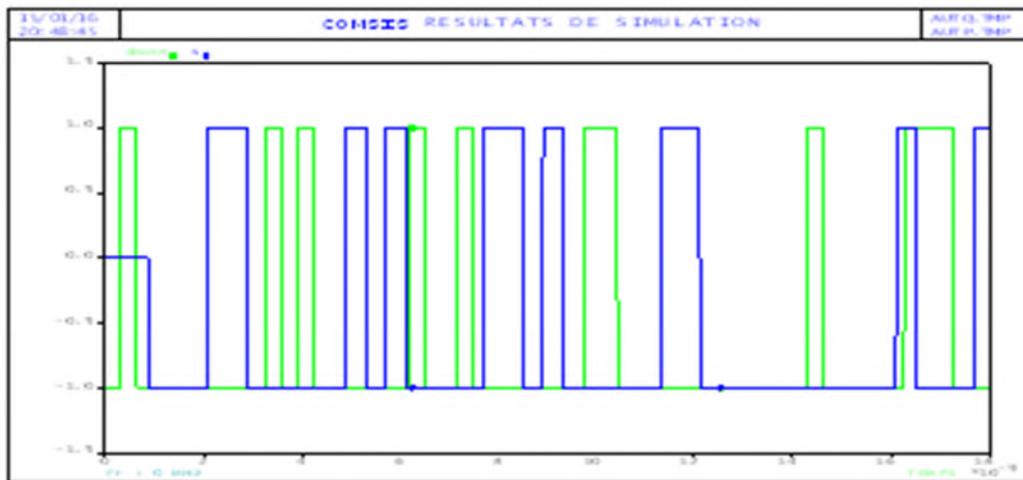
❖ Avec un débit de 3072 Mbits/s

1) Avec une photodiode PIN



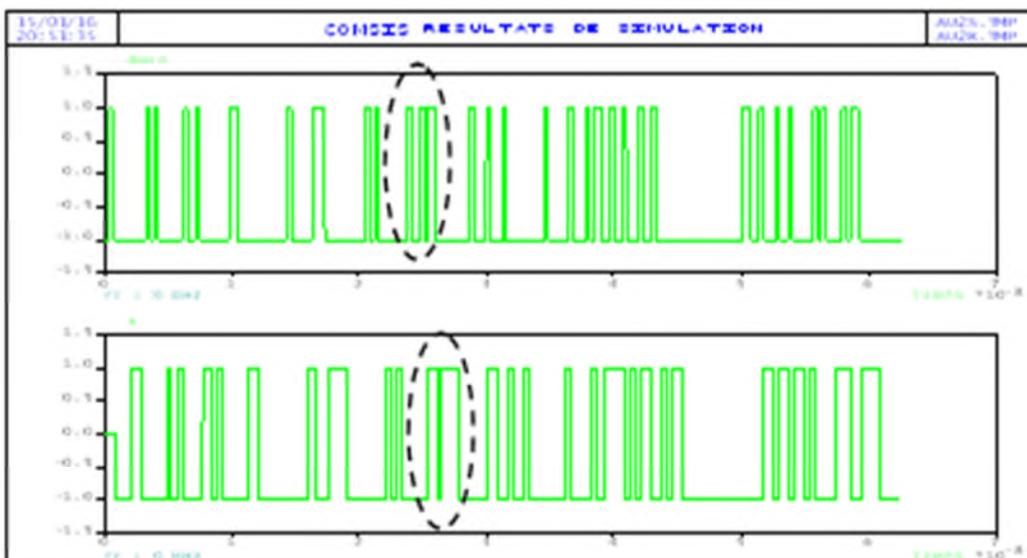
Le signal optique a été fortement atténué durant sa propagation dans la fibre optique, et la photodiode PIN n’émet pas un courant très élevé. une amplification du signal est donc souhaitable avant la prise de décision en multipliant le signal par une constante.

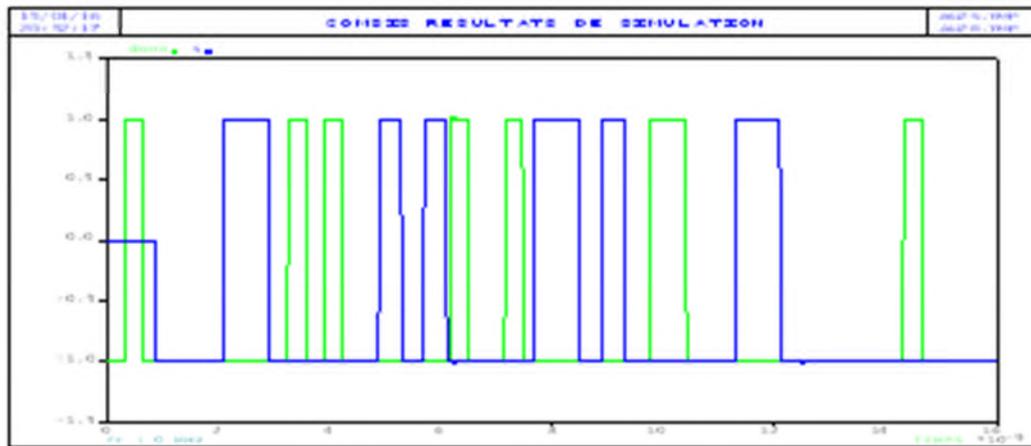




Avec l'augmentation du débit binaire de 3Gbits/s on remarque l'augmentation des erreurs au niveau du récepteur qui traduira par la dépendance taux d'erreur binaire en fonction du débit à injecter.

**2) Avec une photodiode à avalanche**

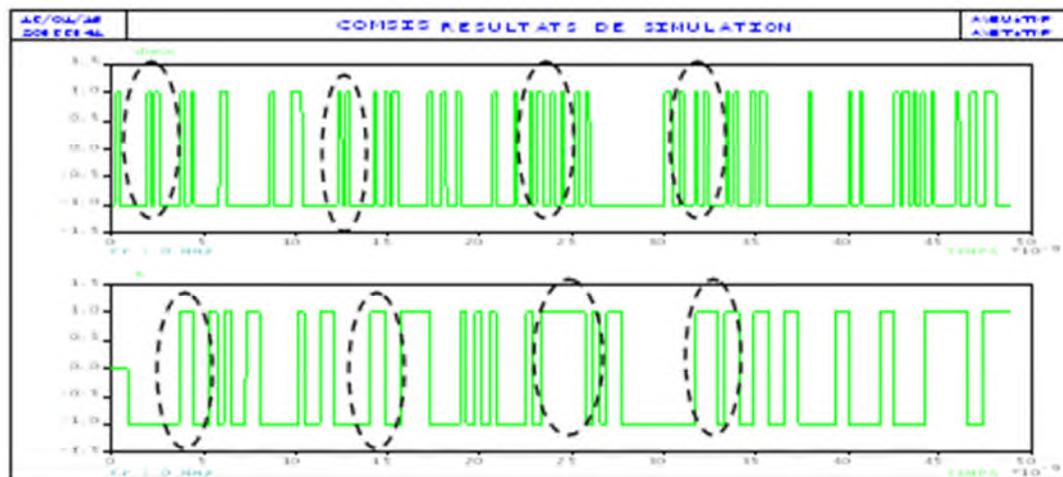


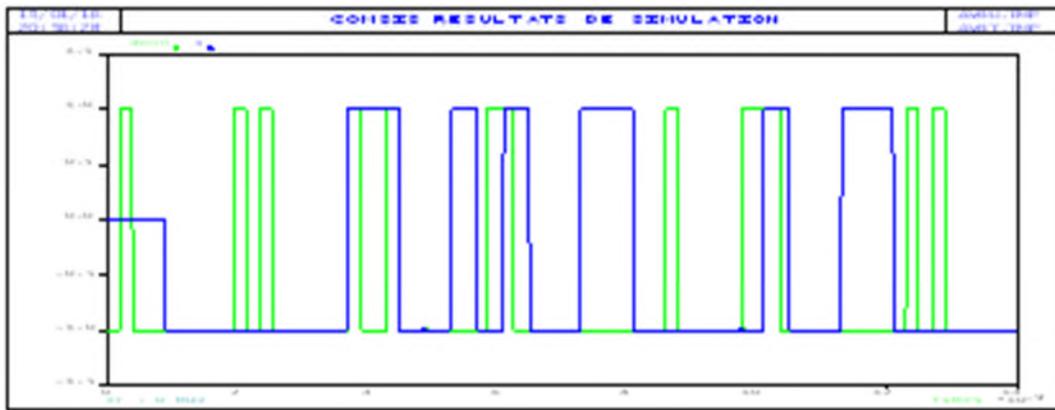


Avec le changement de la photodiode PIN par une photodiode à avalanche le nombre d'erreur est diminué par rapport à la photodiode PIN.

❖ Avec un débit de 5120 Mbits/s

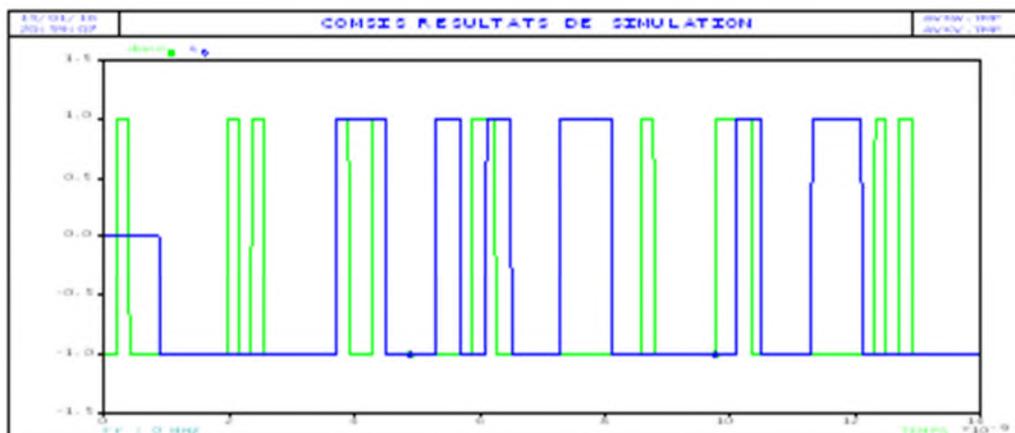
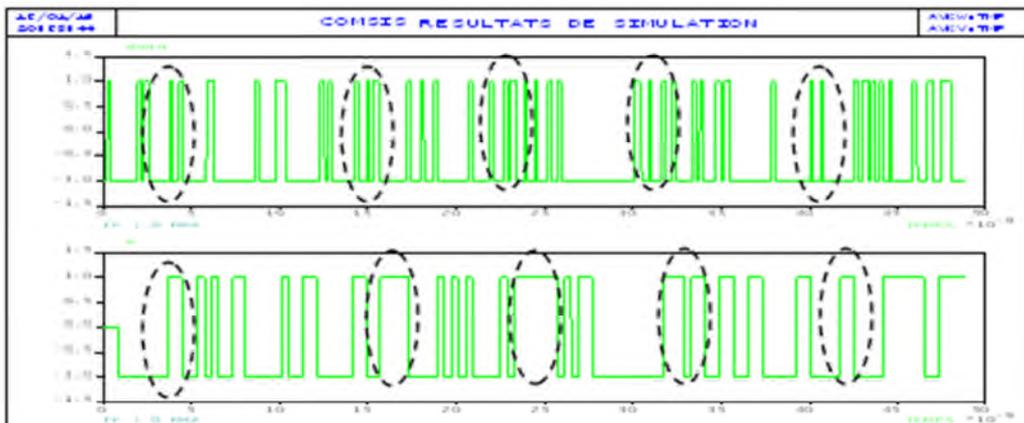
1) Avec une photodiode PIN:





On a augmenté le débit à 5GHz avec une photodiode PIN le taux d'erreur augment beaucoup plus.

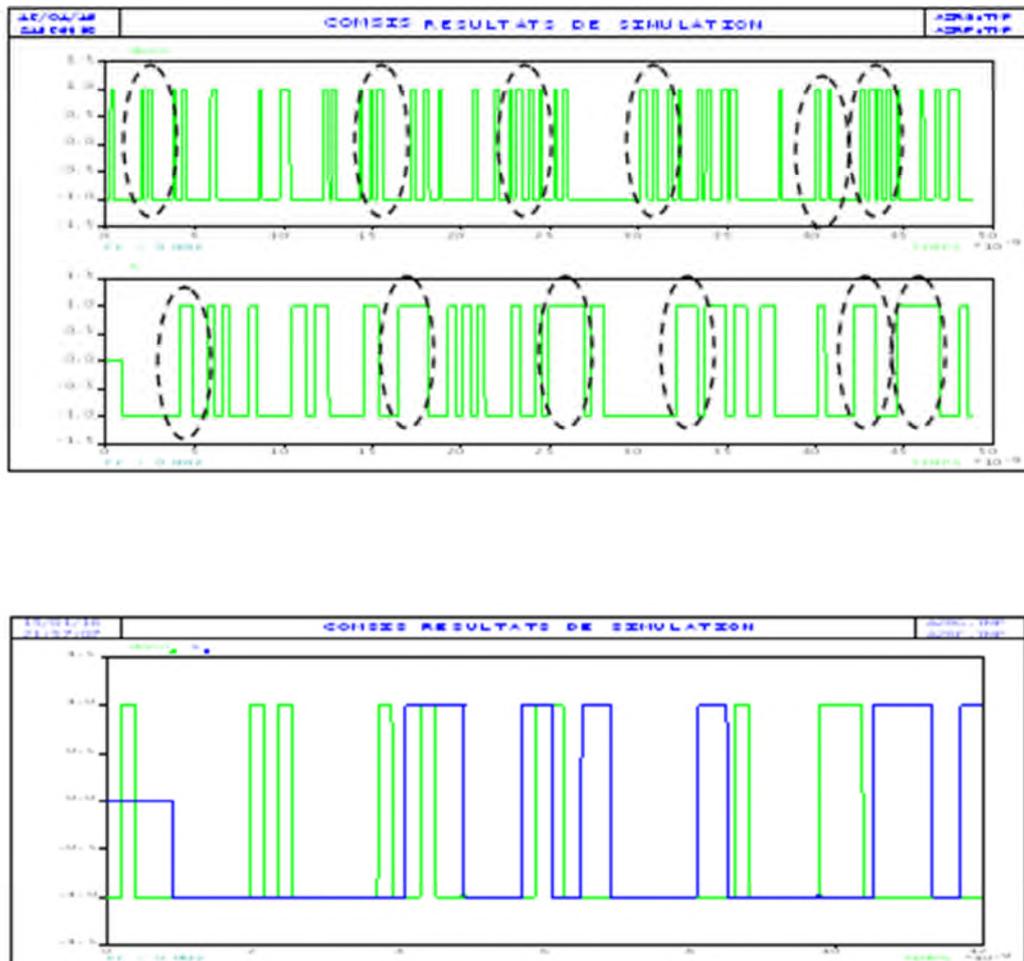
2) Avec une photodiode à avalanche



Même résultat par rapport à la photodiode PIN.

- ❖ Avec un débit =2048 Mbits/s  
La longueur de la fibre =1680 km

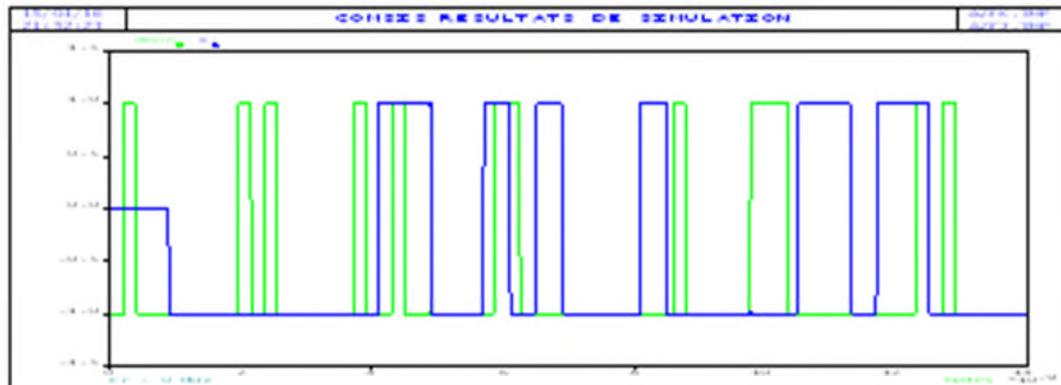
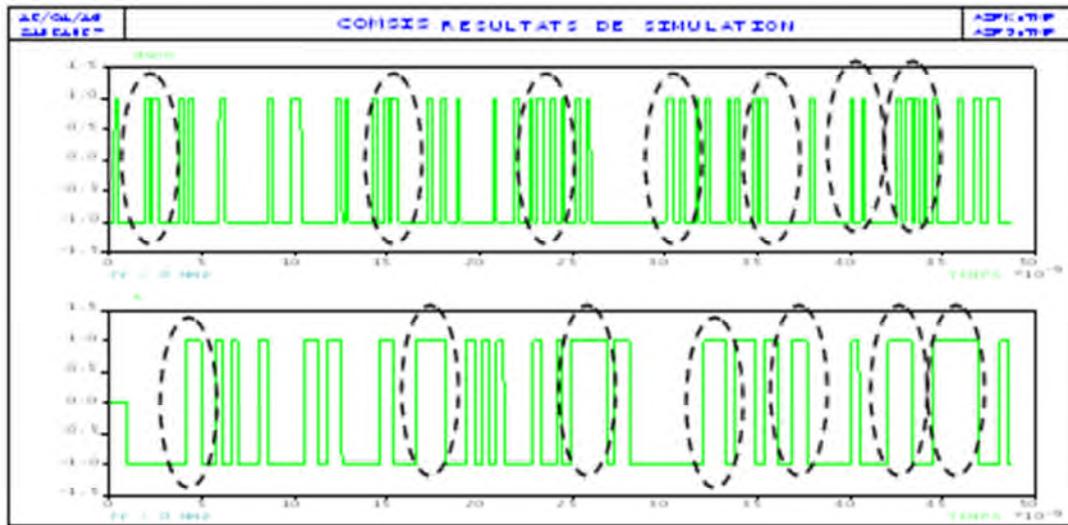
1) Avec une photodiode PIN



Dans cette simulation on a injecte un débit de 2Gbits/s avec le changement de la longueur de la fibre 1680 km on a remarqué une grande différence dans le signal de sortie (encercler dans la figure).



2) Avec une photodiode à avalanche



Avec la longueur de fibre 1680km et le changement de la photodiode on a remarqué une augmentation d'erreur beaucoup important.

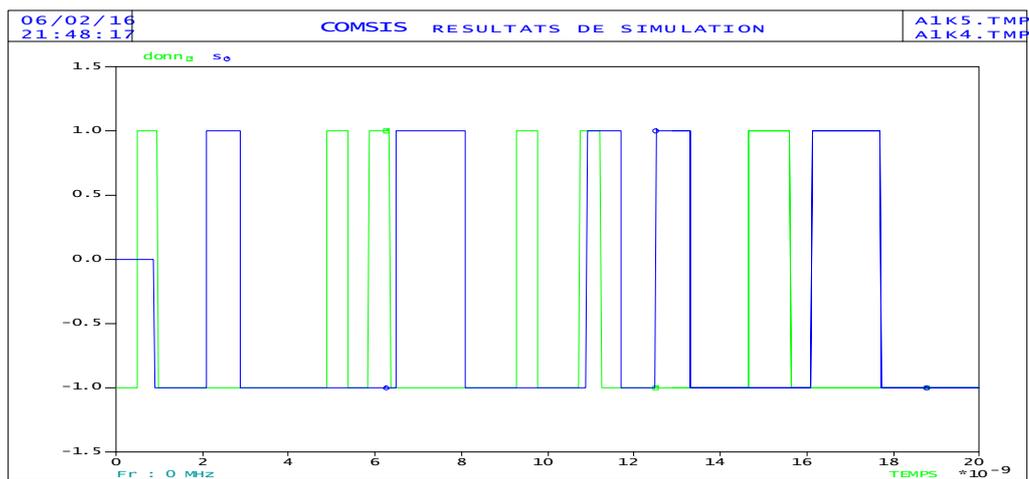
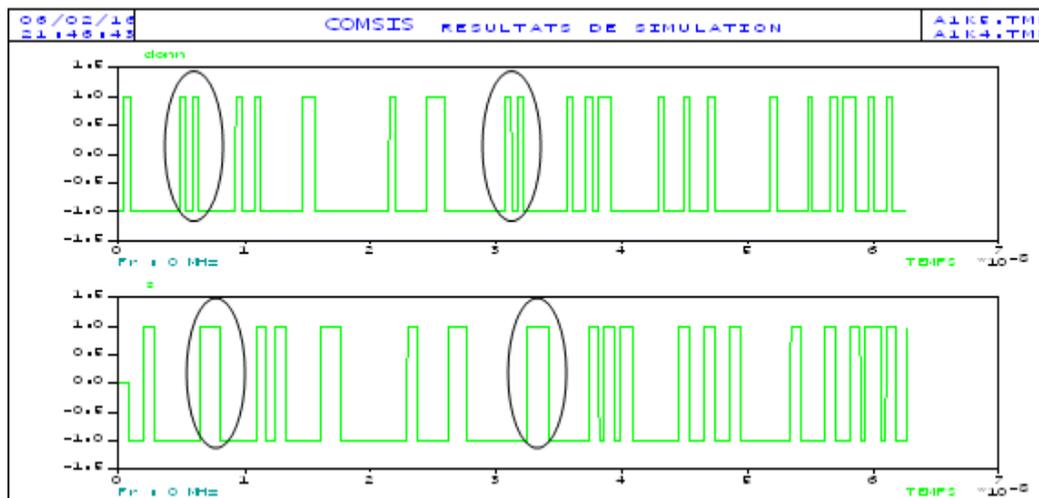


*Résultats de simulations pour modulateur électro-optique*

❖ Avec un débit =2048 Mbits/s

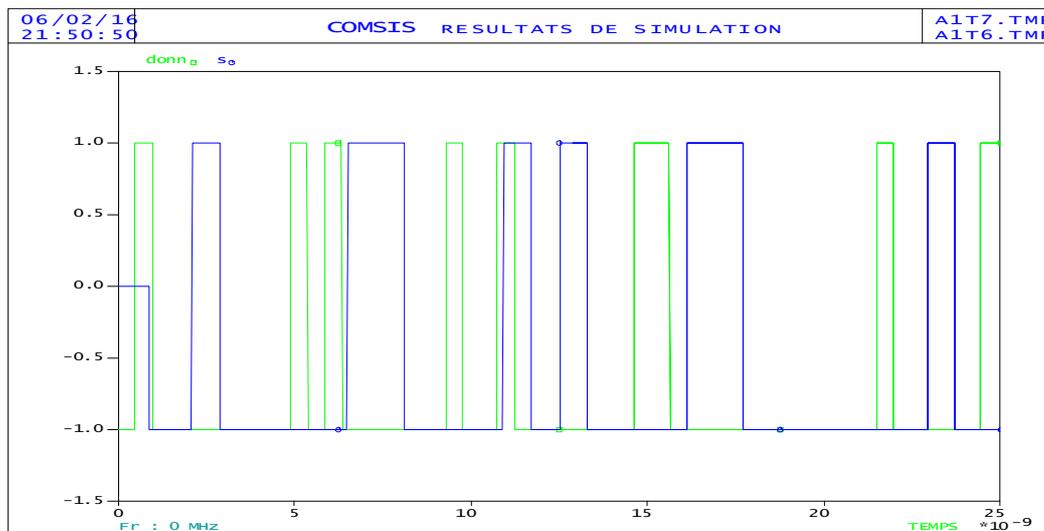
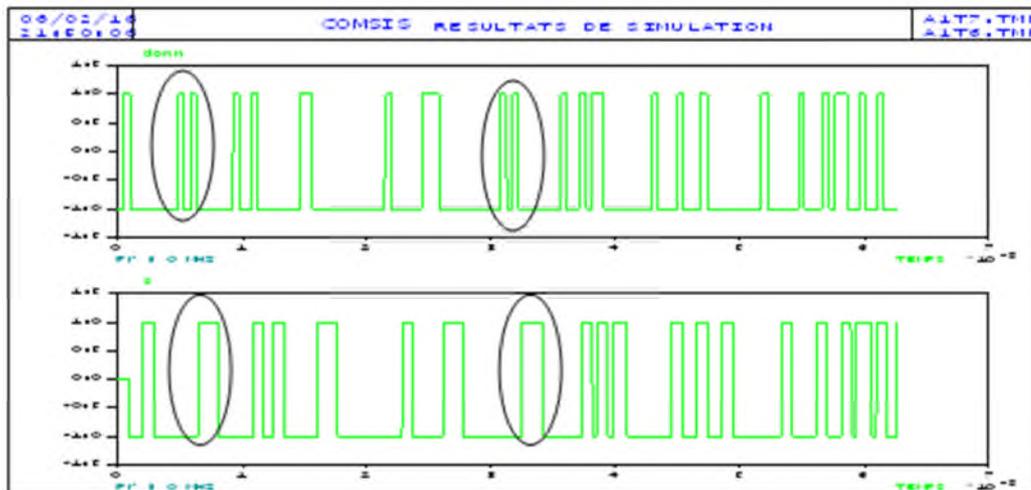
Avec une longueur de fibre 1260 km

1) Avec une photodiode PIN



Le changement du modulateur électro absorbant par un modulateur électro optique donne un signal de sortie différent au signal d'entrée avec un retard.

2) Avec une photodiode à avalanche

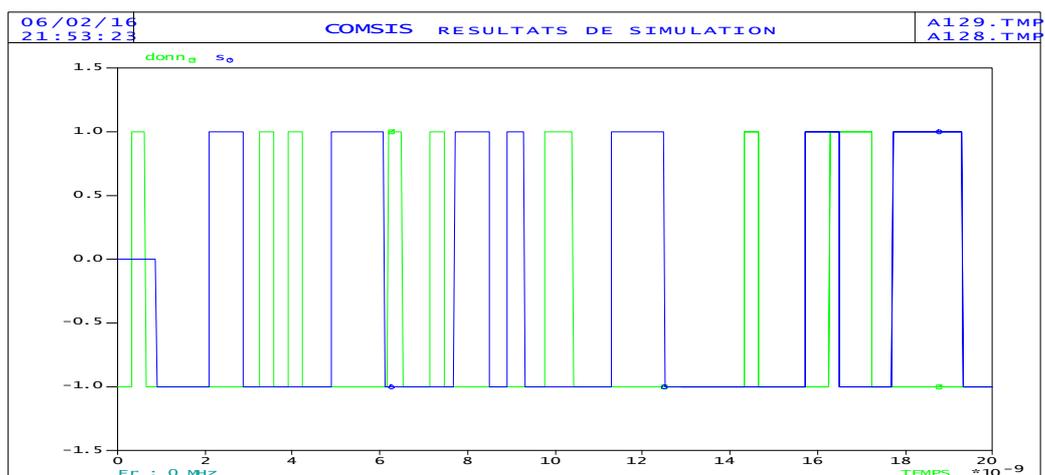
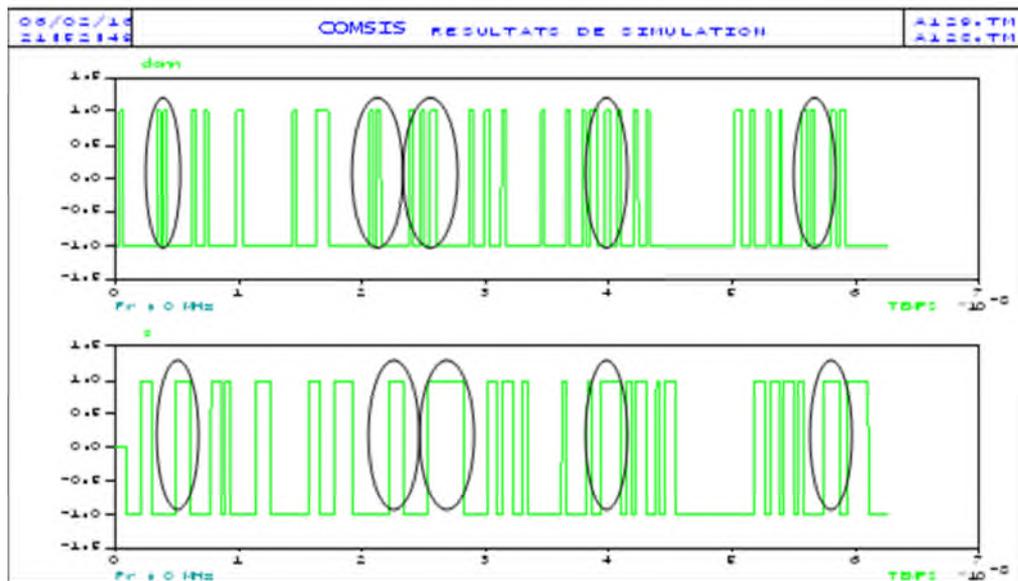


En comparaison avec la photodiode PIN on remarque que le signal de sortie avec la photodiode avalanche est mieux.



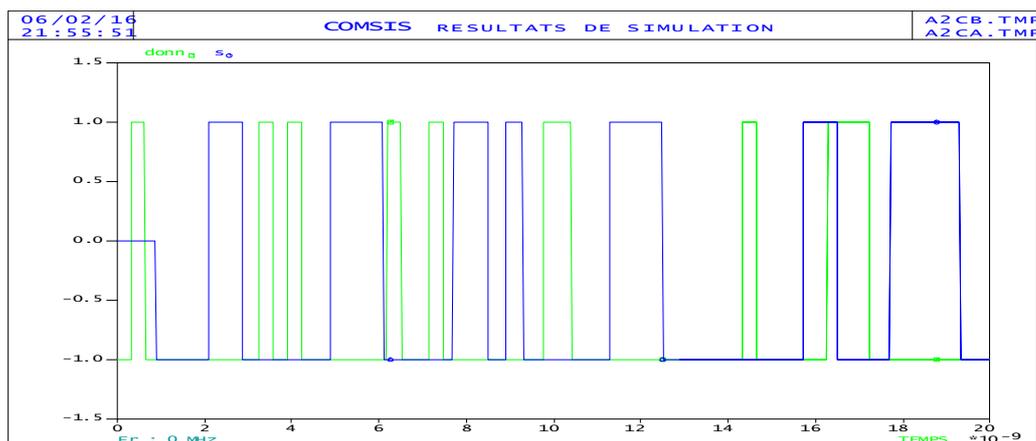
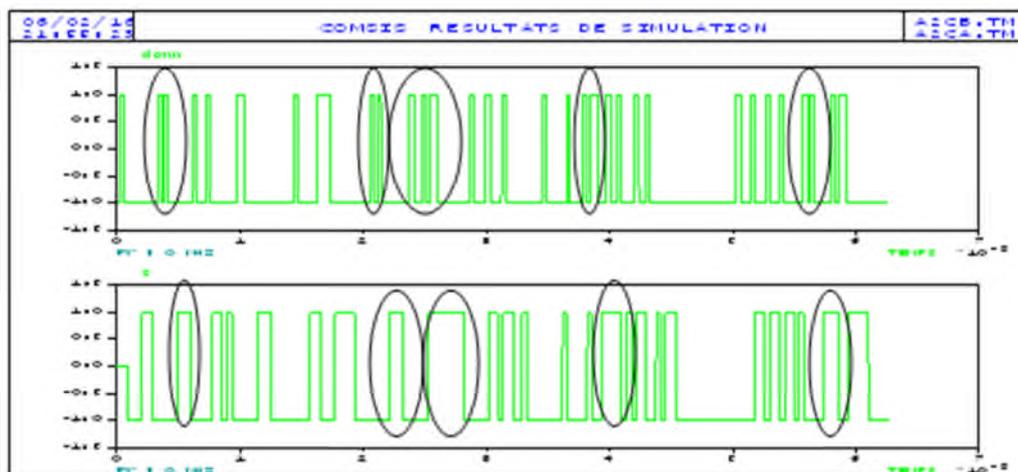
❖ Avec un débit de 3072 Mb/s

1) Avec une photodiode PIN



Pour cette simulation on a injecté un débit de 3Gbit/s à travers une fibre de longueur de 1260 km. On remarque une augmentation du nombre d'erreurs.

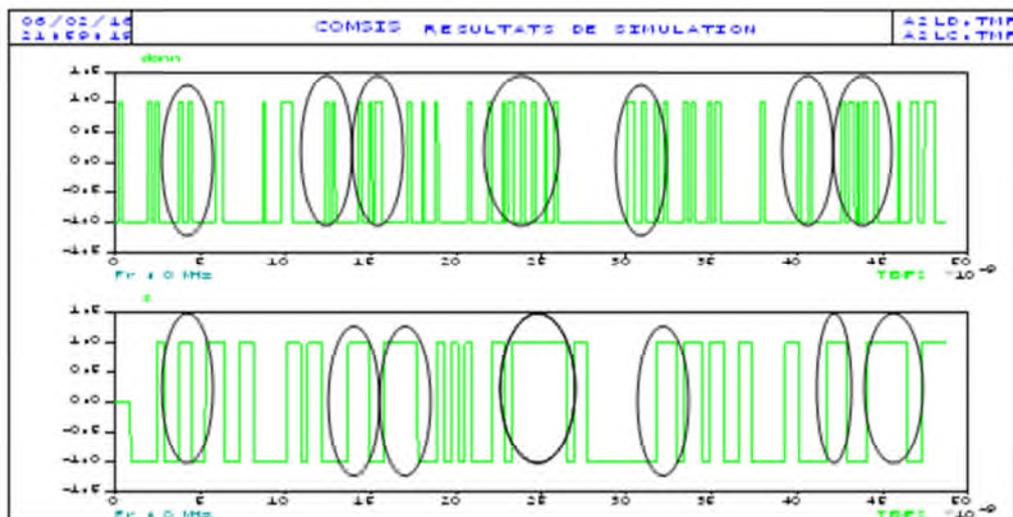
## 2) Avec une photodiode à avalanche

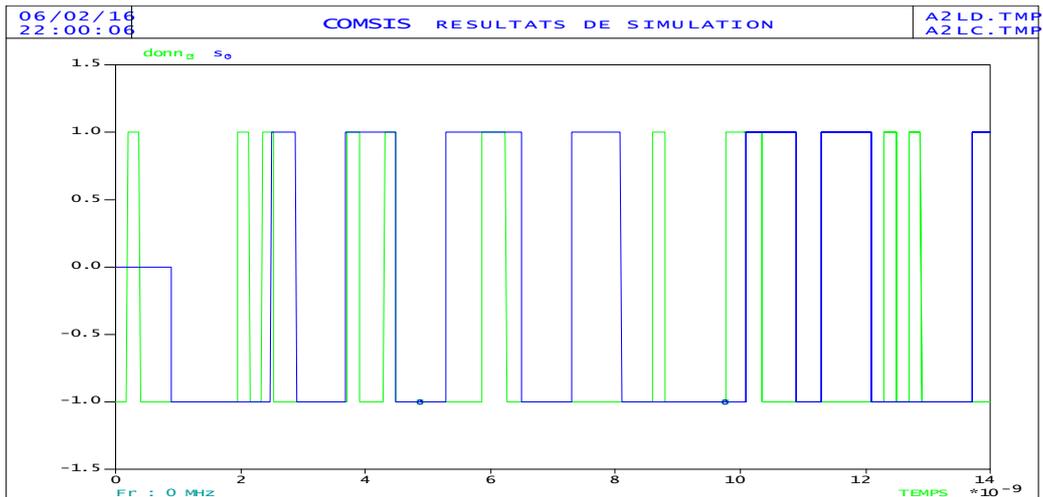


Même en changeant la photodiode PIN par une photodiode à Avalanche on obtient le même résultat.

❖ Avec un débit de 5120 Mbits/s

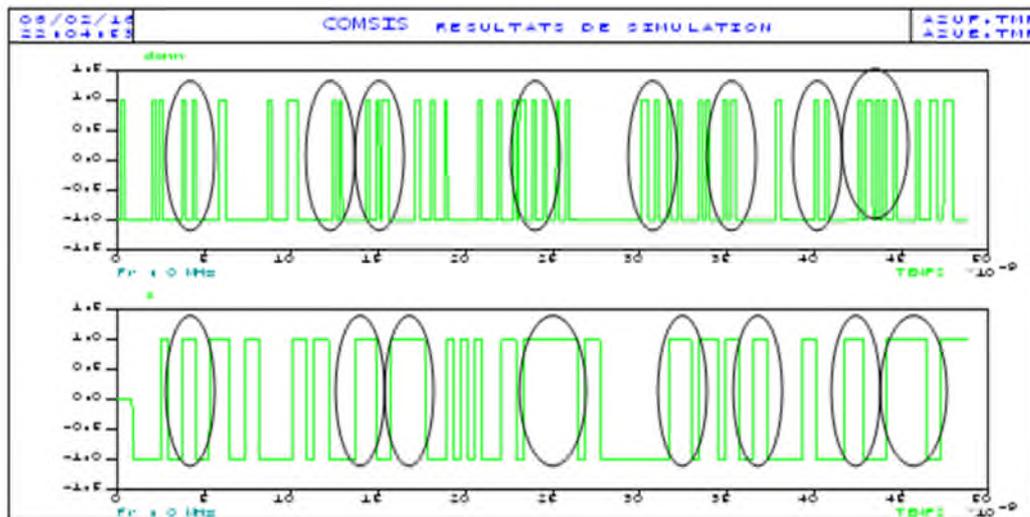
1) avec une photodiode PIN

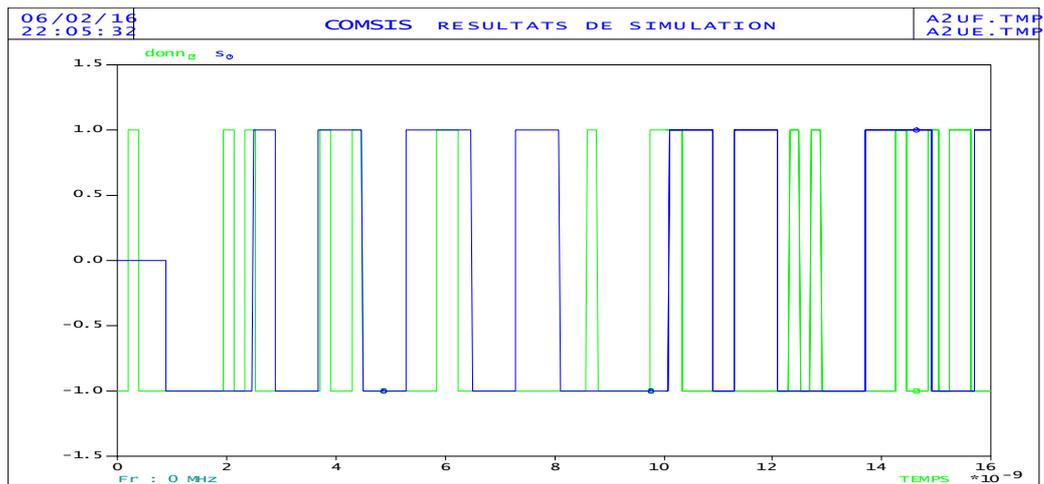




En augmentant le débit de 2 Gbits/s à 5 Gbits/s on remarque un grand retard dans le signal de sortie et un grand nombre d'erreurs.

## 2) Avec une photodiode à avalanche





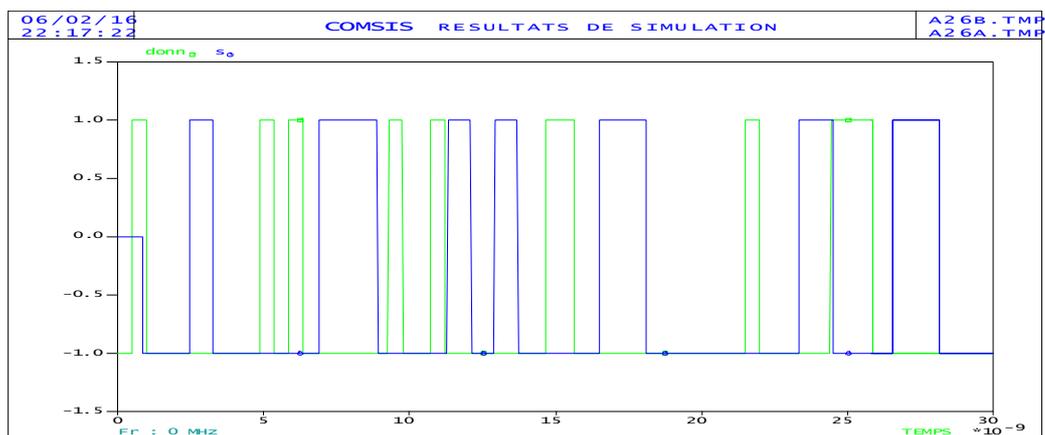
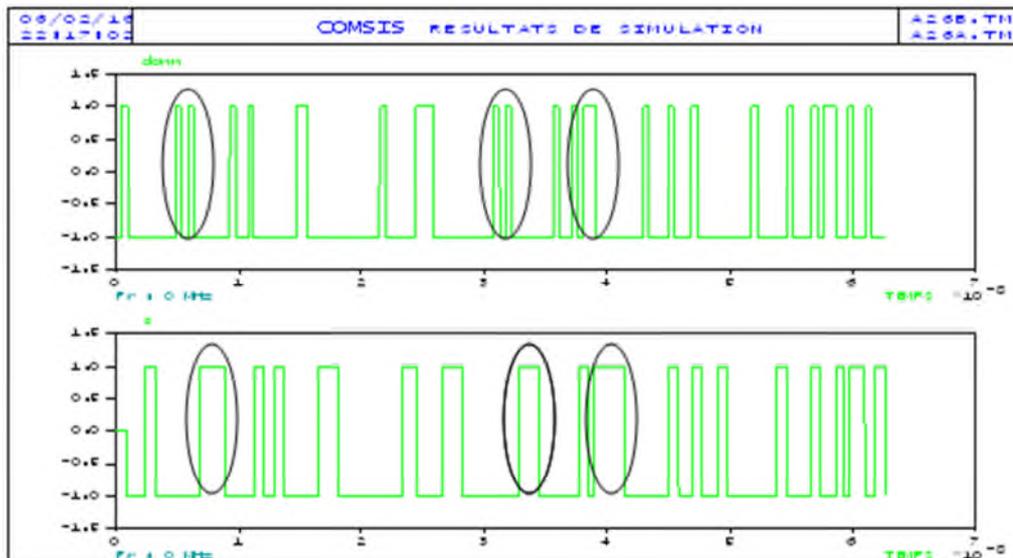
On à changer une photodiode PIN en photodiode à avalanche avec l'augmentation de débit.

Plus le débit binaire augmente plus le nombre d'erreurs augmente.

- ❖ Avec un débit de 2048 Mbits/s  
Une fibre de longueur de 1680 km.

### 1) Avec une photodiode PIN

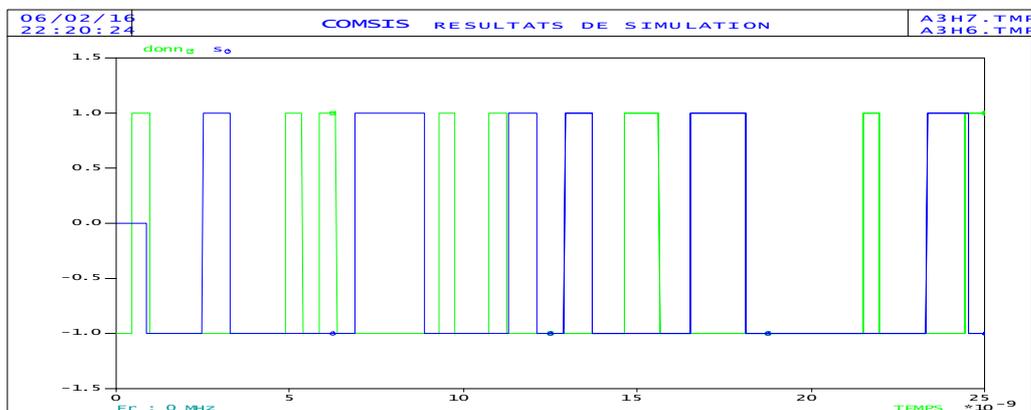
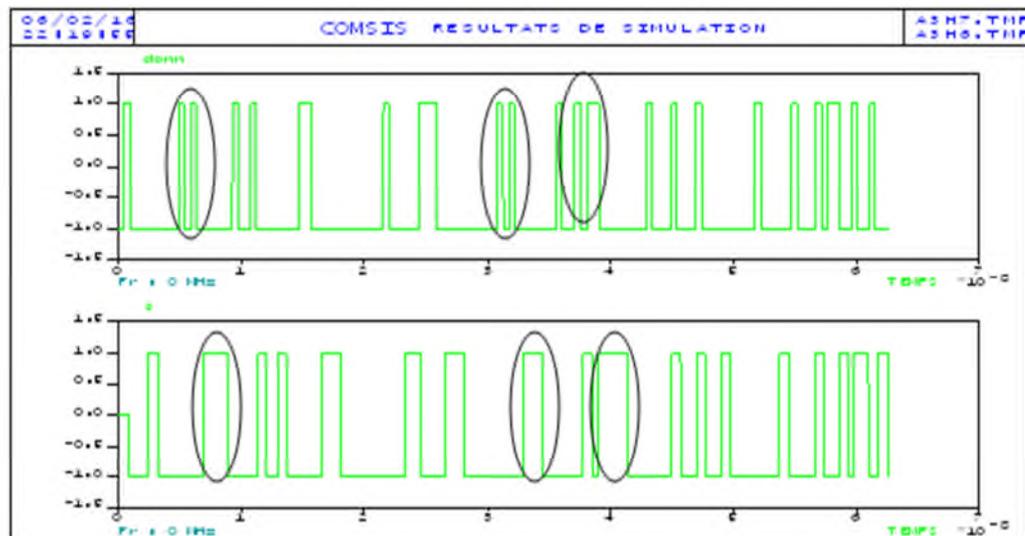




Lorsqu'on augmente la longueur de la fibre à 1680 km en remarque des erreurs plus élevés par rapport au modulateur électro absorbant.

### 1) Avec une photodiode à avalanche





Même remarque pour la photodiode à avalanche.

## V. Conclusion

D'après nos études sur les deux types de modulateurs on a arrivés à conclure que :

- Il y a une relation linéaire entre l'augmentation de débits binaires et l'augmentation d'erreurs.
- En augmentant la longueur de la fibre l'erreur augmente aussi.
- La différence entre la photodiode PIN et la photodiode à avalanche que pour la photodiode à avalanche on a pas besoin d'ajouter un amplificateur électriques.
- Le modulateur électro absorbant donne de bon résultats par rapport aux modulateurs électro optiques.



## Conclusion générale

Au début de notre travail on a voulu approcher et apprécier les techniques des communications optiques. C'est pourquoi il nous a paru important de commencer ce mémoire par une description approfondie des différents modules de la chaîne, ainsi que les diverses limitations rencontrées au cours de la propagation du signal. Cette description nous permet de maîtriser le concept théorique d'un tel système et simplifier sa conception qui devient de plus en plus complexe avec l'apparition de nouveaux composants et donc de nouveaux paramètres influant sur les performances de transmission. Les fibres optiques possèdent de nombreuses qualités pour transmettre une grande quantité d'informations sur de longues distances.

Avec les techniques de multiplexage en longueur d'onde (WDM), couplé aux amplificateurs optiques, sources lasers accordables en longueur d'onde. Cela permet actuellement d'obtenir des débits de transmission très élevés sur des dizaines de milliers de km avec des répéteurs tous les 100~150 km.

La modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc d'envoyer des débits plus élevés. Le bruit, le chirp ... ne sont pas inexistantes dans les modulateurs externes mais leurs valeurs sont nettement plus faibles que dans les lasers.

La modulation directe, plus simple et moins coûteuse est encore très utilisée si les données sont transmises à un débit de quelques gigabits/s, selon la qualité du laser. Mais au-delà de 5 Gbits/s, la modulation externe est indispensable pour maintenir une qualité de transmission correcte.

Les modulateurs électro-optiques sont l'un des piliers du développement de la communication moderne à travers fibres optiques ou en espace libre. Les modulateurs de Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques. Ils sont fréquemment utilisés pour les applications de télécommunication large bande. En réalité, les effets électro-optiques sont à la base de ce type de modulateur. Des concepts physiques simples comme la polarisation, la biréfringence, l'effet électro-optique, les ondes progressives ... permettant d'aborder, de comprendre et de comparer les différents démonstrateurs de modulation. Avec deux effets *pockels* et *kerr* qui sont le résultat que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique et leur intensité. Le bruit, le chirp ... ne sont pas inexistantes dans les modulateurs de Mach-zehnder mais leurs valeurs sont nettement plus faibles que dans les lasers. Les limites de capacité de transmission sont donc repoussées vers des fréquences plus importantes.

Le modulateur électro absorbant est à première vue le composant le plus approprié pour fonctionner en tant que modulateur déporté car il a une large plage de fonctionnement en longueur d'onde de 30nm et que son fonctionnement est indépendant de la polarisation du signal injecté. Ce dernier avantage est très important car le contrôle de la polarisation du signal au cours de la propagation dans l'architecture n'est pas envisageable. C'est pour cette raison que les modulateurs Mach-Zender sont difficilement utilisables en tant que modulateurs déportés pour l'accès.

L'un des principaux avantages d'un modulateur à électro-absorption réside dans le fait qu'il peut être réalisé dans le même semi-conducteur que celui utilisé pour fabriquer le laser et donc de faciliter leur intégration sur la même puce (intégration monolithique).

L'application d'une tension électrique au guide d'onde qui constitue le modulateur optique permet d'obtenir l'extinction du signal optique par effet Franz-Keldysh. Cette tension de commande est typiquement de 3 V crête à crête. Elle est deux fois plus faible que celle nécessaire pour produire le même effet pour un modulateur électro-optique. Par conséquent ce type de modulateur nécessite un étage d'amplification électrique (circuit de commande du modulateur) beaucoup moins performant en termes de puissance de sortie que son « concurrent ». A l'heure actuelle, on trouve des modulateurs à électro-absorption offrant une bande passante de 40 GHz. Toute fois les modulateurs électro-optiques procurent une qualité de signal optique supérieure nécessaire aux transmissions longues distances.

Après les résultats de simulations entre les deux types de modulateurs on arrivé à conclure que le modulateur électro absorbant apporte beaucoup d'avantages par rapport au modulateur électro optique.

Les recherches actuelles portent sur un nouvel type de modulateur à base de polymère. Ce dernier peut aller jusqu'au 110 GHz.

## Bibliographie

- [1] : Jérôme LAURENT, « **communications optiques à très hauts débit** » Présenté au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris Département STIC , 3 décembre 2004.
- [2] : Nassima BOUDRIOUA, « **Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD** » l'Université Paul Verlaine – Metz, le 25 octobre 2007.
- [3] : Younes ZOUINE « **Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant technique CDMA** » Thèse de doctorat Université de LIMOGES 2005.
- [4]: Stéphane DELLIER « **Contributions à la conception des circuits micro-ondes**» Thèse de doctorat Université de LIMOGES 2005.
- [5] : Fadila MEDJDOUB, « **Optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit**» Thèse de magister en télécommunications Université ABOU BEKR BELKAID - TLEMEN 2010.
- [6] : Houda BRAHIMI, « **Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence** » Université Paul Sabatier – Toulouse III Le 13 octobre 2010.
- [7] FICHET M, « **Introduction aux fibres optiques** », Association pour la Diffusion de la Connaissance Scientifique, 1996.
- [8] Jean-Louis VERNEUIL, « **Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s** », Université de LIMOGES, Le vendredi 21 novembre 2003.
- [9] : A. Dupret, A. Fischer, « **Introduction à la télécommunication optiques. Comment transmettre des signaux avec de la lumière ?**», Université de Paris XIII.
- [10] : Vincent RONCIN, «**Contribution a l'étude de fonctions optiques a base d'amplificateurs optiques a semi-conducteurs pour la régénération des signaux de télécommunication a très haut débit** », L'Université de Rennes I, le 30 avril 2004 .
- [11]: Eric CASSAN, article« **Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples** » (IEF, Université Paris-Sud Orsay) Mis en ligne le 4 juin2003.
- [12] : [http://www.unilim.fr/theses/2003/sciences/2003limo0021/these\\_body.html](http://www.unilim.fr/theses/2003/sciences/2003limo0021/these_body.html)
- [13]: Khalil MERZOUK, « **Etude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage temporel** », INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, le 08 Avril 2008.
- [14] : Nicolas DUPUIS, « **Intégration par épitaxies élective d'un Modulateur Electro-Absorbant et d'un amplificateur Optique a base de puits quantiques AlGaInAs** », université de METZ, 18 décembre 2008.

[15] : Bouchra FTAICH-FRIGUI, « **Aide à la conception et à la caractérisation expérimentale de composants optoélectroniques pour les interfaces RF-Optique à très haut débit. Optimisation du packaging associé par une approche hybride électromagnétique-circuit.** », UNIVERSITE DE LIMOGES, le 04 Octobre 2010.

[16] : Philippe ROUX, « **théorie générale simplifiée des semi conducteurs jonction PN au silicium** », en 2008.

[17] : Mohammed El Amin BENFOULA, « **Effet tunnel, Calcul de la fréquence d'inversion de la molécule d'Ammoniac, Application au Maser à Ammoniac.** » Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen FACULTE DE TECHNOLOGIE.

[18] : Jean-François LARCHANCHE, « **Etudes pour la réalisation d'un modulateur électro-optique à ondes progressives sur polymères** » Université des sciences et technologies de Lille, le 24 janvier 2001.

[19] : Juan Mauricio Petit Ferrufino Dual Electro absorption Modulated Laser: « **étude et caractérisation d'une nouvelle source optique laser-modulateur intégrées pour les transmissions numériques haut-débit et les applications Radio-sur-Fibre** » Septembre 2010, Université Paris Tech.

**Résumé :**

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut graver les données sur le signal lumineux à envoyer dans la fibre. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques. Les modulateurs électro-optiques sont habituellement construits avec des cristaux électro-optiques mettant en évidence l'effet Pockels. La phase de l'onde transmise est alors modulée par le signal électrique appliqué au cristal. Modulateurs électro d'absorption ont attiré beaucoup d'attention récemment en tant que sources de d'impulsions optiques courtes à des taux élevés de redoublement, en particulier pour des applications dans les télécommunications autour de 1,55 microns. Ils présentent généralement une variation d'atténuation approximativement logarithmique avec la tension appliquée, ce qui entraîne la génération d'impulsions optiques de haute qualité avec un rapport cyclique faible lorsqu'il est entraîné de façon sinusoïdale.

**Mots clés :**

Modulateurs électro optique, Modulateur électro absorption, effet Pockels, effect Kerr, Semi-conducteur

**Abstract :**

To transmit information in digital optical systems require writing data to the light signal to be sent into the fiber. For this it is necessary to perform a conversion of electrical data into optical data. Electro-optical modulators are typically constructed of electro optical crystals highlighting Pockels effect. The phase of the transmitted wave is then modulated by the electrical signal applied to the crystal. Electro absorption modulators have attracted a lot of attention recently as sources of short optical pulses at high repetition rates, particularly for applications in telecommunications around 1.55 microns. They typically display an approximately logarithmic attenuation variation with applied voltage, resulting in the generation of high quality optical pulses with a low duty cycle when driven sinusoidally.

**Keywords:**

Electro optics modulator, Electro absorption modulator, Pockels effect, Kerr effect, Semi-conductor.