

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM



FACULTÉ DE Technologie



DÉPARTEMENT de Génie Électrique et Électronique

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de  
Master en Photonique et Réseaux Optiques de Télécommunications

(PROTONS)

*THEME*

***Etude de l'effet de la modulation  
sur une liaison SMF à 40 Gb/s.***

**Présenté par :**

Melle BENALI MEDJAHED Wissame

Melle ABDELLAOUI Hanane

**Soutenu le 30 Juin 2013 devant un jury composé de:**

Mr S.KAMECHE	Président	M. C. à l'université de Tlemcen
Mr S-A.DJENNAS	Examineur	M. C. à l'université de Tlemcen
Mr R.MERZOUGUI	Examineur	M. C. à l'université de Tlemcen
Mr A. R. BORSALI	Encadreur	M. C. à l'université de Tlemcen

Année Universitaire 2012/2013

# Remerciements

*Lorsqu'une thèse s'achève, un désire s'empare de chacun de nous pour remercier toutes les personnes dont la contribution à permis à ce travail de voir le jour.*

*Avant tout, nous remercions ALLAH ; le tout puissant, de nous avoir aidé à accomplir ce travail*

*Ce travail a été effectué à la faculté de technologie, université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, sous la direction de Mr **A.R. BORSALI**, maitre de conférence à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, que nous tenons à lui exprimer notre reconnaissance, notre profonde gratitude et nos sincères remerciements, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter à nous encadrer dans ce travail. Nous la remercies encore pour l'aide et pour les conseils qu'elle nous a fournis tout au long de ce travail, nous la remercions aussi pour son esprit professionnel et humain.*

*Nous remercions vivement Mr **S. KAMECHE**, maitre de conférences à la faculté de technologie de Tlemcen pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Nous tenons à remercier profondément Mr **S-A. DJENNAS** , maitre de conférences à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements à Mr **R. MERZOUGUI**, maitre de conférences à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui de près ou de loin nous ont aidé et soutenu pendant cette période.*

# *Dédicace*

*À l'aide d'ALLAH tout puissant, qui trace le chemin de ma vie, j'ai pu arriver*

*à réaliser ce modeste travail que je dédie à :*

*À ma plus belle étoile qui puisse exister dans l'univers, ma très chère mère, celle à qui je*

*souhaite une longue vie et bonne santé*

*À mon père qui n'a pas cessé de m'encourager et de se sacrifier pour que je puisse franchir*

*tous obstacle durant toutes mes années d'études, que le Dieu me le garde en très bonne santé*

*À mon très cher frère OUSSAMA*

*À mon petit frère IMAD EDDINE*

*Et spécialement à ABDERRAZAK pour son soutien durant toute cette année*

*bons et mauvais moments ainsi que sa famille*

*À toutes la famille BENALI MEDJAHED et MILOUD ABID*

*À toutes mes amies*

*À ma chère binôme ABDELLAOUI HANANE qui a partager avec moi se travail dans les*

*bons et les mauvais moments ainsi sa famille*

*À toute la promotion de Master PROTONS 2013*

*Et a tous qui m'aime*

*WISSAM...*

# *Dédicace*

*À l'aide d'ALLAH tout puissant, qui trace le chemin de ma vie, j'ai pu arriver  
à réaliser ce modeste travail que je dédie à :*

*Les deux êtres les plus chers qui ont sacrifié leur vie pour mon bonheur, qui ont été  
toujours à mes côtés, dans la joie comme la tristesse, mes parents que j'aime énormément,  
pour leur soutien durant toute ma vie que DIEU les protège.*

*Mon cher frère ZAKARIA ainsi que mes sœurs, Téma et la petite Nour El Houda*

*A toute ma grande famille.*

*Mes très chers grands parents qu'ALLAH les protège.*

*A mes amies spécialement ma chère binôme WISSAM*

*Toute la promotion Master PROTONS 2013.*

*Ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*En espérant avoir répondu à leurs souhaits de me voir réussir.*

*HANANE...*

# Sommaire

Remerciements .....	
Dédicaces .....	
Sommaire .....	
Listes des figures .....	
Introduction générale.....	

## Chapitre 1: Etude d'une chaine de transmission par fibre optique

1.1 Introduction.....	4
1.2 Définition d'une chaine de transmission par fibre optique.....	4
1.3 Les émetteurs optiques .....	6
1.3.1 La source optique.....	6
1.3.2 La modulation.....	16
1.4 La fibre optique .....	18
1.4.1 Présentation générale des fibres .....	19
1.4.2 L'atténuation .....	22
1.4.3 Dispersion .....	23
1.4.4 Les effets non linéaires dans la fibre optique.....	27
1.4.5 Avantages et inconvénients des fibres optiques.....	29
1.4.6 Quelques applications de la fibre optique.....	30
1.5 Le module de réception .....	31
1.5.1 Le photodétecteur.....	32
1.6 Eléments de transmission par fibre optique.....	37
1.6.1 Amplification optique.....	38
1.6.2 Fibre compensatrice de dispersion DCF (Dispersion Compensating Fiber).....	41
1.6.3 Les isolateurs .....	42
1.6.4 Les coupleurs .....	42
1.7 Conclusion.....	43

## Chapitre 2: Etude de l'effet du format de transmission

2.1 Introduction.....	45
2.2 Présentation du logiciel.....	45

2.3	Analyse de la chaine de transmission.....	47
2.3.1	Diagramme de l'œil.....	47
2.3.2	Taux d'erreur binaire « TEB ».....	48
2.3.3	Facteur de qualité Q.....	48
2.4	Liaison de référence.....	49
2.4.1	La partie émission.....	50
2.4.2	La partie réception.....	51
2.5	Résultats de simulation et interprétations.....	52
2.5.1	Choix du code du générateur.....	52
2.5.2	Choix du modulateur.....	59
2.5.3	Effet de variation du nombre de tronçons.....	64
2.5.4	Effet de la variation de la puissance.....	66
2.5.5	Etude de l'effet du débit binaire.....	67
2.6	Conclusion.....	69

## Chapitre 3: Transmission par Soliton

3.1	Introduction.....	71
3.2	Historique.....	71
3.3	Définition du soliton.....	72
3.3.1	Caractéristiques importantes des solitons.....	72
3.3.2	Le soliton moyen.....	76
3.3.3	Le soliton, une solution aux distorsions de propagation.....	78
3.3.4	Les difficultés et les limites de la transmission par solitons.....	79
3.3.5	Dépasser les limites induites par le bruit.....	80
3.3.6	Les axes d'études en transmission par solitons.....	82
3.4	Etude et simulations.....	86
3.4.1	Effet de la variation de la longueur de la fibre SMF.....	87
3.4.2	Effet de la variation des puissances sur un tronçon.....	89
3.4.3	Effet de la variation de débit binaire sur une liaison optique.....	91
3.5	Conclusion.....	93
	Conclusion générale.....	95
	Liste des abréviations.....	96
	Références bibliographiques.....	98

## *Sommaire*

---

# *Listes des figures*

## Chapitre 1: Etude d'une chaîne de transmission par fibre optique

Figure 1.1 : Synoptique général d'un système de communication par fibre optique.....	4
Figure 1.2 : Structure d'un émetteur optique. ....	6
Figure 1.3 : Comparaison entre les trois types. ....	7
Figure 1.4 : Jonction PN en polarisation directe et inverse.....	8
Figure 1.5 : Symbole de la diode DEL.....	8
Figure 1.6 : Schéma d'une DEL.....	9
Figure 1.7 : Niveau d'énergie et processus de transition. ....	9
Figure 1.8 : un laser est un oscillateur composé d'un milieu amplificateur(A) et d'une boucle contre réaction (CR).....	10
Figure 1.9 : principe de fonctionnement de la diode laser .....	12
Figure 1.10: Un schéma d'un oscillateur laser.....	12
Figure 1.11 : Schéma des processus.....	13
Figure 1.12 : Diode LASER type DH-OS ("Double Heterostructure Oxide-isolated Stripe")	14
Figure 1.13: Fonction de transfert du LASER .....	14
Figure 1.14 : Spectre d'émission d'une source optique. ....	15
Figure 1.15 : Diagramme de rayonnement.....	15
Figure 1.16 : Synoptique de la modulation directe. ....	16
Figure 1.17: Synoptique de la modulation externe. ....	17
Figure 1.18 : Schéma d'un interféromètre de Mach-Zendher .....	18
Figure 1.19 : Structure d'une fibre optique. ....	19
Figure 1.20 : Guidage de la lumière dans le milieu d'indice n1 par réflexion totale interne...	20
Figure 1.21 : Fibre optique multimode a saut d'indice. ....	21
Figure 1.22 : Fibre optique multimode a gradient d'indice.....	22
Figure 1.23 : Fibre optique monomode.....	22
Figure 1.24 : Atténuation spectrale d'une fibre optique.....	23
Figure 1.25 : Dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde.....	25
Figure 1.26 : Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit. ....	25

Figure 1.27 : Effet de la PMD au 1er ordre dans les transmissions optiques.....	27
Figure 1.28: Structure bloc d'un récepteur optique.....	31
Figure 1.29: Schéma d'un récepteur de données à détection directe.....	32
Figure 1.30: La photodiode PIN.....	34
Figure 1.31 : Structure d'une photodiode à avalanche pII pn.....	36
Figure 1.32 :Système de transmission optique.....	38
Figure 1.33: Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur.....	39
Figure 1.34: Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'Erbium avec pompage optique.....	41

## Chapitre 2: Etude de l'effet du format de transmission

Figure 2.1 : La fenêtre principale du logiciel.....	46
Figure 2.2: Schéma de liaison de référence.....	50
Figure 2.3: la partie émission.....	50
Figure 2.4 : format NRZ (a), format RZ (b).....	50
Figure 2.5 : la partie réception.....	51
Figure 2.6 : Illustration de quelques réponses de filtres.....	52
Figure 2.7 : Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons (NRZ).....	53
Figure 2.8 : Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons (RZ).....	53
Figure 2.9 : Facteur de qualité et TEB en fonction de longueur de fibre (Gaussien).....	52
Figure 2.10 : Facteur de qualité en fonction de longueur de SMF (RZ,NRZ,Gaussien).....	53
Figure 2.11 : TEB en fonction de longueur de SMF (RZ,NRZ,Gaussien).....	53
Figure 2.12 : Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons N (NRZ).....	54
Figure 2.13: Facteur de qualité et TEB en fonction de nombres de tronçons (RZ).....	54
Figure 2.14 : Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons (Gaussien).....	55
Figure 2.15 : Facteur de qualité en fonction de nombres de tronçons (RZ,NRZ,Gaussien).....	56
Figure 2.16 : TEB en fonction de nombres de tronçons (RZ,NRZ,Gaussien).....	56
Figure 2.17 : Facteur de qualité et TEB en fonction de la longueur de fibre SMF (MZ).....	57
Figure 2.18 : Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons (EAM).....	60
Figure 2.19 : Facteur de qualité et TEB en fonction de longueur de la fibre SMF (AM).....	60
Figure 2.20 : Facteur de qualité en fonction de longueur de SMF (MZ,EAM et AM).....	61
Figure 2.21 : TEB en fonction de longueur de SMF (MZ ,EAM et AM).....	61
Figure 2.22: Facteur de qualité en fonction de nombres de tronçons (MZ).....	62

Figure 2.23 : Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons (MZ).....	62
Figure 2.24 : Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons (AM).....	63
Figure 2.25 :Facteur de qualité en fonction de nombre de tronçon (Modulateurs MZ, EAM et AM).....	63
Figure 2.26 : TEB en fonction de nombre de tronçon (Modulateurs MZ, EAM et AM).....	64
Figure 2.27 : Facteur de qualité en fonction du nombre de tronçon.....	65
Figure 2.28: TEB en fonction de nombre de tronçon.....	65
Figure 2.29 : Facteur de qualité en fonction de la puissance.....	66
Figure 2.30 : TEB en fonction de la puissance.....	67
Figure 2.31 : Facteur de qualité en fonction de débit.....	68
Figure 2.32 : TEB en fonction de débit.....	68

### Chapitre 3: Transmission par Soliton

Figure 3.1 : Caractéristiques importantes.....	76
Figure 3.2 : Propagation sur 14 000 km de la forme d’onde soliton associée au message “1011”.....	79
Figure 3.3 : Architecture générale d’un système amplifié.....	82
Figure 3.4 : Facteur de qualité et TEB en fonction de la longueur de la fibre (N=1) .....	87
Figure 3.5 : Facteur de qualité et TEB en fonction de la longueur de la fibre (N=5).....	87
Figure 3.6 : Facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre (N=1) .....	88
Figure 3.7 : TEB en fonction de la longueur de la fibre (N=1).....	89
Figure 3.8 : Facteur de qualité et TEB en fonction de la puissance.....	90
Figure 3.9 : Facteur de qualité en fonction de la puissance.....	90
Figure 3.10 : TEB en fonction de la puissance.....	91
Figure 3.11 : Facteur de qualité et TEB en fonction du débit.....	91
Figure 3.12 : Facteur de qualité en fonction de nombre de tronçon (N).....	92



# Introduction Générale



# *Introduction générale*

Avant l'optique, ni les systèmes à câbles coaxiaux, ni les systèmes micro-ondes, ne permettaient de transmettre un débit supérieur à 100 Mb/s en moyenne. Le système coaxial le plus évolué était capable de transmettre un débit de 274Mb/s, mais à condition de prévoir l'installation de répéteurs tous les kilomètres.

Une amélioration substantielle des performances était pressentie si l'on réussissait à transmettre l'information sur une porteuse optique de l'ordre de la centaine de THz, au lieu de la dizaine de GHz des porteuses micro-ondes.

L'utilisation de la fibre optique puis des réseaux « tout-optique » a totalement révolutionné le monde des télécommunications. On arrive désormais à des systèmes de transmission de plus en plus performants, atteignant plusieurs Tbit/s sur plusieurs milliers de kilomètre.

L'intérêt de la communication par fibre optique par rapport aux systèmes classiques de transmission (Hertzien, par câble, par satellite, micro-onde, propagation de la lumière en atmosphère...) est l'absence d'interférence extérieure perturbatrice (en effet, la fibre protège de l'entrée de lumière parasite et est insensible aux perturbations atmosphériques et aux champs électromagnétiques), ainsi que la plus grande fréquence de la porteuse qui permet de lui faire transporter beaucoup plus de canaux ou d'en augmenter la bande passante.

Le but de notre mémoire est l'étude de l'effet de la modulation sur une liaison SMF à 40Gb/s. Elle est divisée en trois chapitres, Dans le premier chapitre, nous nous intéressons tout d'abord à la spécification de la fibre optique. Pour cela, nous présentons d'abord un état de l'art des différentes fibres, leurs caractéristiques physiques, leurs principes de fonctionnement et les différentes applications développées.

Les télécoms par voies optiques sont basées sur l'utilisation de quatre éléments essentiels : Une source qui produit un rayonnement de faible largeur spectrale, une fibre optique monomode en silice à faible taux d'absorption, un amplificateur tout optique (répéteur) qui permet de régénérer le signal lors du transport long distance et une photodiode qui transforme les photons incidents en pair électron trou, donc en courant électrique, avec un excellent rendement et un bruit de fond minimal.

---

Nous examinerons dans ce rapport particulièrement les études théoriques des composants clés de la chaîne de transmission. Et nous essayons à la base des résultats théoriques de rapprocher le système de transmission optique à des modèles.

Avec l'avancement de l'Internet la technologie haut débit est s'imposée ces dernières années grâce notamment à deux techniques le multiplexage en Longueur d'onde et la transmission par Solitons.

Le second chapitre est consacré à la simulation par logiciel Optisystem, le 3 ème chapitre aborde la transmission par soliton.

Jusqu'au aujourd'hui la transmission par Solitons est un domaine d'actualité très peu développe et en pleine expansion.

---



# Chapitre 1

Etude d'une chaîne de  
transmission par fibre optique



## 1.1 Introduction

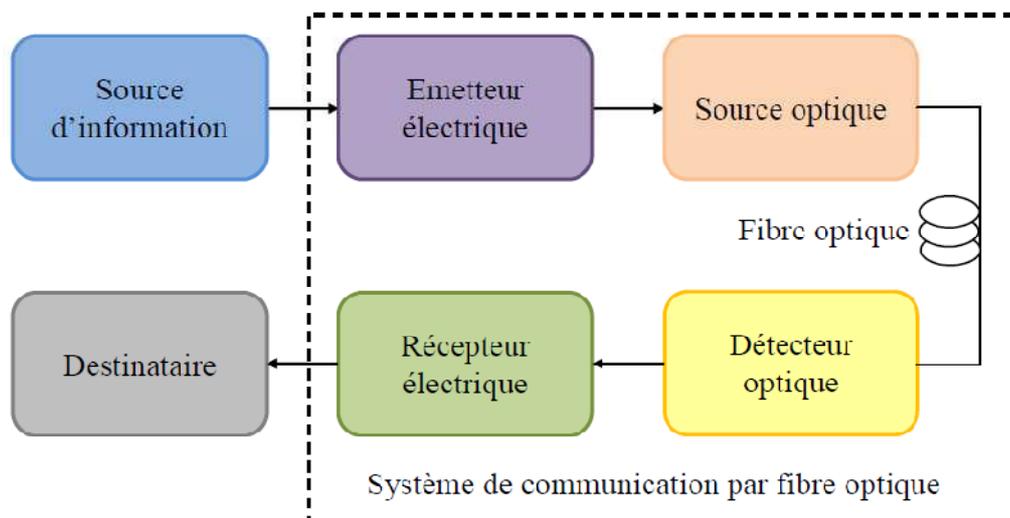
Le besoin de l'être humain pour les communications n'a jamais cessé d'évoluer et ne pourrait être comblé. C'est pourquoi il faut toujours de nouvelles solutions pour les transmissions numériques. Ces transmissions ont évolué dans le temps mais ont gardé la même structure, Voire un émetteur, un support de transmission et un récepteur.

De nombreux tests ont été effectués, de nombreuses modèles ont été proposés mais la fibre optique est la référence de support de transmission du point de vue qualité, débit, En effet la fibre optique est plus fiable.

Le seul inconvénient que présente celle-ci est la compatibilité. En effet, la fibre optique nécessite des convertisseurs optoélectronique pour l'émission et la réception du signal transmis.

## 1.2 Définition d'une chaîne de transmission par fibre optique

L'architecture d'une liaison optique, quelque soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée d'un émetteur, d'une fibre optique et d'un récepteur. Pour chacun de ces éléments constitutifs d'une liaison sur fibre optique, nous tenterons de décrire leur rôle et leur fonctionnement.



*Figure 1.1 : Synoptique général d'un système de communication par fibre optique.*

L'interface optique d'émission a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Il contient principalement le composant optoélectronique d'émission, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL). L'interface contient également

des circuits d'adaptation et de protection ; il est relié au câble soit par une embase de connecteur, soit par une fibre amorce qu'il faut raccorder. La modulation est en général une modulation d'intensité lumineuse obtenue par la modulation du courant qui traverse la diode d'émission. Certains systèmes expérimentaux pratiquent la modulation en fréquence ou en phase optique (transmissions cohérentes).

L'interface optique de réception contient une photodiode qui convertit le signal optique reçu en signal électrique. Elle est suivie d'un préamplificateur, dont la réalisation doit être soignée car c'est en général le bruit de celui-ci qui limite la puissance optique minimale détectable, et donc la portée du système. Suivant les applications, on trouve ensuite des circuits de filtrage ou de remise à niveau logique.

Lorsque la longueur de la liaison le nécessite, on insère un ou plusieurs répéteurs, qui contiennent des interfaces de réception et d'émission reliés par des circuits d'amplification, et de régénération pour les transmissions numériques. Plutôt que de ramener le signal sous forme électrique pour l'amplifier, on utilise de plus en plus l'amplification optique dans des fibres dopées Erbium, pompées par laser.

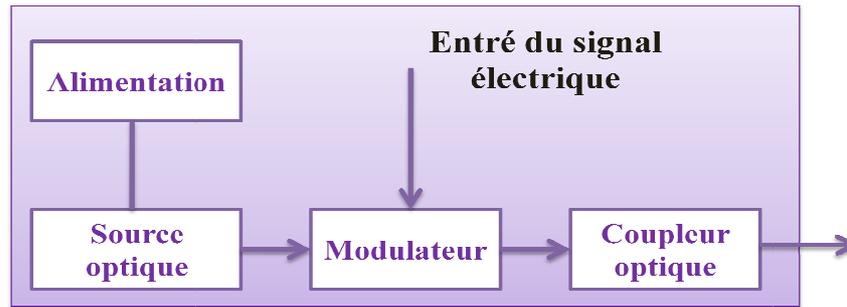
Pour la transmission des signaux lumineux par des fibres optiques il faut, aux deux extrémités de la fibre, des éléments émetteurs et récepteurs capables de convertir les signaux électriques en signaux lumineux et réciproquement.

Du côté émetteur, un signal électrique module l'intensité d'une source lumineuse. Le signal optique est couplé dans la fibre et arrive du côté récepteur où un détecteur optique retransforme le signal optique en un signal électrique.

Pour chacun des éléments constitutifs d'une liaison sur fibre optique, nous tenterons de décrire leur rôle et leur fonctionnement. Nous débuterons par la description de l'émetteur (laser, driver, modulateur, ...), pour enchaîner sur les blocs constituant le récepteur (photodiode, amplificateur électrique, filtre électrique, circuit de remise en forme). Nous poursuivrons par la fibre optique, élément essentiel puisqu'elle permet le transport de l'information et à l'origine des efforts réalisés par la suite. Enfin, nous terminerons en détaillant les éléments pouvant être utilisés en ligne, tels que les amplificateurs, en vue d'une amélioration de la qualité du signal transmis ou de l'augmentation des distances.

### 1.3 Les émetteurs optiques

Au niveau d'émission les télécommunications optiques sont basées sur l'utilisation des composants optoélectroniques qui ont pour rôle de convertir le signal électrique en un signal optique par l'intermédiaire des diodes émettrices à semi conducteur appelées DEL. Grâce au progrès technologique continu, s'est apparue la source Laser (DL), la figure 1.2 illustre une structure d'un émetteur optique. .



*Figure 1.2 : Structure d'un émetteur optique.*

#### 1.3.1 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.

Pour que le semi-conducteur puisse émettre des photons par émission spontanée ou stimulée, il faut que des porteurs excessifs soient amenés au semi-conducteur. On obtient ceci en injectant des porteurs de charge via une jonction- PN.

Un semi conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante.

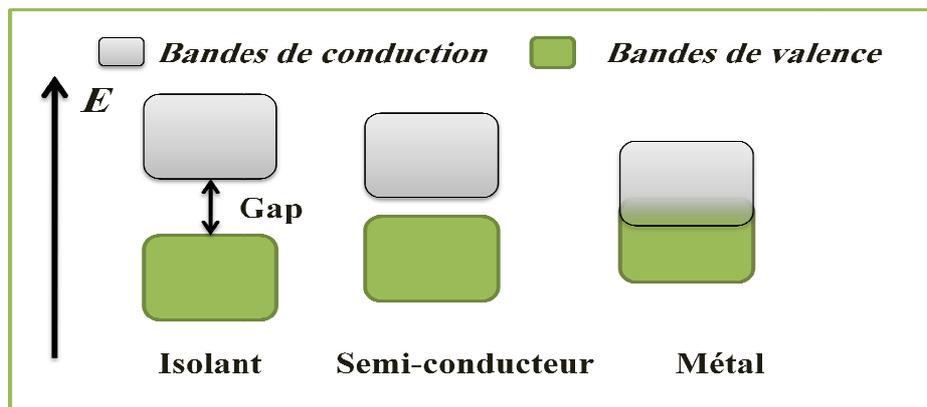
Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses

bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement de tels électrons et celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence.

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau afin de produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact afin de créer des jonctions, permettant de contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse l'ensemble. Cette propriété est à la base du fonctionnement des composants de l'électronique moderne : diodes, transistors, etc.

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle ; il existe également des dizaines d'autres semi-conducteurs utilisés, comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium.

La figure 1.3 donne une comparaison entre les trois types des matériaux.

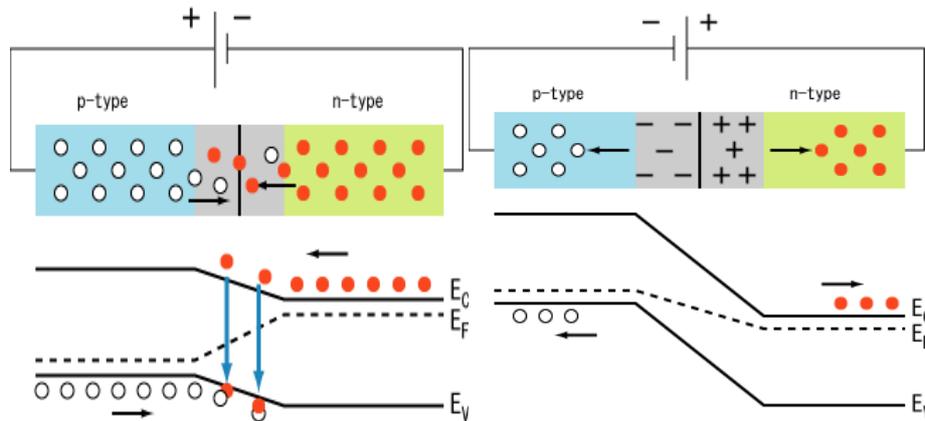


*Figure 1.3 : Comparaison entre les trois types.*

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N et d'un semi-conducteur dopé P. La jonction entraîne l'égalisation des niveaux de fermi par décalage des bandes. Si l'on applique une tension positive du côté de la région P, les porteurs majoritaires positifs (les trous) sont repoussés vers la jonction. Dans le même temps, les porteurs majoritaires négatifs du côté N (les électrons) sont attirés vers la jonction. Arrivés à la jonction, soit les porteurs se recombinent (un électron tombe dans un trou) en émettant un photon éventuellement visible (LED), soit ces porteurs continuent leur course au travers de l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée : le courant circule, son intensité varie en exponentielle de la tension. Si la différence de potentiel est inversée, les porteurs

majoritaires des deux côtés s'éloignent de la jonction, bloquant ainsi le passage du courant à son niveau. Ce comportement asymétrique est utilisé notamment pour redresser le courant alternatif.

La jonction P-N est à la base du composant électronique nommé diode, qui ne permet le passage du courant électrique que dans un seul sens. De manière similaire, une troisième région peut être dopée pour former des doubles jonctions N-P-N ou P-N-P qui forment les transistors bipolaires.



*Figure b: polarisation directe*

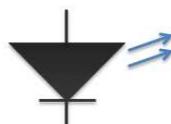
*Figure a: polarisation inverse*

*Figure 1.4 : Jonction PN en polarisation directe et inverse.*

Le processus de l'injection de porteurs et l'émission résultante est appelé luminescence à injection. En pratique ce processus trouve ses applications sous forme de sources lumineuses (émetteurs) par exemple les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL).

### 1.3.1.1 Les Diodes DEL

Une diode électroluminescente, abrégée sous les sigles DEL ou LED (de l'anglais *light-emitting diode*), est un composant optoélectronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens (le sens passant, comme une diode classique, l'inverse étant le sens bloquant) de plus elle produit un rayonnement monochromatique ou poly chromatique incohérent à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse.



*Figure 1.5 : Symbole de la diode DEL.*

Elle compte plusieurs dérivées, principalement, l'OLED, l'AMOLED ou le FOLED (pour flexible oled). Les LED sont considérées, par beaucoup, comme une technologie d'avenir dans le domaine de l'éclairage général. Elles sont utilisées aussi dans la construction des écrans de télévision plats : pour le rétro éclairage des LCD, comme source d'illumination principale dans les écrans de télévision à LED.

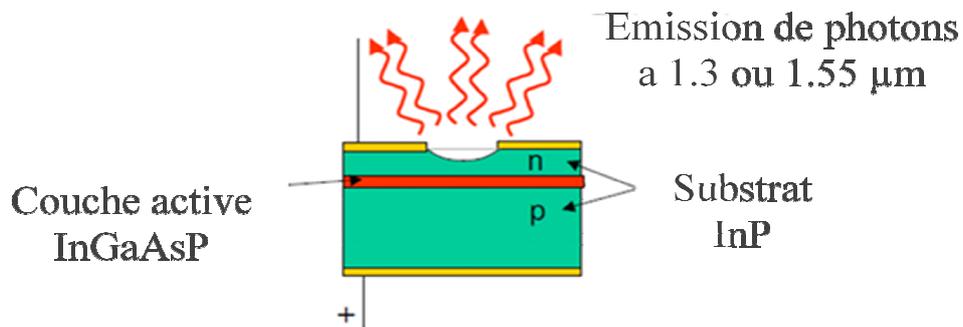


Figure 1.6 : Schéma d'une DEL

- **Emission spontanée**

Dans une DEL, la lumière est émise par Emission spontanée : les Electrons et les trous ayant une durée de vie se recombinent dans un semi-conducteur à gap direct en émettant un photon (recombinaison radiative).

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

Le photon émis à l'énergie :

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1.1)$$

$$h\nu \approx E_g \quad (1.2)$$

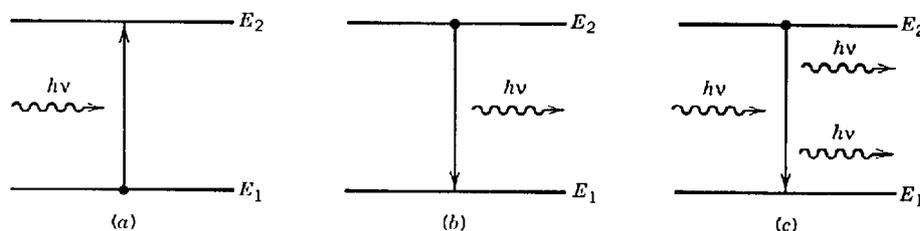


Figure 1.7 : Niveau d'énergie et processus de transition.

A un niveau d'énergie  $E_1$ , une lumière de fréquence :

$$F_0 = (E_2 - E_1)/h \quad (1.3)$$

Peut être absorbée ou émise ou  $h$  est la constante de Planck ( $h = 6.6262.10^{-34} \text{ J.s}$ ).

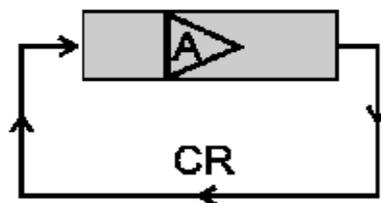
Le premier processus de transition de la figure (a) où l'atome est initialement au niveau d'énergie supérieure 2 et la lumière de fréquence  $f_0$  est émise spontanément et d'une façon erratique sans lumière extérieure :

Ce processus est appelé, émission spontanée. Quand un grand nombre d'atomes ou de molécules est présent initialement à l'état d'énergie supérieur, les phases des ondes rayonnées pour les différents atomes ou molécules sont tout à fait indépendantes et n'ont pas de relations avec d'autres ; l'intensité lumineuse totale rayonnée décroît exponentiellement dans le temps.

### 1.3.1.2 Les Diodes laser [1-3]

Depuis le début des télécommunications par fibre optique, le choix des sources optiques s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique. Ainsi la diode laser est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre. C'est pour ces raisons que nous ne parlerons dans la suite que des diodes lasers et que nous n'aborderons pas les diodes électroluminescentes.

Le mot laser, sigle de l'expression anglaise Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement. L'effet laser ne fut démontré qu'en 1960 par Mainman en utilisant un barreau de rubis. Deux notions peuvent résumer cet effet : amplification et contre-réaction (Figure 1.8).



*Figure 1.8 : Un laser est un oscillateur composé d'un milieu amplificateur (A) et d'une boucle de contre-réaction (CR)*

#### 1.3.1.2.1 Structure de base d'une diode laser

Une diode laser est une jonction de semi-conducteurs, comme une diode électroluminescente classique. Elle possède trois zones caractéristiques :

Une couche de confinement de type n, une zone active et une couche de confinement de type p. Les couches de confinement permettent d'optimiser l'utilisation du courant dans la diode et d'augmenter le rendement. La zone active est formée d'un guide d'onde encadrant le lieu de l'émission laser : matériau massif ou quantique (puits, boîtes ou fil).

Lorsque cette diode est polarisée en direct, elle laisse passer un fort courant qui peuple la bande de conduction et peut réaliser l'inversion de population. En réalité, une couche intermédiaire d'indice optique supérieur joue le rôle de guide optique, comme dans une fibre. Les extrémités sont clivées et donnent des faces parfaitement planes jouant le rôle de miroirs semi-réfléchissants, créant la cavité résonante. Le dioptre entre le semi-conducteur d'indice 3.5 environ et l'air d'indice 1 possède ainsi un coefficient de réflexion de 30%. Ce coefficient peut être diminué sur les deux côtés par l'application d'un revêtement anti-réfléchissant afin d'obtenir une puissance de sortie plus importante. Suivant le domaine d'application, on ajoute soit une lentille de focalisation par exemple pour les pointeurs ou les lecteurs, soit un asservissement en température ou en courant et une fibre amorce pour les applications télécoms et de spectroscopie.

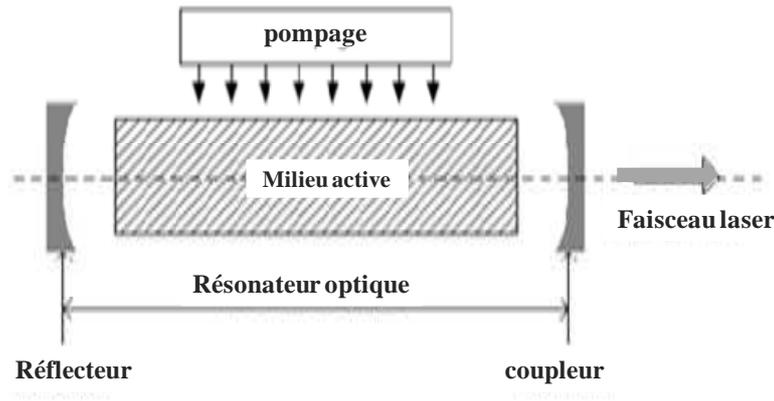
#### **1.3.1.2.2 Les caractéristiques d'une diode laser**

Ses caractéristiques sont proches de celles des lasers conventionnels. La plus faible longueur de la cavité, quelques centaines de micromètres au lieu de quelques dizaines de centimètres, entraîne une plus grande divergence du faisceau et des raies d'émission plus éloignées les unes des autres, ce qui facilite la création de lasers monomodes (une seule raie d'émission) par filtrage. Les états énergétiques se répartissent dans la structure de bandes du semi-conducteur à la place d'états énergétiques bien définis dans un gaz, par exemple, impliquant l'émission de raies moins fines.

Les avantages sont sa compacité, sa facilité de modulation à des fréquences élevées, ses faibles tensions de service et puissance consommée grâce à des rendements de l'ordre de 30% au lieu de 3% pour les autres types de laser.

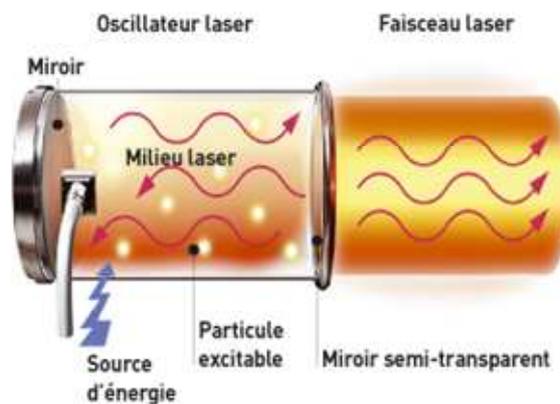
#### **1.3.1.2.3 Principe de fonctionnement**

Les trois principales composantes d'un laser sont les suivantes : un milieu actif, un mécanisme de pompage et un résonateur optique. Un système laser peut être schématisé de la façon suivante:



*Figure 1.9 : principe de fonctionnement de la diode laser*

Cependant, ce processus n'est pas suffisant pour produire à lui seul un faisceau laser. C'est pourquoi le milieu actif est placé dans un résonateur optique, qui peut aussi être appelé oscillateur laser.



*Figure 1.10: Un schéma d'un oscillateur laser*

#### 1.3.1.2.4 Amplification par émission stimulé

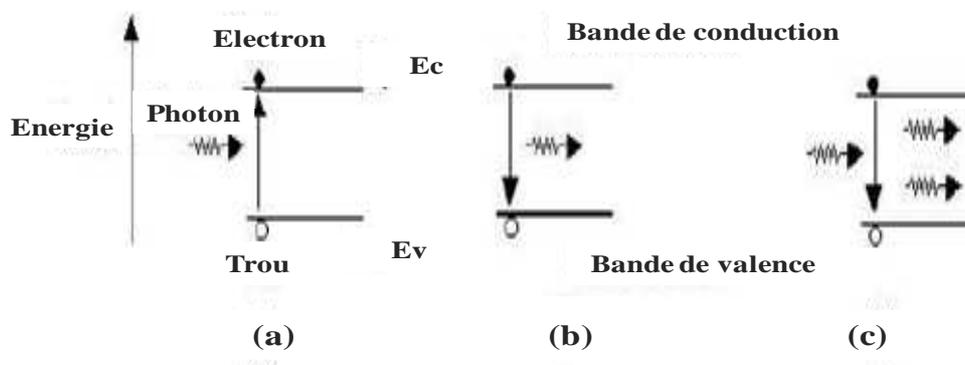
Si l'émission stimulée l'emporte sur l'absorption, le nombre de photons augmente au cours de la propagation du faisceau lumineux : le milieu est amplificateur.

Un laser est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée. En effet, dans un semi-conducteur, un électron peut passer d'un état à un autre de trois façons (Figure 1.11) :

- L'émission spontanée : De sa propre initiative, l'électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant un photon spontané.

– L'absorption : En absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé (électron dans la bande de conduction et trou dans la bande de valence).

– L'émission stimulée : Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident. On parle alors de lumière cohérente. Avec l'émission stimulée s'introduit la notion de gain ou d'amplification du rayonnement incident puisque, à partir d'un photon, on en obtient deux.



**Figure 1.11** : Schéma des processus (a) d'absorption (b) d'émission spontanée (c) d'émission stimulée où un pair électron trou interagit avec un photon.

### 1.3.1.2.5 Le résonateur Pérot-Fabry

Ce type de résonateur est constitué, dans le cas le plus simple, par deux miroirs plans, parallèles et réfléchissants entre lesquels les ondes lumineuses font de multiples allers-retours.

Dans le cas d'un semi-conducteur, les parois clivées du cristal sont utilisées pour constituer la cavité. Une forte valeur de l'indice (de l'ordre de 3,5) du semi-conducteur permet d'obtenir, avec les faces clivées en contact avec l'air, un coefficient de réflexion suffisant pour provoquer ces allers-retours de l'onde dans la cavité. C'est ce que nous avons appelé la boucle de contre-réaction.

Ainsi, en imposant un coefficient de réflexion élevé (environ 30%), l'amplification dans le résonateur est d'autant plus accrue et peut compenser les pertes dues à l'absorption dans la cavité et à la transmission vers l'extérieur, transmission pourtant utile pour constituer le signal

porteur de l'information dans le réseau. En effet, ces pertes signifient une baisse de l'émission stimulée.

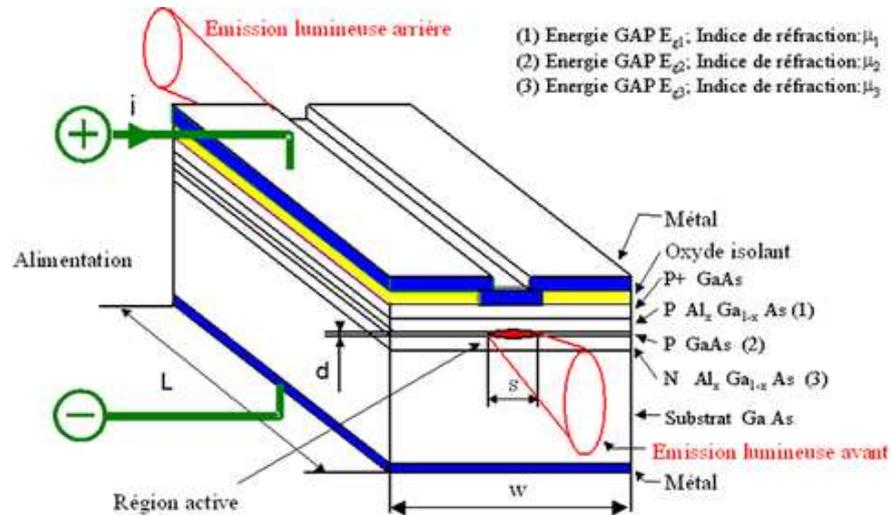


Figure 1.12 : Diode LASER type DH-OS ("Double Heterostructure Oxide-isolated Stripe")

Une diode Laser a la forme d'un parallélépipède 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.

#### 1.3.1.2.6 La différence entre DEL/DL

Pour montrer la différence entre une diode électroluminescente et une diode laser, la (figure 1.13) illustre les courbes caractéristiques de la puissance lumineuse en fonction du courant.

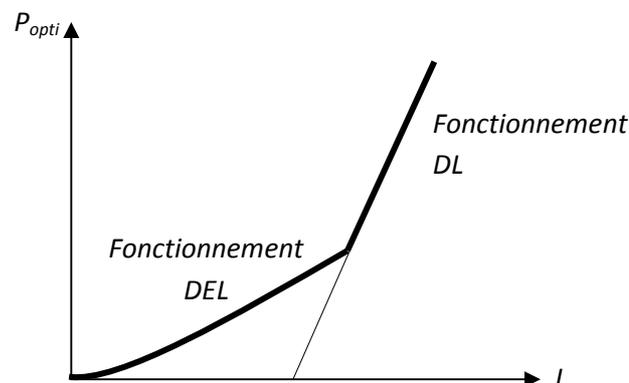
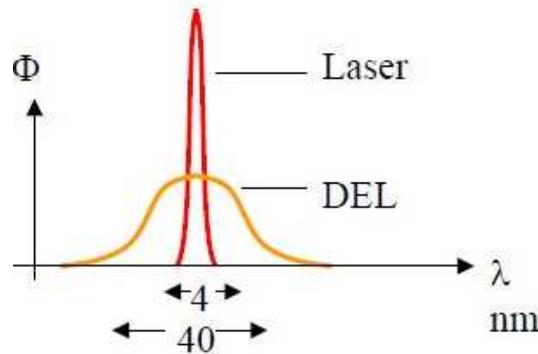


Figure 1.13: Fonction de transfert du LASER

Au fur et à mesure avec l'augmentation du courant de la diode on atteint un seuil où l'amplification de la lumière au cristal compense les pertes provoquées par l'affaiblissement

et les radiations. Au-dessus de ce seuil une force émission laser commence. Contrairement à la DEL et à sa large répartition spectrale, l'émission de la diode laser a lieu en une ou quelques raies spectrales (Figure 1.14).



**Figure 1.14 :** Spectre d'émission d'une source optique.

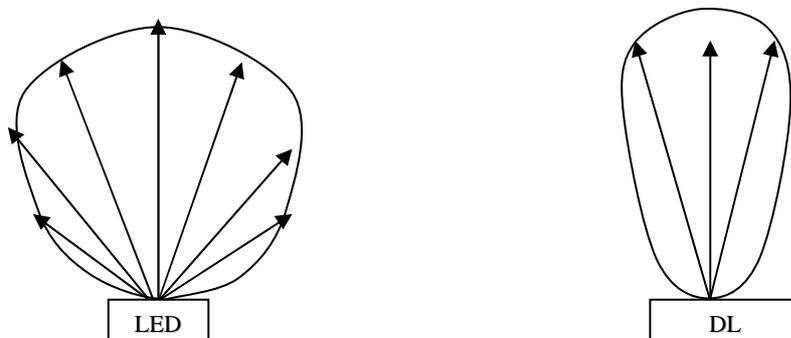
La largeur d'un spectre d'émission est habituellement indiquée sous forme de largeur spectrale (à mi-hauteur du pic)  $\Delta\lambda$  ou comme largeur spectrale effective  $\Delta\lambda_{\text{eff}}$ . La relation suivante est vérifiée pour un spectre gaussien

$$\Delta\lambda = \sqrt{\ln 4} \cdot \Delta\lambda_{\text{eff}} \approx 1,18 \quad (1.4)$$

$$\text{Ou } \Delta\lambda_{\text{eff}} \approx 0,85 \cdot \Delta\lambda \quad (1.5)$$

Le rayonnement par émission stimulée d'une diode laser est spatialement cohérent, ce qui n'est pas le cas pour une DEL. Comparé à celui de la DEL, le lobe de rayonnement est beaucoup plus étroit et ceci facilite un couplage particulièrement efficace du rayonnement dans la fibre. Le diagramme de rayonnement donne une image du flux lumineux tel qu'il se présente en sortie de composant.

De part sa nature, le diagramme de a diode laser sera plus étroit que celui de la LED.



**Figure 1.15 :** Diagramme de rayonnement

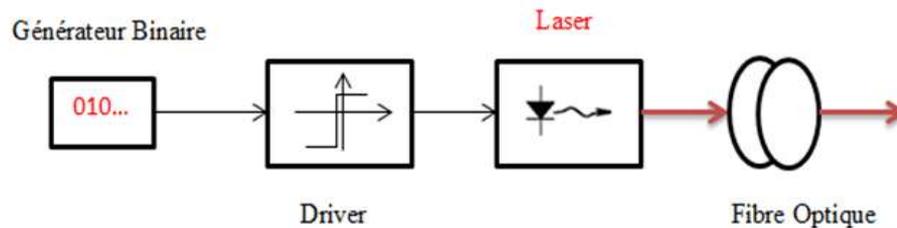
L'angle formé entre les rayons extrêmes et l'axe permet de déterminer l'ouverture numérique du composant. Si cette ouverture numérique est supérieure à celle de la fibre une part du flux ne pourra pas être injectée. Un raisonnement analogue peut être mené en se basant sur les diamètres respectifs de la source et de la fibre.

### 1.3.2 La modulation

Un modulateur, c'est un système capable de modifier les paramètres de la lumière (essentiellement amplitude et /ou phase ; mais cela pourrait être : polarisation, direction de propagation, fréquence, répartition de modes, etc.) en fonction d'un signal de commande. Un modulateur est un système d'interaction. Les interactions entre phénomène physique de nature différente - mécanique (ou élastique), acoustique, magnétique, etc. On peut moduler ces sources de deux manières différentes.

#### 1.3.2.1 Modulation directe

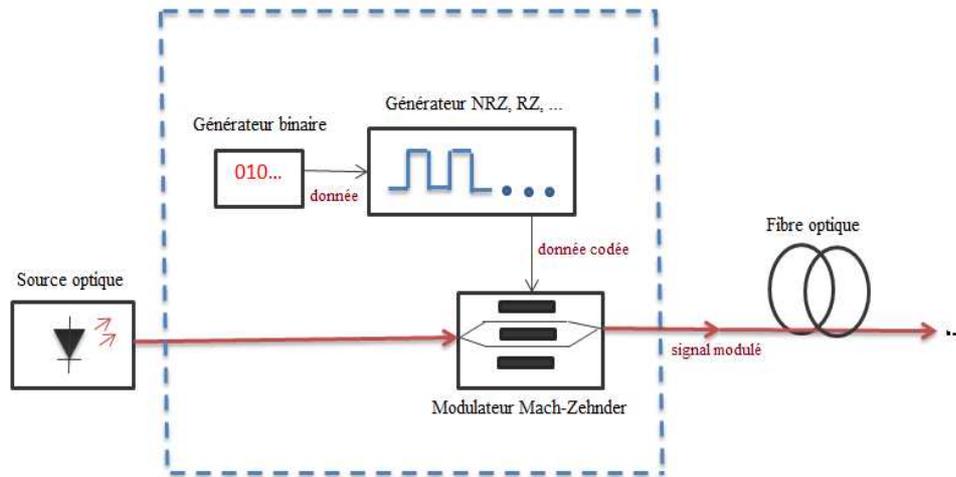
On agit sur le courant de jonction qui provoque l'effet laser. En première approximation, la puissance optique délivrée varie linéairement en fonction du courant. Ce type de modulation provoque une modification dynamique du spectre due à la conversion amplitude fréquence (désignée par le terme anglo-américain de chirp) et du diagramme de rayonnement, avec des effets nuisibles aux grandes vitesses de modulation.



*Figure 1.16 : Synoptique de la modulation directe.*

#### 1.3.2.2 Modulation externe

Le champ émis par la source n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial où l'on peut provoquer une modulation de phase ou d'amplitude. Les modulateurs d'amplitude ne présentent aucune propriété de linéarité mais introduisent beaucoup moins de conversion amplitude fréquence.



*Figure 1.17: Synoptique de la modulation externe.*

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

Pour éviter un chirp trop important et pour pouvoir utiliser des formats de modulation plus variés, il est préférable d'utiliser un modulateur externe. En ce qui concerne les modulateurs d'amplitude, il en existe principalement de deux sortes : les modulateurs à électro-absorption (EAM pour Electro-Absorption Modulator) et les modulateurs Mach-Zehnder (MZM pour Mach-Zehnder Modulator). Il existe aussi des modulateurs d'amplitude (AM pour Amplitude Modulator).

#### **a) Le modulateur à électro-absorption (EAM)**

L'EAM est un composant optique basé sur des matériaux semi-conducteurs, dont la fonction de transfert en intensité dépend de la tension qui leur est appliquée. Elle est maximale lorsque de faibles tensions y sont appliquées, et minimale et à peu près constante à partir d'une certaine valeur de cette tension. Un gros inconvénient des EAM est que leur fonction de transfert en intensité dépend fortement de la longueur d'onde du signal optique. De plus ils présentent également un chirp non négligeable.

### b) Le modulateur Mach-Zehnder (MZM)

Le modulateur Mach-Zehnder est un interféromètre à deux ondes, constitué de deux bras recevant chacun la moitié de la puissance lumineuse initiale. Au niveau de ses bras, un déphasage relatif entre les deux signaux est appliqué, au moyen d'une ou de deux cellules électro-optiques disposées chacune dans un bras. Ce déphasage est converti en variation d'intensité du signal optique par l'interférence entre les signaux déphasés issus des deux bras.

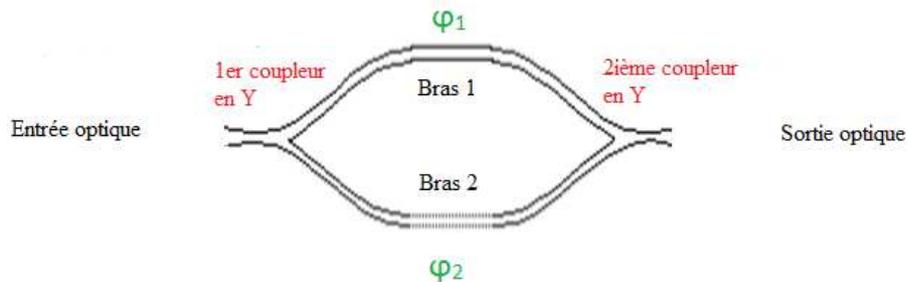


Figure 1.18 : Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder

### c) La modulation d'amplitude (AM)

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement : la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée modulation directe. Ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser [4].

## 1.4 La fibre optique [1][5]

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

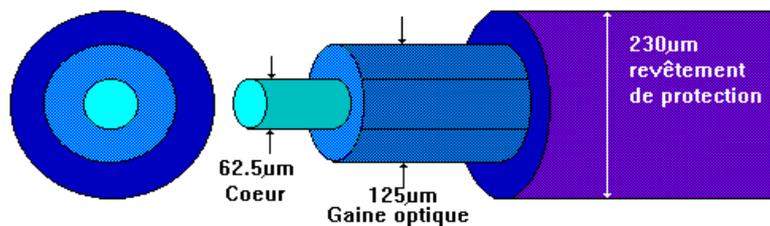
- **Performances de transmission** : Très faible atténuation, très grande bande utilisable, multiplexage possible.
- **Avantages de mise en œuvre** : Très petite taille, grande souplesse, faible poids.
- **Sécurité électrique** : Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous de fortes tensions.

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

- **Avantage économique** : Moindre coût, en comparaison des autres supports.

### 1.4.1 Présentation générale des fibres

Une fibre optique est un guide d'onde optique, de géométrie simple (Figure 1.19), constitué au centre d'un cœur d'indice de réfraction élevé (composé essentiellement de silice pure hautement raffinée et plus ou moins dopée). Autour, nous trouvons la gaine dite optique qui possède un indice de réfraction plus faible avec un diamètre extérieur de l'ordre de 125 $\mu\text{m}$  pour les fibres conventionnelles. Enfin, une gaine dite mécanique est rajoutée pour protéger la fibre optique en assurant une meilleure résistance mécanique.



*Figure 1.19 : Structure d'une fibre optique.*

Généralement, on fabrique la fibre optique avec de la silice, un matériau qui ressemble au verre. La silice est un composé de silicium (Si) et d'oxygène (O) dont la formule chimique est  $\text{SiO}_2$ . On retrouve ce composé dans la nature dans différents minéraux tels que le quartz. Le principe de fabrication d'une fibre optique repose sur l'étirage d'une préforme de verre. Grâce à des techniques complexes, on peut ainsi étirer un tube de verre d'un mètre de long sur 10 cm de diamètre jusqu'à en faire une fibre optique de 150 km de long.

#### 1.4.1.1 Principe de guidage

Nous avons vu ci-dessus qu'une fibre est constituée de deux milieux d'indices optiques différents : le cœur central et la gaine optique d'indice de réfraction noté respectivement  $n_1$  et  $n_2$ , avec  $n_1 > n_2$ .

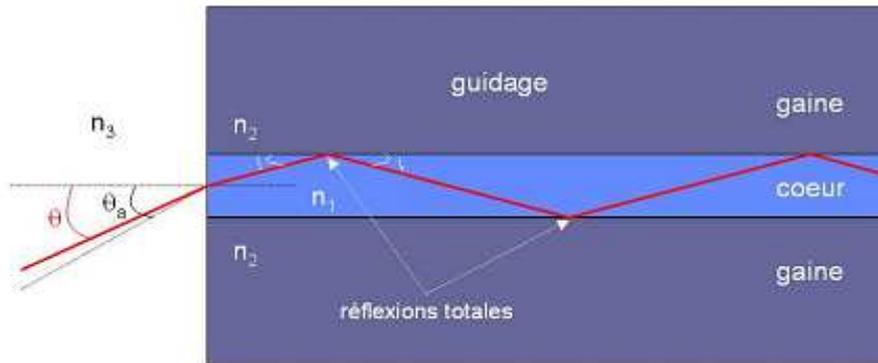
Or il est connu que lorsqu'un rayon lumineux d'incidence  $i$  passe d'un milieu d'indice  $n_1$  à un milieu d'indice  $n_2$ , il est dévié (ou réfracté) avec un angle de déviation  $i_r$  tel que :

$$n_1 \sin i_i = n_2 \sin i_r \quad (1.6)$$

Dans le cas où l'angle d'incidence respecte la condition suivante :

$$i_i > \arcsin(n_2/n_1) \quad (1.7)$$

Alors le rayon n'est plus réfracté mais réfléchi. En rajoutant un deuxième milieu d'indice  $n_2$ , le rayon optique se trouve alors piégé dans le milieu  $n_1$  par des réflexions successives aux interfaces (entre le cœur et la gaine dans une fibre optique) comme le montre la figure suivante :



**Figure 1.20 :** Guidage de la lumière dans le milieu d'indice  $n_1$  par réflexion totale interne.

On parle alors de guidage par réflexion totale interne. Pour les fibres optiques, une grandeur supplémentaire est introduite concernant l'angle d'incidence du rayon sur la face d'entrée de la fibre noté  $q$ . Elle découle de l'équation :

$$\lambda = \frac{1,24}{Eg} \quad (1.8)$$

Et stipule que si l'angle d'incidence  $\theta$  est inférieur à l'angle critique (ou angle d'acceptance) noté  $\theta_a$  et défini par :

$$\theta_a = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.9)$$

Alors le rayon sera uniquement guidé dans le cœur. On définit alors la notion d'ouverture numérique (ON) par la relation (1-10), dans le cas où le milieu d'indice  $n_3$  est l'air

$$ON = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.10)$$

### 1.4.1.2 Les différentes catégories de fibres optiques

Il existe deux grandes familles de fibres optiques : les fibres unimodales et multimodes. Une fibre est dite unimodale si un seul chemin optique est envisageable pour la lumière et à l'inverse, une fibre est dite multimode si plusieurs chemins sont possibles. Un paramètre appelé fréquence réduite et noté  $v$  permet de définir la catégorie dans laquelle se situe la fibre :

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.11)$$

Avec  $a$  le rayon du cœur de la fibre et  $\lambda$  la longueur d'onde

Le critère de sélection est alors très simple : lorsque  $v < 2,405$  la fibre (à saut d'indice) est dite unimodale.

Il existe deux types de fibres : multimode et monomode.

#### a) La fibre multimode

Dans cette famille, nous trouvons deux sous catégories :

- **La fibre à saut d'indice**

C'est la plus "ordinaire". Le cœur a un relatif gros diamètre, par rapport à la longueur d'onde de la lumière (de l'ordre du  $\mu\text{m}$  dans l'infrarouge). Tous les inconvénients vus plus haut se manifestent ici. Observez l'allure de l'impulsion de sortie, comparée à celle de l'impulsion d'entrée. Ce sont bien entendu des informations non quantitatives.

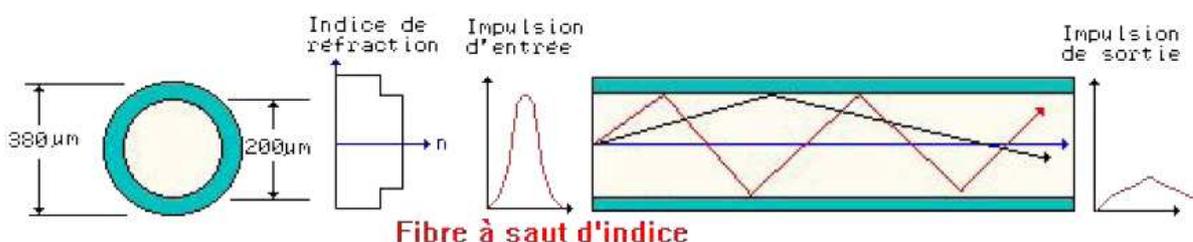
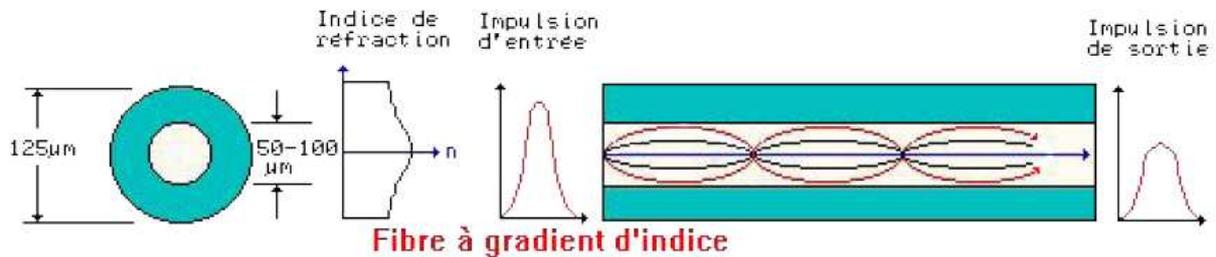


Figure 1.21 : Fibre optique multimode à saut d'indice.

- **Fibre à gradient d'indice**

Dans une fibre optique à gradient d'indice, l'indice de réfraction du cœur n'est pas constant. Il est plutôt maximal au centre de la fibre et diminue progressivement jusqu'à l'interface de la

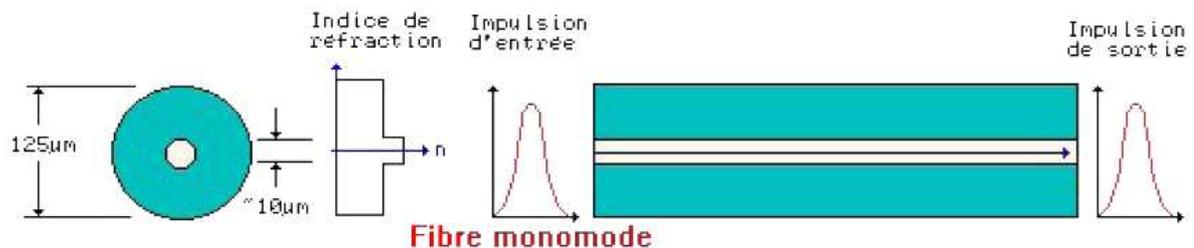
gaine. Ce profil d'indice de réfraction peut être obtenu en variant la concentration en dopant lors de la fabrication de la préforme. Dans une fibre de ce type, la lumière n'est plus réfléchiée à l'interface cœur-gaine, mais est plutôt courbée progressivement lorsqu'elle s'en approche.



*Figure 1.22 : Fibre optique multimode à gradient d'indice.*

### b) Fibre monomode

Dans ce type de fibre, le cœur est beaucoup plus petit par rapport à la gaine que dans les fibres optiques conventionnelles (multimodes). Les fibres monomodes, comme leur nom l'indique d'ailleurs, ne peuvent supporter qu'un seul mode de propagation de la lumière. À cause du très petit diamètre du cœur de la fibre monomode, le transport de la lumière se fait sans réflexion. L'avantage de ce type de fibre est qu'il produit peu de dispersion; une impulsion lumineuse polychromatique transmise dans la fibre n'est alors que très peu déformée.



*Figure 1.23 : Fibre optique monomode.*

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

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

### 1.4.2 L'atténuation

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. Dans le cas de la silice pure, le minimum théorique d'atténuation devrait descendre à 0,14 dB/km vers  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ . De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement.

Les microcourbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour la fibre standard des télécommunications dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement. La Figure (1.24) montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications.

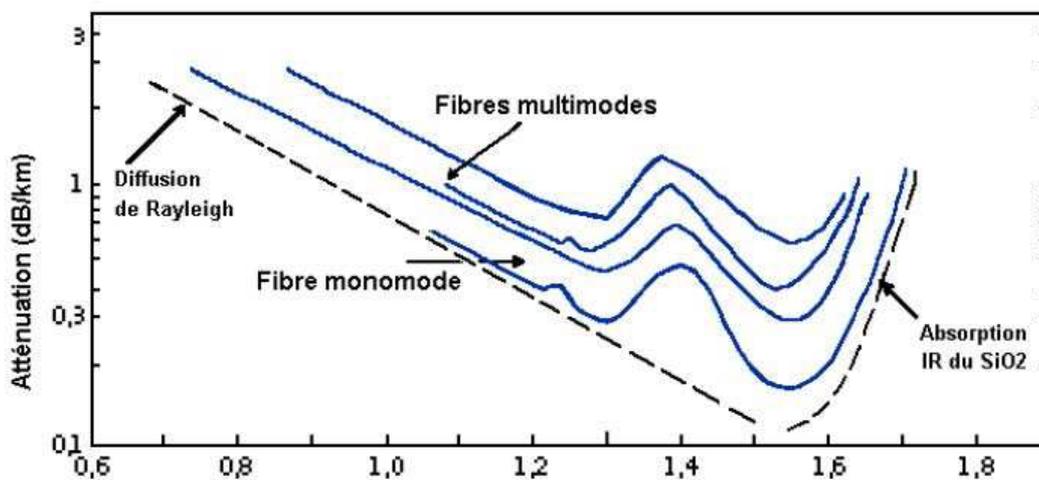


Figure 1.24 : Atténuation spectrale d'une fibre optique.

### 1.4.3 Dispersion

Quand on veut transmettre une impulsion sur une fibre optique, on produit l'impulsion avec un émetteur laser. Cette impulsion n'est pas idéale car elle présente une durée dans le temps. Dans une transmission idéale, on espère avoir à la sortie la même impulsion, mais cette impulsion a une durée plus grande que la durée initiale.

Il y a plusieurs causes pouvant expliquer ce phénomène :

- Dispersion chromatique
- Dispersion intermodale
- Dispersion de mode de polarisation

### 1.4.3.1 La dispersion chromatique [3] [6]

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

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 (1.12)). 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  $\mu\text{m}$ .
- *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 (1.13).

La dispersion du matériau  $D_m$  est donnée par :

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{coeur}}}{d\lambda^2} \quad (1.12)$$

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

La dispersion du guide  $D_g$  est donnée par :

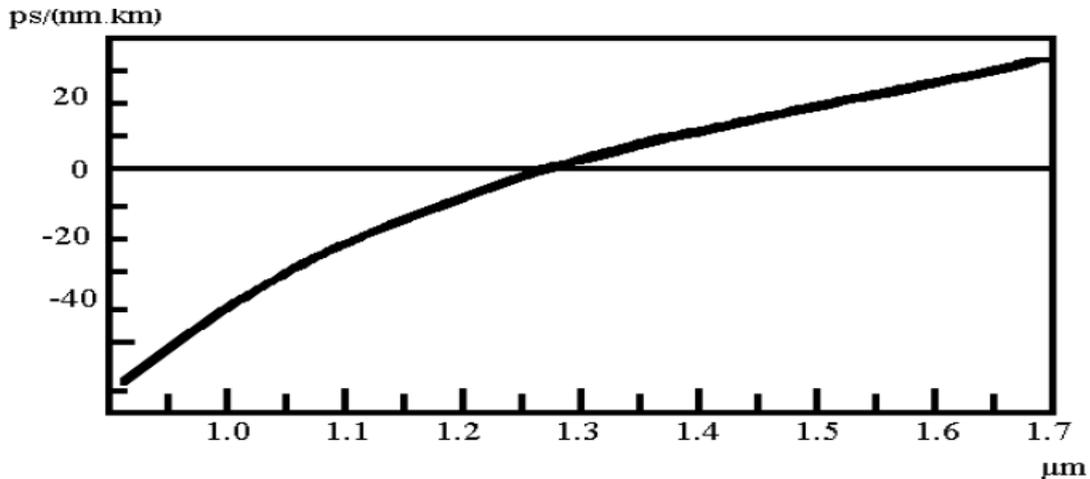
$$D_g \approx -\frac{n_{\text{gaine}} - n_{\text{coeur}}}{c\lambda} \left[ v \frac{\delta^2(bv)}{\delta v^2} \right] \quad (1.13)$$

Avec :

$$v \frac{\delta^2(bv)}{\delta v^2} \approx 0.08 + 0.5439(2.834 - v)^2 \quad (1.14)$$

En fait, la dispersion chromatique  $D$  dans les fibres monomodes est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériel) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion modale).

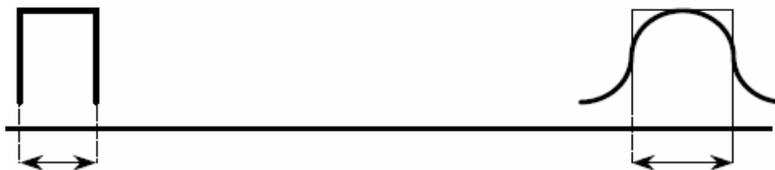
$$D = D_m + D_g \quad (1.15)$$



*Figure 1.25 : Dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde.*

On voit sur la figure 1.25, que la fibre monomode standard G.652 présente une dispersion maximale de 20 ps/(nm.km) à 1550 nm. Dans la bande 1288 à 1359 nm, elle est de 3,5 ps/(nm.km). Ainsi, la capacité de transmission est la plus grande possible pour une longueur d'onde d'environ 1,3 μm. Elle est donc idéale pour cette fenêtre spectrale et permet de transporter de très hauts débits.

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne donc différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques.



*Figure 1.26 : Effet de la dispersion chromatique : le signal qui se propage s'élargit.*

Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre symboles est possible.

Cet élargissement  $\tau$  se calcule ainsi :

$$\tau = D(\text{ps/nm.km}) * L(\text{km}) * \Delta\lambda(\text{nm}) \quad (1.16)$$

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

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

#### **1.4.3.2 Dispersion intermodale**

Dans les fibres multimode quand le signal transmis est composé de différents modes de propagation. Chaque mode de propagation suit un chemin différent dans la fibre, et a un temps de propagation différent. Quand on regarde le signal à la sortie, composé par les signaux transmis sur les différents modes, le signal a agrandi sa longueur temporelle.

Dans les fibres monomode, il n'y a qu'un seul mode de propagation donc il n'aurait aucun effet de dispersion intermodale. Une valeur typique de dispersion intermodale dans une fibre à saut d'indice est d'environ de  $30\text{ns/km}$ .

Dans les fibres à gradient d'indice, on peut faire varier la vitesse du rayon en fonction du chemin pris en changeant la valeur de l'indice sur chaque point de la fibre. Une valeur typique pour ce type de fibres est d'environ de  $60\text{ps/km}$ .

#### **1.4.3.3 Dispersion de mode de polarisation (PMD, Polarization Mode Dispersion) [7]**

En principe, la polarisation, dans une fibre parfaitement circulaire, ne devrait pas évoluer le long de la fibre. On n'observe rien de tel dans la pratique. Un petit tronçon de fibre apparaît généralement comme une lame biréfringente, avec un mode dit rapide et un mode dit lent qui ont des polarisations rectilignes orthogonales. De plus, dans une fibre réelle, cette

biréfringence et la direction des axes propres varient constamment et de manière incontrôlée, et la polarisation devient rapidement imprévisible.

Ce phénomène est dû à la non-symétrie de révolution du profil d'indice dans le cœur de la fibre, non-symétrie intrinsèque à la fabrication de la fibre et/ou extrinsèque lors de la pose de la fibre. Les origines intrinsèques peuvent être une symétrie géométrique circulaire imparfaite de la fibre ou une non-homogénéité de l'indice de la fibre. Les causes extrinsèques peuvent être un écrasement, un étirement, une torsion ou une courbure de la fibre. Ceci induit un effet photo-élastique, d'où une biréfringence et une polarisation variable.

Quand on envoie un signal sur une fibre « biréfringente », sans se soucier de sa polarisation, on excite les deux modes à la fois. Chacun d'entre eux a sa propre vitesse de propagation. Ce décalage des temps de propagation de groupe a pour effet le dédoublement du signal à la sortie de la fibre, et donc un brouillage de l'information (Figure 1.27).

On l'appelle dispersion modale de polarisation (Polarization Mode Dispersion, PMD, en anglo-américain).

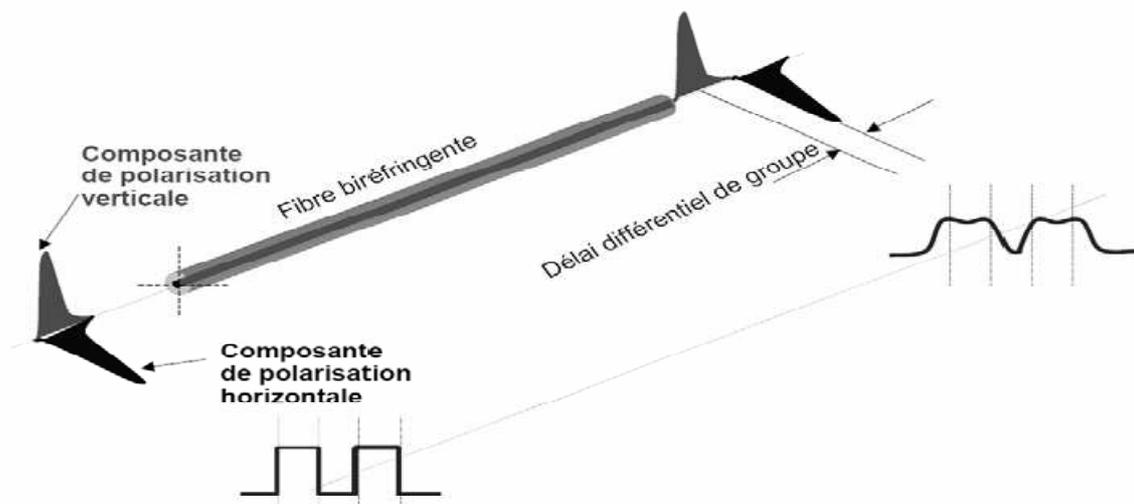


Figure 1.27 : Effet de la PMD au 1er ordre dans les transmissions optiques [8]

#### 1.4.4 Les effets non linéaires dans la fibre optique [9]

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

#### 1.4.4.1 Effet de Kerr

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

$$n = n_0 + n_2 \quad (1.17)$$

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

Cet effet prend une importance considérable dans l'industrie des télécommunications.

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

L'influence de l'effet Kerr sur un signal optique peut s'observer aux travers trois phénomènes différents : l'auto-modulation de phase, ou SPM pour 'Self Phase Modulation', la modulation de phase croisée, ou XPM pour 'Cross Phase Modulation' et le mélange à quatre ondes, ou FWM pour 'Four-Wave Mixing'.

##### a) Automodulation de phase (SPM, Self Phase Modulation)

La variation de l'indice de réfraction en fonction, de la puissance présente localement dans la fibre, induit une modulation de phase parasite qui, sous l'effet de la dispersion chromatique, se traduit par un élargissement de l'impulsion et donc la création d'interférences entre symboles. Elle est bien sûr liée à la puissance injectée.

##### b) Modulation de phase croisée (XPM, Cross Phase Modulation) [7]

L'indice de réfraction vu par le signal se propageant dans un canal est modifié par les impulsions se propage dans les autres canaux. Quand une impulsion est transportée dans un canal, elle subit une modulation de phase et se retrouve, après croisement, affectée d'un déphasage proportionnel à la puissance du signal interférant. Ce déphasage constant n'a pas d'influence ensuite sur la suite de la propagation, sauf dans le cas où le croisement se fait dans un amplificateur de ligne. Dans ce cas en effet, l'impulsion interférant voit sa puissance variée à la traversée de l'amplificateur et le signal perturbé est donc affecté d'un déphasage dépendant du temps, ce qui entraînera une déformation sous l'effet de la dispersion chromatique.

### c) Mélange à quatre ondes (FWM, Four Wave Mixing)

Si deux ondes se propagent dans la fibre, la non-linéarité induit une modulation de phase croisée, ainsi que des phénomènes connus sous le nom de mélange à trois ou quatre ondes, sources d'intermodulation entre les différents canaux d'un système de transmission utilisant plusieurs longueurs d'ondes. Le battement de deux canaux aux fréquences  $f_1$  et  $f_2$  engendre des produits d'intermodulation aux fréquences  $2f_1-f_2$  et  $2f_2-f_1$  dont l'effet est particulièrement néfaste lorsqu'une de ces fréquences est égale à celle d'un autre canal multiplex.

#### 1.4.4.2 L'effet Brillouin (SBS, Stimulated Brillouin Scattering)

L'effet SBS a une puissance de seuil : quand ce seuil est dépassé, un facteur significatif de la lumière transmise est réorienté en arrière vers l'émetteur, onde de Stokes, avec une fréquence inférieure à celle du signal ; le SBS induit un bruit significatif dans le système. L'efficacité de cet effet diminue si le signal est modulé et disparaît pratiquement pour une bande supérieure à 100 GHz. Cet effet impose une limite sur la quantité de puissance optique qui peut être utilement injectée dans une fibre optique.

#### 1.4.4.3 L'effet Raman (SRS, Stimulated Raman Scattering) [15]

L'onde engendrée se propage dans le même sens et elle possède un décalage en fréquence beaucoup plus grand, de l'ordre de 10 THz. Cet effet devient important dès que la largeur spectrale de l'ensemble des signaux transmis est supérieure à quelques nm, ce qui est le cas de l'ensemble des canaux DWDM. Le SRS limite la quantité de la lumière qui peut atteindre le récepteur. Pour un système consistant en N amplificateurs optiques, le seuil du SRS chutera d'un facteur N.

### 1.4.5 Avantages et inconvénients des fibres optiques

Les principaux avantages apportés par la fibre optique sont les suivants :

- Très large bande passante, de l'ordre de 1GHz pour 1km, qui permet le multiplexage sur un même support de très nombreux canaux, comme le téléphone, la télévision, etc.
- Grande légèreté, le poids d'un câble optique par unité de longueur, de l'ordre de quelques grammes de kilomètre, étant environ neuf fois plus faible que celui d'un câble conventionnel.

- Très faible atténuation, qui permet d'envisager un espacement important des points de régénération des signaux transmis. Le pas de régénération est supérieur à 10 km, alors que, sur du câble coaxial, il est de l'ordre de 2 à 3 km.
- Excellente qualité de la transmission. Une liaison par faisceau lumineux est, par exemple, insensible aux orages, aux étincelles et au bruit électromagnétique.
- Absence de rayonnement, ce qui rend son emploi particulièrement intéressant pour les applications militaires.
- Résistance à conditions environnementales adverses.
- Les prix de la fibre reste faible, car la matière de base utilisée, la silice (verre très pur composé de dioxyde de silicium), est très abondante sur la terre ;

Tous les avantages cités permettent de diminuer le coût d'installation. Par exemple, pour les grandes distances, on peut mettre la fibre optique avec les câbles de garde de tours d'haute tension.

L'emploi de la fibre optique présente quelques inconvénients qui permettent d'utiliser avec succès le câble cuivre :

- Difficultés de raccordement aussi bien entre deux fibres qu'entre une fibre et le module d'émission ou réception.
- Dérivations difficiles à réaliser, l'affaiblissement qui en découle dépassant souvent 5 dB. Ces dérivations sont le plus souvent actives et engendrent une panne définitive du réseau en cas de défaillance.
- Les interfaces électriques/optiques ainsi que les connecteurs sont d'un prix élevé.
- Dispersion chromatique (élargissement du signal entre le début et la fin de la fibre).
- Coût d'exploitation élevé.

#### **1.4.6 Quelques applications de la fibre optique [10]**

En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission d'information, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. Avant l'apparition de la fibre optique, tous les réseaux de communication étaient câblés avec des liaisons cuivre ou des câbles coaxiaux. Aujourd'hui, de plus en plus d'entreprises se tournent vers la fibre optique, qui présente de nombreux avantages par rapport au cuivre. Aujourd'hui, elle le remplace dans des milliers de réseaux à travers le monde.

De nos jours, les stations de travail sont connectées entre elles à l'aide de réseaux utilisant la fibre optique car son utilisation permet d'avoir des débits d'information plus rapides et une plus grande sûreté lors des transmissions.

En téléphonie, les câbles coaxiaux sont remplacés peu à peu par des fibres optiques. En effet, elle est plus économique sur longues et courtes distances et le nombre de composants nécessaires est moins important. Son utilisation est particulièrement intéressante pour les applications militaires car elle leur apporte certains avantages : faible poids, taille de la fibre et insensibilité au brouillage et à la détection.

La fibre optique sert également pour examiner des petits objets d'habitude inaccessibles.

Au niveau médical pour les endoscopies, pour la recherche sur le cerveau et le cœur en utilisant des filaments de fibres sans revêtement, l'image est alors visualisée sur un écran de télévision.

La fibre possède des qualités non négligeables comme support de transmission de l'information qui lui ont permis de s'imposer dans les réseaux de télécommunications. Et plusieurs de ses défauts semblent pouvoir se corriger (la dispersion chromatique par une fibre à dispersion contraire, l'atténuation par un amplificateur optique, ...).

Nous allons maintenant présenter les autres modules de la ligne de transmission optique et donner leurs principales propriétés.

## **1.5 Le module de réception**

Les systèmes de transmission par fibre optique nécessitent des récepteurs optiques qui doivent remplir certaines conditions

- Une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement.
- Une grande bande passante (réponse à grande vitesse).
- Bruit minimum (courant d'obscurité le plus faible possible).
- Grande fidélité de reconstitution du signal.
- Bonne stabilité en température.

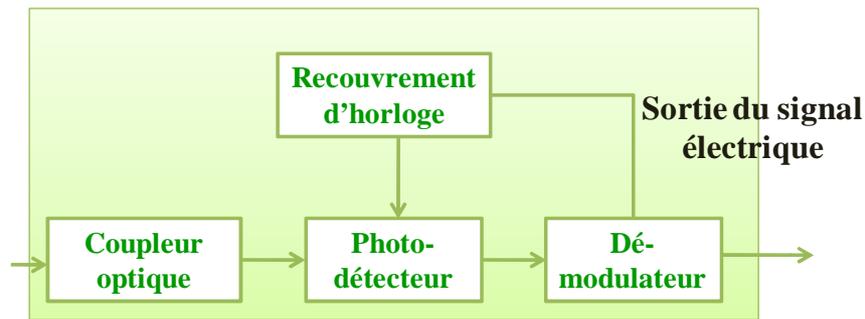


Figure 1.28: Structure bloc d'un récepteur optique.

Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels.

Le module de réception est composé de plusieurs blocs fonctionnels. On y retrouve trois parties (Figure 1.29).

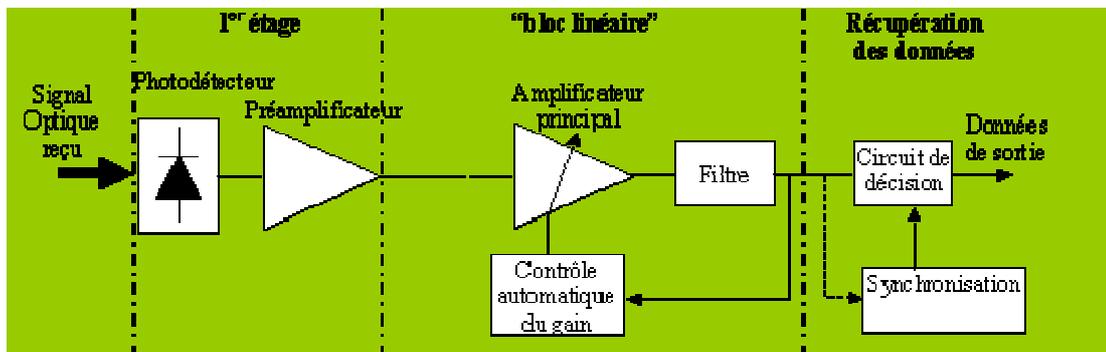


Figure 1.29: Schéma d'un récepteur de données à détection directe.

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

### 1.5.1 Le photodétecteur

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur, il se comporte comme un compteur de photons et un générateur

de courant. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité : il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10 Gbits/s voir même 40 Gbits/s. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit.

Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présente les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles. Nous rappellerons le principe de la photodétection avant d'étudier plus précisément deux exemples de photodétecteur : la photodiode PIN et la photodiode à avalanche (PDA).

### 1.5.1.1 Principe de la photodétection

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

### 1.5.1.2 Caractéristiques d'une photodétection [3] [11]

Tout photon ne subira pas automatiquement la photodétection, tout d'abord, il doit posséder une énergie  $E_{\text{photon}}$  égale ou supérieure à la hauteur de la bande d'énergie interdite  $E_g$  pour faire passer l'électron de la bande de valence à la bande de conduction. Cela implique une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$ , au-delà de laquelle le matériau devient transparent au rayonnement. C est déterminé par l'énergie de bande interdite  $E_g$  du semi-conducteur selon la relation suivante :

$$\lambda_0 = \frac{hc}{E_g} \rightarrow E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \quad (1.18)$$

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

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

- Le rendement quantique ( $\mu$ ) 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 ampères par watt et définissant le rapport de la photo courant  $I_{ph}$  au flux énergétique (ou puissance optique  $P_{opt}$ ) reçue.

Ces grandeurs sont reliées par les relations suivantes, avec  $e$  représentant la charge élémentaire de l'électron,  $h$  la constante de Planck,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $c$  la vitesse de la lumière.

$$\eta = \frac{I_{ph} / e}{P_{opt} / h\nu} \quad (1.19)$$

Et

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \eta \cdot \frac{e\lambda}{hc} \quad (1.20)$$

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

### 1.5.1.3 Les photodiodes PIN [3]

Pour effectuer la photodétection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large. D'où l'intérêt de la photodiode PIN (Figure 1.30).

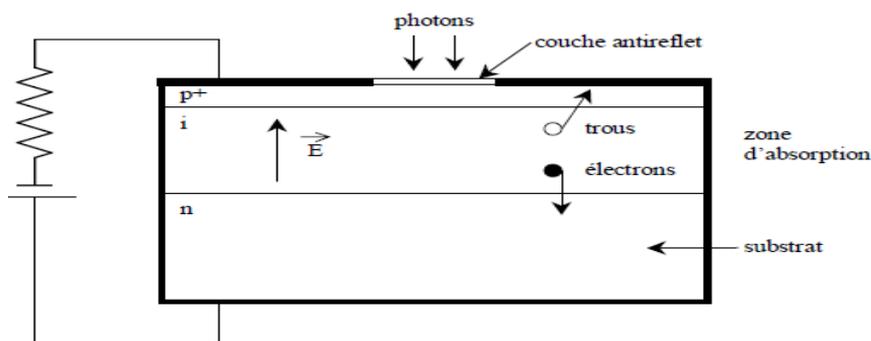


Figure 1.30: La photodiode PIN.

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

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

La sensibilité dépend du rendement, elle varie selon le coefficient d'absorption du matériau, et selon la largeur de la zone intrinsèque

On peut relever un courant d'obscurité,  $I_{obs}$ , qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement. Ce courant ne provient donc pas des photons transmis par la fibre.

Il peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite... L'expression du courant total dans la photodiode est donnée par l'Équation suivante :

$$I_{ph} = S \cdot P_{opt} + I_{obs} \quad (1.21)$$

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

#### **1.5.1.4 Les photodiodes à avalanche APD [3] [12]**

Afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, l'idée d'utiliser le phénomène de multiplication interne pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photo-électron, mais plusieurs a été soulevée, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à une puissance optique incidente donnée.

En faisant croître le champ électrique dans la jonction PIN, 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 (en anglais APD). Le gain de multiplication par ionisation par impact, appelé aussi facteur de multiplication  $M$ , est le rapport entre le nombre moyen de

porteurs secondaires créés par ionisation et le nombre de porteurs primaires provenant de la photodétection. La valeur du courant relatif au nombre de photons absorbés devient :

$$I_{PDA} = M(V) \times S(\lambda) \times P_{opt} \quad (1.22)$$

Le gain augmente avec la différence de potentiel appliquée, mais est limité à une valeur maximale. Si le champ devient trop fort, il y a risque de claquage. Cette valeur limite de tension dépend du matériau et de la structure utilisés.

Tout comme pour les photodiodes PIN, il existe plusieurs structures possibles. Voici à titre d'exemple le cas d'une structure dans le Silicium. Elle résulte d'un compromis entre une zone d'absorption large, et une jonction très abrupte pour obtenir un très fort champ électrique. C'est le principe de la structure pΠpn (Figure 1.31).

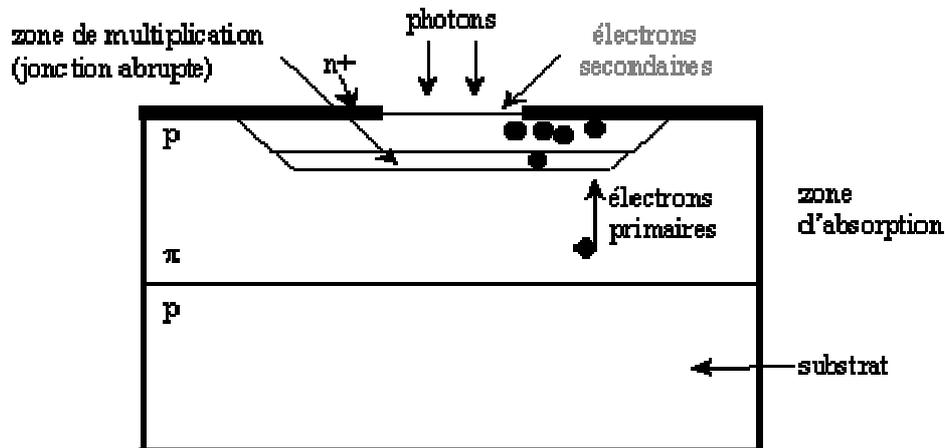


Figure 1.31 : Structure d'une photodiode à avalanche pΠpn.

L'absorption a lieu dans une zone large et peu dopée, dite Π et la multiplication à lieu dans la jonction abrupte pn+. En outre, pour une tension inverse élevée, la zone de charge d'espace s'étend dans la zone Π, dont la résistivité va augmenter avec la tension. Ce principe introduit un effet stabilisateur : le champ électrique et le gain augmentent lentement, ce dernier peut atteindre de fortes valeurs tout en le commandant avec précision. Il est plus facile d'éviter le claquage.

Le courant d'obscurité observé,  $I_{obs}$ , est plus important dans une photodiode en régime d'avalanche, mais il reste en général inférieur au gain, M, multiplié par le courant d'obscurité non multiplié. En effet, toutes les composantes de celui-ci ne subissent pas le phénomène d'avalanche.

Le courant débité par la PDA vaut :

$$I_{ph}' = M \cdot S \cdot P_{opt} + I_{obs}' \quad (1.23)$$

La rapidité est affectée par le phénomène d'avalanche. Elle est donc inférieure à celle des photodiodes PIN, à cause du temps de multiplication, mais reste élevée (de l'ordre de la nanoseconde). Les photodiodes PIN affectent les photodiodes PDA. Il faut noter que le bruit quantique est également multiplié par le gain  $M$ . De plus, chaque porteur primaire ne donne pas naissance à un même nombre  $m$  de porteurs secondaires. Cette fluctuation de  $m$  donne naissance à un bruit supplémentaire.

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

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.

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

Lors d'un front montant de l'horloge, le signal reçu est comparé au seuil de décision.

S'il est supérieur, alors un niveau haut sera détecté et établi, sinon, ce sera un niveau bas.

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

## **1.6 Eléments de transmission par fibre optique**

Le principal élément de la partie transmission est la fibre optique. Elle offre une très grande capacité de transport, plus grande que les convertisseurs optique-électronique et les composants électroniques. D'où l'idée de traiter le plus souvent possible le signal lumineux avant sa conversion électrique. Pour cela, de nombreux progrès ont été réalisés sur les

composants optiques. Nous verrons tout d'abord l'amplification optique et les différents amplificateurs permettant de la réaliser. Seront abordés également les multiplexeurs optiques.

Aujourd'hui, on ne peut plus parler de systèmes de télécommunications sans ces éléments.

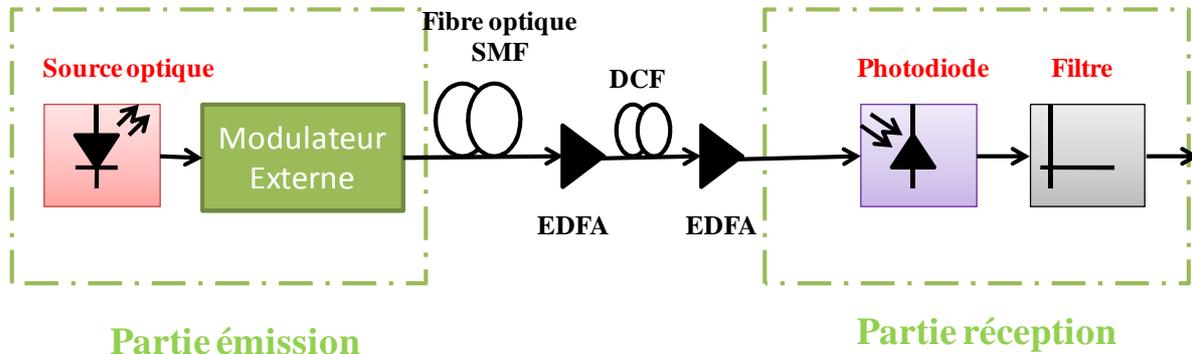


Figure 1.32 : Système de transmission optique

### 1.6.1 Amplification optique [1] [3]

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

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

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

L'amplification optique repose sur le phénomène d'émission stimulée, déjà présentée dans le paragraphe sur les diodes lasers. Le signal est amplifié dans un guide (semi-conducteur ou fibre) grâce à un apport extérieur d'énergie appelé pompage (courant injecté ou source de lumière) qui vient créer une inversion de population. La recombinaison électron-trou peut

ensuite être provoquée par un photon incident, ce qui donne naissance à un deuxième photon de même fréquence, de même phase et même direction. Cette émission est dite stimulée et conduit à une amplification du signal.

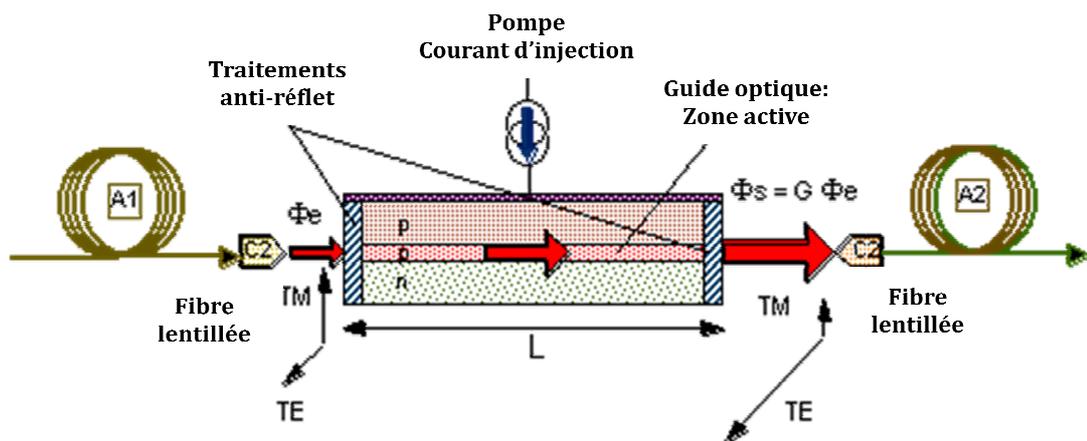
En même temps, la recombinaison peut se faire sans la présence d'un photon incident. Ces photons, émis de façon spontanée, de manière non cohérente, constituent le bruit de l'amplification optique.

L'ensemble des photons, originels ou pas, subissent une série d'amplifications. Les photons spontanés seront aussi amplifiés, ce qui définit la source de bruit appelée ESA (Émission Spontanée Amplifiée).

Deux exemples d'amplificateurs optiques, l'amplificateur à semi conducteur(AOSC) et l'amplificateur à fibre dopée (EDFA) sont traités dans ce qui suit.

### 1.6.1.1 Les amplificateurs à semi-conducteur (AOSC) [13-14]

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 1.33*).



*Figure 1.33: Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur*

La lumière incidente entre dans le circuit, elle 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 AOOSC sont :

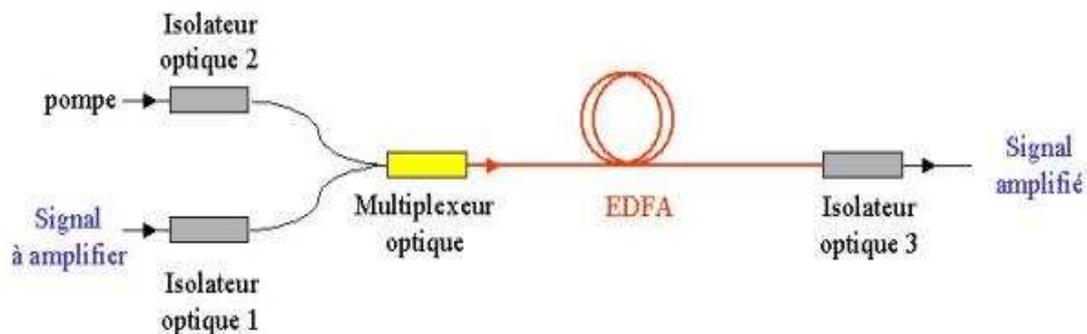
- Un gain élevé (jusqu'à 30 dB) selon le semi-conducteur, la longueur d'onde, le courant à injecter et la puissance du signal incident.
- Une puissance de saturation en sortie autour de 5 - 10 mW.
- Une bande passante optique importante, de l'ordre de 5 THz (soit environ 40 nm autour de 1550 nm).
- Les 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.

### **1.6.1.2 Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA) [11] [13]**

Le milieu amplificateur est cette fois-ci le cœur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terre rare. Pour que la fibre ne soit pas absorbante, mais amplificatrice, il faut l'associer à un pompage optique. Un multiplexeur permet de coupler le flux lumineux puissant provenant d'une diode laser de pompe et le signal à l'intérieur de la fibre. Les longueurs d'onde de pompe doivent permettre des transitions vers les états excités des ions de terre rare et créer l'inversion de polarisation.

L'ensemble module de pompe, multiplexeur et fibre dopée forme l'amplificateur le plus rudimentaire. La longueur de fibre est généralement comprise entre 10 et 20 mètres. On parle alors d'Amplificateur à Fibre Dopée à l'Erbium (AFDE ou EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier en anglo-américain). 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées à l'EDFA. Des diodes lasers à semi-conducteur sont disponibles à ces longueurs d'onde (lasers en AlGaAs pour le 980 nm et lasers en InGaAsP pour le 1480 nm). Le multiplexeur optique, sélectif en longueur d'onde, doit présenter une perte d'insertion faible à ces deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. Des isolateurs présents à chaque extrémité assurent aussi la stabilité en bloquant tous les faisceaux lumineux

susceptibles de revenir en aval. Le signal de pompe peut être couplé dans la fibre en co-propagation (mêmes sens pour le signal et le signal de pompe) afin de réduire le facteur de bruit ou en contre-propagation (sens opposés du signal de pompe sur le signal utile) ; favorisant ainsi une plus forte puissance de saturation. Mais afin d'augmenter et uniformiser dans la fibre dopée l'inversion de polarisation et donc l'amplification du signal, un double pompage aux deux extrémités peut également être réalisé. La figure 1.34 représente la configuration d'un de ces amplificateurs à fibre dopée.



*Figure 1.34: Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec pompage optique.*

L'amplificateur à semi-conducteur n'apparaît que très peu dans un système de transmission, car il présente aujourd'hui des caractéristiques assez peu favorables, au regard des EDFA. On notera cependant qu'il est le meilleur candidat à  $1,3 \mu\text{m}$ . De plus, il se prête à l'intégration monolithique, ce qui est difficilement réalisable avec les EDFA.

L'apparition des amplificateurs dopés à l'Erbium a néanmoins eu des conséquences fondamentales. Ils ont permis de fabriquer un milieu de propagation sans perte sur une très grande distance dans les systèmes de transmission travaillant à  $1,55 \mu\text{m}$ . En les insérant périodiquement, ils trouvent leur application dans les liaisons sous-marines. Ils introduisent de plus faibles pertes d'insertion, une faible distorsion du signal, un gain plus important ; et ils sont insensibles à la polarisation de la lumière incidente contrairement aux AOSC. Ceci conduit à préférer les EDFA. Leur plus gros défaut est leur limite à amplifier uniquement autour de  $1550 \text{ nm}$ .

### 1.6.2 Fibre compensatrice de dispersion DCF (Dispersion Compensating Fiber)

Ce sont des fibres qui sont conçues pour avoir de fortes dispersions négatives grâce à des modifications de leurs paramètres optogéométriques.

Par design du profil d'indice de la fibre, il est possible d'ajuster la dispersion du guide et d'obtenir ainsi une fibre à dispersion négative (jusqu'à  $-200$  ps/(nm.km)), qui servira en fibre compensatrice de dispersion DCF. Cette technique est considérée comme meilleure solution permettant de minimiser les pénalités introduites par la dispersion chromatique sur une large bande de longueurs d'onde. Et c'est cette solution qui sera utilisée pour notre étude. Elle consiste alors à introduire un tronçon de longueur adapté de cette fibre dont la dispersion est de signe opposé par rapport à celle de la fibre de ligne, mais il n'est pas possible de ramener la dispersion chromatique cumulée à zéro périodiquement simultanément sur toute une bande de plusieurs nanomètres en ajoutant simplement une seule et même valeur négative.

La DCF est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux éléments extérieurs, son avantage majeur est son caractère large bande, mais elle présente aussi des inconvénients comme les pertes linéiques non négligeables.

### **1.6.3 Les isolateurs**

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

Les isolateurs sont également utilisés dans les amplificateurs optiques à fibre dopée afin de les empêcher de résonner et de se transformer en lasers s'il y a réflexion.

### **1.6.4 Les coupleurs**

Dans les réseaux de fibres optiques, les coupleurs permettent de distribuer le signal optique vers plusieurs fibres ou inversement, acheminer le signal venant de plusieurs fibres vers une seule. Le principe de base est celui du couplage par onde évanescente entre deux fibres dont les cœurs sont très proches. Le champ électromagnétique s'étend au delà des cœurs. De ce fait, la lumière qui se propage dans un guide sent la présence de l'autre guide et se transfère progressivement dans l'autre guide. Si les guides sont identiques, la totalité de la lumière

passer dans le second guide après une longueur d'interaction  $L_{inter}$ . Si cette région d'interaction est supérieure à  $L_{inter}$ , la lumière repasse dans le premier guide.

## 1.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la synthèse bibliographique des systèmes de transmission par fibre optique.

Une description détaillée de tous les composants présents dans un système de transmission sur fibre optique a été présentée. Cette présentation a permis d'établir le cahier des charges des composants à utiliser pour une liaison optique d'un réseau structurant. Le laser et les caractéristiques du signal émis ont été décrits en détail.

Les fibres optiques possèdent de nombreuses qualités pour transmettre une grande quantité d'informations sur de longues distances. Plusieurs de leurs défauts ont été énumérés (par exemple la dispersion chromatique) et des solutions sont proposées pour les corriger (fibres de compensation).

Le principe de la photodétection a également été rappelé, avec une description de deux exemples de photodétecteurs.



# Chapitre 2

Etude de l'effet du format de  
Transmission



## 2.1 Introduction

La technologie optique de communication par fibre est devenue l'une des principaux piliers de la communication moderne. Elle joue un rôle important dans les réseaux de télécommunications modernes.

La communication par fibre optique, ces dernières années, se développe rapidement et avec une vaste gamme d'application. Il devient la dénotation de la nouvelle révolution technologique dans le monde. Comme une boîte de transmission principale d'outils d'informations diverses, elle est d'une grande importance dans l'avenir de la société de l'information. Maintenant, les systèmes de communication optiques sont de plus en plus complexes. Ces systèmes comprennent souvent des canaux de signaux multiples, la structure de topologie différente, les dispositifs non linéaires et les sources de bruit non-gaussien, ce qui rend leur conception et d'analyse très complexes et nécessitent une haute intensité de travail.

La simulation est une étape importante dans l'étude et la mise en œuvre de systèmes réalisables de transmission. En effet elle permet d'une part la validation des études théoriques et d'autre part l'optimisation du système par l'analyse de l'impact des divers paramètres sur les performances. Afin de pouvoir étudier des liaisons par fibre optique de longue distance, en point à point, il est nécessaire de pouvoir les simuler à l'aide d'un logiciel approprié.

Le logiciel de simulation qui a été retenu, pour cette étude est le logiciel Optisystem qui vient résoudre ces problèmes tant par la simplicité de son utilisation que par la grande variété de sa bibliothèque de composants. Afin d'étudier et d'évaluer les performances du système avec la liaison SMF 40 Gbit/s pour les télécommunications optiques haut débit, nous allons exposer des différentes simulations effectuées pour étudier avec variation des critères de qualité en modifiant les paramètres essentiels de la chaîne de transmission.

## 2.2 Présentation du logiciel

Optisystem a été développé par OPTIWAVE entreprise afin de répondre aux exigences des concepteurs de systèmes et des chercheurs. OptiSystem Design est un paquet destiné à la simulation des communications optiques en mode simulation, ce logiciel innovateur permet la conception, le test et l'optimisation virtuelle des liaisons optiques de tous types [20].

OptiSystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale.

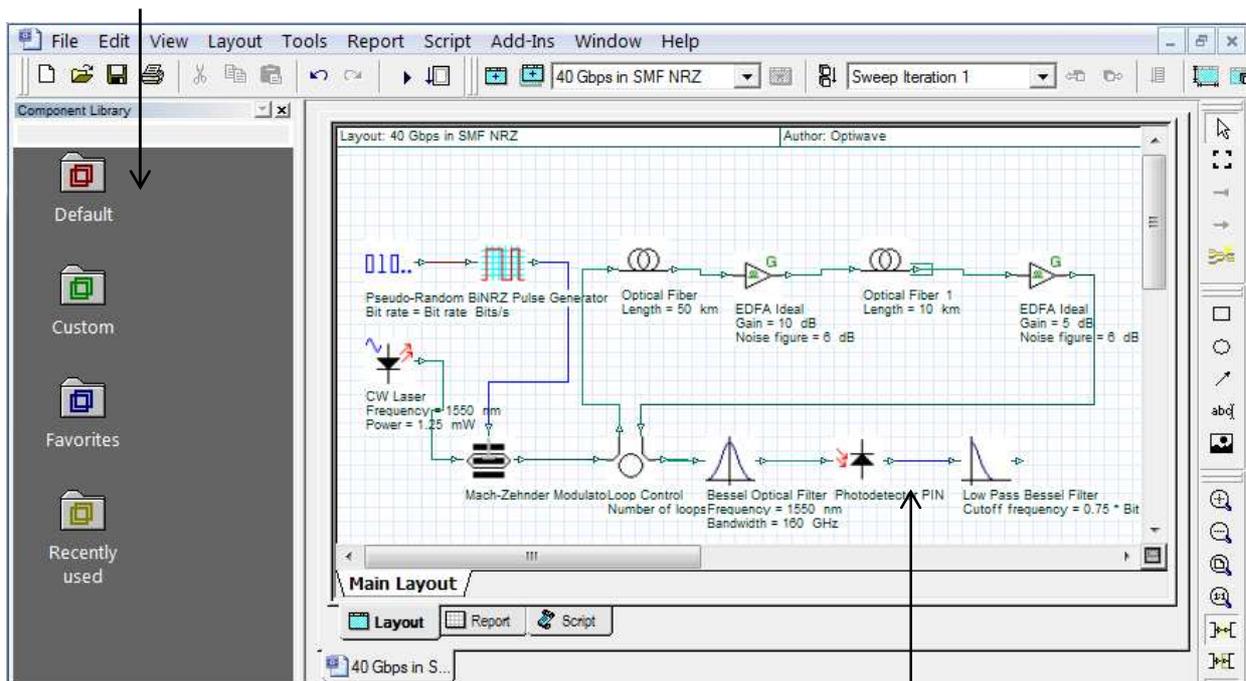
Il permet de :

- Concevoir un system.
- Connecter les composants
- Modifier les paramètres des composants.

OptiSystem contient une fenêtre principale répartit en plusieurs parties :

- Bibliothèque : une base de données de divers composants existants.
- Editeur du layout : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cour [18].

### *Bibliothèque*



### *Editeur du Layout*

**Figure 2.1** : La fenêtre principale du logiciel

Optisystem est une application complète pour établir des simulations et des tests de montages optiques, en effet Optisystem comprend une bibliothèque riche de composants, tel que les fibres et des appareillages de mesures paramétrables.

Optisystem est une application Xwindows, elle comprend essentiellement une fenêtre principale réparti en plusieurs parties :

- Vue d'ensemble du projet : permet la visualisation miniature du lay-out en cours d'édition.
- Bibliothèque : une base de données de divers composants existants.
- Editeur du lay-out : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.
- Groupe de paramétrage : permet le paramétrage global du projet en cours et la simulation.
- Fenêtre de sortie : lors de la simulation, cette fenêtre permet la visualisation des diverses phases de la simulation ou des messages d'erreurs [16].

### **2.3 Analyse de la chaine de transmission**

Différents paramètres sont utilisés dans la conception et l'analyse d'un lien donné, pour définir la qualité d'une transmission optique. Ces paramètres définissent l'efficacité et la qualité de la transmission. Les trois principaux critères de qualité d'un signal transmis sont le diagramme de l'œil, le taux d'erreur binaire BER et le facteur de qualité Q. Ces trois critères sont décrits dans la suite.

#### **2.3.1 Diagramme de l'œil**

On utilise souvent en télécommunications la méthode dite du diagramme de l'œil pour décrire la dégradation par le bruit et la dispersion d'un signal numérique. Une séquence aléatoire de bits est visualisée sur un oscilloscope en mode d'accumulation en fonction du temps, la somme de tous ces signaux aboutissent à une forme de signal appelé l'œil.

Sans bruit, les traces se superposent exactement, quand le bruit augmente les signaux varient et la trace s'épaissit, les transitions dans le temps deviennent aussi moins définies à cause de la gigue qui augmente, on dit que « l'œil se ferme ».

### 2.3.2 Taux d'erreur binaire « TEB »

Si le Diagramme de l'œil est la façon la plus visuelle de juger la qualité d'un signal numérique, alors le critère qui quantifie le mieux cette qualité de transmission est le Taux d'Erreur Binaire (TEB, ou BER pour Bit Error Rate) [17].

La qualité des transmissions numériques est évaluée en mesurant le taux d'erreurs par bit, le TEB. Des appareils spécialisés engendrent des séquences aléatoires et comparent le signal en sortie de la liaison optique avec le signal d'entrée. Le TEB est obtenu en divisant le nombre d'erreurs par le nombre total de bits. Compte tenu de la haute qualité des transmissions optiques, on spécifie des TEB jusqu'à  $10^{-12}$  ce qui correspond à un bit erroné pour mille milliards de bits transmis, il faut donc effectuer les mesures pendant un intervalle de temps suffisamment long afin d'obtenir une mesure fiable. Par exemple on emploie presque deux minutes pour des mesures à un débit de 10 Gb/s [21].

Il se définit comme suit :

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bit erronés}}{\text{Nombre de bit transmis}} \quad (2.1)$$

Le TEB habituellement accepté pour une transmission de bonne qualité est inférieur à  $10^{-9}$  voir inférieur à  $10^{-12}$  [21].

### 2.3.3 Facteur de qualité Q

La méthode suivante permet de quantifier et d'évaluer le signal sans avoir à compter directement les erreurs, elle s'appuie sur l'hypothèse gaussienne de la distribution de bruit d'amplitude pour chaque symbole. Le bruit provient essentiellement de l'émission spontanée amplifiée par l'amplificateur optique. Si l'on considère que le bruit est gaussien, et que l'on connaît les intensités moyennes  $I_0$  et  $I_1$  et les variances  $\sigma_0$  et  $\sigma_1$  des niveaux '0' et des niveaux '1' que l'on veut détecter, on peut en déduire un taux d'erreur. Et lorsque les '0' et les '1' sont équiprobables, le taux d'erreur est donné par :

$$Q = (V_1 - V_0) / (\sigma_1 - \sigma_0) \quad (2.2)$$

Dans la pratique on choisit un seuil de discrimination  $V_T$  afin de distinguer le « 1 » et le « 0 » ; ce seuil est choisi au point moyen et correspond à celui qui donne le TEB avec des « 0 » et « 1 » équiprobables ( $\sigma_1 = \sigma_0 = \sigma$ ).

On aura:

$$Q = (V_1 - V_0) / 2\sigma = (V_T - V_0) / \sigma \quad (2.3)$$

Dans l'hypothèse où la distribution de puissance des symboles est gaussienne, le facteur de qualité est relié au taux d'erreur binaire (TEB) par la relation suivante :

$$TEB = \frac{1}{2} [\operatorname{erfc}(Q/\sqrt{2})] \quad (2.4)$$

Où **erfc** : fonction d'erreur complémentaire.

$$\operatorname{Erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-y^2) dy \quad (2.5)$$

On définit aussi le facteur Q en décibel par :

$$TEB = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} [I_d - I_0/\sqrt{2}] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} [I_1 - I_d/\sqrt{2}] \quad (2.6)$$

' $I_d$ ' le seuil de décision, c'est-à-dire le seuil au-delà duquel on considère qu'il s'agit d'un '1' ou d'un '0'.

Le facteur Q est défini par :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 - \sigma_1} \quad (2.7)$$

## 2.4 Liaison de référence

Notre chaîne de transmission est constituée de trois principales parties, la partie émission est composée principalement d'un laser qui fonctionne en régime continu (CW-Laser) et d'un modulateur externe. Le support de transmission constituée d'une fibre optique monomode SMF, une fibre compensatrice (DCF) et des amplificateurs (EDFA) et la partie réception est constitué d'une photodiode PIN et d'un filtre BESSEL (Figure 2.2).

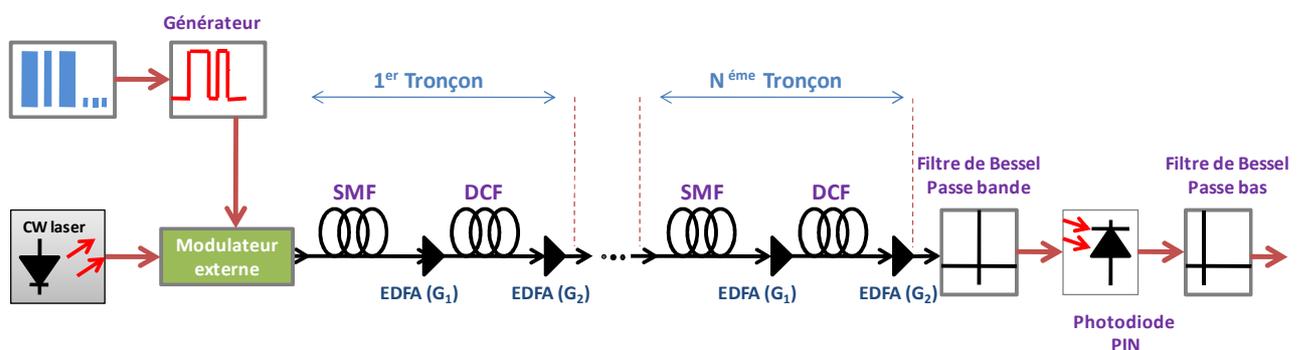


Figure 2.2 : Schéma de liaison de référence

### 2.4.1. La partie émission

Le module d'émission a pour objectif d'inscrire l'information électrique sur un signal lumineux. Et pour un débit de 40 Gbit/s, cette partie est composée principalement d'un laser qui fonctionnent en régime continu (CW-Laser), de modulateur externe composés de générateurs binaires (PRBS ou Pseudo-Random Binary Sequence), de générateurs NRZ (voir RZ ou gaussien) et d'un modulateur Mach-Zehnder (voir figure 2.3).

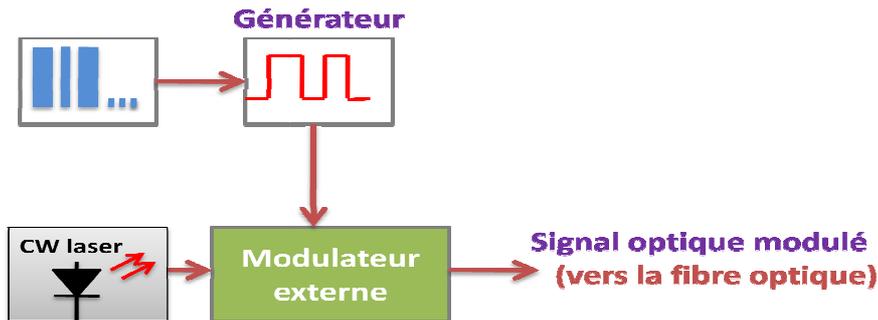


Figure 2.3: la partie émission

Dans le CW-Laser, la cavité considérée est constituée d'un amplificateur à fibre dopé à l'erbium rebouclé sur lui-même grâce à un coupleur (de puissance), supposé indépendant de la longueur d'onde. Le laser utilisé dans notre simulation a une fréquence de 1550 nm et une puissance initiale de 1.25 mW.

#### a) Générateur binaire PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence)

C'est un générateur qui produit une suite de longueur connue de « 0 » et de « 1 » logique. Il est dit aléatoire car c'est une suite arbitraire. Cependant, lorsque la suite arrive à son terme, le générateur ne s'arrête pas de fonctionner. La séquence déjà transmise est à nouveau reproduite, d'où le qualificatif de pseudo-aléatoire.

#### b) Générateur NRZ vs générateur RZ

Les deux principaux formats de modulation d'amplitude sont le format RZ (Return-to-Zéro) et le format NRZ (Non-Return-to-Zéro). Ils sont schématisés sur la Figure 2.5. Comme son nom l'indique, pour le format RZ, l'impulsion associée à la donnée « 1 » est de durée nettement inférieure au temps symbole, la donnée « 0 » à l'absence de signal. C'est un format impulsionnel.

Pour le format NRZ, le signal transmis dans chaque temps bit est continu et si deux symboles '1' se succèdent, le signal reste à son niveau haut. Le format RZ a été utilisé dans un premier temps.

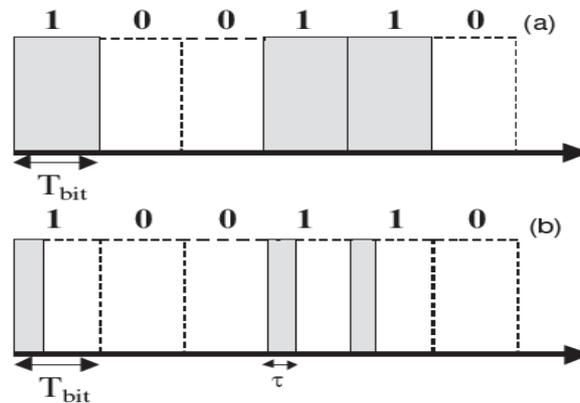


Figure 2.4 : Format NRZ (a), format RZ (b) [19]

### 2.4.2. La partie réception

Cette partie est composée d'un filtre Bessel passe bande avant une photodiode PIN et un filtre de Bessel passe bas (Figure 2.5).

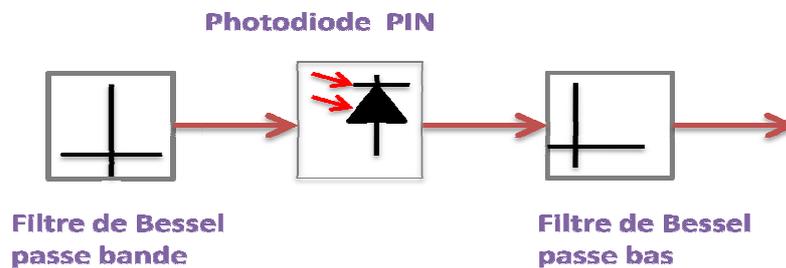


Figure 2.5: la partie réception

#### 2.4.2.1. Filtre de Bessel

Le terme Bessel désigne un type de réponse du filtre et non un type. Il dispose d'un retard de groupe à plat dans la bande passante.

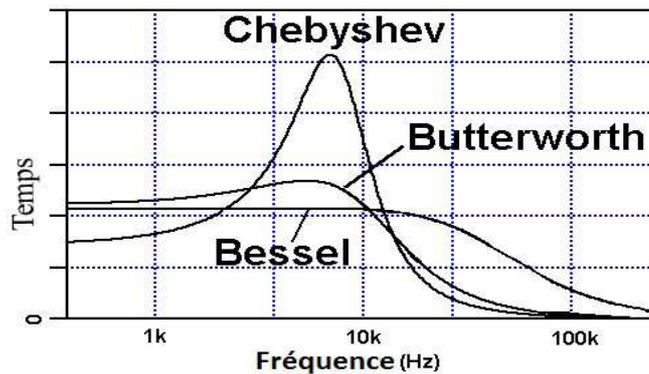


Figure 2.6 : Illustration de quelques réponses de filtres

C'est la caractéristique des filtres de Bessel qui les rend précieux pour les concepteurs numériques. Très peu de filtres sont conçus avec des ondes carrées à l'esprit. La plupart du temps, les signaux filtrés sont des ondes sinusoïdales, ou suffisamment proche pour que l'effet des harmoniques peuvent être ignorés.

La caractéristique du filtre est optimisée pour la phase. En effet, cette caractéristique permet d'obtenir un déphasage pratiquement linéaire pour les fréquences à l'intérieur de la bande passante.

## 2.5 Résultats de simulation et interprétations

Nous allons exposer des différentes simulations effectuées avec le système en modifiant les paramètres essentiels pour étudier les différents critères de qualité.

Nous avons choisit d'évaluer les performances du système avec le facteur de qualité  $Q$ . Sachant que les normes fixées dans le domaine des télécommunications demandent, pour maintenir la qualité de transmission, un facteur  $Q$  supérieur à 6 ce qui correspond à un taux d'erreur binaire inférieur à  $10^{-9}$ .

### 2.5.1 Choix du code du générateur

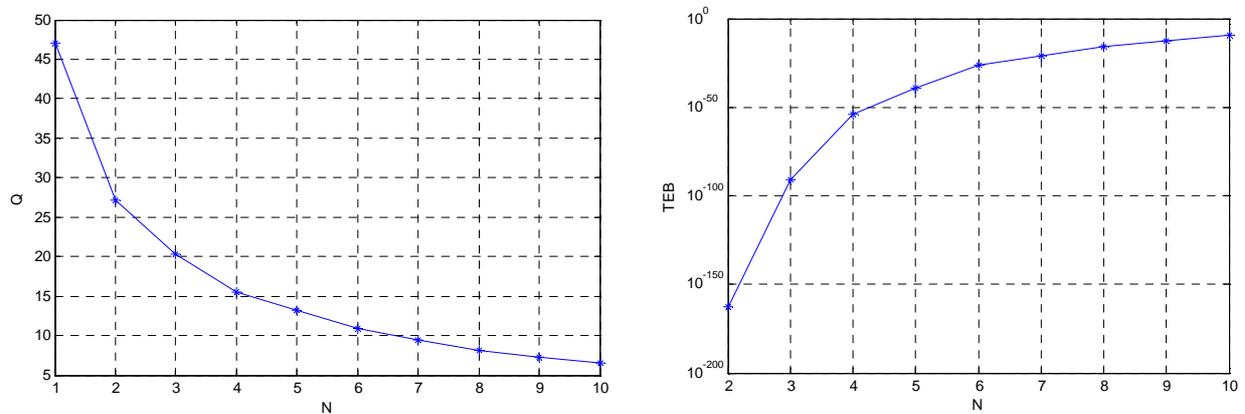
Dans cette partie on cherche le meilleur générateur possible pour avoir un bon facteur de qualité tout en conservant à la réception la forme du signal émis.

#### 2.5.1.1 Effet de variation du nombre de tronçons

Les mesures sont faites en variant le nombre de tronçons ( $N$ ), pour les différents générateur ; RZ, NRZ et Gaussien.

La longueur de la fibre SMF étant fixée à 50 km et le débit par canal est à 40 Gbits/s.

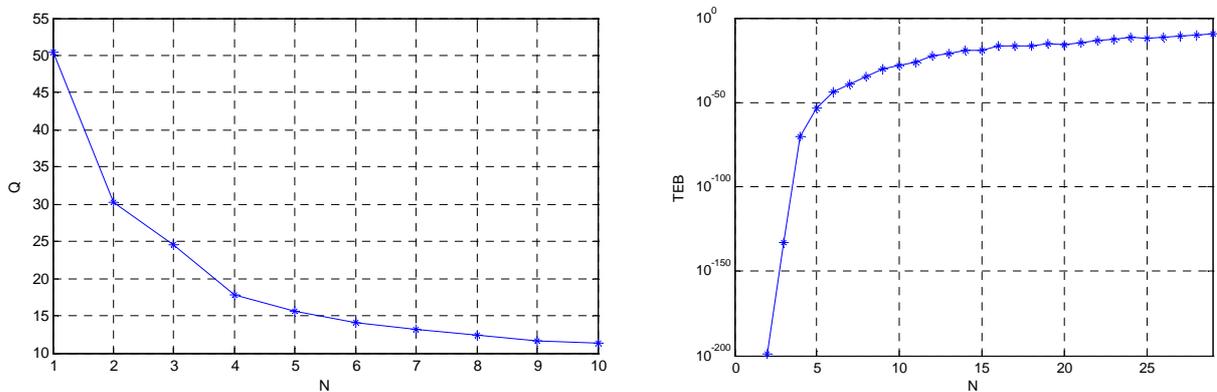
Pour un générateur NRZ, La figure 2.7 illustre la variation que le subit le facteur de qualité et du le taux d'erreur binaire en fonction du nombre de tronçons.



**Figure 2.7 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons N (NRZ)

On constate que la qualité se détériore avec le nombre de tronçon, le nombre de tronçon maximal qu'on peut utiliser est 8, ce qui donne un facteur qualité de 9.48, dans ce cas, la distance totale entre l'émetteur et le récepteur est de 400 km.

La figure (2.8) présente l'impact de l'augmentation du nombre de tronçon sur la chaîne de transmission, dans le cas RZ.



**Figure 2.8:** Facteur de qualité et TEB en fonction de nombres de tronçons (RZ).

Le facteur de qualité se dégrade au fur et à mesure que le nombre de tronçon augmente. On peut atteindre un facteur de qualité égal à 7.20 et un taux d'erreur binaire de l'ordre de  $10^{-12}$  avec un nombre de tronçons égal à 11.

La figure (2.9) indique les variations du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction de nombre de tronçons de la chaîne de transmission pour un générateur gaussien.

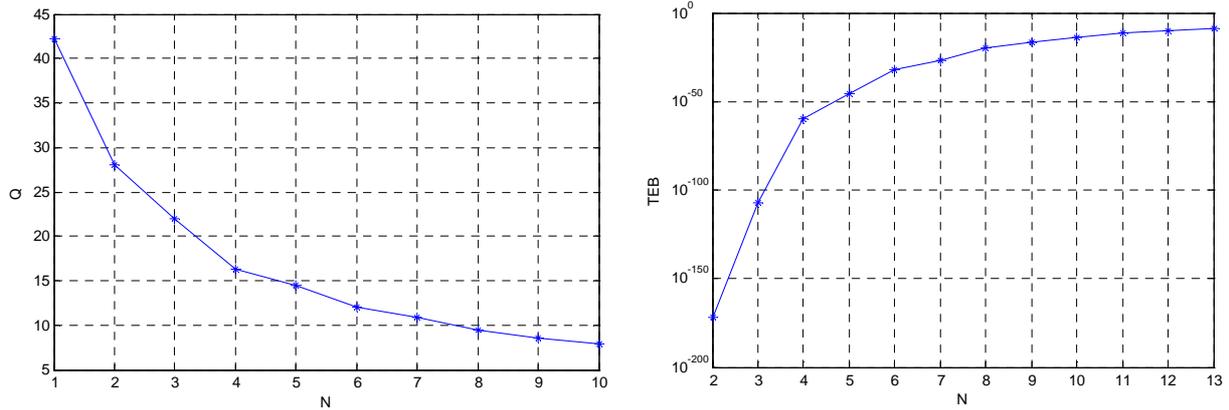


Figure 2.9 : Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons (Gaussien).

La même remarque que pour RZ et NRZ, à savoir une dégradation de la qualité de transmission pour avoir un nombre optimal de 10 pour  $Q= 7.53081$ .

Les figures 2.10 et 2.11 présentent une étude comparative entre RZ, NRZ et code gaussien en faisant varier le nombre de tronçons.

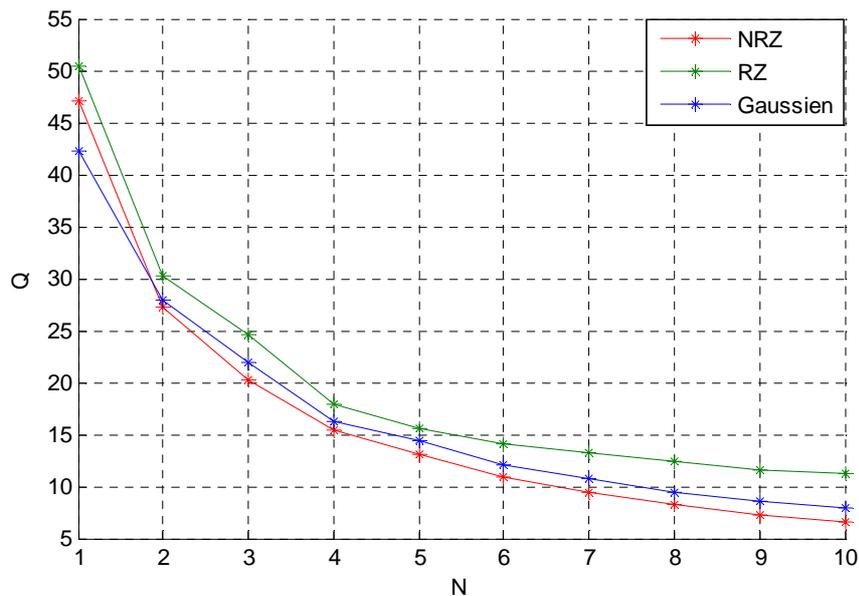
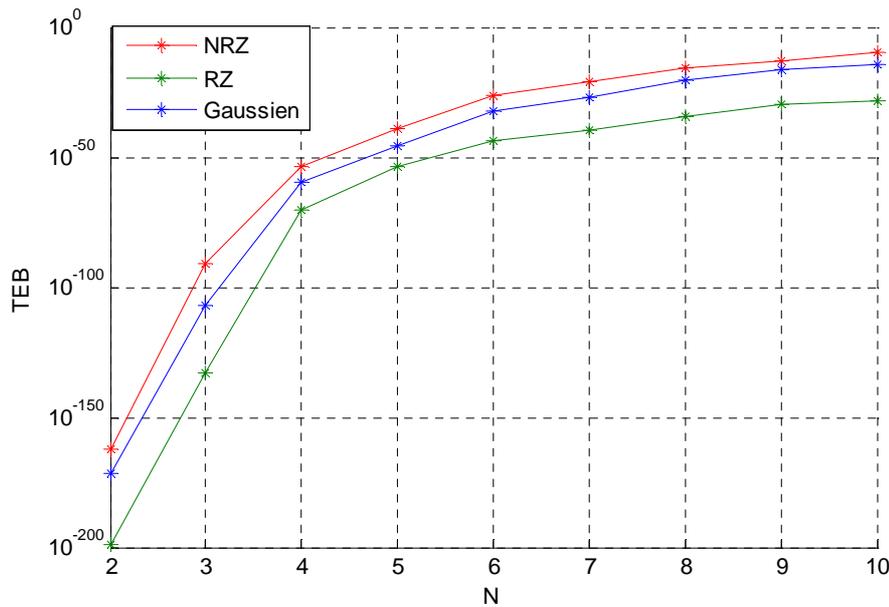


Figure 2.10: Facteur de qualité en fonction de nombres de tronçons (Générateurs RZ, NRZ, et Gaussien).



**Figure 2.11** : TEB en fonction de nombres de tronçons (Générateurs RZ, NRZ, et Gaussien).

La première remarque est que le meilleur résultat est obtenu avec RZ. Une deuxième remarque concerne l'allure de la courbe du facteur de qualité, qui est inversement proportionnelle par rapport au nombre de tronçon, ce qui est normale, sachant que l'augmentation du nombre de tronçon implique l'augmentation de la distance que parcourt l'onde lumineuse, due aux pertes linéaire et non linéaire accumulés, la qualité du signal reçu se dégrade.

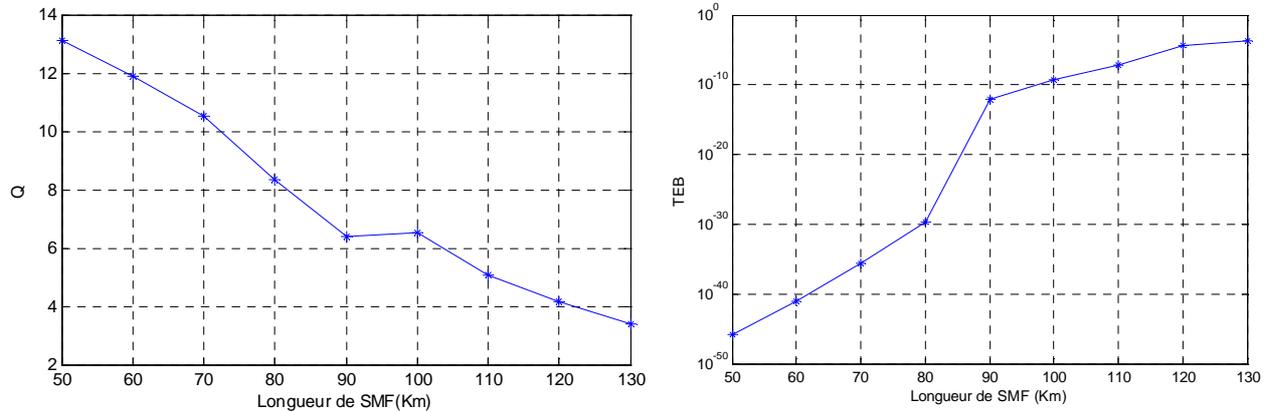
Une dernière remarque concerne le nombre de tronçons maximal qu'on peut atteindre, qui est de l'ordre de 10 pour RZ, de 9 pour NRZ et de 9 pour signal gaussien.

### 2.5.1.2 Effet de la variation de la longueur de la fibre SMF

Nous allons chercher la longueur optimale de la fibre optique en précisons le nombre de tronçons. On s'intéresse à la variation de la longueur de la fibre optique monomode SMF dans 3 cas différents : générateur RZ, générateur NRZ et générateur gaussien en insérant un modulateur de Mach-Zehnder et une diode laser d'une longueur d'onde de 1550nm et d'une puissance de 1.25mw, le débit étant fixé à 40 Gbit/s.

Dans ce qui suit nous allons varier la longueur de la fibre monomode, le nombre de tronçons étant fixé à 5 car ce dernier correspond à un très bon facteur de qualité que ça soit pour RZ, NRZ ou Gaussien. Les résultats obtenus avec codeur NRZ sont présentés sur la

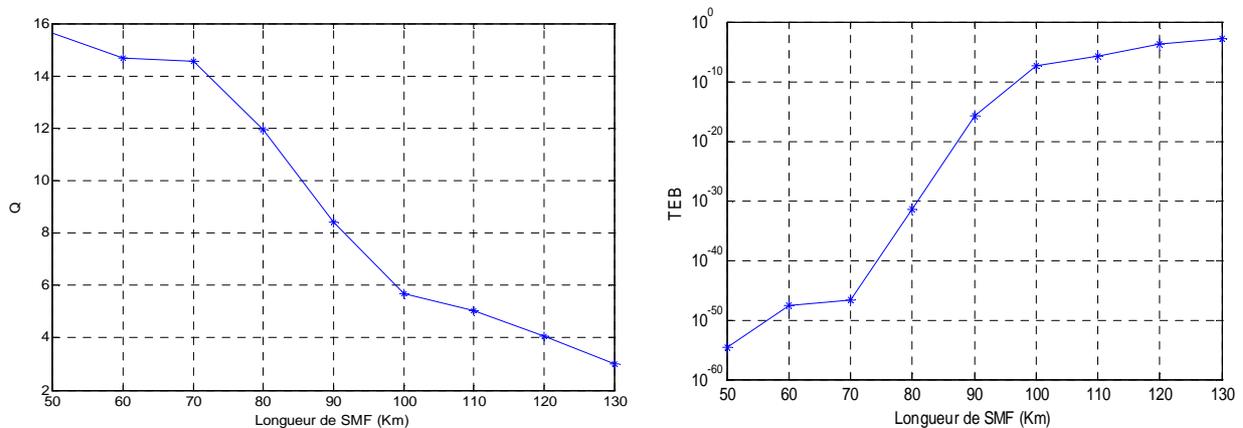
figure 2.12, cette dernière présente le facteur de qualité Q et le taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre SMF.



**Figure 2.12 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de la longueur de la fibre (NRZ)

Nous constatons une dégradation du facteur de qualité en augmentant la longueur de la fibre .On note que pour une longueur importante de 100km de la fibre SMF on obtient un bon facteur de qualité égale à 6.53 et un taux d'erreur binaire de l'ordre de  $10^{-11}$ .

Pour un générateur RZ on a obtenu les résultats présenté sur la figure ci dessous.

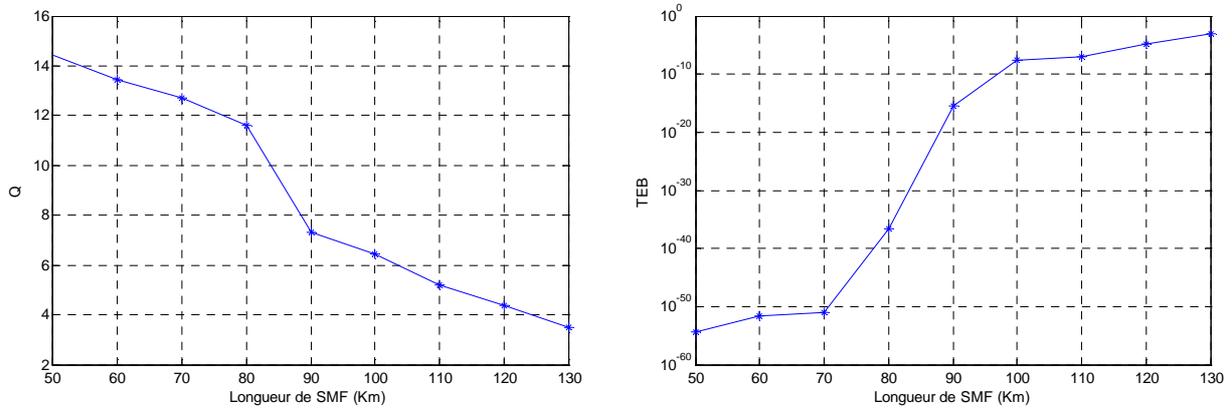


**Figure 2.13 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de la longueur de la fibre SMF (RZ)

Lorsque le nombre de tronçon de la chaîne de transmission augmente, le facteur de qualité diminue.

Il est à noter qu'on a une dégradation des performances du système pour des longueurs de fibre importantes. La qualité de transmission diminue au fur et à mesure que la longueur de la fibre augmente. La qualité de transmission est acceptable jusqu'à des longueurs de SMF de 100Km.

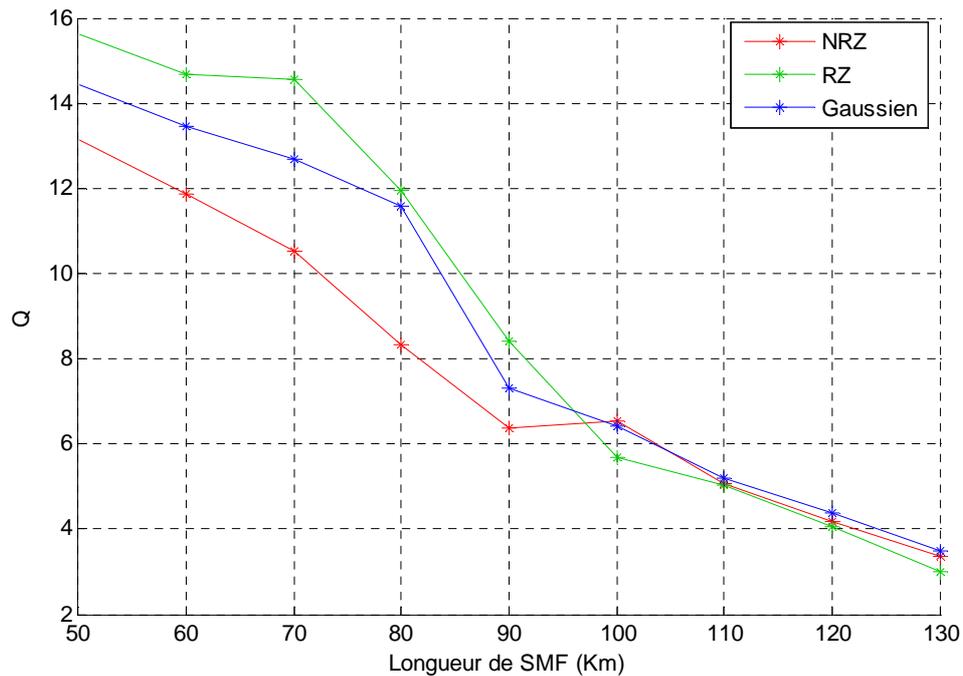
En variant la longueur de la fibre SMF dans un générateur Gaussien. On obtient les résultats de la figure 2.14.



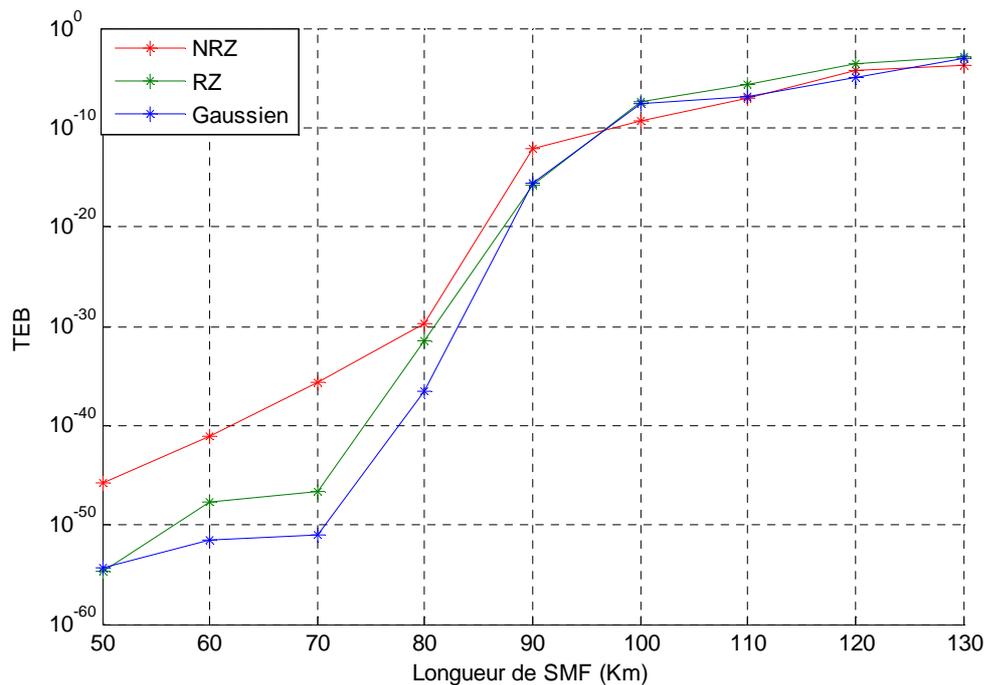
**Figure 2.14 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de longueur de fibre (Gaussien).

Nous constatons une diminution du facteur de qualité, le maximum qu'on peut atteindre pour une bonne qualité de transmission est 95 Km, dans ce cas le facteur de qualité est 7 et le TEB est  $10^{-11}$ .

Les figures (2.15) et (2.16) présentent respectivement le facteur de qualité Q et le taux d'erreur binaire TEB en fonction de la longueur de la fibre monomode SMF. C'est une étude comparative entre les trois générateurs : RZ, NRZ et Gaussien.



**Figure 2.15 :** Facteur de qualité en fonction de longueur de SMF (Générateurs RZ, NRZ, - Gaussien).



**Figure 2.16 :** TEB en fonction de longueur de SMF (Générateurs RZ, NRZ, Gaussien).

Nous constatons que le meilleur facteur de qualité est obtenu pour une valeur de 50 km pour les trois générateurs. A partir d'une longueur de SMF de 70 km on remarque une forte diminution de la qualité de transmission pour les trois générateurs, on peut atteindre une valeur maximale de l'ordre de 90km à 100km.

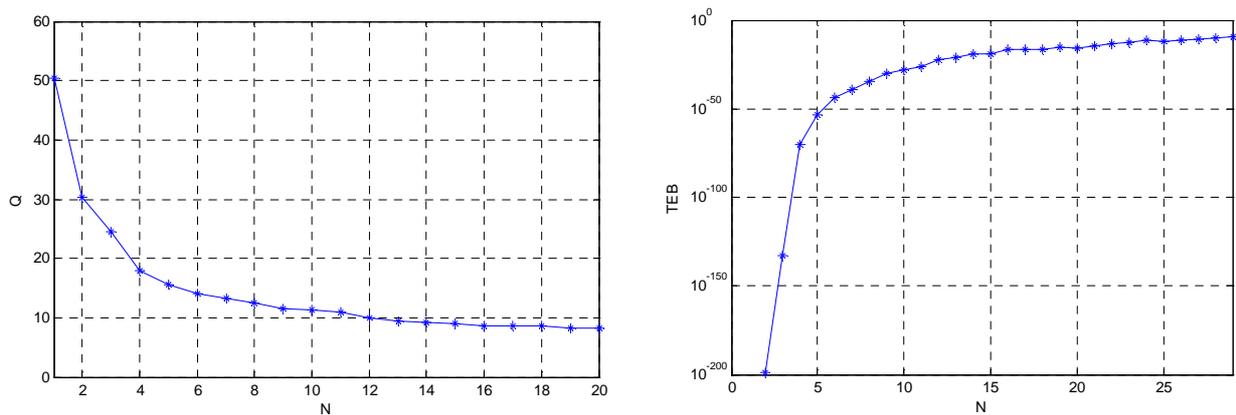
Dans la suite des applications on va utiliser le codeur RZ, qui donne le meilleur résultat par rapport aux deux autres..

### 2.5.2 Choix du modulateur

Le but de cette partie est de chercher un meilleur modulateur pour atteindre une distance de transmission la plus longue possible en ayant un bon facteur de qualité, tout en conservant à la réception la qualité du signal émis. Dans ce qui suit, nous allons étudier l'effet de la longueur de la fibre monomode ainsi que la variation du nombre de tronçons pour trois différents modulateurs : modulateur de Mach-Zehnder, modulateur d'amplitude et modulateur à électroabsorption.

#### 2.5.2.1 Effet de variation du nombre de tronçons

La figure 2.17 présente la variation du facteur de qualité et du TEB en fonction du nombre de tronçons pour un modulateur de Mach-Zehnder.

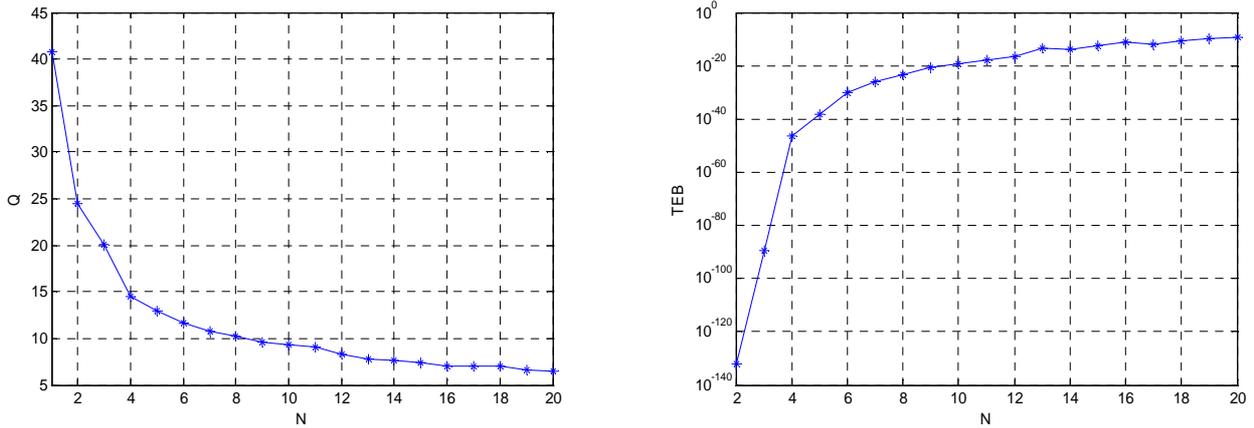


**Figure 2.17:** Facteur de qualité et TEB en fonction de nombres de tronçons (MZ)

On remarque sur la figure 2.17 une forte dégradation de la qualité de transmission avant le 4<sup>ème</sup> tronçon. Le nombre maximal qu'on peut utiliser est 11, ce qui donne un facteur de qualité égale 7.20 et une longueur de fibre optique de 400 km.

Nous observons sur la figure 2.18 l'effet de l'augmentation du nombre de tronçons sur le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire.

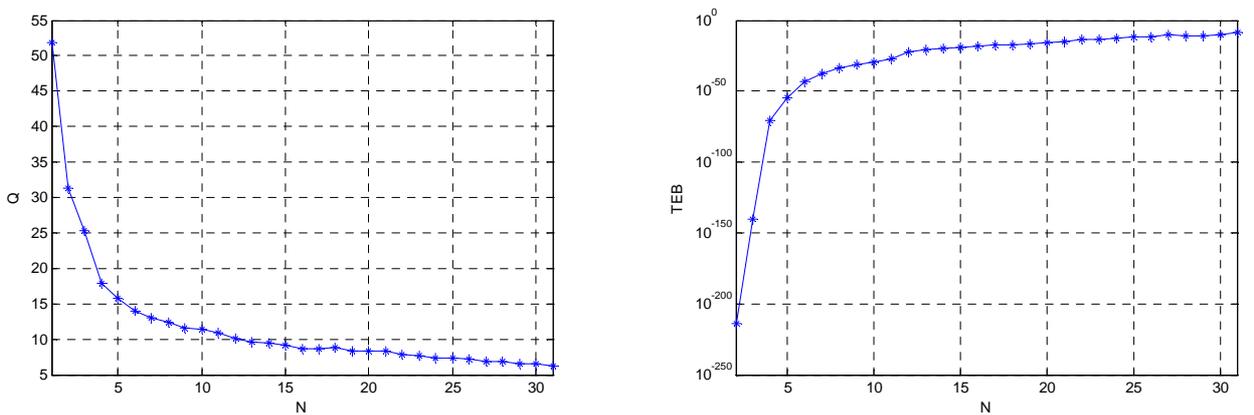
Dans cette figure nous avons une longueur de fibre monomode égale à 50 km et on varie le nombre de tronçon pour calculer le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire



**Figure 2.18 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons (EAM)

On constate une faible dégradation du facteur de qualité après le 4<sup>ème</sup> tronçon.

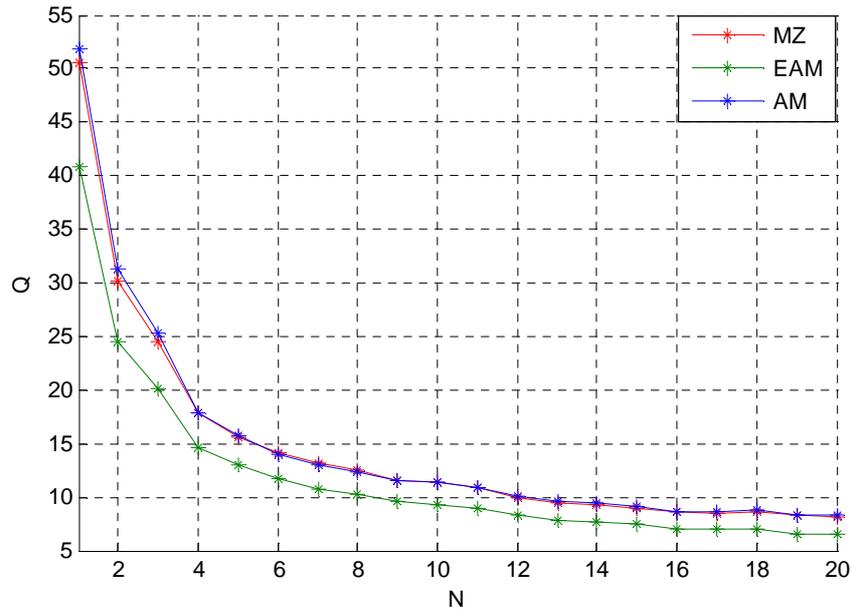
En insérant un modulateur AM, on obtient les résultats de la figure 2.19.



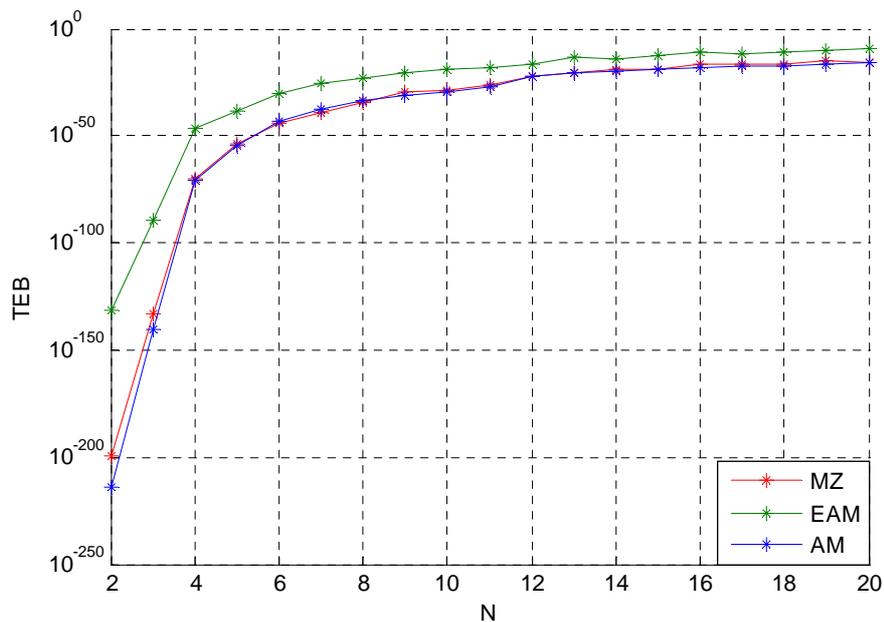
**Figure 2.19 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de nombre de tronçons (AM).

Le facteur de qualité est assez important pour un nombre de tronçons allant jusqu'à 20 avec un facteur de qualité de 8.32535 et un TEB de  $2.96551 \times 10^{-16}$  sachant que chaque tronçon à une longueur de 60 Km on obtient une longueur total de 1200 Km avec un débit de 40 Gbits/s, ce qui constitue un résultat important en terme de distance avec un débit de l'ordre de Gbits/s.

En comparant entre les trois modulateurs, on obtient les résultats des figures 2.20, 2.21.



**Figure 2.20** : Facteur de qualité  $Q$  en fonction de nombre de tronçon (Modulateurs MZ, EAM et AM)



**Figure 2.21** : TEB en fonction de nombre de tronçon (Modulateurs MZ, EAM et AM)

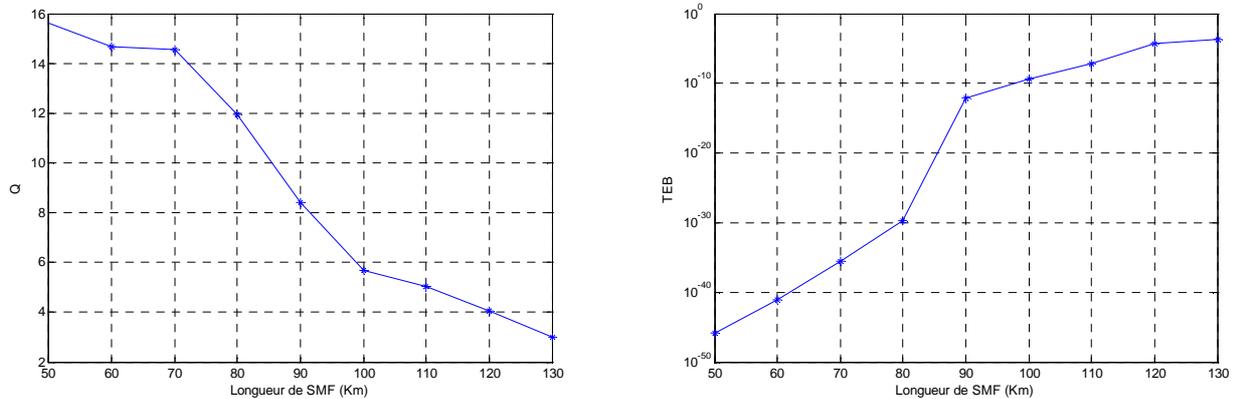
On remarque que le meilleur résultat est obtenu avec AM. L'allure de la courbe du facteur de qualité est inversement proportionnelle par rapport au nombre de tronçon sachant que l'augmentation du nombre de tronçon implique l'augmentation de la distance.

Le nombre de tronçons maximal qu'on peut atteindre, est de l'ordre de 14 pour les trois modulateurs.

### 2.5.2.2 Effet de variation de la longueur de la Fibre SMF

Dans un premier temps on étudie le système avec le modulateur de Mach-Zehnder, en variant la distance de la chaîne de transmission pour obtenir le meilleur résultat possible.

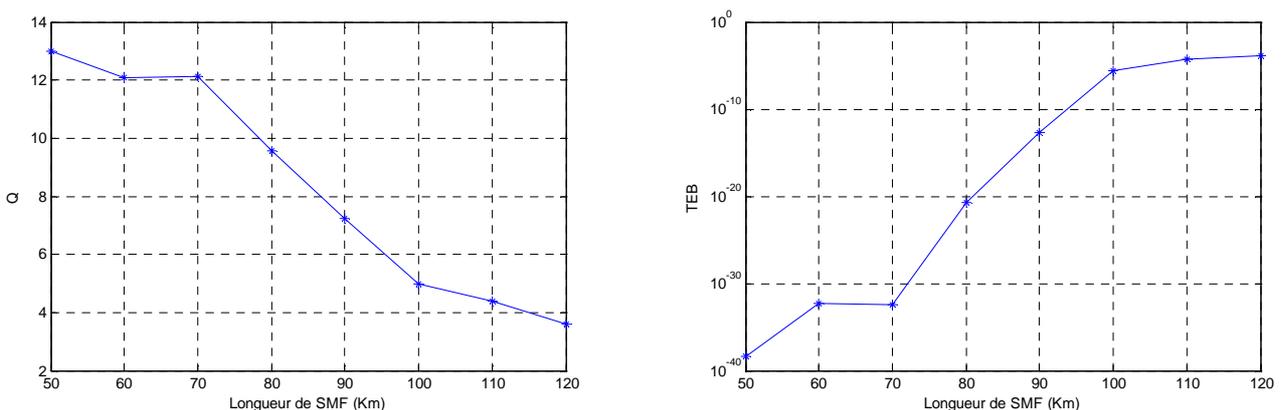
En variant la longueur de la fibre SMF on obtient les résultats de la figure 2.22.



**Figure 2.22 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de la longueur de fibre SMF (Modulateur MZ).

On remarque que le facteur de qualité avec un générateur RZ et un modulateur de Mach-Zehnder est en dégradation avec l'augmentation de la longueur. Par exemple, Nous avons un bon facteur de qualité et un taux d'erreur binaire de l'ordre de  $10^{-16}$  pour une longueur de 90km de la fibre monomode SMF en prenant du compte l'amplificateur EDFA et la fibre DCF.

La figure 2.23 présente la même étude pour un modulateur EAM.



**Figure 2.23 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de longueur de fibre SMF (Modulateur EAM).

On constate que le meilleur facteur de qualité est de l'ordre de 13, il est obtenu pour une longueur de 50 km, a partir de la longueur 70km le facteur de qualité décroît rapidement.

En remplaçant le modulateur EAM par un modulateur AM, on obtient les résultats de la figure 2.24.

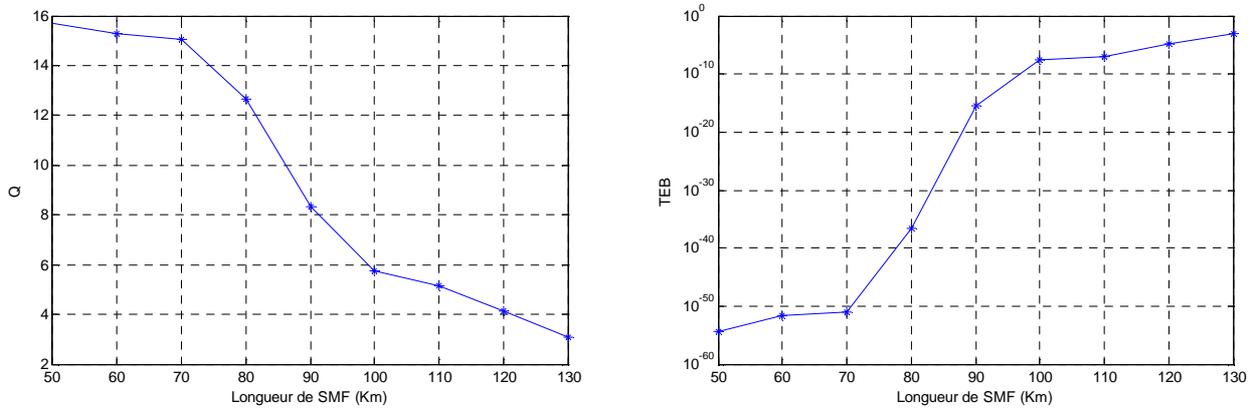


Figure 2.24 : Facteur de qualité et TEB en fonction de longueur de la fibre SMF (Modulateur AM).

On remarque que le meilleur facteur de qualité est obtenu pour une longueur de 50km. En augmentant la longueur, la qualité de transmission se dégrade.

En comparant entre les trois modulateurs, on obtient les résultats des figures 2.25, 2.26.

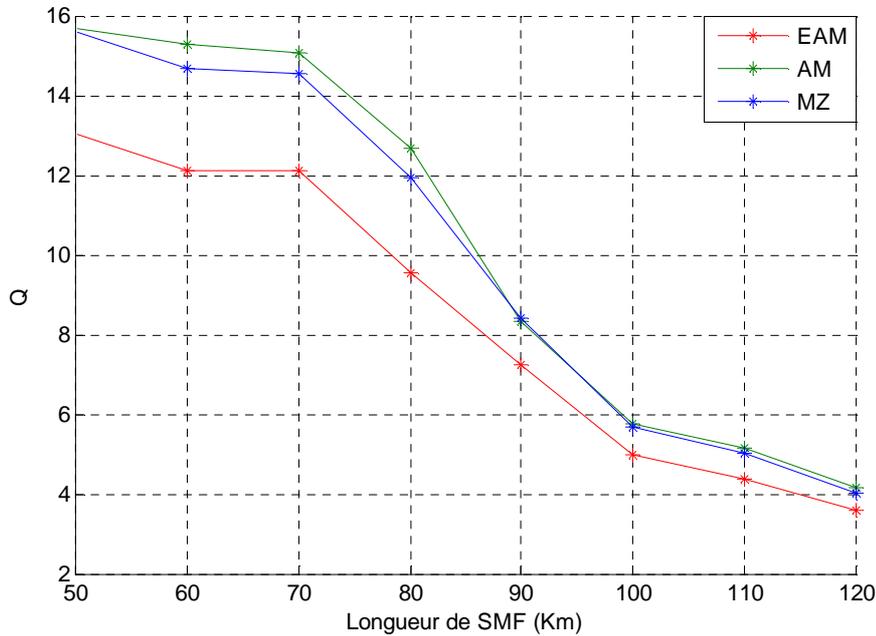
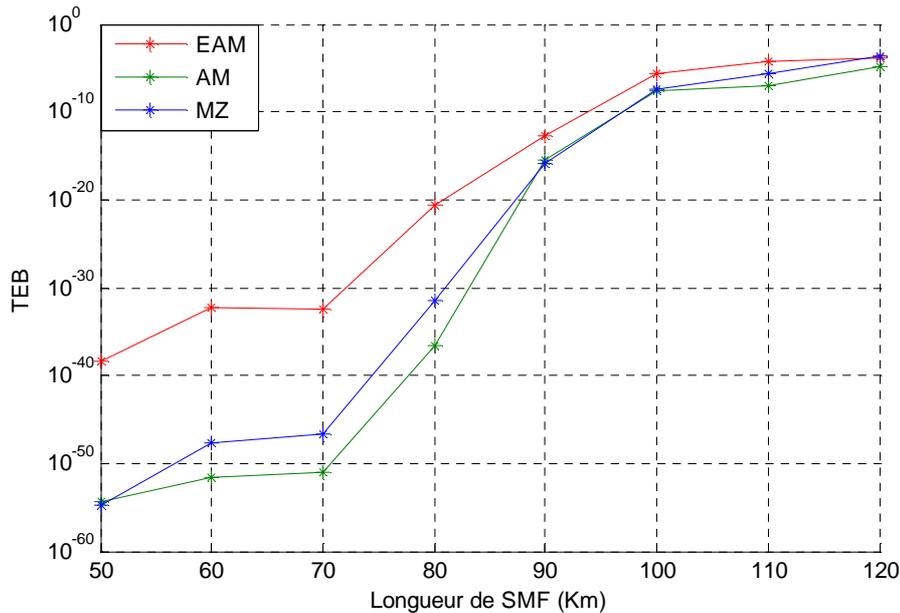


Figure 2.25 : Facteur de qualité en fonction de longueur de SMF (Modulateurs MZ, EAM et AM).



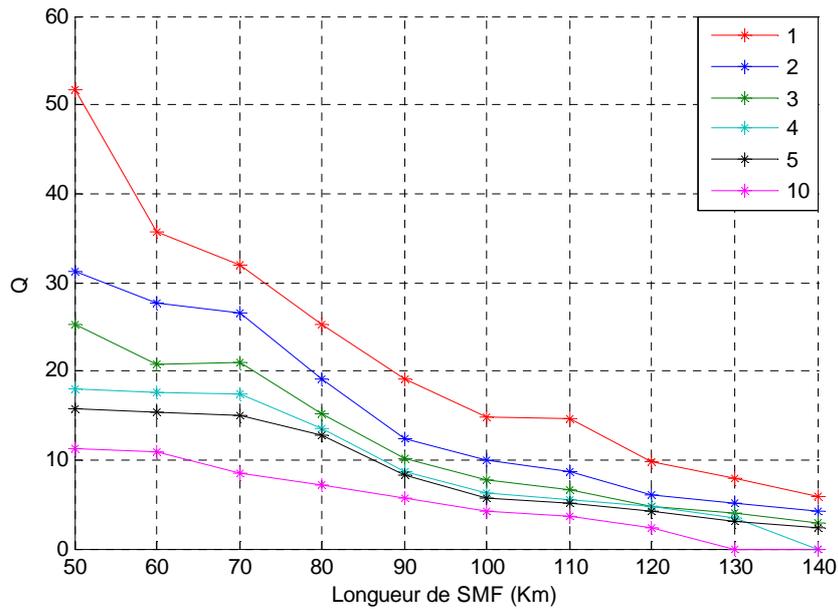
**Figure 2.26 :** TEB en fonction de longueur de SMF (Modulateurs MZ, EAM et AM).

On note sur la figure 2.25 que pour des longueurs de fibre de moins de 90 Km, il y a un léger avantage au modulateur AM par rapport à MZ, cet avantage est important par rapport à EAM, à partir de 90 Km les résultats convergent vers un facteur de qualité de l'ordre de 5 et un TEB de  $10^{-5}$ . Concernant la longueur admissible de la longueur de SMF, on a 94 Km pour EAM et 97 Km pour AM et MZ.

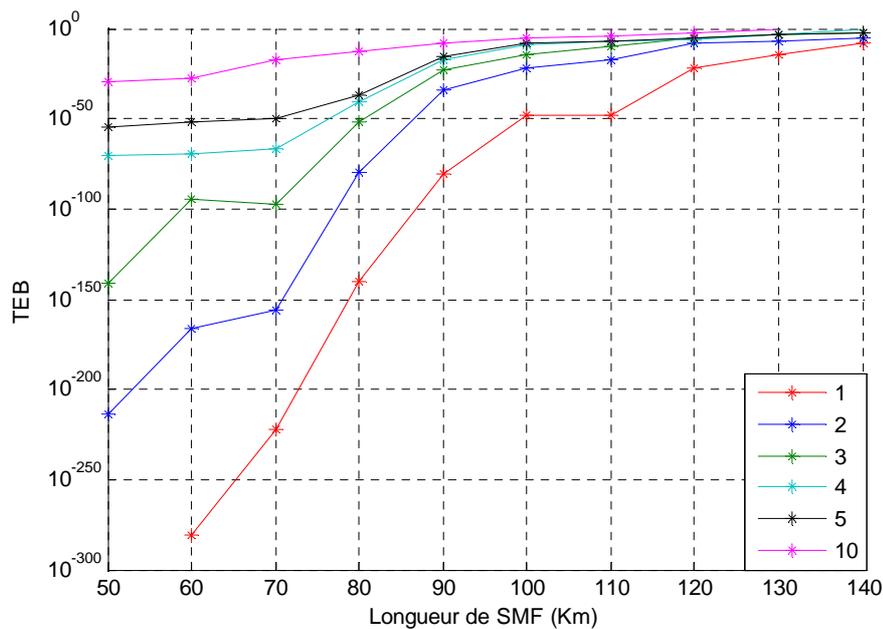
Dans la suite des applications on va utiliser le modulateur AM qui donne les meilleurs résultats.

### 2.5.3 Effet de variation du nombre de tronçons

Dans ce qui suit on va faire varier le nombre de tronçons à 1, 2, 3, 4, 5 et puis 10, on utilise un codeur RZ avec modulateur d'amplitude et compare les 6 courbes du facteur de qualité et du TEB en fonction de la longueur de la fibre SMF. Les résultats sont présentés sur les figures 2.27 et 2.28.



**Figure 2.27 :** Facteur de qualité en fonction du nombre de tronçon.



**Figure 2.28:** TEB en fonction du nombre de tronçon.

On connaît déjà l'effet de l'augmentation de la longueur de la fibre sur la qualité de transmission, mais ce qui est intéressant de noter sur les figures 2.27 et 2.28 c'est l'effet de l'augmentation du nombre de tronçons notamment en passant de 1 à 2, on note une dégradation importante, cette dégradation est moins importante quand on passe de 2 à 3 et ainsi de suite. Une autre remarque importante concerne les distances que parcourt le signal lumineux avant d'être considérablement déformé, on parle de distance qui dépassent les 150

Km pour 1 tronçon, cette distance diminue au fur et à mesure pour être au environ de 110 Km pour 10 tronçons, mais dans ce cas on a distances totale de l'ordre de 1300 Km.

### 2.5.4 Effet la variation de la puissance

Pour évaluer les performances d'une liaison optique en vue d'obtenir un bon compromis entre la puissance et le facteur de qualité, nous avons fait varié la puissance a la sortie de la diode laser , en changeant le nombre de tronçons .Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 2.29 et 2.30.

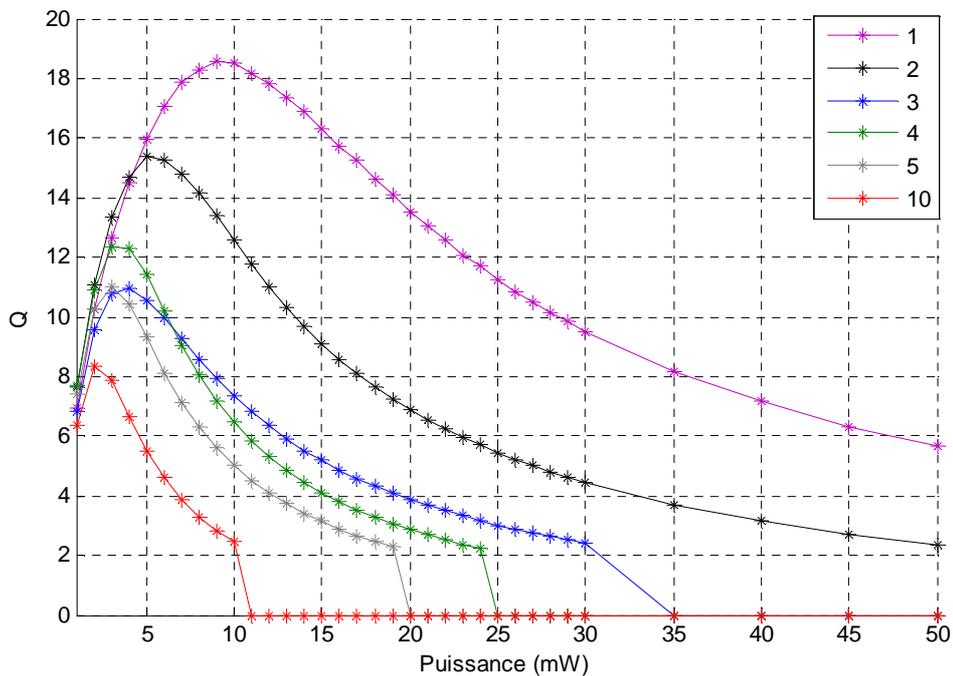
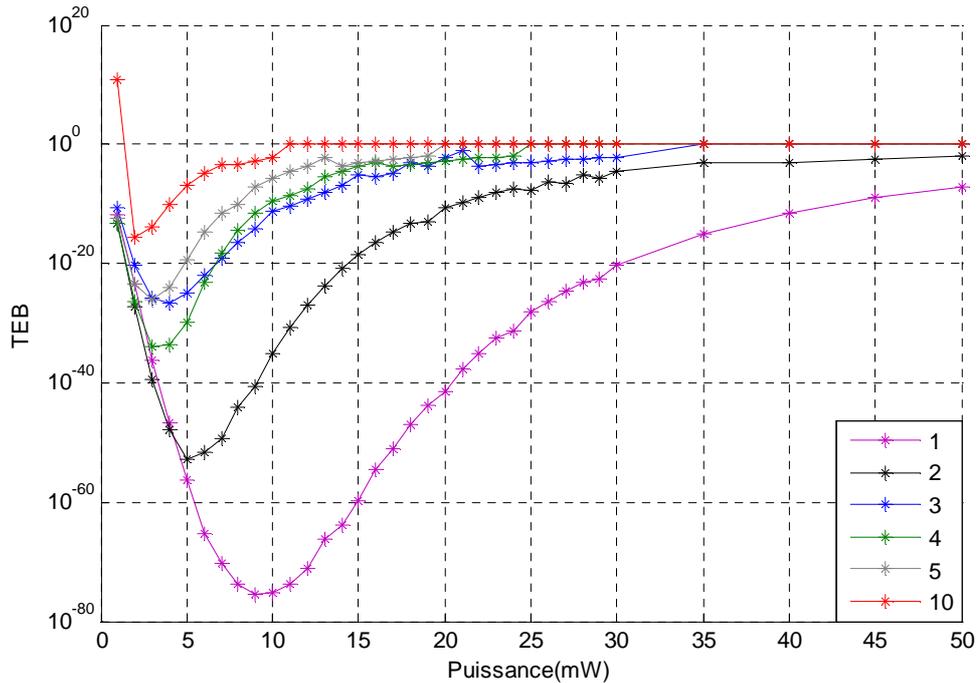


Figure 2.29 : Facteur de qualité en fonction de la puissance



**Figure 2.30 :** TEB en fonction de la puissance

Le facteur de qualité augmente jusqu'à une valeur de 9 mW et il diminue par la suite. On note une allure similaire pour toutes les courbes à savoir une augmentation du facteur de qualité suivi d'une diminution, ce qui change c'est la valeur du facteur maximal, qui est par exemple de 18.4 pour un nombre de tronçons de 1 et de 9 pour un nombre de tronçon de 10. On note que plus le nombre de tronçons augmente plus la valeur du facteur de qualité diminue et la puissance correspondante diminue aussi (9mW pour 1 tronçon, 2mW pour 10 tronçons). Ce qui amène à dire qu'il faudrait diminuer la puissance quand on augmente le nombre de tronçons. La dernière remarque concerne la puissance maximale qu'on peut atteindre pour avoir un  $TEB < 10^{-10}$ , cette puissance est de l'ordre de 45 mW pour 1 tronçon, 20mW pour 2, 3mW pour 10, donc cette puissance diminue avec le nombre de tronçon.

### 2.5.5 Etude de l'effet du débit binaire

Pour ce qui concerne l'étude suivante on va s'intéresser au débit de transmission en utilisant une longueur de fibre de 50 Km, et toujours avec 1, 2, 3, 4, 5 et 10 tronçons. Les résultats du facteur de qualité et du TEB sont présentés sur les figures 2.31 et 2.32.

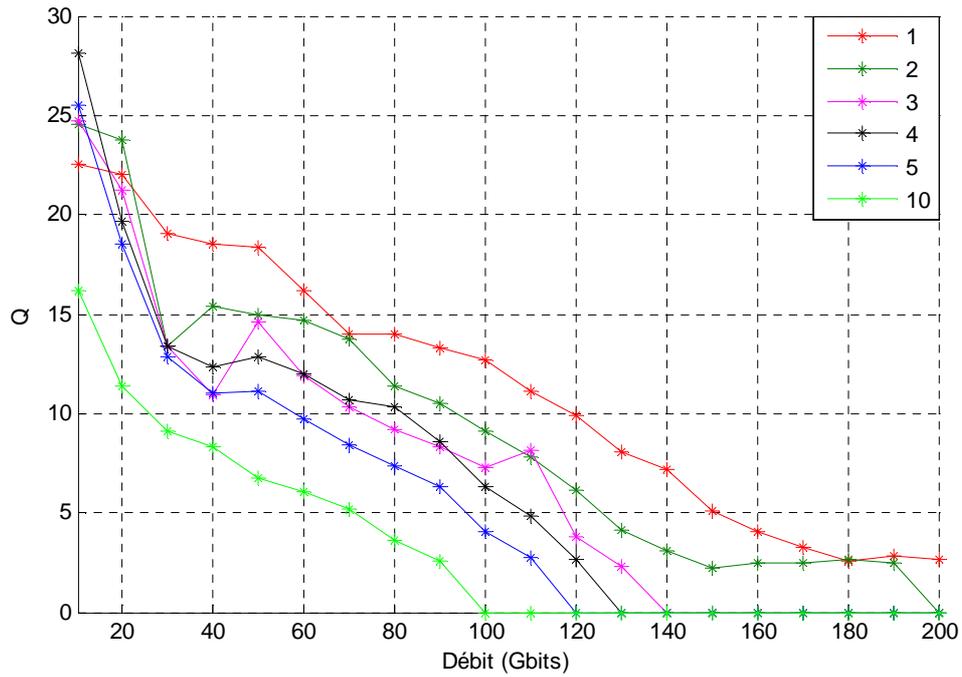


Figure 2.31 : Facteur de qualité en fonction du débit.

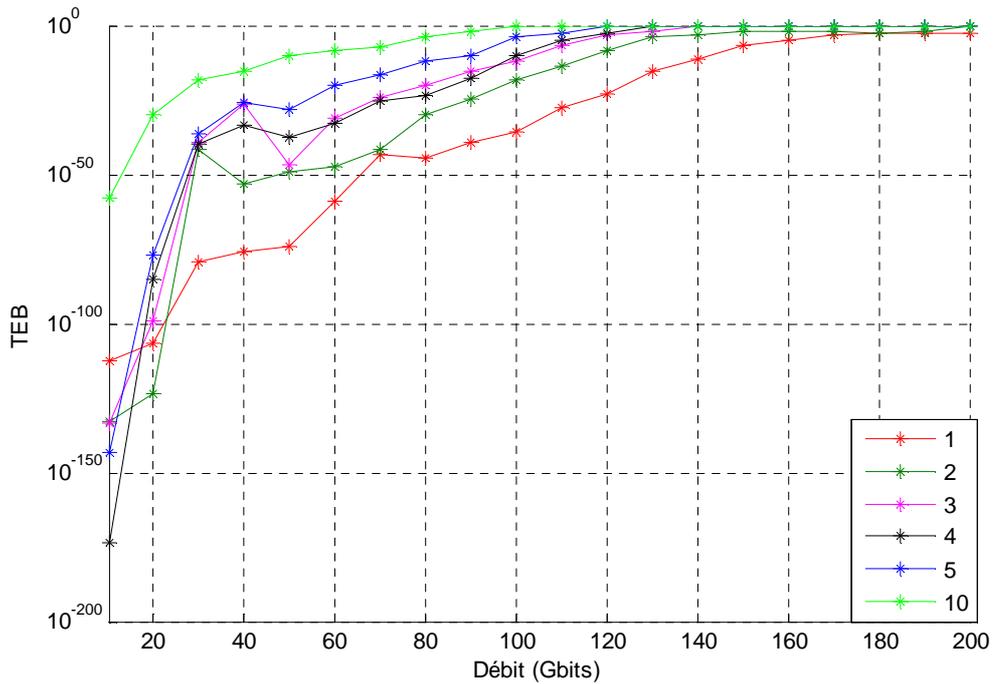


Figure 2.32 : TEB en fonction du débit.

On note tout d'abord une dégradation du signal reçu dès que le débit augmente pour atteindre un débit maximal de 140 Gbits/s pour 2, et 60 Gbits/s pour 10.

Ces résultats avec ceux présentés auparavant montrent l'influence de chaque paramètre sur la liaison optique. Nous avons pu établir une liaison qui dépasse les 130 Km avec un

débit de l'ordre de 40 Gbits/s. En même temps on est arrivé à faire passer un signal avec un débit de 140 Gbits/s sur une distance de 50 Km.

## **2.6 Conclusion**

Ce deuxième chapitre a permis d'étudier une chaîne de transmission par fibre optique grâce à deux critères (le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire) : Pour avoir un bon rendement sur la transmission du signal. Avec différentes configurations utilisant plusieurs codeurs : RZ, NRZ et gaussien et plusieurs modulateurs : modulateur de Mach-Zehnder, modulateur d'amplitude et modulateur à électroabsorption. Nous avons étudié plusieurs paramètres de la liaison, tout en essayant d'établir les valeurs optimales, qui permettent d'avoir un bon compromis entre le haut débit et une distance importante entre l'émetteur et le récepteur.



# Chapitre 3

## Transmission par Soliton



### 3.1 Introduction

Des démonstrations remarquables de transmission avec des pas d'amplification deux à trois fois supérieurs à ceux utilisés en transmission classique ont été réalisées avec la technique soliton, et le soliton est apparu dans les années 1990 comme une technique d'un grand intérêt pour des liaisons à très grande distance, avec une application potentielle aux futures générations de systèmes sous-marins. On opposait alors à la transmission « classique » utilisant le multiplexage en longueur d'onde la transmission sur un seul canal à grande capacité (multiplexage temporel ou TDM *Time Division Multiplexing*) utilisant le soliton [22].

### 3.2 Historique

La première observation physique des solitons date de 1834. Un gentleman écossais, John Scott Russel, se promenant à cheval le long d'un canal, a observé que, lorsqu'une péniche se fut arrêtée brusquement, une grande vague solitaire continua de se propager sans déformation apparente de sa forme ni variation de vitesse. Il a pu la suivre pendant plus de dix kilomètres. Il fit un rapport de son observation en 1844.

Les phénomènes physiques intervenant dans la propagation de cette onde solitaire sont accessibles à tout observateur attentif. Ce dernier remarquera que les vagues de forte amplitude se propagent plus vite que celles d'amplitude plus modeste. Il arrive fréquemment que les premières rattrapent et dépassent les secondes. C'est l'effet non linéaire de la propagation. L'autre phénomène est plus difficilement observable. Cependant, si l'on prend un peu de recul, il apparaît que les vagues de plus grande longueur d'onde se propagent plus rapidement que celles de longueur d'onde plus courte.

Cet effet est responsable de l'élargissement spatial des vagues. La vague observée par Russel était de celles dont la dépendance non linéaire de la vitesse en fonction de son amplitude compensait exactement la dépendance linéaire de la vitesse en fonction de la longueur d'onde. Ce que n'a pas observé Russel, mais qui est d'une grande importance, est que, après une collision entre une onde solitaire de grande amplitude (rapide) et une autre d'amplitude plus faible (lente), les deux ondes retrouvent leur forme initiale. Cet effet n'est pas évident a priori, puisque, lors de la collision, les deux ondes se superposant, l'effet non linéaire total n'est certainement pas égal à la somme des effets non linéaires de chacune des

deux ondes prises isolément. Des ondes solitaires retrouvant leur forme initiale après une collision sont appelées des solitons. Le suffixe « on » représente l'aspect particulière de l'onde. Ce nom a été donné par Zabusky et Kruskal en 1965 [23].

### **3.3 Définition du soliton**

L'impulsion soliton (ou tout simplement soliton) est une solution particulière de l'équation de Schrödinger non linéaire, qui reste invariante au cours de sa propagation parce que l'effet (linéaire) de la dispersion chromatique est exactement compensé par l'effet (non linéaire) de l'automodulation de phase. La non-linéarité est donc utilisée de manière positive pour contrebalancer l'effet de la dispersion et garantir la stabilité du signal au cours de sa propagation.

#### **3.3.1 Caractéristiques importantes des solitons [27]**

La vitesse de l'onde, de la vague, dépend de son amplitude et si plusieurs vagues entrent en collision, les vagues ressortent non perturbées avec la même vitesse et la même forme qu'avant la collision. Un soliton est une onde capable de se déplacer sur une très grande distance sans se déformer, en conservant sa forme exacte et sa vitesse.

Il y a plusieurs phénomènes qui interviennent dans le soliton :

##### **3.3.1.1 La dissipation (dissipation de l'énergie)**

Qui en mécanique est due aux frottements. Dans un système optique c'est l'absorption, un milieu n'est jamais transparent à 100% (UV, IR selon les matériaux constituants) et un autre phénomène, la diffusion qui provient des impuretés, particules d'assez grosses dimensions diffusant la lumière dans toutes les directions, laquelle va quitter le système.

Les pertes se traduisent par l'affaiblissement de l'impulsion au cours de la propagation, actuellement les pertes sont de 0,2 dB par km dans les fibres optiques à 1,5 micron de longueur d'onde. Cet affaiblissement correspond à avoir 1% de transmission après 100 km de parcours. On peut comparer cette valeur à celle d'un verre de lunette qui donne 8% de pertes, 4% sur chaque face pour une très courte distance (quelques mm). Donc 1% de signal après 100 km de parcours est une prouesse technologique.

La fenêtre à 1,3 micron donne des pertes raisonnables d'environ 1,2 dB par km.

Elle sera utilisée pour les communications terrestres (quelques centaines de km), les transmissions à très longues distances (plusieurs milliers de km) seront effectuées à 1,5 micron.

Si l'on envoie une impulsion dans un milieu dissipatif, on observe une décroissance exponentielle de l'amplitude en fonction de la distance de propagation.

On note que la forme de l'impulsion est conservée. On retrouve par exemple une gaussienne avec les mêmes propriétés, la même largeur. C'est la "surface" de l'impulsion qui diminue (l'intégrale, l'énergie). Tous les milieux sont dissipatifs sauf le vide.

### 3.3.1.2 La dispersion (chromatique dans les milieux optiques)

- Provient du fait que l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde (Prisme).
- La vitesse de phase (le rapport entre la fréquence angulaire, ( $\omega = 2\pi f$ ) et la constante de propagation)
- La vitesse de groupe (variation de la fréquence angulaire (longueur d'onde) vis à vis de la constante de propagation  $k$ ).
- L'indice de réfraction dépend de la fréquence angulaire ( $\omega = 2\pi f$ ) implique que ces vitesses dépendent de la longueur d'onde
- La vitesse de groupe est la vitesse à laquelle se propage une impulsion.
- La vitesse de phase est la vitesse à laquelle se propage une oscillation à l'intérieur de cette impulsion.

Une impulsion est en fait une onde modulée, la représentation d'une onde comme une variation sinusoïdale à l'infini est un cas particulier, un concept mathématique qui n'existe pas en pratique. Il existe des trains d'ondes sur un intervalle de temps limité ou plus généralement une onde modulée (variation harmonique dont l'amplitude est modulée).

Il y a donc une onde porteuse de l'information, information représentée par l'enveloppe. La puissance est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électromagnétique.

La vitesse de groupe est donc la vitesse à laquelle l'enveloppe de l'impulsion se propage, la vitesse de phase est la vitesse à laquelle se propage une oscillation de la porteuse. En pratique il y a une différence très faible entre ces deux vitesses (1/1000).

L'indice de réfraction entre 400 et 1600 nm varie de 1,470 à 1,440 (il diminue lorsque la longueur d'onde augmente) c'est une variation faible mais qui a énormément de conséquences en pratique.

Le coefficient de dispersion de la vitesse de groupe varie autour d'une valeur nulle situé vers 1300 nm, il devient négatif au delà de 1300 nm. On parle de régime de dispersion anormal ( $\lambda > 1300$  nm) ou normal ( $\lambda < 1300$  nm).

La vitesse de phase est inversement proportionnelle à l'indice de réfraction, plus la fréquence est élevée (vers le bleu) plus la vitesse de phase (vitesse de propagation) est lente ou la vitesse de propagation augmente avec la longueur d'onde.

### **3.3.1.3 Conséquences de la dispersion [24]**

Une impulsion injectée dans un milieu dispersif va s'étaler, s'élargir au fur et à mesure de la propagation. S'il n'y a pas de perte par dissipation, et en vertu de la conservation de l'énergie cette impulsion voit son amplitude décroître quand sa largeur augmente (surface constante sous la courbe).

Les diverses composantes (fréquences) de l'impulsion ont des vitesses de propagation différentes, donc au cours de la propagation on observe un "étalement" de l'impulsion identique à l'étalement observé sur un groupe de couleurs en fonction de la distance parcourue.

### **3.3.1.4 La non linéarité**

Un système linéaire donne en sortie une réponse directement proportionnelle à l'amplitude d'entrée de sorte que  $U_{\text{sortie}} = k U_{\text{entrée}}$ . Si à l'entrée on a  $U_1 + U_2$  on aura en sortie  $k (U_1 + U_2)$ .

Un système non linéaire donne en sortie une réponse qui sera, par exemple, proportionnelle au carré, au cube de la valeur d'entrée. S'il y a deux signaux à l'entrée, la sortie ne donnera pas la somme des réponses, le principe de superposition n'est plus vrai.

En optique la non linéarité provient de l'effet Kerr, qui est une variation de l'indice de réfraction vis à vis de la puissance (amplitude) de l'onde initiale. L'indice de réfraction qui dépend déjà de la fréquence, va également dépendre de la puissance d'entrée, de l'intensité

du signal qui traverse le milieu, (il augmente avec la puissance, il est maximum au centre de l'impulsion).

#### 3.3.1.4.1 La conséquence de ce phénomène

Les différentes parties (fréquences) de l'impulsion ne se propagent pas à la même vitesse, qui est inversement proportionnelle à l'indice. Cette vitesse sera minimum au centre de l'impulsion et plus rapide de chaque côté, ce qui induira une distorsion (déformation) du signal, une non linéarité au fur et à mesure de la propagation.

#### 3.3.1.4.2 Influence du non linéarité sur la propagation d'une impulsion

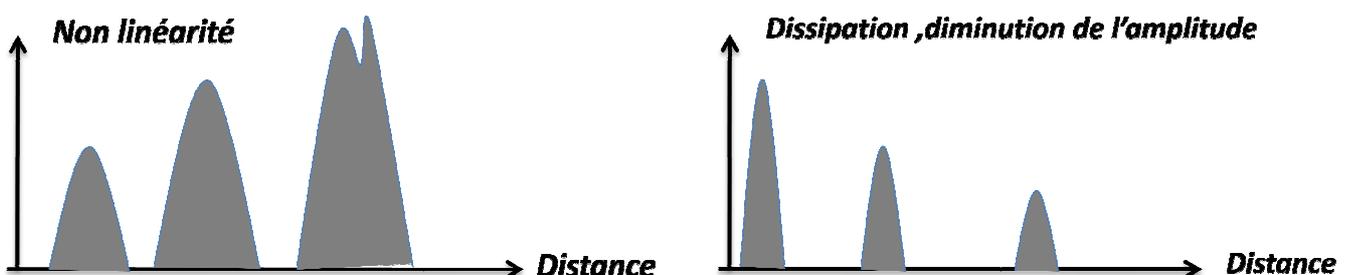
Après quelques kilomètres dans la fibre, l'impulsion se rétrécit. Comme l'énergie est conservée (si l'on fait abstraction des pertes), l'amplitude augmente. En optique il faut qu'il y ait une petite dispersion, si non, on peut montrer que la forme de l'impulsion serait conservée. C'est donc un phénomène néfaste en télécommunications optique (brouillage, ou perte de l'information).

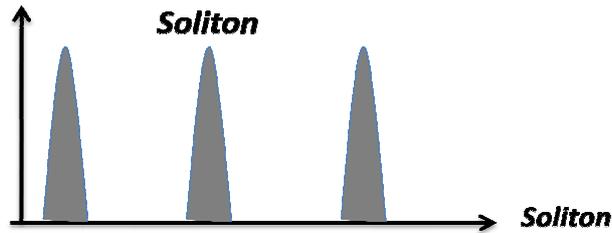
Dispersion, non linéarité, pertes ont des effets néfastes, comment s'en sortir ?

Pourquoi ne pas les utiliser pour obtenir un effet positif, un soliton est une impulsion qui doit être capable de se propager sur une grande distance sans se déformer (sauf l'amplitude).

La non linéarité dépend de l'amplitude, si l'on pense à la vague de Scott-Russel c'est sa hauteur. On peut contrôler l'effet de non linéarité avec la puissance d'entrée du signal dans la fibre optique. Si l'on prend une puissance qui vient juste compenser la non linéarité on obtient un soliton. On tire profit de ces 2 effets négatifs, c'est un vrai cadeau de la nature.

La figure suivante illustre quelques caractéristiques importantes :





*Figure 3.1 : Caractéristiques importantes*

### 3.3.2 Le soliton moyen

Un soliton n'existe que s'il y a compensation exacte entre non linéarité et dispersion. La dispersion peut être contrôlée mais elle a un niveau donné sur toute la ligne. La non linéarité est contrôlée par la puissance, mais avec les pertes l'amplitude diminue au fur et à mesure de la propagation.

On peut faire en sorte qu'à l'entrée de la ligne il y ait un soliton, mais le long de la ligne l'amplitude va diminuer de sorte qu'avec les pertes le soliton se détruira. On a montré que malgré ces pertes on peut injecter dans la ligne une impulsion qui restera globalement un soliton. La puissance diminue le long de la ligne et on l'amplifie, si la puissance moyenne correspond à la puissance qu'il faut pour obtenir un soliton idéal, alors, tout se passe comme si c'était un soliton idéal, si la puissance est trop faible la dispersion "étale" l'impulsion et s'il y a une puissance trop élevée à l'entrée il manque de la dispersion, l'impulsion se "rétrécit" et accroît la dispersion .

Le phénomène soliton est très stable, c'est une sorte d'attracteur. Pour que le soliton moyen existe il faut que la distance entre deux amplificateurs soit supérieure à la longueur de dispersion qui correspond à la longueur à laquelle la largeur de l'impulsion s'est étalée d'un facteur racine de 2 (par convention).

### 3.3.3 Propagation non linéaire et solitons

La propagation d'impulsion dans une fibre monomodale est affectée par trois phénomènes principaux : les pertes, la dispersion de vitesse de groupe (dispersion chromatique) et l'effet Kerr. La dispersion de vitesse de groupe élargit temporellement les impulsions (après une éventuelle compression initiale) proportionnellement à la largeur du spectre et à la distance parcourue. Elle peut donc créer de l'interférence entre symboles.

L'effet Kerr est responsable de l'automodulation de phase qui peut élargir le spectre de l'impulsion. En l'absence de dispersion chromatique, il n'a aucune influence sur la forme temporelle de l'intensité des impulsions.

Cependant, le spectre élargi de l'impulsion associé à une dispersion chromatique résiduelle (qui existe toujours dans un système réel constitué de plusieurs fibres soudées entre elles), peut être à l'origine de déformations temporelles des impulsions.

Ces deux effets sont a priori néfastes pour la transmission d'impulsions, les pertes sont faibles (0.2dB/km à 1,55nm) et peuvent être compensées par des amplificateurs.

Ces derniers ajoutent du bruit et imposent une puissance de signal minimale pour obtenir en détection un rapport signal à bruit suffisant. Cette puissance de signal et donc les effets non linéaires qui en découlent sont d'autant plus importants que la distance à parcourir est grande ou que le débit est élevé.

La propagation dans une fibre optique monomode est modélisée par l'équation suivante, dite non linéaire de Schrödinger, dès lors que la largeur typique des impulsions est supérieure à la picoseconde :

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{j}{2} B_2 + \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = j\gamma |A|^2 A \quad (3.1)$$

Où  $z$  est la distance de propagation,  $t$  le temps "retardé" (pour tenir compte de la vitesse de propagation),  $A(z, t)$  est l'enveloppe complexe du champ optique,

$\alpha$  l'atténuation linéique  $B_2$  est lié à la dispersion chromatique  $D$  de la fibre et  $\lambda$  est le coefficient d'effet non linéaire Kerr.

On mettant le terme lié à  $\alpha$  qui correspond à une atténuation pure, il apparaît que les sources de distorsion proviennent de deux effets bien distincts : la dispersion chromatique (par  $B_2$ ) qui joue à la fois sur la phase et l'amplitude de  $A$  et l'effet Kerr qui déphase  $A$  en fonction de sa puissance. Suivant la valeur de  $b_2$  et de la puissance en ligne, l'un ou l'autre de ces deux effets peut prédominer.

- $D < 0$  (régime “normal”)

Pour des valeurs de dispersion négatives même faibles, il y a “coopération” entre l’effet Kerr et la dispersion et les impulsions s’élargissent très vite, avec la Conséquence système d’apparition d’interférences entre symboles rapidement Insupportables.

- $D > 0$  (régime “anormal”)

Quand la dispersion est positive, les deux effets ont plutôt tendance à s’opposer et il y a généralement apparition d’instabilité de modulation (“explosion” des impulsions en impulsions beaucoup plus fines et instables, et élargissement démesuré du spectre optique).

Le soliton est la solution à la recherche d’un équilibre stable dans ce régime de propagation.

Il s’agit en fait d’une impulsion de forme et de largeur donnée, d’une puissance donnée se propageant dans une fibre de dispersion chromatique (positive) donnée :

Lorsque toutes ces conditions sont réunies, il y a propagation stable à l’infini (en omettant évidemment le terme de perte linéique de la fibre pourtant bien présent). Plus précisément, le soliton est une impulsion de forme générique

$$A(z,t) = \sqrt{P_c} \operatorname{sech}\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.2)$$

Où  $P_c$ , puissance crête, et  $\zeta$  largeur caractéristique de l’impulsion, sont liées par :

$$\tau^2 P_c = f \quad (3.3)$$

### 3.3.4 Le soliton, une solution aux distorsions de propagation

Pour une fibre optique de dispersion et de non linéarité données, la recherche d’un équilibre entre les deux effets conduit naturellement à une relation entre l’intensité de l’impulsion et son spectre. Il en résulte une impulsion particulièrement stable puisque son spectre et sa forme temporelle sont simultanément stabilisés, dès lors que les pertes de la fibre sont supposées exactement compensées par le gain des amplificateurs optiques.

L’enveloppe d’une telle impulsion, appelée soliton, résulte d’une parfaite symbiose entre la lumière et la fibre, alors parfaitement adaptées l’une à l’autre dans une sorte de résonance permettant une relative insensibilité à toute sollicitation perturbatrice. Le bénéfice en est une

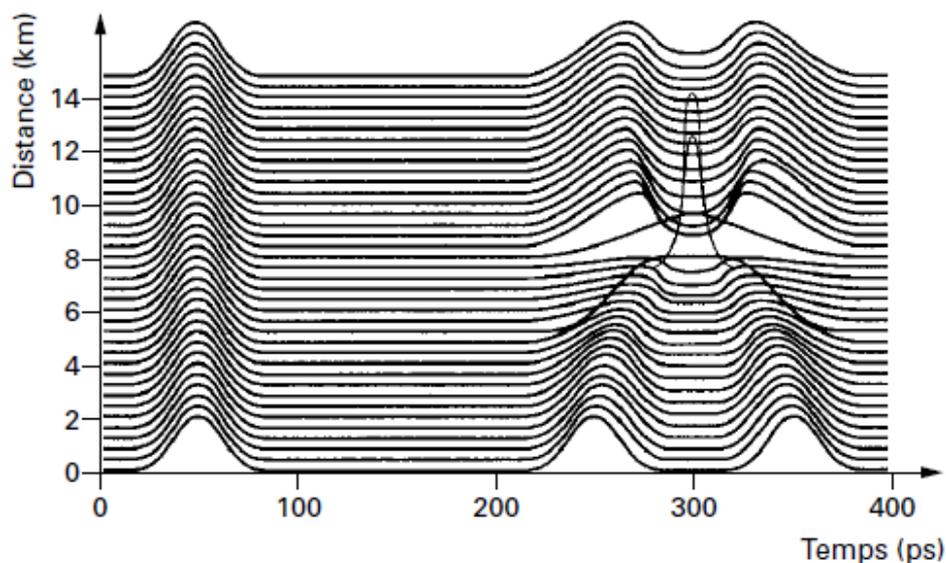
robustesse du soliton aux fluctuations locales de gain et de dispersion la propagation de l'impulsion restant pour l'essentiel gouvernée par les valeurs moyennes de ces paramètres.

De la même manière, une impulsion n'ayant pas les caractéristiques exactes évolue en général, par une sorte d'auto-épuration, vers un soliton. Bien sûr, l'exploitation bénéfique de la non-linéarité du milieu va aussi conduire à des problèmes nouveaux. Nous en citons ici deux exemples à nos yeux les plus limitatifs.

### 3.3.5 Les difficultés et les limites de la transmission par solitons

#### 3.3.5.1 Interaction entre solitons adjacents

Le soliton est, comme son nom l'indique, une solution "solitaire" de l'équation de Schrödinger. Un train de solitons n'en est donc plus solution et on peut s'attendre à une propagation différente. C'est effectivement le cas, des solitons proches pouvant interagir très fortement (phénomènes d'attraction ou de répulsion). Pour limiter cette interaction, il est nécessaire d'espacer fortement les impulsions successives, ce qui conduit à l'utilisation d'impulsions beaucoup plus fines (facteur 5 à 10) que le temps bit et donc, d'une certaine manière, à une réduction de débit. La figure III.2 illustre l'aspect fondamentalement solitaire du soliton : le soliton le plus à gauche, isolé, se propage sur 14 000 km sans déformation notable, alors que le couple de droite se déforme par attraction et répulsion.



*Figure 3.2 : propagation sur 14 000 km de la forme d'onde soliton associée au message "1011".*

### 3.3.5.2 Interaction avec le bruit des amplificateurs

Comme dans les systèmes classiques, le bruit optique a une influence très limitante sur les performances des systèmes à solitons. Il y a bien entendu une dégradation du rapport signal à bruit en réception. Un autre effet, très particulier aux solitons, est la gigue de Gordon-Haus déjà évoquée. Cette gigue induit un taux d'erreur planché, tout comme le bruit. De variance proportionnelle à la puissance en ligne et au cube de la longueur de la liaison, elle est donc extrêmement virulente sur des liaisons transocéaniques.

Les performances optimales en termes de taux d'erreur d'un système à soliton résultent ainsi d'un compromis entre le rapport signal à bruit et le niveau de gigue de Gordon-Haus, tous deux croissants avec la puissance du signal. Ceci limite, en l'absence de compensation particulière, le débit admissible à 5 Gbit/s sur 9 000 km.

### 3.3.6 Dépasser les limites induites par le bruit

Le compromis précité a été présenté pendant longtemps comme une limite rédhibitoire pour la capacité d'un système à solitons, limite d'ailleurs peu différente de celles des systèmes conventionnels.

C'est la non-linéarité qui en est à l'origine. C'est la nature non linéaire du soliton qui va permettre de s'en affranchir. Différentes techniques ont ainsi été proposées dans la littérature internationale pour outrepasser l'effet délétère de la gigue de Gordon-Haus. Nous en donnons ici brièvement les principes.

#### 3.3.6.1 Réduction de gigue par traitement en ligne

La non-linéarité de la fibre permet de différencier le comportement des signaux de faible et forte intensité. Elle autorise donc une discrimination de comportement entre signal utile (fort) et bruits (faibles).

L'exploitation de ce constat a conduit à des solutions plus ou moins complexes de traitement en ligne permettant de réduire de manière significative les niveaux de gigue de position et de bruit d'amplitude.

Deux axes d'étude en cours sont le traitement en ligne dans le domaine spectral (par filtrage en ligne) et dans le domaine temporel (par modulation synchrone).

L'idée du filtrage en ligne est simple :

La gigue étant issue des fluctuations en fréquence du soliton, des filtres optiques placés tout au long de la ligne forcent le train de soliton à maintenir sa fréquence quasi-constante. Quant à la modulation en ligne, elle resynchronise directement chaque impulsion par une modulation d'intensité périodique à la fréquence horloge, interdisant ainsi au soliton de s'échapper de sa fenêtre temporelle.

Ces traitements sont, au même titre que l'amplification, localisés dans les répéteurs.

### **3.3.6.2 Le multiplexage en longueur d'onde [25]**

Sous certaines conditions de fonctionnement (espacement fréquentiel entre canaux bien maîtrisé), le multiplexage en longueur d'onde de plusieurs trains de solitons induit des pénalités mineures sur les performances (dus aux collisions entre solitons de canaux différents, donc se propageant à des vitesses différentes).

Le débit total étant réparti entre les canaux, la gigue tolérable sur chaque canal est alors augmentée du facteur de multiplexage.

Toutes ces techniques sont récentes et mal connues. De nombreux points importants restent encore à éclaircir, non seulement sur les effets qu'elles engendrent mais aussi sur les conséquences au niveau d'un système : par exemple sa robustesse vis-à-vis des dispersions de productions, des variations de puissance en ligne, etc.

### **3.3.7 Les axes d'études en transmission par solitons**

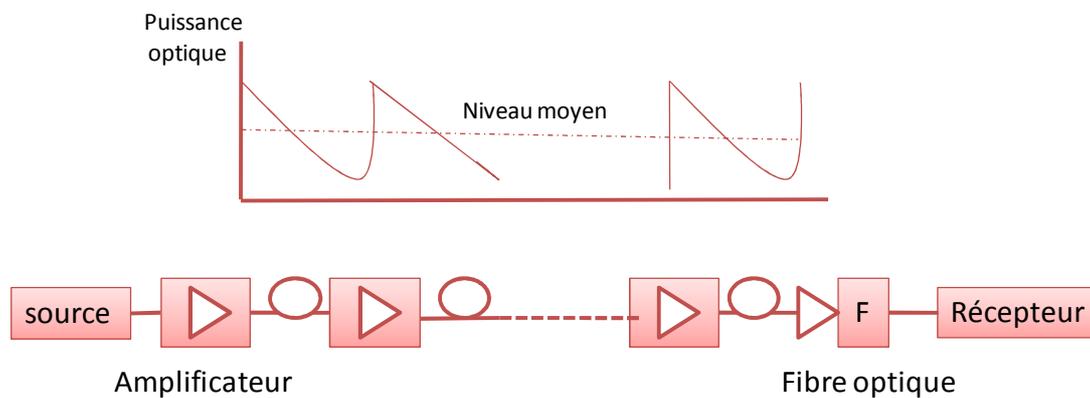
Les études en matière de transmission par solitons portent naturellement sur les problèmes de propagation précisés dans le paragraphe précédent mais couvrent également les aspects de recherche liés aux composants et à la définition des systèmes.

Afin de préciser plus clairement ces points, nous allons nous placer dans le cadre d'une transmission de type transocéanique, c'est-à-dire sur une très longue distance (typiquement 9 000 km), application pour laquelle le soliton apparaît naturellement comme une solution potentielle aux problèmes rencontrés.

Nous verrons au dernier chapitre que d'autres applications peuvent aussi se révéler prometteuses et donc amener à étendre le champ de ces investigations.

### 3.3.7.1 Les axe d'études

La figure 3.3 donne l'architecture générale d'un système optique de transmission avec amplification en ligne. Les éléments constitutifs sont la source qui délivre un signal optique porteur de l'information numérique à transmettre, la ligne de transmission proprement dite constituée de tronçons de fibre et de répéteurs optique dont la fonction de base est d'amplifier le signal, enfin le récepteur chargé de la conversion optique-électrique et de la détection du train numérique. Les études nécessaires à la conception d'un tel système sont, comme nous allons le détailler, pluridisciplinaires.



*Figure 3.3 : Architecture générale d'un système amplifié.*

#### 3.3.7.1.1 Etudes de composants

a) La source, élément critique d'un système à solitons :

La source réalise deux fonctions, le plus souvent en cascade : d'abord, la génération d'un train régulier d'impulsions optiques à un taux de répétition égal au débit à transmettre ; ensuite, sa modulation par le train binaire d'information par masquage éventuel de ces impulsions. La difficulté pour réaliser une telle source réside dans le contrôle des caractéristiques de chaque impulsion, contrôle indispensable pour garantir une propagation satisfaisante.

Les propriétés des diodes laser actuelles ainsi que des modulateurs optiques (qui permettent l'occultation des impulsions) ne sont pas compatibles avec la génération directe d'impulsions répondant à ces conditions.

Disposer d'une source réunissant des caractéristiques de stabilité et de fiabilité compatibles avec un usage industriel, et disposant par ailleurs d'une accordabilité minimale, est un objectif ambitieux. Toutefois, une source sous forme d'un composant intégré remplissant les fonctions de génération de lumière, de mise en forme des impulsions et de modulation est un objectif considéré aujourd'hui comme réaliste. Des études de nouvelles structures de diodes lasers, de modulateurs à large bande et d'intégration de ces derniers contribuent à atteindre cet objectif.

b) Les contraintes de bande passante du récepteur :

Les fonctions constituant le récepteur ne se distinguent pas fondamentalement de celles d'un récepteur classique basé sur la détection de puissance optique. Leur adaptation à des débits supérieurs ou égaux à 10 Gbit/s oblige à garantir, pour chacun des éléments, des caractéristiques de bande passante pas toujours disponibles avec la technologie actuelle et pose des problèmes d'assemblage que, là aussi, l'intégration devrait aider à résoudre. Une prévision réaliste fixe aujourd'hui à 10 ans le temps nécessaire pour disposer des circuits électroniques compatibles avec un débit de 40 Gbit/s.

### **3.3.7.1.2 Etudes de propagation**

Nous avons vu précédemment que la propagation de solitons relevait d'un équilibre parfait entre les effets de deux phénomènes principaux : la dispersion chromatique et l'effet Kerr. Tout autre phénomène tend à nous écarter de cet équilibre théorique. Ces phénomènes supplémentaires peuvent être classés en deux catégories :

- Les phénomènes naturellement présents dans la fibre, entre autres ceux induits par l'atténuation et l'amplification compensatrice ;
- Les traitements optiques introduits volontairement en ligne dans le but d'améliorer la propagation, comme ceux réduisant la gigue ou l'interaction.

Les études de propagation concernent la modélisation, l'analyse et la compréhension des effets ainsi engendrés et leur quantification de façon à pouvoir les prendre en compte dans l'étude des systèmes.

a ) Maîtriser les conséquences de l'amplification optique une localisée :

En plus de l'introduction du bruit d'émission spontanée et de la gigue de position qu'il induit sur le signal, l'amplification optique, par sa nature localisée, conduit à une distribution non constante du niveau de signal en ligne, la variation relative de puissance optique sur un tronçon reliant deux amplificateurs pouvant dépasser un facteur 10.

Cette distribution est rappelée sur la figure 3.4. Elle semble a priori incompatible avec la possibilité d'équilibre recherché dans lequel l'effet Kerr est directement fonction de la puissance optique. La robustesse du régime de propagation soliton aux stimuli extérieurs se traduit par un régime moyen de propagation qui tient compte de la puissance du signal moyennée spatialement sur la liaison.

Au deuxième ordre, ce régime est toutefois affecté par les variations de la puissance autour de cette valeur moyenne. Quantifier les limites admissibles de cette perturbation (en termes de période et d'amplitude), c'est-à-dire rechercher les limites de validité du "soliton moyen", est un objectif déterminant pour la configuration du système. Cela permet d'en déduire l'espacement maximal tolérable entre répéteurs pour une atténuation de fibre et un traitement en ligne donnés, avec les conséquences économiques directes d'un tel résultat.

b ) Réduire le bruit de position :

Suivant la présentation faite précédemment, deux axes d'étude importants se dégagent aujourd'hui, à savoir le filtrage et la modulation en ligne :

1) Le filtrage en ligne : [26]

Le filtrage en ligne laisse espérer des réductions de gigue importantes. Il affecte également le niveau de bruit et modifie les forces d'interaction entre solitons.

Une limite existe toutefois dans la sévérité du filtrage admissible, un filtrage trop étroit pouvant conduire à une destruction des impulsions. La détermination des caractéristiques de filtrage optimales doit prendre en compte ces différents effets.

Une technique dérivée permet d'utiliser des filtres nettement plus étroits, et donc de diminuer considérablement la gigue, tout en réduisant fortement le niveau de bruit. Les filtres sont disposés à des fréquences centrales légèrement décalées les unes par rapport aux autres. Le soliton, grâce à ses propriétés non linéaires, glisse en fréquence, alors que le bruit et les perturbations (qui sont en régime linéaire) ne peuvent suivre et sont absorbés par la cascade de filtres.

En bref, la ligne devient transparente au signal et opaque aux bruits ! La maîtrise de ces techniques passe par une nécessaire quantification des tolérances sur la dispersion des paramètres des filtres. Pour les filtres décalés, s'ajoute la détermination de la vitesse de glissement optimale, elle-même fonction de la largeur des filtres.

## 2) La modulation en ligne :

La modulation en ligne, qu'il est nécessaire de stabiliser par un filtrage complémentaire, conduit à un résultat remarquable :

Les niveaux de bruits et de gigue, croissant en début de propagation, se stabilisent ensuite à des valeurs indépendantes de la distance. Ce résultat, trop récent pour avoir été complètement exploré, ouvre la porte à la notion de régénération optique distribuée. Classiquement, la fonction (non linéaire) de régénération est avant tout un moyen d'élimination du bruit. Avec la propagation soliton, on dispose en quelque sorte d'une régénération distribuée tout au long de la liaison, dont l'effet n'est plus directement localisé dans le répéteur.

A nouveau, les études portent sur les caractéristiques d'un couple modulation filtrage optimal, et sur l'évaluation de ses tolérances

A terme, exploiter les autres degrés de liberté du soliton :

Les études de propagation couvrent aussi l'exploitation des autres degrés de liberté du soliton parmi lesquels nous pouvons citer :

- La possibilité de transmettre plusieurs trains de solitons à des longueurs d'onde différentes (multiplex en longueur d'onde).
- l'utilisation de la polarisation comme moyen de discrimination,

- l'utilisation des paramètres de phase et d'amplitude relative des impulsions pour réduire l'interaction et donc le bruit de position et ce, sans traitement en ligne.

### 3.3.7.1.3 Etudes des systèmes de transmission

L'objectif des études de système est l'identification des points de fonctionnement possibles pour le débit à transmettre et la longueur de la liaison. Pour ce faire, le taux d'erreur par élément binaire est l'élément de mesure principal, même s'il est difficilement accessible par des moyens non expérimentaux.

Par ailleurs, dans la comparaison des points de fonctionnement, le critère de qualité retenu ne peut pas être exclusivement technique et devra aussi intégrer des paramètres économiques.

Définition de l'architecture du système, choix et dimensionnement du traitement en ligne, choix de l'espacement entre répéteurs, détermination de la (des) longueur(s) d'onde de fonctionnement, du régime de fonctionnement des amplificateurs sont autant de tâches délicates s'appuyant sur une démarche la plus exhaustive possible.

La notion de meilleur point de fonctionnement est par ailleurs indissociable de celle de marges. Ces dernières ont pour but de quantifier les tolérances du système aux dérives de différents paramètres imputables au vieillissement des différents sous ensembles ou à une éventuelle défaillance de l'un d'entre eux.

Là aussi, la nature non linéaire de la propagation modifie l'approche habituelle en la matière. Par exemple, se garantir une protection accrue vis-à-vis des bruits d'amplitude par un excès de puissance en ligne n'est plus possible, cette dernière étant une des caractéristiques principales définissant le régime de fonctionnement.

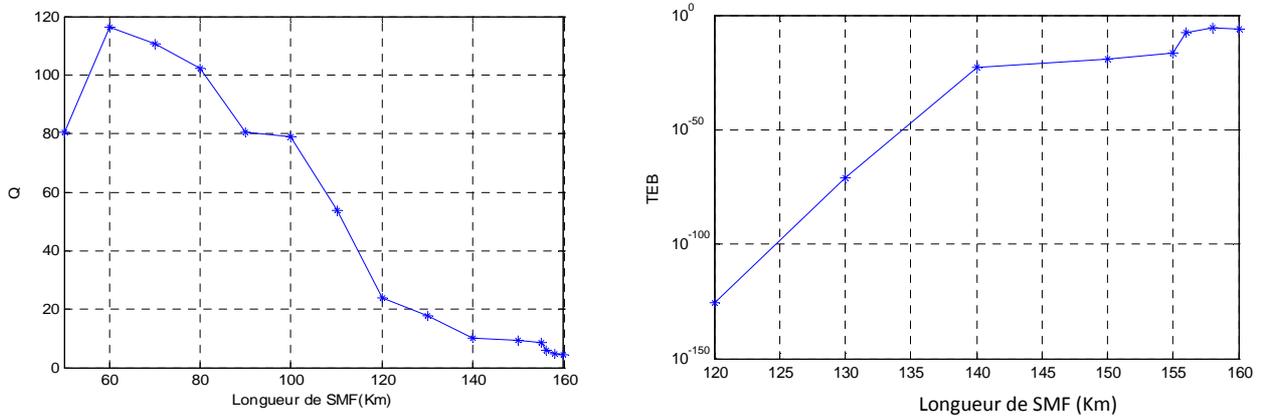
Redéfinir le formalisme, anticiper les conséquences sur les exigences de fiabilité font aussi partie intégrante des études de système à solitons.

## 3.4 Etude et simulations

Pour mesurer le TEB, on compare entre deux signaux électrique, comme on obtient un signal optique en générant des solitons, ou est obligé d'utiliser un convertisseur optique-électrique au niveau de l'émetteur pour pouvoir comparer avec le signal reçu.

### 3.4.1 Effet de la variation de la longueur de la fibre SMF

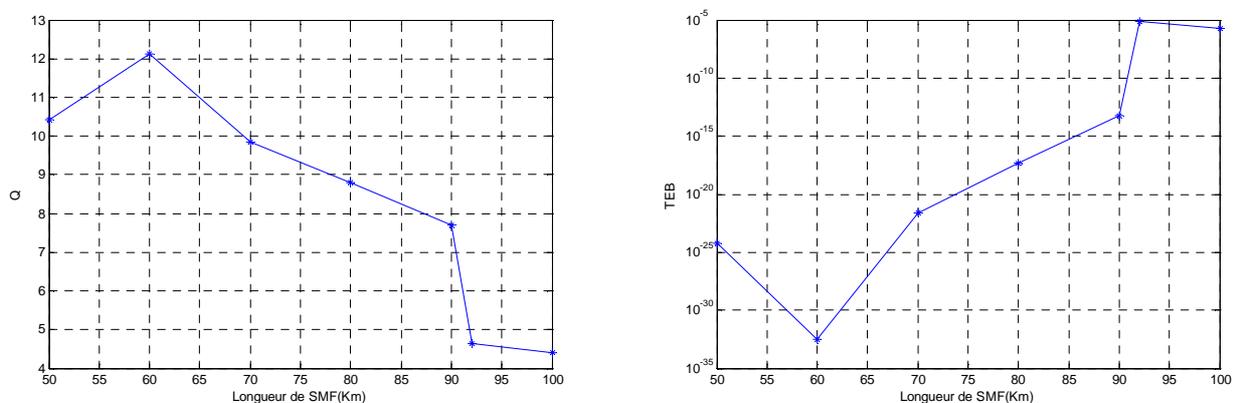
Dans cette partie nous allons voir l'effet de la longueur de la fibre monomode SMF dans un system avec soliton sur la qualité de transmission, en utilisant un seul tronçon de 60 km, les résultats sont présentés sur la figure 3.4.



**Figure 3.4 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de la longueur de la fibre ( $N=1$ )

D'après la figure ci dessous on remarque que le facteur de qualité est au maximum pour une longueur de fibre monomode SMF de 60 km, et on constate une forte dégradation de facteur de qualité due à l'augmentation de la longueur. On peut atteindre une longueur maximal de 155km de la fibre monomode, donc au total une longueur de 186 km avec un facteur de qualité égal a 8.63 et un taux d'erreur binaire de l'ordre de  $10^{-17}$ .

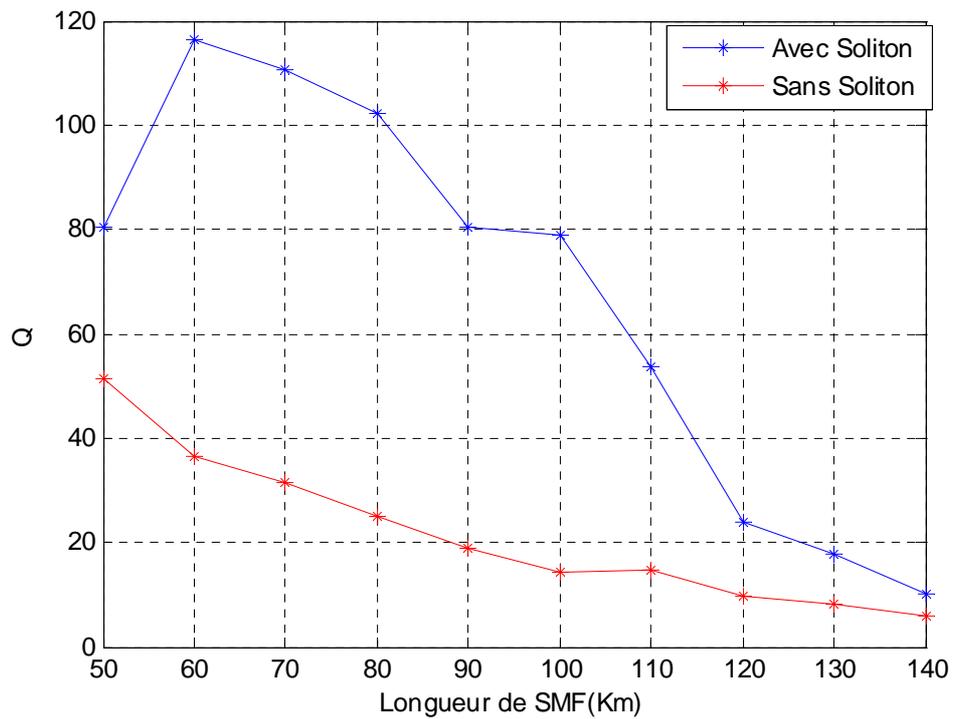
En faisant la même étude, mais en utilisant 5 tronçons au lieu de 1, on obtient les résultats de la figure 3.5



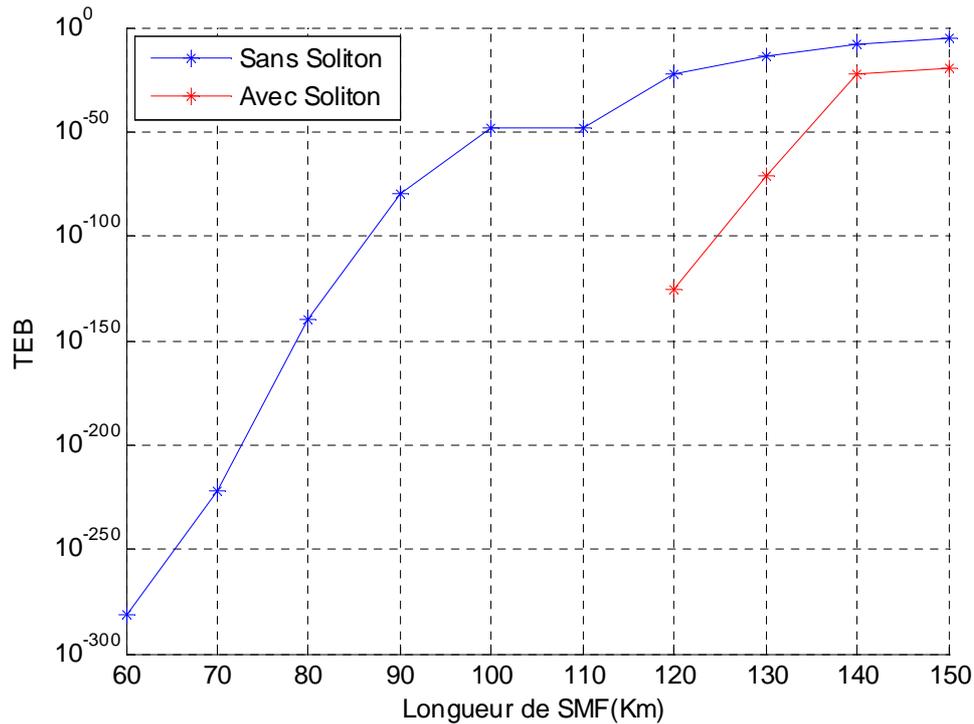
**Figure 3.5 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de la longueur de la fibre ( $N=5$ )

On constate qu'on obtient un meilleur facteur de qualité  $Q$  pour une longueur de 60 km de la fibre SMF, avec un facteur de qualité égal à 12.11 et un taux d'erreur binaire de l'ordre de  $10^{-33}$  la qualité est décroissante et se décroît avec l'augmentation de la longueur pour avoir une valeur optimale de 90 km de la fibre monomode.

Dans cette partie nous avons une comparaison du facteur de qualité et le taux d'erreur binaire avec un nombre de tronçon égal a 1 en mode avec soliton et en mode sans soliton, les résultats sont présentés sur la figure 3.6 et 3.7.



**Figure 3.6 :** Facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre ( $N=1$ )

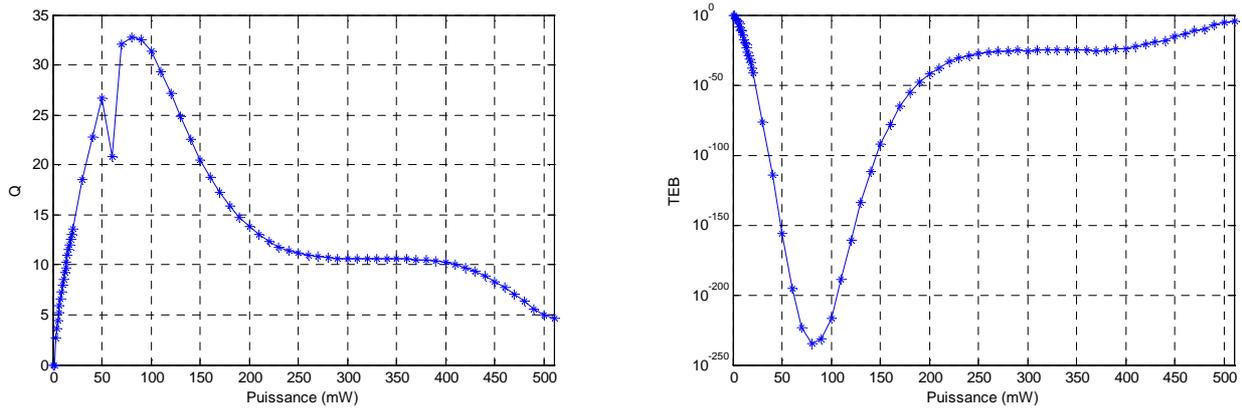


*Figure 3.7 : TEB en fonction de la longueur de la fibre (N=1)*

Dans un mode sans soliton nous avons une valeur maximal de TEB pour une longueur de 60km par contre pour le mode soliton nous avons un taux d'erreur binaire nul ce qui confirme une très bonne qualité, et nous avons maximum taux d'erreur binaire dans le cas de soliton pour une longueur de 120 km. On obtient une longueur maximale dans le mode avec soliton égale a 150km avec un taux d'erreur binaire égale a  $10^{-17}$  par contre pour un mode sans soliton nous avons une longueur de la fibre SMF égal a 130 avec un taux d'erreur binaire égal a  $10^{-16}$ .

### 3.4.2 Effet de la variation des puissances sur un tronçon de fibre monomode

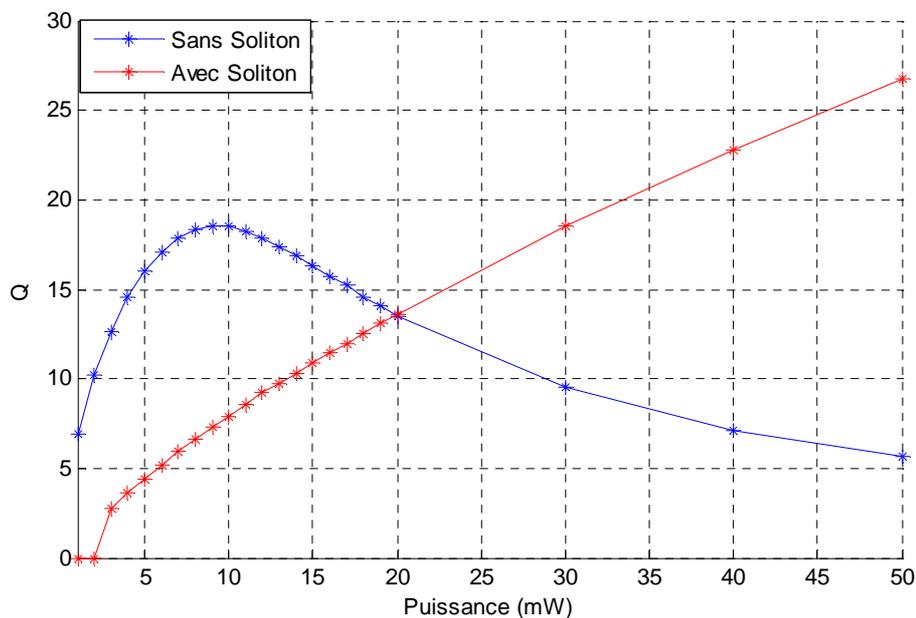
Plusieurs mesures sont faites en variant la puissance de la diode laser injecté à l'émission avec une longueur de 150 km de la fibre monomode SMF pour un seul nombre de tronçon.



**Figure 3.8 :** Facteur de qualité et TEB en fonction de la puissance

On remarque que le facteur de qualité avec une puissance égal 80mw est maximum, ce facteur est en dégradation avec l'augmentation de la puissance. Par exemple, Nous avons un bon facteur de qualité et un taux d'erreur binaire de l'ordre de  $10^{-16}$  pour une puissance de 450 mw émise par la diode laser.

On va présenter dans la suite une comparaison entre le mode sans soliton et avec soliton en variant la puissance pour un seul nombre de tronçon.



**Figure 3.9 :** Facteur de qualité en fonction de la puissance

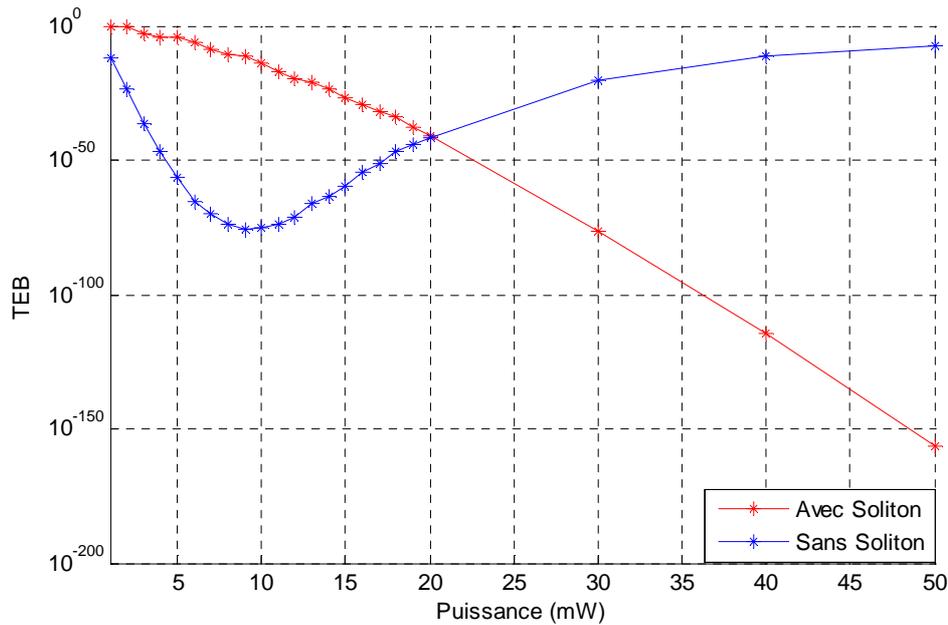


Figure 3.10 : TEB en fonction de la puissance

Dans la figure suivante, pour des valeurs de puissance émise inférieure à 20mw on observe un meilleur résultat pour le mode sans soliton des que cette puissance dépasse 20 mw, le mode avec soliton prend avantage. Pour ce qui l'allure des courbes nous avons une augmentation du facteur de qualité dans le mode avec soliton .Par contre dans le cas du mode sans soliton on remarque une augmentation suivi d'une forte diminution.

### 3.4.3 Etude de Variation de débit binaire sur une liaison optique

Les mesures sont faites ici en variant le débit de donnée, la longueur de la fibre SMF fixée à 150km ainsi la puissance égal à 8mw pour un seul tronçon. Le tracé nous donne les graphes suivants.

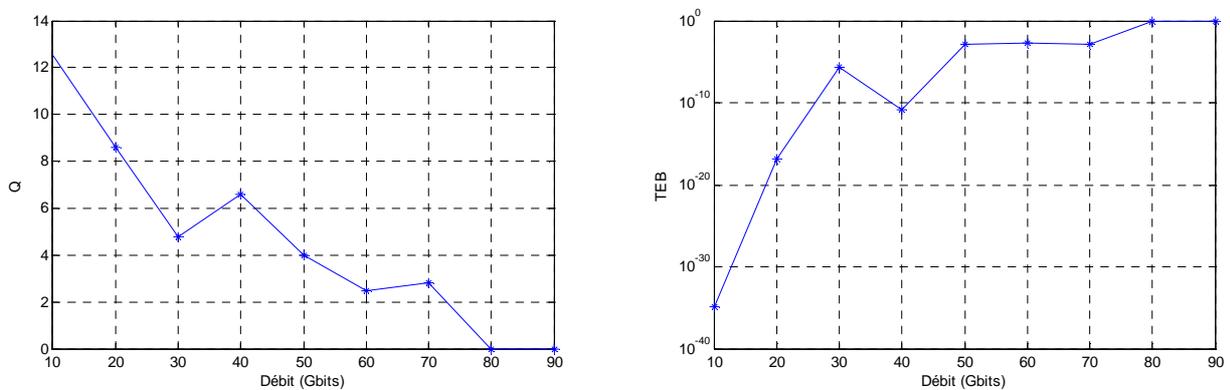
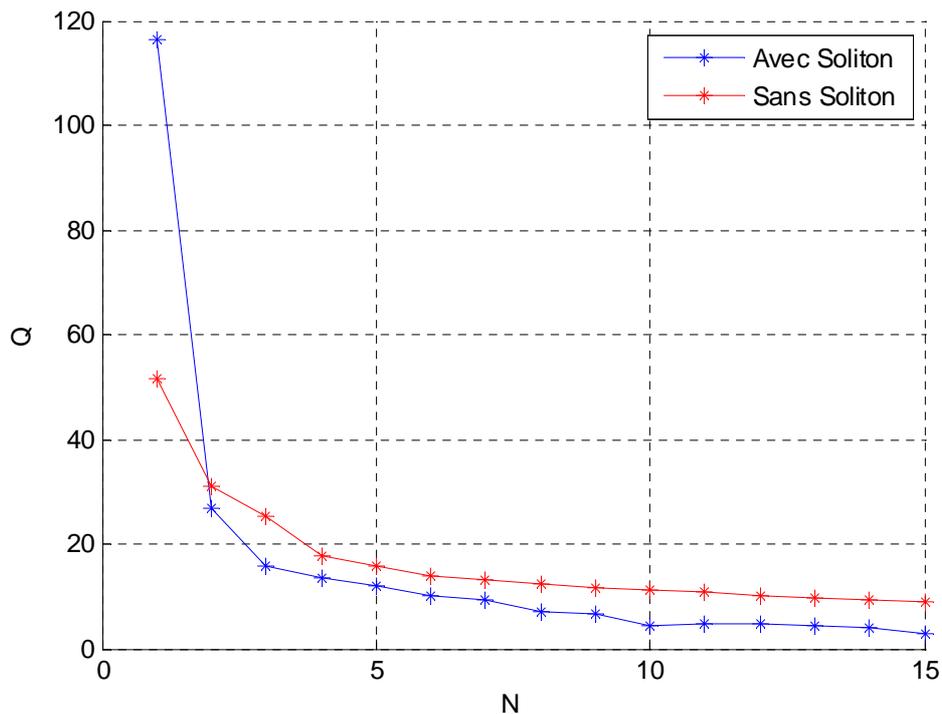


Figure 3.11 : Facteur de qualité et TEB en fonction du débit

Nous avons obtenu pour 10 Gbit/s un facteur de qualité égale à 12.52 et un taux d'erreur binaire de l'ordre de  $10^{-35}$  le facteur de qualité décroît rapidement avec l'augmentation du débit. On a un bon facteur de qualité de l'ordre de 6 avec un débit de 40 Gbit/s.

La figure 3.12 présente une étude comparative entre un mode avec soliton et sans soliton en faisant varier le nombre de tronçons.



**Figure 3.12 :** Facteur de qualité en fonction de nombre de tronçon (N)

On note que le système avec soliton est nettement meilleur que le système sans soliton quand on utilise un seul tronçon. Dès qu'on passe à un système avec plus de 2 tronçons, on aura un meilleur résultat pour le système sans soliton. On remarque une différence moyenne de 5 dans le facteur de qualité. Le nombre de tronçons qu'on peut atteindre dans le système sans soliton est 30 et pour le système avec soliton on aura 8 tronçons. Pour conclure cette partie on peut dire que les amplificateurs optiques et les fibres compensatrices de dispersion dégrade considérablement les systèmes avec soliton, ces derniers fonctionnent mieux en grandes distance sans régénération.

### 3.5 Conclusion

La transmission par solitons constitue aujourd'hui un axe de recherche très pertinent pour la transmission optique à Longue distance et a très grand débit .Notre simulation permet de démontrer l'influence d'un mode soliton sur une chaine de transmission en le comparant avec un mode sans soliton, Nous avons pu conclure qu'un amplificateur dégrade la qualité de la chaine de transmission dans le cas avec soliton .



# Conclusion Générale



## *Conclusion générale*

Le développement des télécommunications à haut débit par fibre optique nécessite la mise au point de dispositifs de plus en plus rapides, à large bande et fonctionnant dans la plage spectrale des amplificateurs à Erbium.

Notre objectif dans ce travail est d'optimiser une chaîne de transmission 40 Gb/s en agissant sur les différents paramètres et caractéristiques des composants constitutifs de cette liaison. C'est pourquoi il nous a paru important de commencer ce mémoire par une description approfondie des différents modules d'une chaîne de transmission par fibre optique.

La fibre optique apparaît de nos jours comme la solution pour les transmissions hautes débit et très haut débit.

Tout d'abord, ce travail nous a permis de renforcer et enrichir nos connaissances théoriques dans le domaine de télécommunications optiques. On a fait une étude pour les différents composants de la chaîne.

Nous avons étudié plusieurs paramètres de la chaîne de transmission, tout en essayant d'établir les valeurs optimales, qui permettent d'avoir un bon compromis entre le haut débit et une distance importante entre l'émetteur et le récepteur.

Les amplificateurs optiques et les fibres compensatrices de dispersion dégradent considérablement les systèmes avec soliton, ces derniers fonctionnent mieux en grandes distances sans régénération.

Ce projet de fin d'études, présente ainsi, des résultats théoriques et pratiques (simulation sur Optisystem) expérimentaux concernant l'étude de l'effet de la génération du signal ainsi que la modulation sur la chaîne de transmission, pour faire transiter les données avec un minimum d'erreurs et très rapidement avec des longueurs de fibre monomode SMF importantes.

## Liste des abréviations

### *A*

APD	Avalanche PhotoDiode (Photodiode à avalanche)
AOSC	Amplificateur à semi conducteur

### *B*

BER	Bit Error Rate
-----	----------------

### *D*

DCF	Dispersion Compensating Fiber
DEL	Diode Electroluminescente
DL	Diode Laser

### *E*

EAM	ElectroAbsorption Modulator
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier

### *F*

FWM	Four Wave Mixing (Mélange à quatre ondes)
-----	---

### *L*

LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
-------	---

### *M*

MZM	Modulateur Mach-Zhender
-----	-------------------------

## *N*

NRZ Non retour à zéro

## *O*

ON Ouverture Numérique

## *P*

PDA Photodiode à avalanche

PMD Polarization Mode Dispersion

PRBS Pseudo Random Binary Sequence

## *R*

RZ Retour à zéro

## *S*

SBS Stimulated Broullion Scatering

SMF Single Mode Fiber

SPM Self Phase Modulation (Automodulation de phase)

SRS Stimulated Raman Scatering

## *T*

TEB Taux d'erreurs Binaire

## *W*

WDM Wavelength Division Multiplexing

## *X*

XPM Cross Phase Modulation (Modulation de phase croisé)

## Références bibliographiques

- [1] JOINDOT, Irène et Michel, *Les Télécommunications par fibres optiques*, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris : Dunod et CNET-ENST, 1996.
- [2] LECOY, Pierre, *Télécommunications optiques*, Paris : Editions Hermès, 1992.
- [3] BOISROBERT Christian, TOFFANO Zeno, *Cours de DESS et DEA d'Optique et Optoélectronique*, Université de Nantes, 2001.
- [4] les techniques de transmission optique, projet bibliographique.
- [5] *Les techniques de l'ingénieur*, Techniques de l'ingénieur, Paris, 1999.
- [6] HEIDEMANN R., WEDDING B. et VEITH G., « *10-GB/s transmission and beyond Proceedings of the IEEE* », November 1993, Vol. 81, n°11.
- [7] Jérôme LAURENT, « *Communications optiques a très haut débit* », centre de Paris 2009.
- [8] BOUDRIOUA Nassima, « *Vers une compensation électronique de la PMD* », thèse doctorant, école doctorale IAEM-Lorraine, 2007.
- [9] AGRAWAL G.P., « *Nonlinear fiber optics*», Academic Press, New York, 1989.
- [10] DAFA Seynabou Loum , « *Transmissions radio haut débit multiservices sur fibres optiques – Application à l'optimisation de la capacité utilisateurs en emprises de transport* », thèse doctorat, université VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS, 2012.
- [11] CASSAN E., « *Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples* », Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, EDP Sciences, 2002, Vol. 3.
- [12] KANEDA T, « *Silicon and Germanium avalanche photodiodes semiconductor and Semimetals* », Lightwave Communications Technology, Vol. 22, Part D, Photodetectors.
- [13] BOYOGUENO BENDE A., DUGUAY A. et FORTIER P., « *Etude sur l'amplification en ligne des systèmes de communication optique* », IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Montréal, Septembre 1995, pp. 93-96
- [14] MIKKELSEN, « *Monolithic integrated Michelson interferometer with SOA's for high speed all-optical signal processing* », *Proc. Optical Fiber Communications*, San Diego,

TuH4, February 1995.

[15] Web Page: [www.forceinc.com](http://www.forceinc.com), « The effects of fibre nonlinearities on high speed fibre optic data transmission, a brave new world of complexity » .

[16] « *Génération d'impulsions Optiques brèves à 40 GHz par Mélange a quatre ondes* »

[17] MEDJDOUB Fadila « *Optimisation par la simulation système d'une chaine de transmission numérique par fibre optique haut débit* » thèse de Magister.

[18] KIMBIRI.S et KPEMISSI EYANA.P « *Etude d'une liaison optique multiplexée RZ/NRZ 16x40 Gbit/s* » thèse de Master. Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen.

[19] GAY M, « *Etude théorique et expérimentale de l'impact de la régénération 2R dans un système de transmission optique haut débit* », thèse doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes.

[20] KHAMIRI Sondes, « *Génération d'impulsion optiques brèves 40 GHz par mélange a quatre ondes* », PFE, Ecole Supérieur des Communications de Tunis, 2005.

[21] Adardour Haroun Errachid , « *Etude et évaluation des performances d'un système WDM pour les télécommunications optiques haut débit* » PFE université de TLEMEN 2012.

[22] Michel JOINDOT et Irène JOINDOT « *System de transmission sur fibre optique* » technique de l'ingénieur.

[23] Thierry GEORGES, « *Soliton dans les fibres optiques* », technique de l'ingénieur.

[24] Dimensionnement Des Reseaux WDM : Modélisation et Approximation. Hervé Rivano.

[25] <http://www.rd.francetelecom.fr/fr/technologies/ddm>

[26] <http://www.perso.club-internet.fr/rose2seb/wdm2.html>

[27] <http://www-opt.enst-bretagne.fr/razzak/these/node7.html>

## Résumé

L'objectif de ce travail concerne l'étude d'une chaîne de transmission optique d'un système de télécommunication pour le besoin de transmettre des débits plus élevés (aujourd'hui supérieurs ou égaux à 40 Gb/s) sur des longueurs de transmission de plus en plus grandes. Notre simulation permet de définir le code le plus performant, entre RZ, NRZ et gaussien ainsi que le modulateur optimal (Modulateur de Mach-Zehnder, modulateur d'amplitude et modulateur à électro-absorption) pour la liaison à différents débits et distances pour obtenir une meilleure qualité de transmission.

**Mots clés :** Liaison optique, fibre optique monomode, EDFA, DCF, Soliton.

## التلخيص

الهدف من هذا العمل هو دراسة سلسلة انتقال البصرية من نظام الاتصالات السلكية واللاسلكية للحاجة إلى نقل معدلات بيانات أعلى (الآن أكبر من أو تساوي 40 جيجا بت / ثانية) أطوال انتقال كبير ومتزايد أخذ في الازدياد. يتم استخدام المحاكاة لدينا لإثبات المغير الأكثر كفاءة والأفضل للربط إلى سرعات مختلفة للحصول على أفضل جودة الإرسال رمز، وفقا لنتائج المحاكاة أن نستنتج أن قانون RZ و NRZ المغير يلبي هذه يحتاج لأنها تمر بمرحلة انتقالية الغنية التي تسمح للانتعاش إشارة على مدار الساعة للربط إلى معدلات تدفق مختلفة ومسافات لنقل جودة أفضل..

## Abstract

The objective of this work is the study an optical transmission link for telecommunication system in order to transmit higher data rates (greater than or equal to 40 Gbit/s) with growing distance between emitter and receiver. Our work consist to find the most efficient code between RZ, NRZ and Gaussian and optimal modulator (Mach-Zehnder modulator, amplitude modulator et electro-absorption modulator) for the link with different data rate and distances to obtain the best quality of transmission possible.

**Keywords:** Optical link, Single mode fiber, EDFA, DCF, Soliton

