

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



كلية الهندسة - دائرة الإلكترونيك
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

OPTION : RÉSEAUX ET TÉLÉCOMMUNICATIONS.

***ETUDE ET SIMULATION D'UNE LIAISON
PAR FIBRE OPTIQUE***

Proposé par :

N° :

Mr. NACER Said

- **Présenté par:**
- ***BAKALEM Ahmed***
- ***BOUREGA Adel***

Session : Juillet 2011

2010/2011

I.1 introduction

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

L'architecture d'une liaison, quelque soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée des mêmes briques de base, à savoir un émetteur, un module de transmission et un récepteur.

Pour chacun de ces éléments constitutifs d'une liaison sur fibre optique, nous tenterons de décrire leur rôle et leur fonctionnement. Nous débuterons par la fibre optique, élément essentiel puisqu'elle permet le transport de l'information et est à l'origine des efforts réalisés par la suite. Nous poursuivrons par la description de l'émetteur (laser), pour enchaîner sur les blocs constituant le récepteur (photodiode, amplificateur électrique, filtre électrique). 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.

I.2 La fibre optique

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

- 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.

I.2.1 Présentation générale des fibres

Une fibre est un guide d'onde cylindrique et diélectrique. Elle est constituée de deux diélectriques de même axe, le cœur et la gaine, entourés d'une gaine de protection

(Figure I.1).

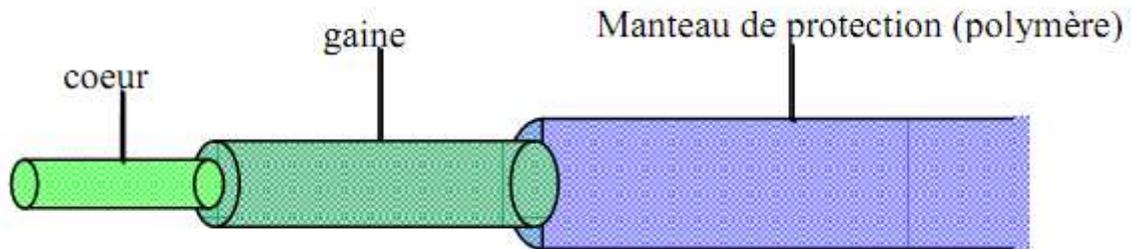


Figure I.1: Structure d'une fibre optique.

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine (Figure I.2). Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui du cœur (une différence de quelques % est suffisante). La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. L'ouverture numérique (O.N.) représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptré cœur-gaine de la fibre.

$$(ON = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)})$$

I.1

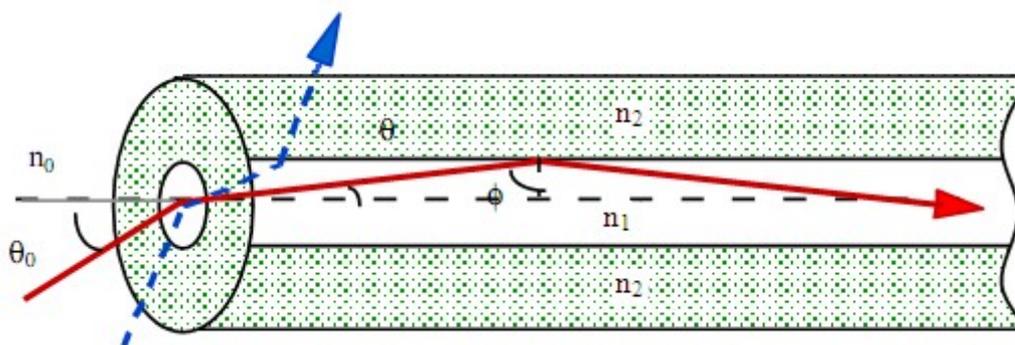


Figure I.2: principe de propagation du signal dans une fibre optique.

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

Il existe deux types de fibres : multimode et monomode. Dans une fibre multimode, les diamètres des diélectriques sont plus importants que ceux d'une fibre monomode (\varnothing du cœur ≈ 50 microns et \varnothing de la gaine ≈ 125 microns) et les différents rayons empruntent des trajectoires différentes. Leurs chemins optiques et donc leurs temps de propagation sont différents. Il en résulte donc une dispersion intermodale (Figure I.3). Pour diminuer cet effet, le profil d'indice du cœur peut être modifié de telle sorte à créer un « gradient d'indice » et non un saut d'indice (l'indice n_1 n'est pas constant mais possède une symétrie autour de l'axe) (Figure I.4). Cela permet de réduire les différences de temps de propagation en réduisant les écarts entre chemins optiques.

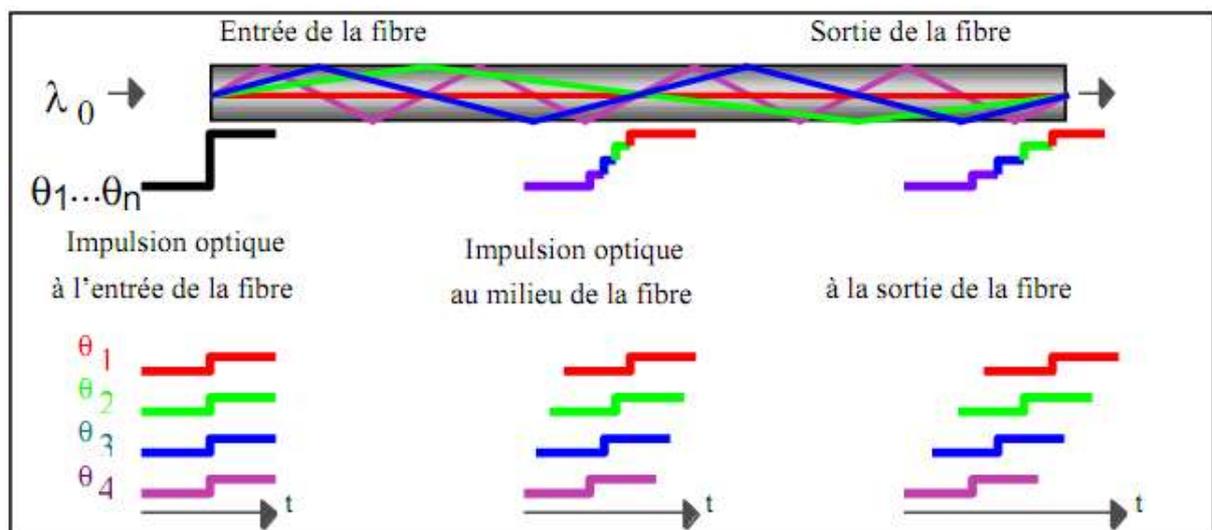


Figure I.3: Dispersion intermodale dans une fibre multimode à saut d'indice.

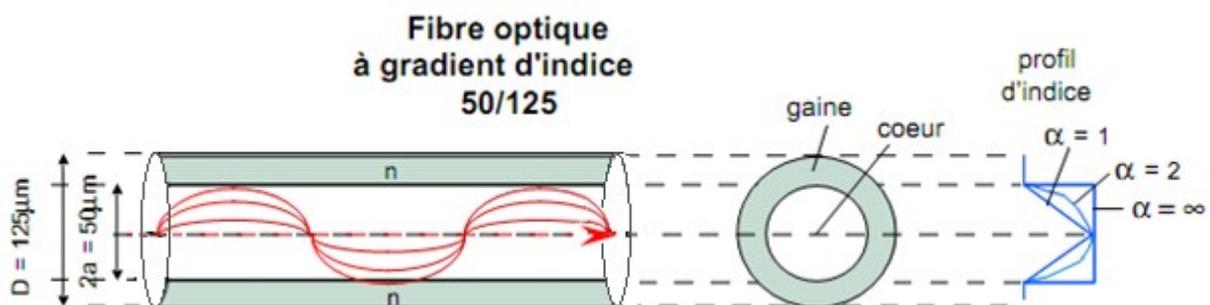


Figure I.4: Profil d'une fibre multimode à gradient d'indice.

Les fibres multimodes sont de préférence employées pour les réseaux locaux, pour les bas débits ou encore pour des longueurs d'onde proches de 850 nm. 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 (Figure I.5).

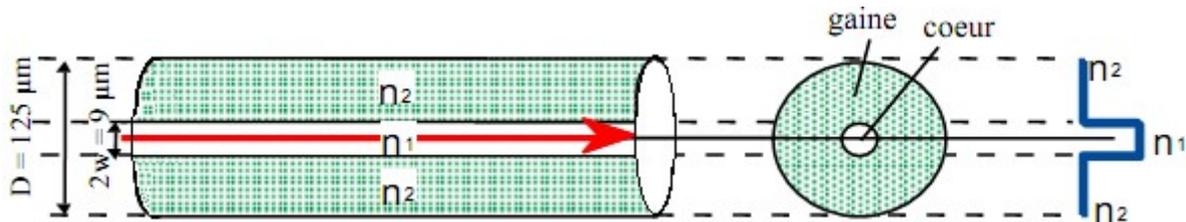


Figure I.5: Profil d'une fibre monomode à saut d'indice.

L'UIT-T (Union Internationale des Télécommunications) a instauré des normes internationales pour les fibres optiques déployées dans les réseaux de télécommunications.

Les recommandations G.650 à G.655 portent sur les paramètres géométriques, mécaniques et optiques des fibres et sur les tolérances admissibles (Tableau I.1).

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

Tableau I.1 : Exemples de caractéristiques de quelques fibres optiques de transmission.

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

I.2.2 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 micro-courbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour les fibres standards 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 I.6 montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications.

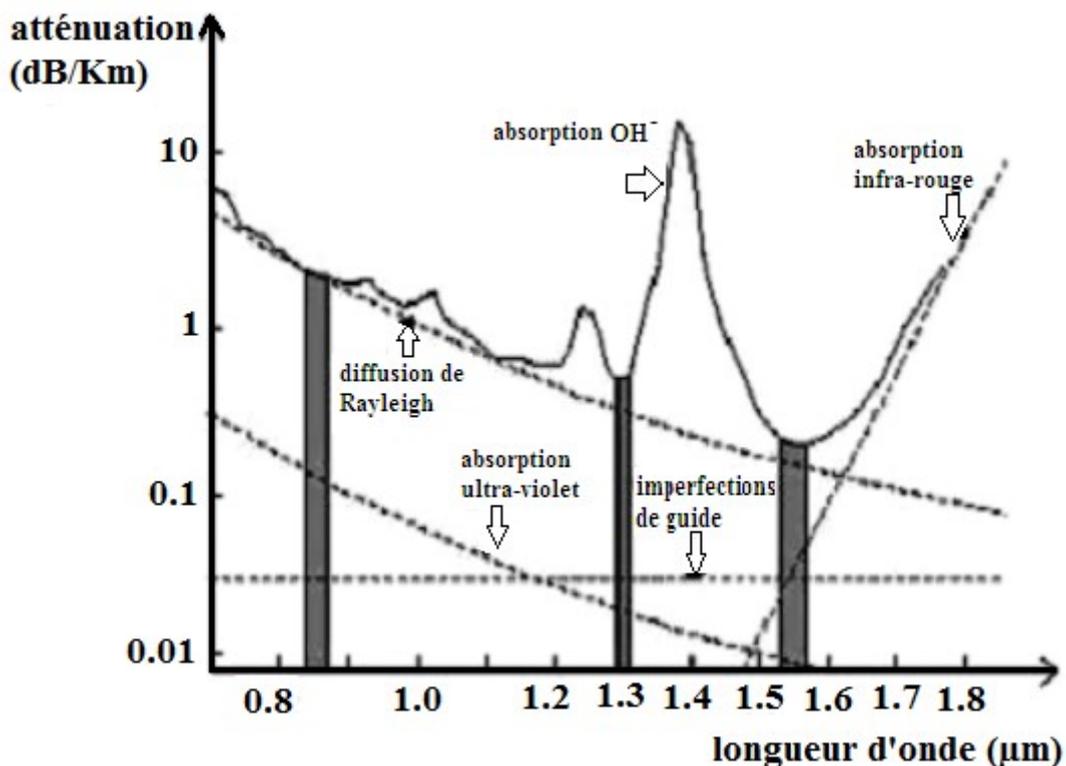


Figure I.6: Atténuation spectrale d'une fibre optique.

L'atténuation minimale de 0,22 dB/km n'est pas très loin du minimum théorique pour la silice. La différence s'explique par le fait que l'on ne peut pas utiliser de la silice pure. On doit doper soit le cœur, soit la gaine et cela augmente les fluctuations de composition et donc les pertes par diffusion. [1]

I.2.3 La dispersion chromatique

I.2.3.1 Définition

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 λ . 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.

En fait, la dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion modale). La Figure I.7 montre l'évolution avec λ du terme matériau pour la silice.

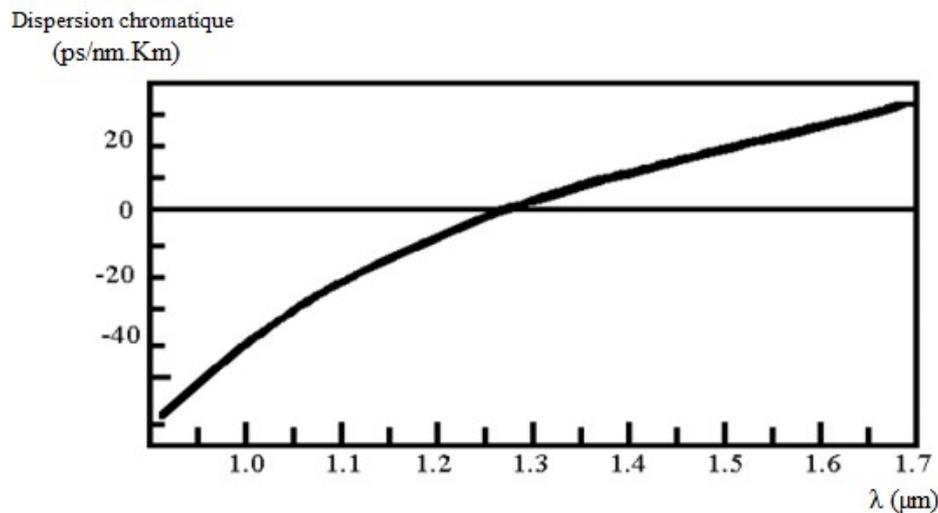


Figure I.7: Dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde.

On voit sur cette courbe, que la fibre monomode standard G.652 présente une dispersion maximale de 20 ps/(nm.km) à 1550 nm. Classiquement, on la considère de 17 ps/(nm.km). Dans la bande 1288 à 1359 nm, elle est de 3,5 ps/(nm.km). Ainsi, la capacité de

transmission est la plus grande possible pour une longueur d'onde d'environ 1,3 μm . Elle est donc idéale pour cette fenêtre spectrale et permet de transporter de très hauts débits.

Malheureusement, ce n'est pas là que l'atténuation est la plus faible (Figure I.8). On a donc cherché à déplacer le point de dispersion nulle vers 1,55 μm . On dit que ce genre de fibre, la G.653, est à dispersion décalée (Figure I.8). Il existe aussi des fibres à dispersion aplatie pour lesquelles la dispersion totale reste très faible, de l'ordre de quelques ps/(nm.km), sur plus d'une centaine de nanomètres (Figure I.8).

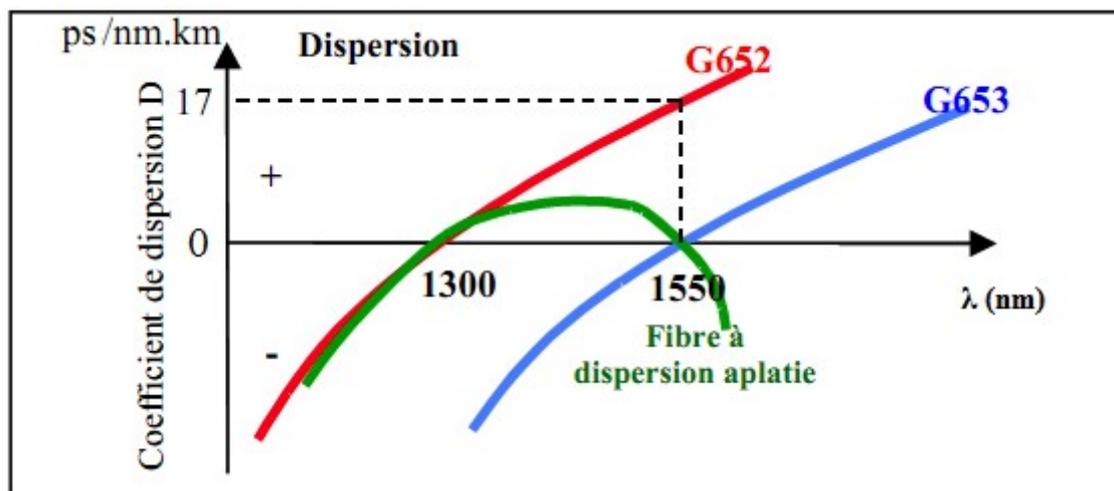


Figure I.8: Courbes de dispersion de quelques fibres optiques.

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

I.2.3.2 Effets sur la transmission

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne donc différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques. Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre symboles est possible. Cet élargissement τ se calcule ainsi :

$$\tau = D \text{ (ps/nm.km)} * L \text{ (km)} * \Delta\lambda \text{ (nm)} \quad \text{I.2}$$

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, car le milieu des télécommunications

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 usité dans les réseaux de télécommunications.

I.2.4 La polarisation et la dispersion modale de polarisation

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 I.9). On l'appelle dispersion modale de polarisation (Polarization Mode Dispersion, PMD, en anglo- américain).

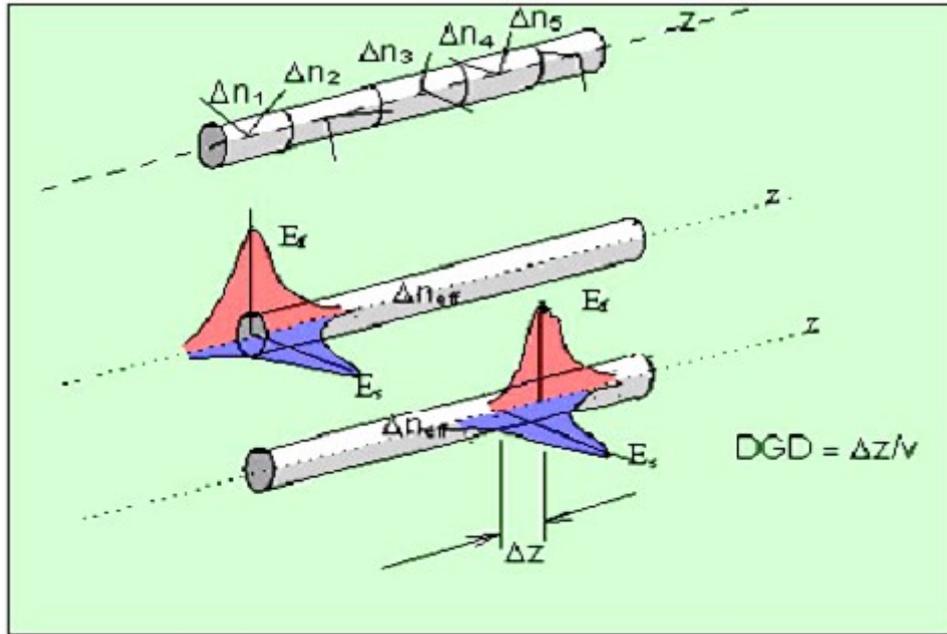


Figure I.9: Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à une biréfringence aléatoire de la PMD.

Une caractéristique essentielle de ce phénomène réside dans son caractère aléatoire, étant donné qu'il est principalement d'origine extrinsèque et dépend de la qualité de la pose de celle-ci. La fibre optique apparaît ainsi comme un milieu fluctuant. La valeur moyenne du retard n'est donc pas suffisante pour le décrire totalement et nous utiliserons donc des données statistiques. La mesure principale est le DGD (Differential Group Delay), retard différentiel entre les 2 composantes correspondant aux états principaux de la propagation.

$$\text{DGD} = \text{BL} \times \sqrt{L_c} \times \sqrt{L} \quad \text{I.3}$$

Où :

BL : Biréfringence Linéique

L_c : longueur de couplage

L : longueur de la fibre

Ce décalage a jusqu'à nos jours souvent été négligé car il reste minime. Cependant, l'allongement du support de transmission optique augmente la valeur de ce décalage temporel alors que la valeur critique diminue avec l'augmentation des débits.

I.3 Module d'émission

Compte tenu des propriétés des fibres optiques, des efforts sont nécessaires sur les composants micro-optoélectroniques pour permettre une utilisation optimale. D'importants progrès sur les lasers ont été réalisés dès la fin des années 60 et les premiers réseaux à fibres optiques ont pu être déployés.

La partie émission de notre liaison optique est composée d'un laser à semi-conducteur. Son rôle est de délivrer au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données.

I.3.1 Fonctionnement d'un laser à semi-conducteur

Dans les systèmes de communications optiques, la source optique la plus utilisée est la diode laser, (acronyme de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation »). La diode laser se base sur trois processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière. Ces processus sont l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée.

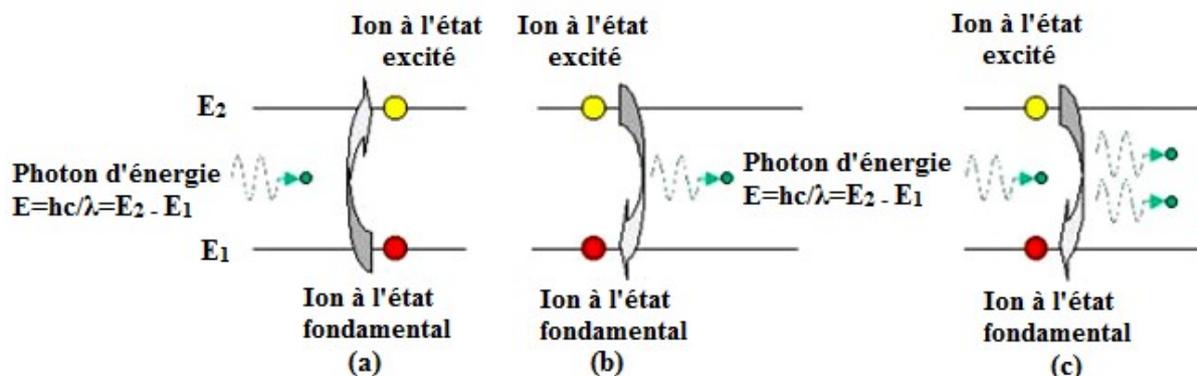


Figure I.10: Mécanismes fondamentaux de fonctionnement d'une diode laser.

Pour obtenir l'effet laser, il est nécessaire de privilégier l'émission stimulée au détriment des deux autres processus. Deux conditions doivent être réalisées pour favoriser cette émission stimulée et ainsi obtenir l'effet laser :

1. Il faut avoir suffisamment d'électrons dans l'état d'énergie supérieure. Dans un semi-conducteur, ceci est réalisé par une opération dite de pompage électrique qui consiste à promouvoir un maximum d'électrons dans la bande de conduction : c'est ce qu'on appelle une inversion de population.

2. Il faut favoriser l'émission stimulée : il faut donc avoir suffisamment de photons incidents (excitateurs). Pour cela, on enferme le semi-conducteur dans une cavité résonante constituée par exemple par un résonateur du type Fabry-Pérot, obligeant ainsi l'énergie lumineuse à s'accumuler.

I.3.2 Différents types de Laser à semi-conducteur

Les quatre principaux types de lasers à semi-conducteurs sont :

I.3.2.1 Lasers Fabry-Pérot (FP)

Sont peu performants en bruit mais sont peu coûteux ; ils sont multimodes et leur longueur d'onde atteint les 1550 nm; on les utilise par exemple comme source de puissance optique continue ou dans les liaisons numériques.

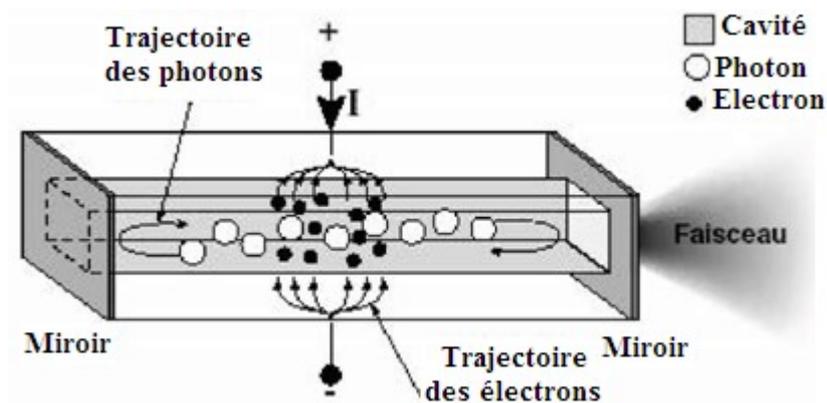


Figure I.11: Structure d'un laser classique Fabry-Pérot

I.3.2.2 Lasers à réaction répartie (Distributed Feedback laser DFB)

Ont de très bonnes performances en bruit et sont largement utilisés pour les télécommunications ; ils sont monomodes et leur longueur d'onde atteint les 1550 nm.

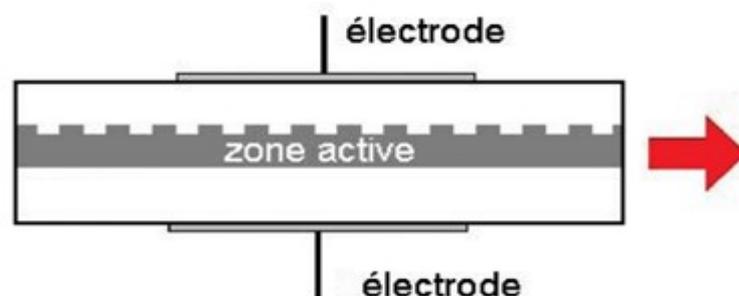


Figure I.12: structure d'un laser DFB

I.3.2.3 Lasers à Réflecteur de Bragg distribué (Distributed Bragg Reflector laser DBR)

Contrairement aux lasers DFB (historiquement plus anciens), la contre-réaction ne se réalise pas à l'intérieur du milieu actif. En effet les extrémités d'un laser DBR se comportent comme des miroirs dont la réflectivité est maximale pour une longueur d'onde donnée. Ils restent plus difficiles à réaliser et présente un coût élevé.

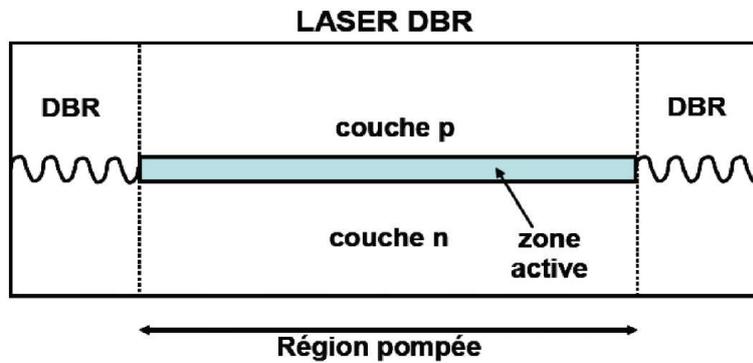


Figure I.12: Structure d'un laser DBR

I.3.2.4 Lasers à cavité verticale émettant par la Surface

Leur longueur d'onde atteint pour l'instant les 1550 nm et leur intérêt principal est d'être plus adaptés à la fabrication en grand nombre. Cependant la technologie de fabrication des VCSELs (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) à 1550 nm n'est pas encore mature, et ils présentent encore quelques inconvénients : en comparaison aux DFBs leur puissance émise est plus faible et leurs propriétés spectrales et en bruit sont moins bonnes [2].

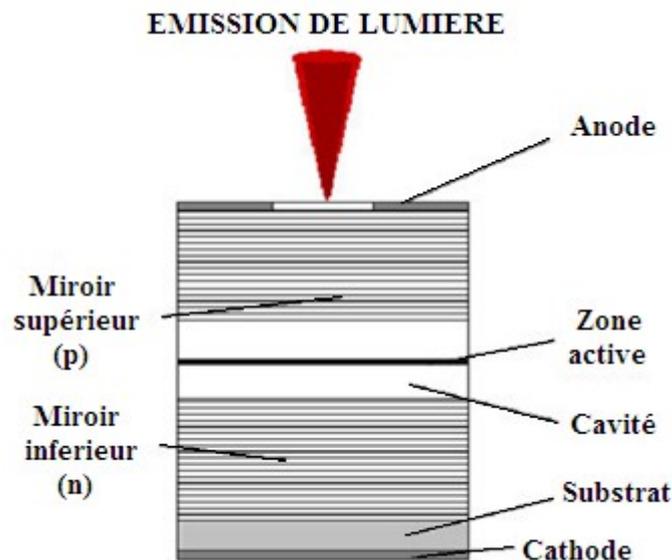


Figure I.13: Structure d'une diode laser à cavité verticale émettant par la surface (Typiquement VCSEL à 850 nm).

I.4 Module de réception

De même que pour les modules d'émission, de nombreux efforts ont été fournis pour rendre les modules de réception de plus en plus performants. Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Pour cela nous allons voir le photodétecteur comme module de réception.

I.4.1 Concepts de base

La transmission par fibre optique des données nécessite des conversions électrique - optique et optique - électrique du signal. L'interface optique de réception, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur qui, pour simplifier, se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité : il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10 Gbits/s ,40 Gbit/s voire même 80 Gbits/s. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit. Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles. Dans le paragraphe suivant, nous rappellerons le principe de la photodétection avant d'étudier plus précisément un exemple de photodétecteur : la photodiode PIN.

I.4.2 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 l'électron de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés. [3]

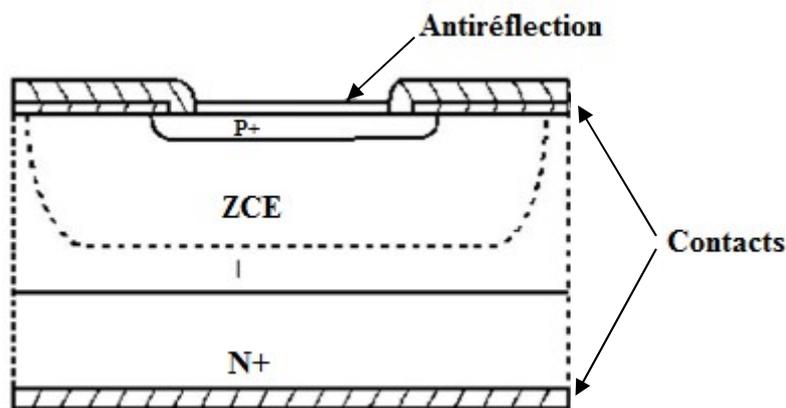
Pour effectuer la photodétection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles,

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.

I.4.3 Photodiodes PIN

La principale qualité d'une photodiode PIN est que la composante d'entraînement du photocourant domine sur la composante diffusive simplement parce que la plupart de la puissance optique incidente est absorbée à l'intérieur de la zone intrinsèque (I).

En effet, la zone I est placée entre la zone P et la zone N d'un semi-conducteur différent dont la bande interdite est choisie afin que les photons incidents soient absorbés seulement dans la



zone I de la photodiode (figure I.14).

Figure I.14: Coupe transversale d'une photodiode PIN.

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

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

$$I_{ph} = S * P_{obs} + I_{obs} \tag{I.4}$$

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

$$S = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q}{hc} \lambda$$

I.5

I_{obs} est le courant d'obscurité 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... Dans la plupart des applications ce courant est négligeable ($I_{obs} < 10$ nA). En ce qui concerne le temps de réponse, les meilleurs photodétecteurs actuels sont utilisables jusqu'à plus de 100 GHz [2h].

Pour les expérimentations, le choix d'une photodiode PIN s'imposait car le rapport signal à bruit est généralement meilleur qu'avec une photodiode à avalanche, pour peu que le niveau optique d'attaque soit assez fort.

I.5. Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (AFDE)

I.5.1 Définition

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 population. 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 30 mètres. Pour l'amplification autour de 1550 nm, fenêtre spectrale la plus utilisée car de faible atténuation des fibres optiques en silice, les dopants sont des ions Erbium Er^{3+} . On parle alors d'amplificateur à fibre dopée à l'Erbium (AFDE ou EDFA, Erbium dope Fibre Amplifier en anglo-américain). 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées à l'AFDE. Et 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 en assurent aussi la stabilité en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval. Le signal de pompe peut être couple dans la fibre en co-propagation (mêmes sens pour le signal et le signal de pompe) afin de réduire le facteur de

bruit contre propagation (sens opposé 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 population et donc l'amplification du signal, un double pompage aux deux extrémités peut également être réalisé. La Figure I.15 représente la configuration d'un de ces amplificateurs à fibre dopée. [3]

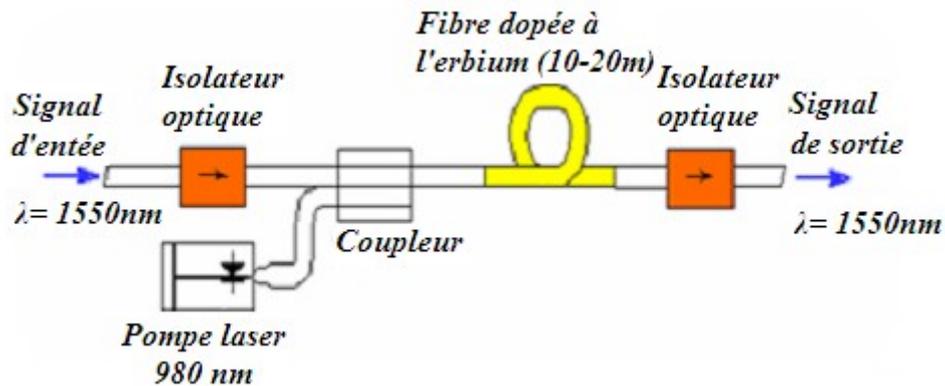


Figure I.15: Configuration d'un amplificateur optique a fibre dopée à l'erbium avec Pompage optique.

I.5.2. Principales caractéristiques de l'EDFA

I.5.2.1 Gain et puissance de saturation

Il est relativement aisé d'obtenir des gains optiques de l'ordre de 35 dB, pour une puissance de pompage optique de l'ordre de 15 dBm.

Cependant la puissance de saturation en sortie, c'est-à-dire à peu de chose près la puissance maximale disponible, est dans ce cas d'environ 11 à 13 dBm, ce qui est nettement insuffisant pour des amplificateurs en ligne capables de traiter une centaine de canaux simultanément. L'un des principaux efforts actuels concernant le développement de ces amplificateurs porte sur l'obtention de puissances voisines de 30 dBm, à l'aide de fibre à double cœur, un cœur monomode dopé entouré d'un cœur multimode non dopé beaucoup plus gros servant à confiner la puissance importante de pompage. [4]

La figure I.16 montre que la puissance de sortie P_s augmente proportionnellement à P_e pour les faibles puissances d'entrée ($P_e < -30 \text{ dBm}$) : c'est le régime « petit signal », dans lequel le gain est constant et égal à G_0 (voir figure b). On observe par contre un phénomène de saturation aux puissances plus importantes, qui se traduit par une diminution du gain en fonction de P_e .

Ce phénomène de saturation s'explique de la manière suivante : à partir d'une certaine puissance optique dans le milieu, la forte intensité de l'émission stimulée entraîne une réduction de l'inversion de population, ce qui réduit le gain optique G . On définit la puissance de saturation P_s^{sat} , comme étant la valeur de la puissance de sortie pour laquelle le gain G est égal $G_0/2$, ce qui représente une atténuation de 3 dB.

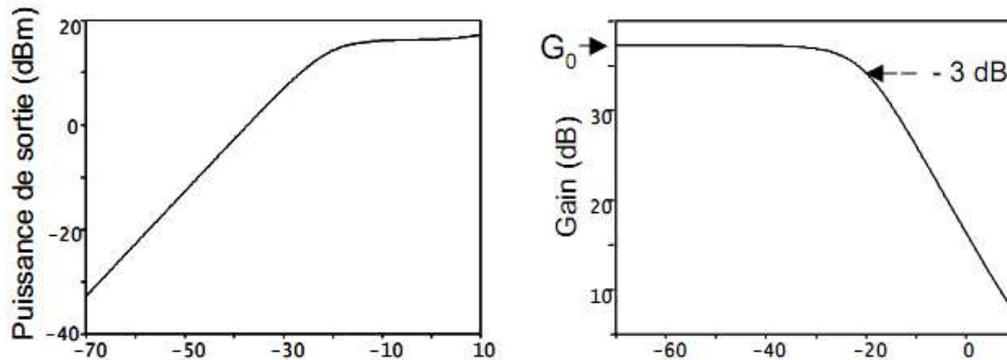


Figure I.16 : Saturation du gain ; a) Puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée ; b) Gain en fonction de la puissance d'entrée en dBm.

I.5.2.2 Facteur de bruit

Le bruit des amplificateurs optiques vient de l'émission spontanée amplifiée, accompagnant de manière inévitable l'émission stimulée. Si l'on utilise une définition du facteur de bruit très voisine de celle utilisée en électronique rapide, les valeurs typiques se situent autour de 1 à 3 dB. Il faut ajouter 3 dB une fois les signaux détectés, le mélange quadratique dû au processus de détection créant un bruit de battement que l'on ne retrouve pas en micro-ondes, l'énergie des photons "optiques" étant très supérieure à l'énergie thermique (kT). Ces facteurs de bruit peuvent paraître élevés, mais ils sont indépendants de la fréquence entre quelques MHz et une dizaine de THz. [4]

I.5.2.3 Rendement de l'amplificateur

On définit le rendement de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium comme le rapport entre le gain en décibel et la puissance de la pompe (en mW).

Le rendement considère comme un critère pour l'optimisation des fibres amplificatrices, aussi permis de comparer les paramètres optogéométriques (λ_c , dopage de centre du cœur), les constituants de la matrice (concentrations des dopants) et les longueurs d'onde de pompage. il est maximale autour de la saturation de l'amplificateur par l'ESA.

Le rendement n'est pas un bon critère de choix d'un amplificateur, il permet de comparer l'effet des différentes longueurs d'onde de pompage comme démontre la figure (II.17)

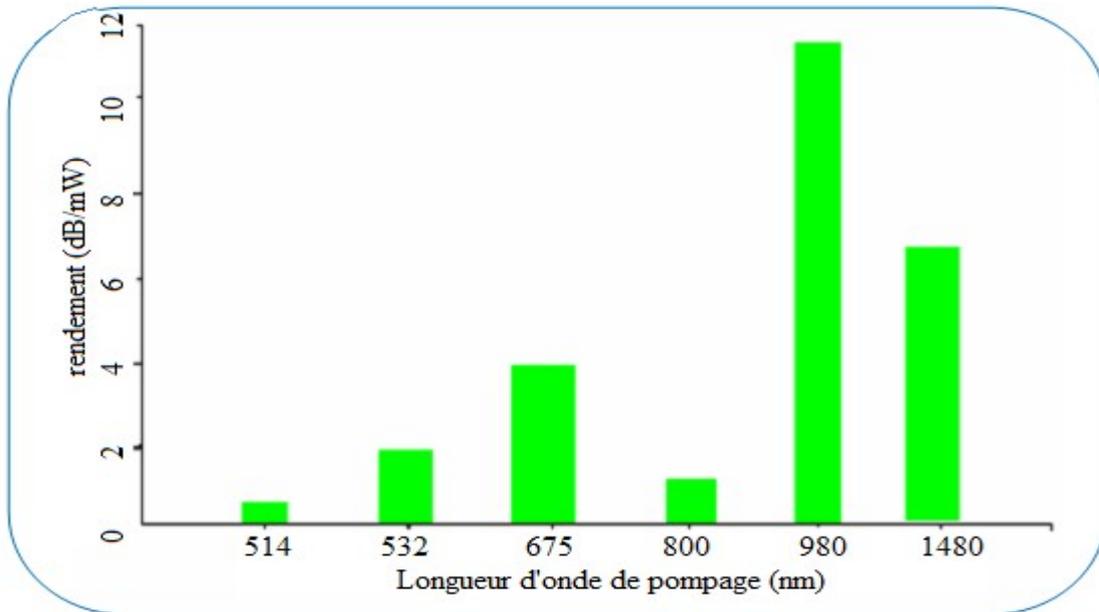


Figure (II.17) Rendements maximaux de pompage des amplificateurs pour différentes longueurs de pompage. [5]

I.5.3. Avantages et inconvénients

I.5.3.1 Avantages

- Excellent couplage : le milieu amplificateur est une fibre monomode à gain important.
- Pas de distorsion à haut débit (grande bande passante).
- Peu sensible à la température.
- Amplification simultanée des signaux multiplexée en longueur d'onde sur 30nm.

I.5.3.2 Inconvénients

- Nécessité d'un laser de pompage.
- Difficulté d'intégration.

I.6 Multiplexeur/Démultiplexeur Optique

I.6.1 Introduction

Le multiplexeur en longueur d'onde est défini comme étant un dispositif de dérivation avec deux accès d'entrée ou plus et un accès de sortie, où la lumière à chaque accès d'entrée est restreinte à une gamme de longueurs d'onde présélectionnée et la sortie est une combinaison de la lumière provenant des accès d'entrée.

Par contre, le démultiplexeur en longueur d'onde est un dispositif qui effectue l'opération inverse.

I.6.2 Principe

Disposant des sources $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ émettant à des longueurs d'ondes différentes, on a la possibilité de les coupler à une même fibre optique. A l'autre extrémité de la fibre, les signaux $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ seront séparés spatialement vers des détecteurs différents. Le composant d'entrée devra introduire dans la fibre avec le minimum de pertes possible, les signaux issus de sources différentes: c'est le multiplexeur. Le composant effectuant l'opération inverse est le démultiplexeur. [6]

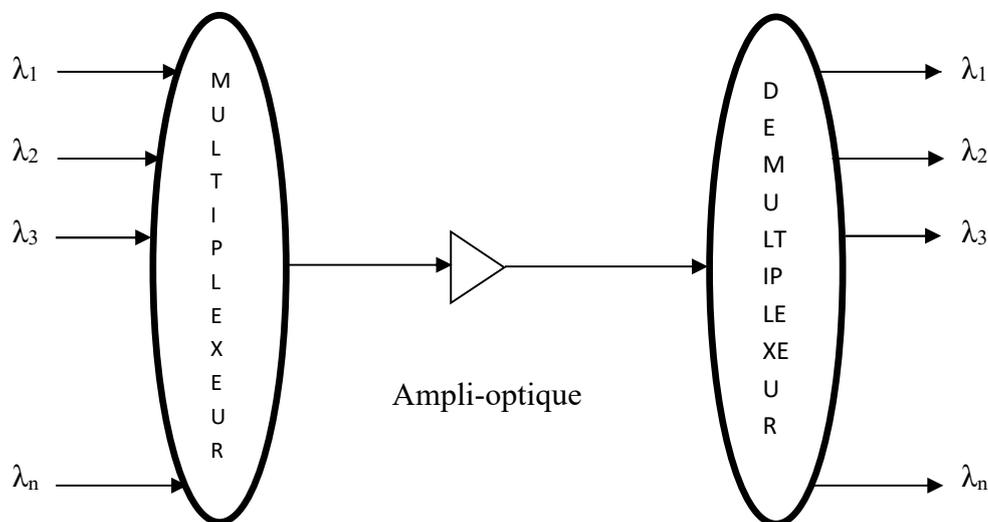


Figure I.18: Multiplexeur/Démultiplexeur.

Ce modèle, disponible dans COMSIS, permet de simuler un multiplexeur à base de réseaux de Bragg ne tenant pas compte de la polarisation.

I.7 Filtrage

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

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

On utilise donc le "filtre pratique de Nyquist" (Figure I.19) dont la largeur de bande de bruit, dans les conditions habituelles, vaut approximativement $\Delta F = 0,8 \times F_r$.

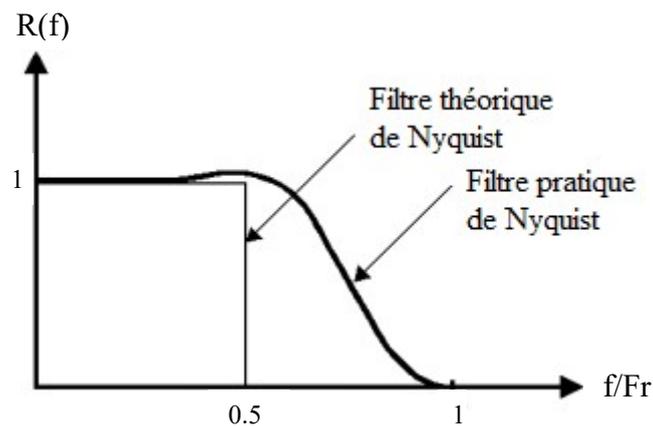


Figure I.19 : Réponses fréquentielles du filtre théorique et du filtre pratique de Nyquist.

I.8 Amplificateur électrique

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

Le modèle d'amplificateur électrique, disponible dans COMSIS, est un opérateur de gain, nommé GAIN (Figure I.20). Ce modèle permet de multiplier le signal d'entrée par une constante.

GAIN

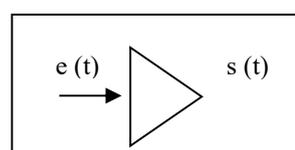




Figure I.20 : Modèle de simulation de l'amplificateur électrique.

$$\left. \begin{aligned} s(t) &= G \cdot e(t) \\ G_{dB} &= 20 \cdot \text{Log}(G) \end{aligned} \right\} \quad \text{I.8}$$

Il est important de noter que le modèle ne prend pas en compte les contributions au bruit de l'amplificateur. Ainsi, le signal de sortie est de qualité identique au signal entrant. La valeur du gain est un paramètre formel.

I.9 Conclusion

Une description détaillée de tous les composants présents dans notre 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 étudiée. Une fois le choix des composants fait, nous avons détaillé le fonctionnement de chacun d'eux.

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 l'atténuation) et des solutions sont proposées pour les corriger (par exemple l'amplificateur EDFA).

Le principe de la photodétection a également été rappelé, avec une description de photodétecteur. La photodiode PIN associée à un préamplificateur a été choisie pour la conception de la liaison de notre projet. Les techniques de remise en forme du signal ont été abordées.

II.1 introduction

Les télécommunications optiques ont acquis une importance considérable dans les réseaux de communication longues distances. L'un des principaux critères de cette réussite tient à la grande bande passante de la fibre, mais surtout dans les très faibles pertes qu'elle présente. L'autre avantage de l'utilisation d'une porteuse optique est la localisation du signal à l'intérieur de la fibre. Ceci fait de la fibre un élément indispensable des réseaux métropolitains, transnationaux et intercontinentaux.

Comme la fréquence optique est très grande, la porteuse optique peut supporter un grand nombre de sous porteuses sans que cela touche les performances des systèmes s'il y a un petit décalage dans la fréquence optique. Compte tenu de la bande passante très grande de la porteuse optique, cette porteuse peut contenir simultanément de multiples canaux de données, de télévision ou de téléphonie, etc. Ceci peut être obtenu par multiplexage temporel et fréquentiel. Un premier multiplexage consiste à utiliser un multiplexage temporel (Time Division Multiplexing ou TDM). Un autre multiplexage est celui de la fréquence qui consiste à transmettre plusieurs sous porteuses optiques espacées entre elles de plusieurs GHz. Il s'agit des techniques WDM (Wavelength Division Multiplexing) et DWDM (Dense WDM). Chacune des sous-porteuses peut être modulée par des signaux ou des débits différents. L'ensemble de ces deux multiplexages permet à une onde optique de transmettre des débits très élevés, par exemple 5 Tbit/s.

Historiquement, les technologies de télécommunications optiques visent donc en premier lieu à transmettre des données et de l'information avec des débits très élevés.

Un autre domaine d'utilisation des communications optiques a débuté en 1960, il s'agit du domaine de la photonique microonde. Dans ce domaine, la fibre profite en complément de ses caractéristiques précédentes d'une grande immunité face aux interférences électromagnétiques, et d'un faible poids. C'est pour cela que la transmission dans une fibre

optique ou dans un guide d'onde diélectrique devient très utilisée dans les domaines civils et militaires. Le seul obstacle reste le coût de l'installation et des composants, qui limite ces applications aux lieux nécessitant de hauts débits. Néanmoins un grand effort est fait pour intégrer les fonctions sur des substrats faibles coûts, dont le Silicium.

Dans les technologies photoniques-microondes, les débits ou les largeurs de bande sont transmis sur des porteuses radios modulant elle-même le signal optique. Dans ces applications, les fréquences de porteuses vont de quelques dizaines de kHz (radio) à quelques centaines de THz (optique). Le rapport entre la fréquence de la porteuse et la bande passante du signal varie en fonction du type de modulation. Il peut varier de quelques milliers (modulation optique en amplitude) à quelques dizaines (Modulation MQAM ou OFDM).

Dans ce chapitre on va se baser sur l'étude des différents types de multiplexage temporel et fréquentiel, les différents types du bruit de la liaison et les critères de qualité qui permet d'évaluer le signal.

II.2 Les techniques de multiplexage

II.2.1 Multiplexage TDM

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing) ou MRT (Multiplexage à répartition dans le temps) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant et à tour de rôle pour chaque utilisateur (figure II.1).

L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminée (Figure II.2). Un intervalle de temps fixe (IT) est successivement assigné à une source.

Le multiplexage TDM permet alors de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé (par exemple, conception d'un débit 40 Gbits/s, à partir de 4 séquences à 10 Gbits/s).

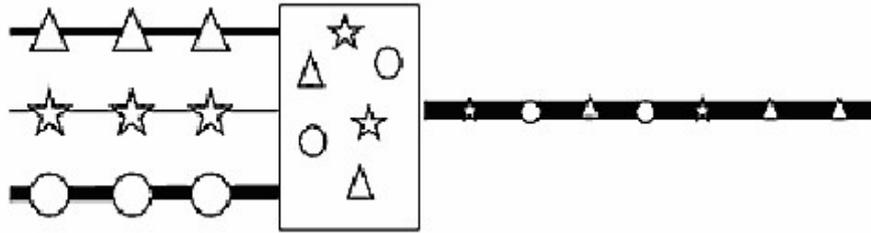


Figure II.1: Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps.

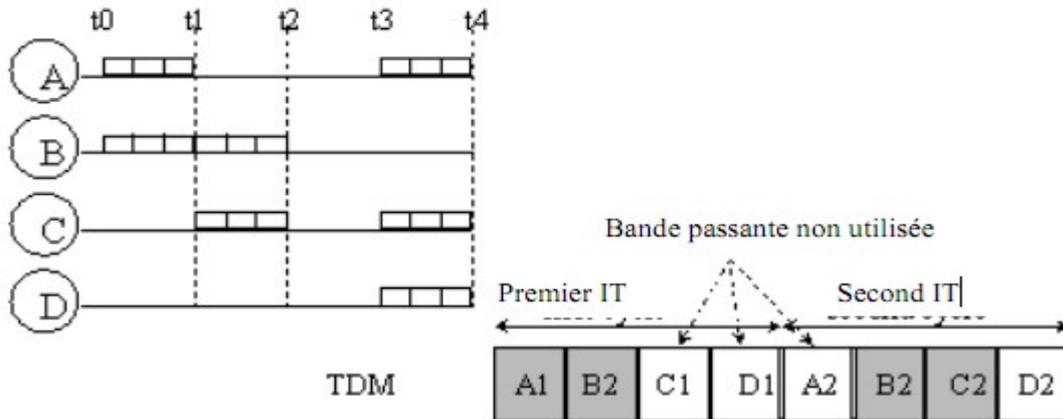


Figure II.2 : Représentation d'un multiplex TDM (4 voies vers 1) en fonction des données initiales.

II.2.2 Multiplexage temporel optique (OTDM: Optical Time Division Multiplexing)

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

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

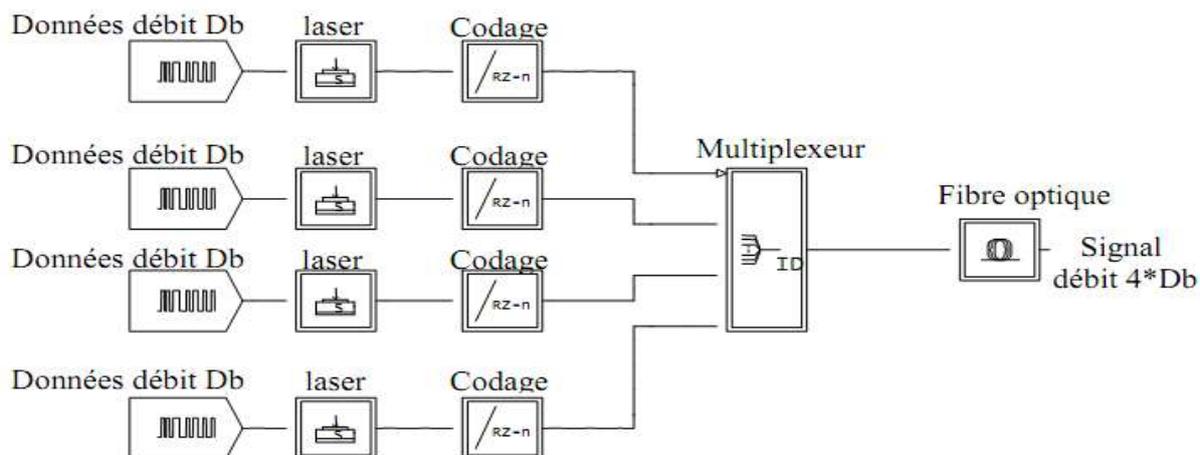


Figure II.2 : Schéma du multiplexage OTDM.

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

II.2.3 Multiplexage temporelle électronique (ETDM: Electronic Time Division Multiplexing)

Dans le cas de l'ETDM, le codage RZ et "l'assemblage" des données se font électriquement.

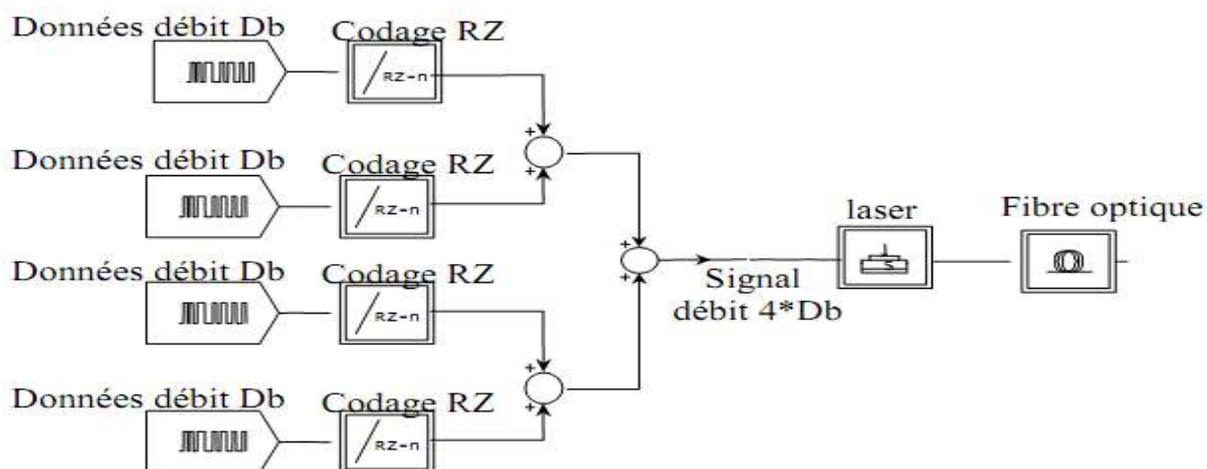


Figure II.3 : Schéma du multiplexage ETDM.

Le haut débit obtenu est ensuite utilisé pour la modulation du courant de polarisation d'une diode laser et il n'y a qu'un seul signal lumineux émis. Cette étape est schématisée sur la

figure suivante par la présence de trois circuits électroniques et d'un multiplexeur électronique (circuit rapide). [1]

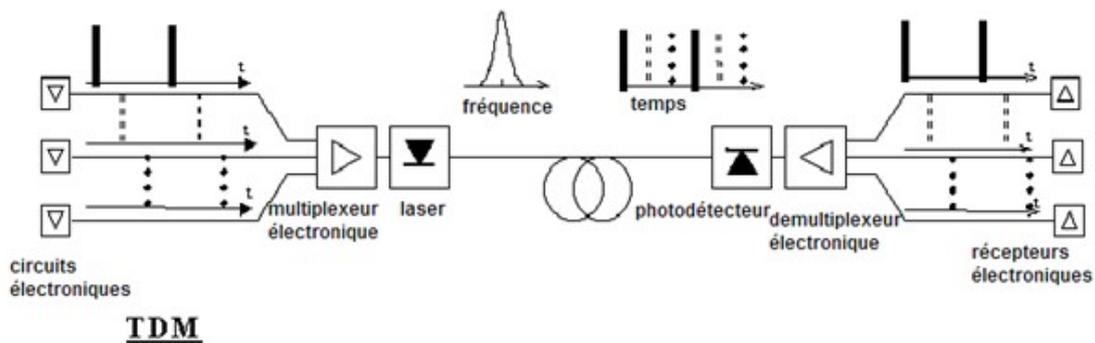


Figure II.4: Schéma de principe du multiplexage ETDM dans les communications par fibre optique.

II.2.4 Multiplexage fréquentiel (FDM, Frequency Division Multiplex)

C'est une ancienne hiérarchie de la téléphonie analogique, la transmission ne s'effectue pas en Bande de base mais avec différentes translations de fréquence sur un même support Physique, chaque canal étant associé à une bande de fréquence et une porteuse (10 000 Voies entre 4 et 60 Mhz). Mais elle est défavorable en numérique.

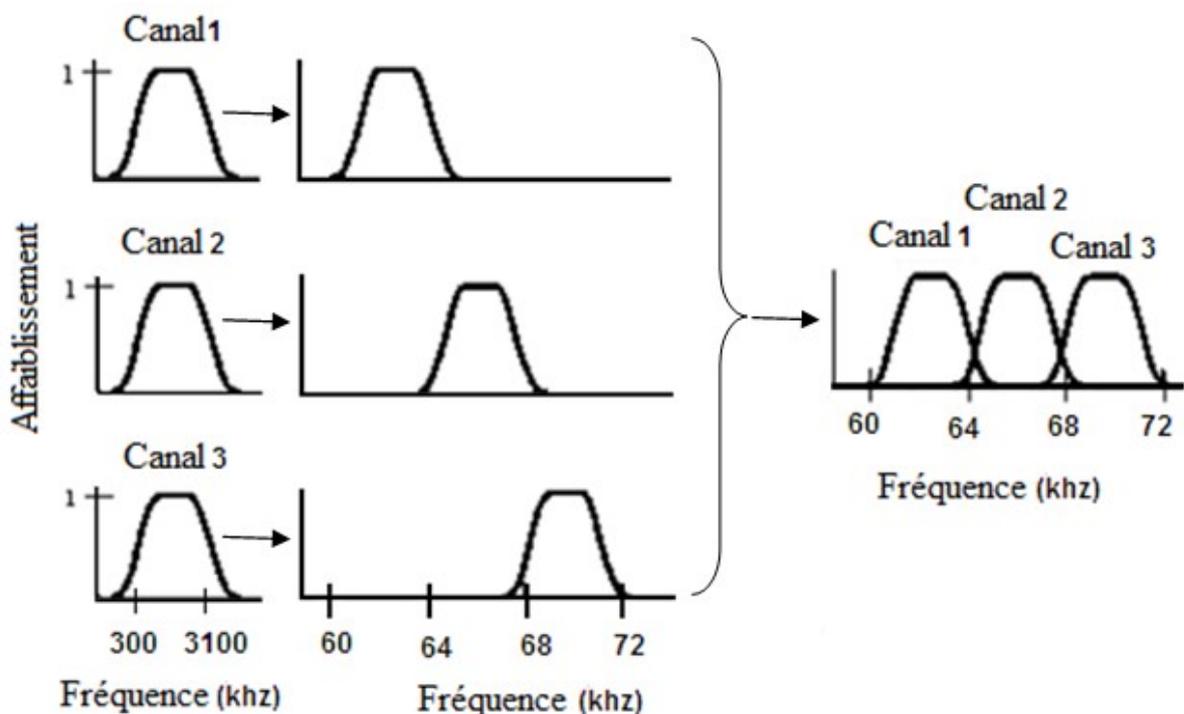


Figure II.5 : Multiplexage fréquentiel

II.2.5 Multiplexage en longueur d'onde : (WDM : Wavelength Division Multiplexing)

II.2.5.1 Principe

La technologie WDM est née de l'idée d'injecter simultanément dans la même fibre optique plusieurs trains de signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais chacun à une longueur d'onde distincte.

A l'émission, on multiplexe N canaux au débit nominal D, à la réception, on démultiplexe le signal global N x D en N canaux : la fibre transporte un multiple de N canaux ce qui est par conséquent équivalent en terme de capacité à N fibres transportant chacune un canal.

Avant l'avènement du multiplexage en longueur d'onde, la seule manière d'accroître la capacité d'une liaison optique était de rajouter des lignes de transmission et l'empilement des répéteurs-régénérateurs.

De ce fait, en technologie WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux. Ce fut le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission longue portée (typiquement entre 150 et 600 km).

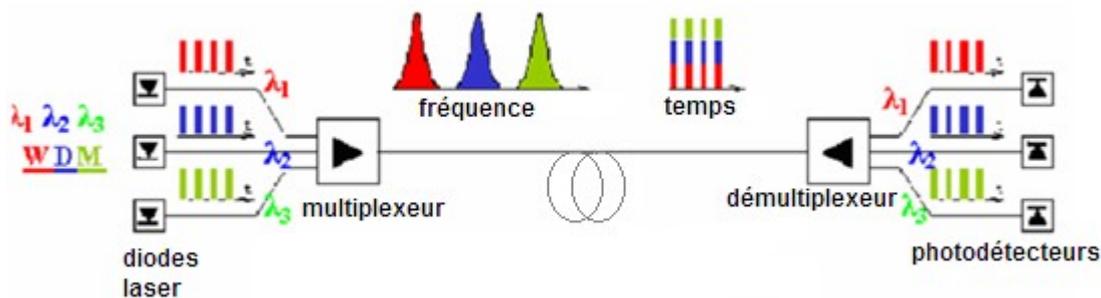


Figure II.6 : Schéma de principe du multiplexage WDM.

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes lasers émettant à des longueurs d'onde différentes mais assez proches (dans le voisinage des 1550 nm), et de multiplexeurs/démultiplexeurs optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans/de la fibre.

II.2.5.2 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

La technologie WDM est dite dense lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'onde est égal ou inférieur à 100 GHz. On l'emploie désormais pour les transmissions longue distance. Dans la pratique, cela signifie que l'on fait passer dans une même fibre beaucoup de signaux portés par des fréquences très rapprochées les unes des autres.

II.2.5.3 U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing)

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

II.2.5.4 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

La technologie CWDM présente des coûts assez élevés:

f - fibre haute performance.

f -lasers refroidis.

f -contrôle fin des longueurs d'onde qui sont très proches les unes des autres.

La technologie CWDM est une solution WDM économique. Les canaux sont plus écartés. De fait, selon sa qualité, on ne dispose que de 8 ou 16 canaux par fibre.

Le matériel utilisé, d'un coût modéré et d'une utilisation sans contraintes importantes, permet une installation dans les équipements finaux (boucles locales, entreprises).

Le CWDM est une alternative beaucoup moins onéreuse, mais également moins performante. C'est pourquoi il est destiné à être utilisé sur des réseaux locaux ou métropolitains.

II.3 Le bruit de la liaison

On peut distinguer deux types de perturbations : les perturbations externes à la liaison et le bruit propre des éléments de la chaîne optique.

II.3 .1 Perturbations externes

Il existe plusieurs causes de perturbations d'une transmission optique :

- bruit du canal de transmission (fluctuations de température de la fibre...);
- couplage de signaux parasites au niveau du récepteur (blindage, CEM...);
- bruit lié aux alimentations (secteur mal filtré...);
- vibrations mécaniques (vibrations des connecteurs optiques, de la fibre...)

Aux basses fréquences, on retrouve en particulier les perturbations dues aux alimentations, aux vibrations ou aux variations de température.

Mais d'autre part il y a plusieurs techniques qui permettent de protéger les liaisons optiques :

- contre les vibrations : mises en boîtier des composants, collages, protections contre les poussières, nettoyage préalable des fibres ;
- contre les fluctuations thermiques : isolation, modules Peltier sur le laser ;
- contre les signaux parasites : blindage type cage de Faraday, filtrage des alimentations par capacités de découplage.

Ces perturbations sont surtout nuisibles aux basses fréquences et donc près de la porteuse.

Avec une bonne mise en boîtier des composants et des alimentations sur batteries, on évite déjà une part importante des perturbations de l'environnement.

II.3 .2 Bruit propre des éléments de la chaîne optique

II.3 .2.1 Bruit du laser

Le signal optique délivré par une diode laser présente des fluctuations en amplitude et en fréquence, même si le laser est polarisé avec un courant constant. Les deux mécanismes fondamentaux qui concourent à la génération du bruit sont l'émission spontanée et la recombinaison électron-trou.

On définit le bruit relatif d'intensité RIN (de l'anglais, « Relative Intensity Noise ») comme le rapport entre la densité spectrale des fluctuations du nombre de photons et le

nombre de photons au carré, ou entre la densité spectrale de fluctuations de puissance optique et le carré de la puissance optique moyenne :

$$\text{RIN}(f) = \frac{\Delta P_{\text{opto}}^2}{P_{\text{opto}}^2} \quad \text{II.1}$$

Le RIN s'exprime en Hz^{-1} mais il est généralement présenté en décibel et donc s'exprime alors en dB/Hz , puisque le bruit est intégré dans 1 Hz de bande.

Un exemple de résultats de mesure du RIN haute fréquence est représenté en figure II.7. Ces courbes montrent clairement la diminution du RIN quand le courant de polarisation augmente. On observe aussi la fréquence de résonance du laser et le pic de RIN correspondant.

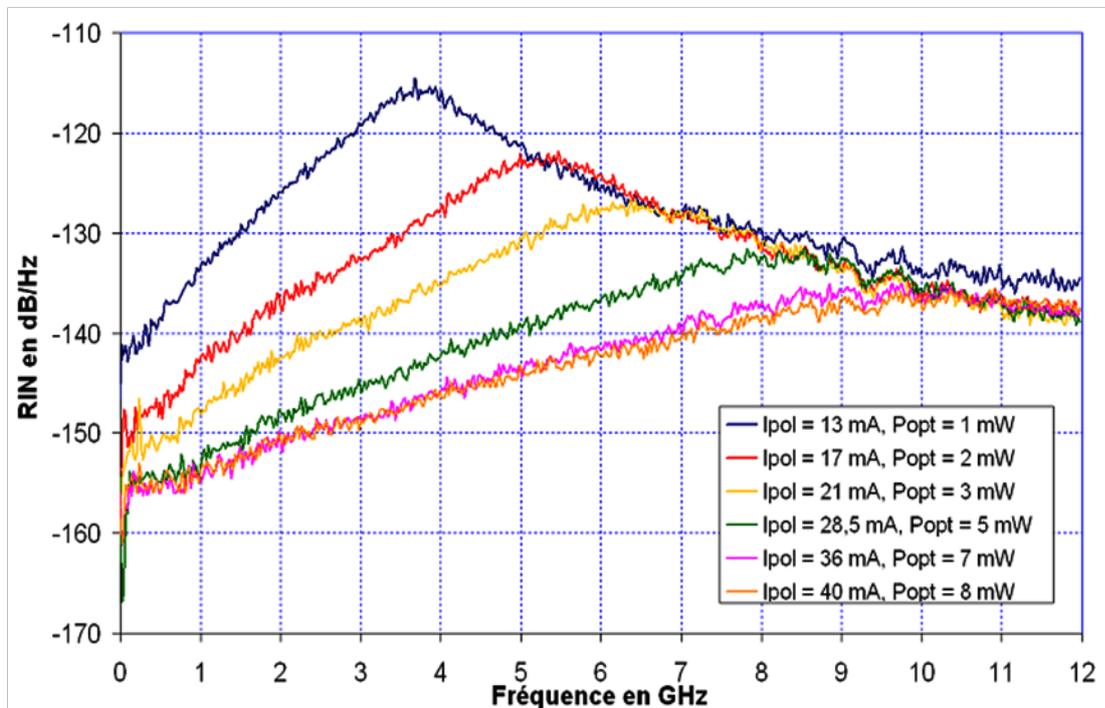


Figure II.7 RIN aux hautes fréquences du laser en fonction de son courant de polarisation et de la puissance optique émise.

Comme tout composant électronique, le laser possède aussi à des fréquences inférieures à quelques MHz une distribution spectrale du bruit qui est caractérisée par une remontée rapide du bruit suivant une pente en $1/f$, à laquelle se superposent parfois des composantes spectrales différentes (par exemple du bruit de génération recombinaison).

L'origine du bruit en $1/f$, en particulier dans les lasers, est malheureusement peu détaillée [9]

Dans une diode laser, les fluctuations optiques basse fréquence sont attribuées à des fluctuations électriques basse fréquence. C'est pour cette raison qu'il a été nécessaire, afin de modéliser correctement le bruit basse fréquence, d'introduire une source de bruit de Langevin.

II.3 .2.2 Bruit du photodétecteur

Les principales composantes de bruit liées aux récepteurs optiques sont le bruit de grenaille (de l'anglais, « shot noise »), le bruit thermique, le bruit en 1/f et le bruit de courant d'obscurité.

Nous allons maintenant définir les caractéristiques de chacune de ces composantes de bruit.

a. Le bruit de grenaille ou « shot noise »

Le bruit associé au passage de porteurs à travers une barrière de potentiel est normalement connu comme bruit de grenaille.

Dans le cas d'un photodétecteur, il est impossible d'effectuer une distinction entre le bruit de grenaille quantique qui dérive des photons détectés par la photodiode et le bruit de grenaille électronique qui dérive du flux de photocourant dans la jonction p-n à l'intérieur de la photodiode.

La densité spectrale normalisée du bruit de grenaille en courant s'écrit de la façon suivante :

$$i_n^2(f) = 2q I_{ph} \quad \text{II.2}$$

Où :

- I_{ph} est le photocourant .
- $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C est la charge d'un électron.

b. Le bruit thermique

Le bruit thermique, ou bruit Johnson, est le résultat des fluctuations aléatoires des porteurs à l'intérieur d'une résistance par cause de l'agitation thermique et il est tout à fait comparable au mouvement brownien des particules.

La densité spectrale de courant de bruit thermique liée à la résistance de charge de la photodiode est donnée par la relation suivante :

$$i_{th}^2(f) = \frac{4 k T}{R} \quad (A^2/Hz) \quad II.3$$

Où :

- $k = 1,38.10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann.
- T est la température en Kelvin.
- R est la résistance de charge de la photodiode.

c. Le bruit en 1/f

Les deux types de bruit précédents étaient des bruits blancs. Mais il existe d'autres types de bruits fondamentaux dont la densité spectrale n'est pas constante en fréquence. Il s'agit principalement de bruits à basse fréquence. Le plus connu est le bruit « en 1/f », connu aussi par bruit de scintillation (ou flicker noise) [17]. Ce dernier est présent dans tout composant parcouru par un courant et il est proportionnel à ce courant à la puissance β .

$$i_{1/f}^2(f) = K \frac{I_0^\beta}{f^\gamma} \quad (A^2/Hz) \quad II.4$$

Avec $\gamma \approx 1$ et $\beta \approx 2$ suivant les composants et les matériaux.

d. Le bruit de courant d'obscurité

Comme il a été expliqué antérieurement, avec ou sans illumination, le photodétecteur présente un courant de pertes qui dérive dans le cas d'une photodiode de la présence de recombinaison en surfaces et de parcours de fuite dans le matériau massif. Ce type de courant non souhaité et qui doit être de très faible valeur est appelé courant d'obscurité. La densité spectrale normalisée du bruit de courant d'obscurité s'écrit de la façon suivante :

$$i_{obs}^2(f) = 2q I_{obs} \quad II.5$$

Où I_{obs} est la valeur moyenne du courant d'obscurité. [2]

II.4 Critères de qualité

La transmission réelle d'un message diffère de la transmission idéale, du fait des défauts des d'extrémités (émetteur et récepteur) et des perturbations introduites par le canal de propagation. Généralement, le signal est déformé et du bruit s'est progressivement superposé au message. Si l'information envoyée est analogique, la qualité est appréciée par le destinataire et se mesure sur des critères difficilement quantifiables mais essentiels. C'est la qualité du message reçu qui constitue le critère pertinent.

Dans le cas d'une information numérique (cas de cette étude), le bloc de réception prend des décisions, à partir du signal reçu, pour reconstituer une suite de données qui soit aussi similaire que possible à celle émise. Pour cela, l'organe de décision, composé entre autres d'un comparateur à seuil, assigne à chaque pulse un bit 0 si le niveau du pulse est en dessous du seuil ou un bit 1 si ce niveau est au-dessus du seuil. Cependant, l'atténuation, la dispersion et les différents bruits que subit le signal entraînent des erreurs. L'important n'est plus vraiment la qualité du signal reçu mais le nombre d'erreurs existant dans le signal régénéré. Le critère de qualité le plus communément utilisé est le taux d'erreur binaire.

Cependant, il est possible aussi de mesurer les performances des transmissions avec le facteur Q. Une autre approche, plus qualitative, consiste à tracer le diagramme de l'œil du signal.

Dans ce paragraphe, nous décrivons ces trois critères de qualité, et nous aborderons le rapport signal à bruit en considérant une transmission de signaux numériques.

II.4.1 Probabilité d'erreur et le taux d'erreur binaire

On peut mesurer la qualité de la réception par l'évaluation de la probabilité d'erreur, qui correspond à la probabilité que la décision prise par le détecteur soit erronée. Il convient de bien faire la distinction entre deux grandeurs qui sont souvent, à tort, confondues, la probabilité d'erreur qui vient d'être définie et le taux d'erreur binaire (TEB, ou BER, Bit Error Rate en anglo-américain).

Ce dernier est défini comme le rapport du nombre d'erreurs au nombre total N d'éléments binaires transmis. C'est une grandeur aléatoire qui constitue une estimation de la probabilité d'erreur.

Lorsque N est suffisamment grand, on peut considérer, d'après le théorème de la limite centrale, que le TEB est une variable aléatoire gaussienne. Pour obtenir une estimation de la

probabilité d'erreur avec un intervalle de confiance donné, il suffit de calculer le nombre N nécessaire de bits à envoyer ou à simuler. Plus la probabilité d'erreur est faible, plus le nombre N doit être grand. La mesure devient donc impossible pour des probabilités d'erreur trop faibles et la limite est d'autant plus grande que le débit est faible. Les mêmes limites sont imposées aux méthodes de simulation. Il existe, néanmoins, pour la simulation comme pour la mesure, des techniques d'approximation qui permettent de réduire le nombre N, mais il existe toujours une limite.

Si les symboles sont émis avec la même probabilité, le taux d'erreur peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$TEB = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q_0}{\sqrt{2}} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q_1}{\sqrt{2}} \right] \quad \text{II.6}$$

Où erfc est la fonction d'erreur corrigée :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt \quad \text{II.7}$$

Paradoxalement, les excellentes performances des systèmes optiques (taux d'erreur inférieurs à 10^{-9} , voire même 10^{-12}), sont un problème ! En effet, devant des taux d'erreur aussi faibles, il n'est plus envisageable d'utiliser des méthodes de comptages d'erreurs pour évaluer les performances des systèmes. Alors, on peut estimer le TEB par l'intermédiaire du facteur de qualité (Facteur Q).

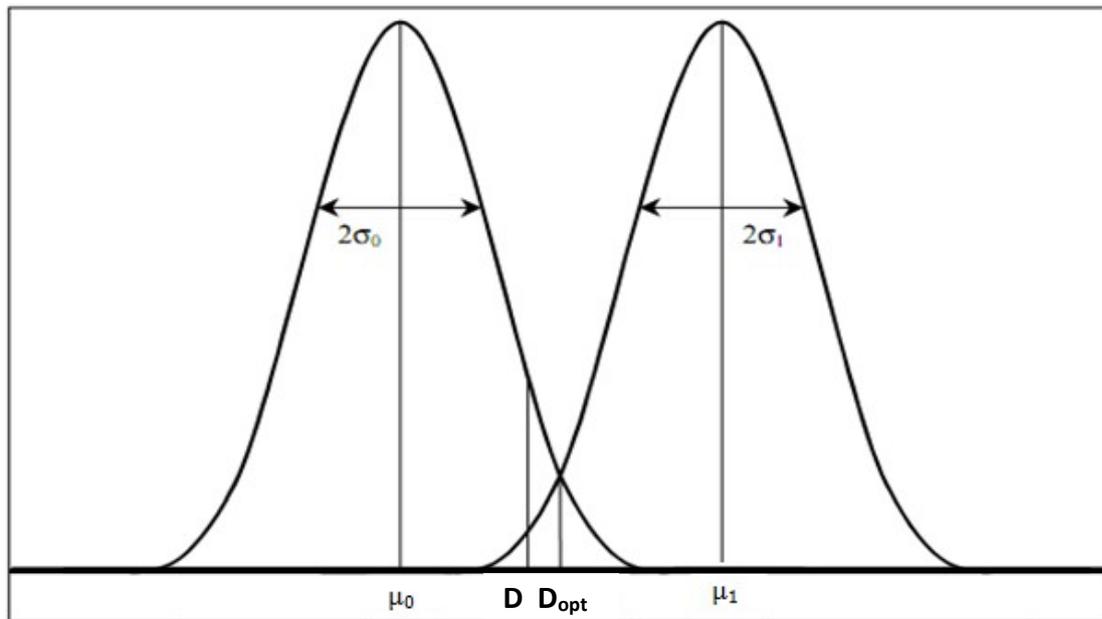
II.4.2 Facteur Q

Considérons que le bruit apporté par la transmission des données binaires est gaussien. On définit alors un facteur Q pour les niveaux hauts et un pour les niveaux bas :

$$Q_i = \left| \frac{D - \mu_i}{\sigma_i} \right| ; i = 0,1 \quad \text{II.8}$$

μ_i est la moyenne sur les niveaux i et σ_i est l'écart-type ;

D est le seuil de décision du récepteur, c'est-à-dire le niveau en dessous duquel on considérera qu'il s'agit d'un 0 et au-dessus d'un 1. D est compris entre μ_1 et μ_0 .



Figure

II.8 : Représentation schématique des densités de probabilités et du seuil de décision.

Lorsque les niveaux hauts et bas sont équiprobables, le TEB est défini en fonction du facteur de qualité par la relation II.6

On peut optimiser le TEB en optimisant la position du seuil de décision. Cette position est approximativement donnée par la formule suivante :

$$D_{\text{opt}} = \frac{\sigma_1 \mu_0 + \sigma_0 \mu_1}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad \text{II.9}$$

Le facteur Q et le taux d'erreur deviennent alors :

$$Q = \left| \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \right| \quad \text{II.10}$$

$$TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \quad \text{II.11}$$

Le TEB varie très vite en fonction de Q. La Figure II.9 représente bien cette forte évolution du TEB en fonction du facteur de qualité.

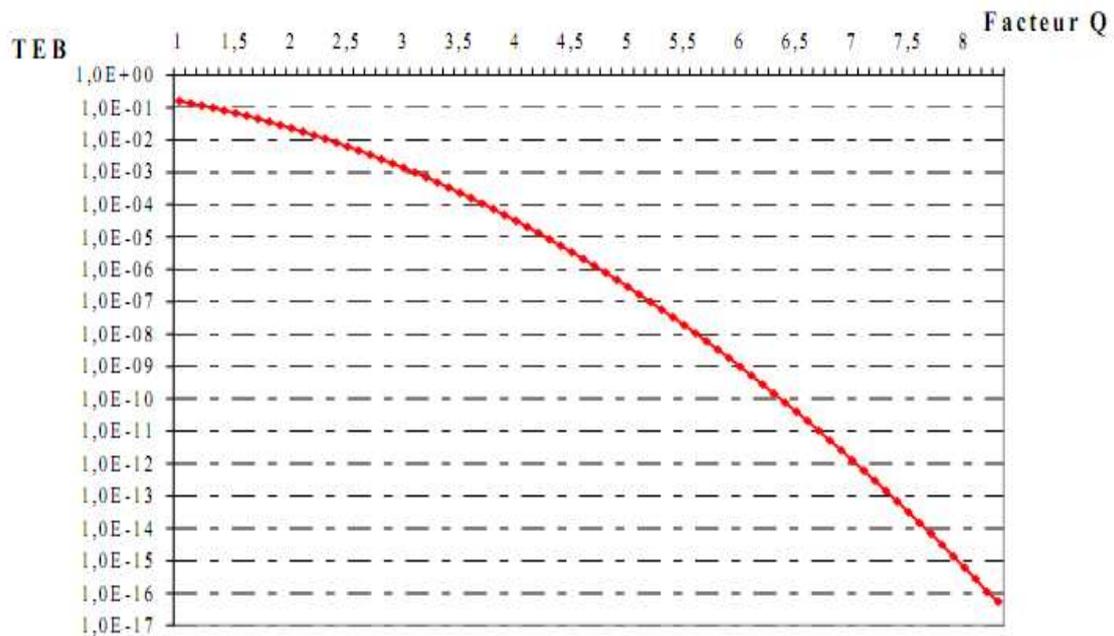


Figure II.9: Courbe représentant la relation entre le taux d'erreur binaire et le facteur Q.

En complément de ces estimations quantitatives, des méthodes qualitatives peuvent être utilisées, comme par exemple l'étude du diagramme de l'œil.

II.4.3 Diagramme de l'œil

L'évaluation des performances d'une liaison optique peut également se faire au travers de l'observation du diagramme de l'œil. Cette manière assez simple d'apprécier la qualité des signaux numériques reçus avant qu'ils atteignent le dispositif de démodulation est considérée comme une des mesures de base en transmission numérique.

L'émission d'une suite aléatoire d'éléments binaires, dont les bits ont une durée T_b , conduit à la réception à un signal $x(t)$ qui est la somme des réponses du système à chacun de ces symboles. Or, par suite du caractère passe-bas des canaux usuels, ces différentes réponses se perturbent mutuellement. La superposition graphique de tous les intervalles T_b associés au signal $x(t)$ permet d'apprécier ces perturbations. Elle fait apparaître des ouvertures en forme de losanges arrondis qui lui ont valu son nom de diagramme de l'œil.

La Figure II.10 représente un exemple de diagramme de l'œil regroupant sur une durée de 2 bits les changements d'amplitudes des "1 vers 0" (+A vers -A) et des "0 vers 1" (-A vers +A) pour une très longue suite (aléatoire) de symboles "1" et "0".

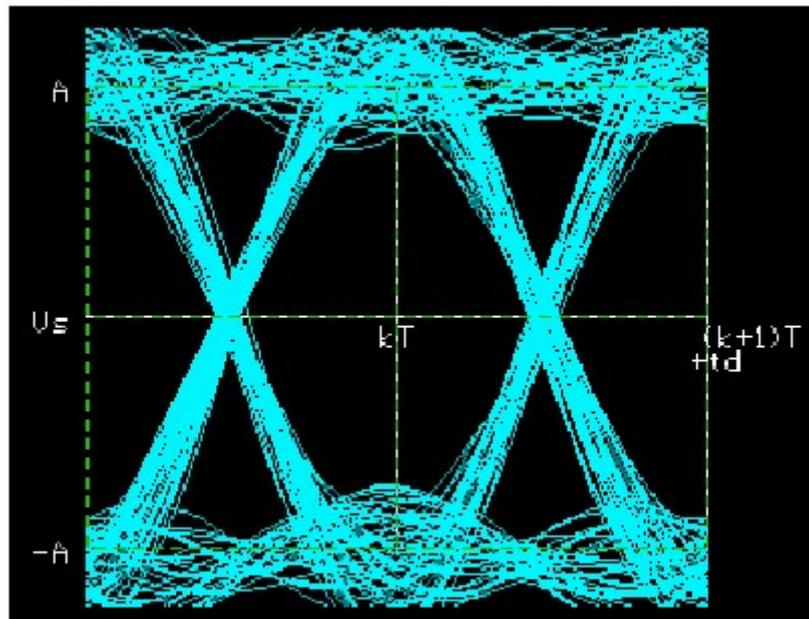


Figure II.10 : Exemple de diagramme de l'œil.

Un tel diagramme représente le degré de discrimination des différents niveaux du signal $x(t)$ et fournit, par conséquent, de bons renseignements sur l'immunité aux erreurs de la liaison. Ces rebondissements d'amplitudes sont la conséquence de la réponse impulsionnelle du canal de transmission (les spécialistes parlent "d'interférences inter-symboles"). Il permet, d'une part, d'apprécier l'interférence entre symboles (IES) et, d'autre part, d'ajuster l'instant d'échantillonnage dans le régénérateur au moment précis d'interférence minimale (Figure II.11).

A l'instant $t_0 + nT$, la valeur maximale du signal lorsque le symbole est égal à 0 est obtenue lorsque tous les symboles encadrant sont égaux à 1. La valeur minimale lorsque le symbole est égal à 1 est obtenue lorsque tous les symboles encadrant sont nuls. La différence entre ces deux niveaux extrêmes est appelée ouverture verticale ou hauteur de l'œil, à l'instant d'échantillonnage. En l'absence de bruit, l'œil est ouvert, si bien qu'il serait possible de détecter les données sans erreur en plaçant un seuil de décision entre les deux valeurs extrêmes. En présence de bruit, on observe des traces brouillées et élargies et la dégradation de la probabilité d'erreur due à l'IES est d'autant plus grande que l'œil est fermé.

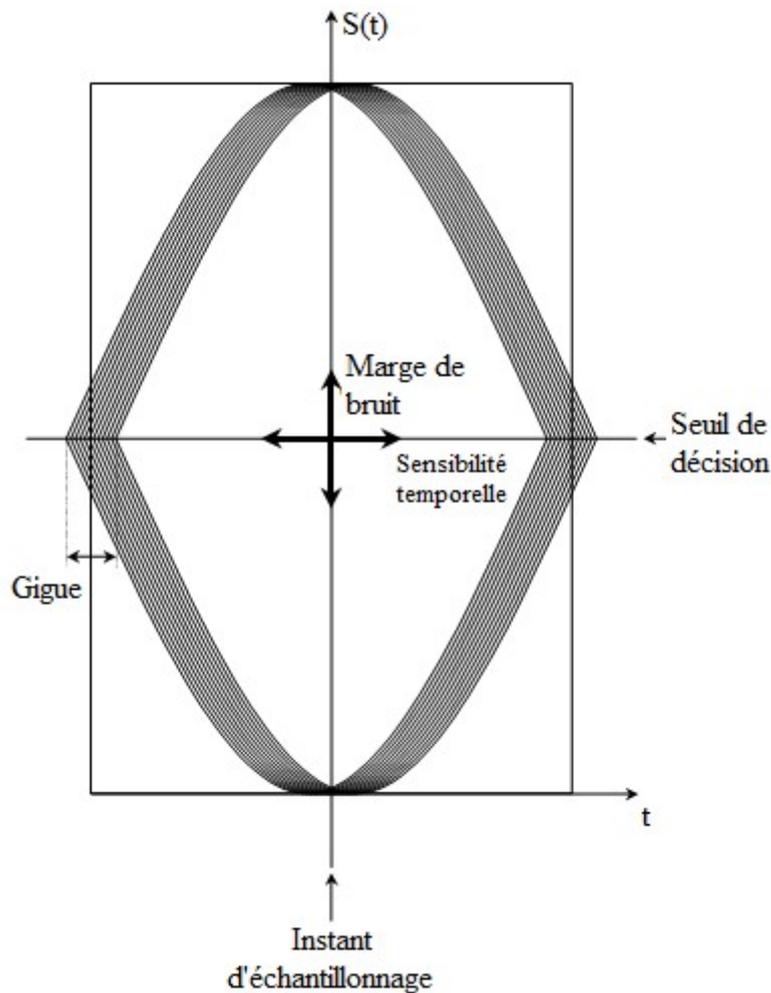


Figure II.11 : Représentation graphique de quelques interprétations d'un diagramme de l'œil.

L'ouverture verticale de l'œil dépend de l'instant d'échantillonnage : quand on décale ce dernier par rapport à sa valeur optimale, correspondant au minimum de la probabilité d'erreur, la dégradation de celle-ci est d'autant plus rapide que l'ouverture décroît rapidement.

Autrement dit, la largeur de l'œil détermine la sensibilité à un décalage de l'instant d'échantillonnage. Or, dans tout système de transmission numérique, l'horloge est toujours affectée de fluctuations aléatoires : c'est ce qui s'appelle la gigue (jitter).

A l'aide de la représentation du type "diagramme de l'œil" (Figure II.11), nous pouvons donc observer :

- Une marge de bruit sur les seuils de détection des "1" et des "0".

– Une gigue de phase (jitter) au niveau des passages par la valeur zéro de l'amplitude ce qui aura comme conséquence des imprécisions dans la récupération du signal "horloge bit".

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

Une approche du facteur de qualité peut facilement être obtenue à partir d'un diagramme de l'œil. Pour cela, il suffit de calculer, dans un intervalle encadrant les niveaux extrêmes, les valeurs moyennes μ_i et les écarts-types σ_i des niveaux "1" et "0". L'équation II.10.

Le dernier paramètre que nous aborderons, aidant à l'évaluation des performances est le rapport signal à bruit.

II.4.4 Rapport signal à bruit

Cette grandeur est le critère principalement utilisé dans le cas des informations analogiques (téléphone, téléviseur, ...). Elle mesure la qualité du signal perçu par le destinataire. Mais elle est également souvent utilisée pour les transmissions numériques.

Elle permet par exemple de contrôler, en tout point de la liaison, la qualité du signal.

Elle permet aussi de mesurer l'impact d'un composant, d'un bloc sur la qualité du signal. Les composants, les appareils sont d'ailleurs souvent caractérisés par le paramètre « Facteur de bruit », qui permet d'évaluer leurs performances.

Si on considère un système, un quadripôle ou un composant Q, et si on note S_e (respectivement S_s) la puissance moyenne du signal utile à l'entrée (resp. en sortie) et N_e (resp. N_s) la puissance moyenne du bruit à l'entrée (resp. en sortie),

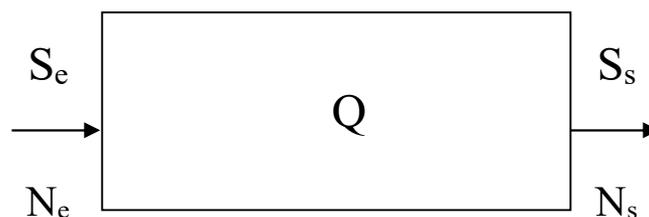


Figure II.12 : Schématisation du calcul du rapport Signal à Bruit d'un système.

Alors, le rapport Signal sur Bruit, ou rapport Signal à Bruit, est On le note également souvent SNR, de l'anglais Signal to Noise Ratio. Ce rapport permet d'estimer le degré de contamination du signal par le bruit. On définit ensuite le facteur de bruit F du quadripôle Q par :

$$F = \frac{S_e \cdot N_s}{N_e \cdot S_s} \quad \text{II.12}$$

Ce critère peut s'exprimer en dB, selon que l'on a calculé ou non son logarithme ($10\log_{10}(S/B)$ ou $10\log_{10}(F)$).

Le SNR est un calcul toujours effectué à partir de signaux électriques. Il a son équivalent pour le domaine optique avec le terme OSNR (Optical Signal to Noise Ratio)

II.4.5 Comparaisons des critères

Pour connaître les performances d'une liaison de télécommunications par fibre optique, il existe donc plusieurs méthodes d'évaluation. Mais selon les projets, selon les systèmes à mesurer, certaines sont plus adaptées que d'autres. Ce paragraphe présente la comparaison des méthodes utilisables avec le logiciel de simulation.

La mesure la plus précise est le calcul du taux d'erreur binaire. C'est également la plus difficile à mettre en œuvre et elle nécessite des temps de calcul parfois extrêmement longs. Il existe néanmoins différentes approximations du TEB, qui n'ont pas les mêmes exigences. En effet, la méthode de Monte Carlo, basée sur le comptage des erreurs, demande un grand nombre de bits simulés (la mesure d'un TEB = 10^{-9} signifie l'envoi minimum de 10^{+10} bits pour observer 10 erreurs). Les autres méthodes de mesures du taux d'erreur basées sur des estimations permettent d'obtenir des résultats cohérents en envoyant moins de bits, tout en restant complexes à mettre en place.

Les évaluations des performances de la liaison peuvent se faire en mesurant le facteur de qualité. Deux méthodes sont disponibles :

- On utilisant le tracé du diagramme de l'œil, mais le résultat restera assez approximatif, car il s'appuie sur une approche visuelle, qui dépend du positionnement de la fenêtre de calcul sur le graphique ;

- On utilisant une méthode de calcul accessible dans le logiciel, pour laquelle la fenêtre de mesure est fixée par le simulateur.

Le choix du critère d'évaluation de la liaison est fortement dépendant du type d'étude à effectuer. Les performances d'une liaison sont à mesurer et à améliorer en apportant des modifications à cette liaison. Les normes fixées dans le domaine des télécommunications demandent, pour maintenir la qualité de service (image, voix, données, etc...), un taux d'erreur binaire inférieur à 10^{-9} , ce qui équivaut à un facteur de qualité supérieur à 6. Compte tenu de ce qui a été présenté précédemment, les besoins en temps de calculs et en ressources informatiques s'avèrent être très importants pour le calcul du TEB. Une comparaison de ces différentes méthodes a été réalisée pour une liaison à 40 Gbits/s (Figure II.13) [1]. Le TEB est calculé avec chacune de ces méthodes sur plusieurs liaisons ayant seulement un niveau de bruit différent. Cette étude a montré que les résultats sont assez comparables. [7][5] [10]

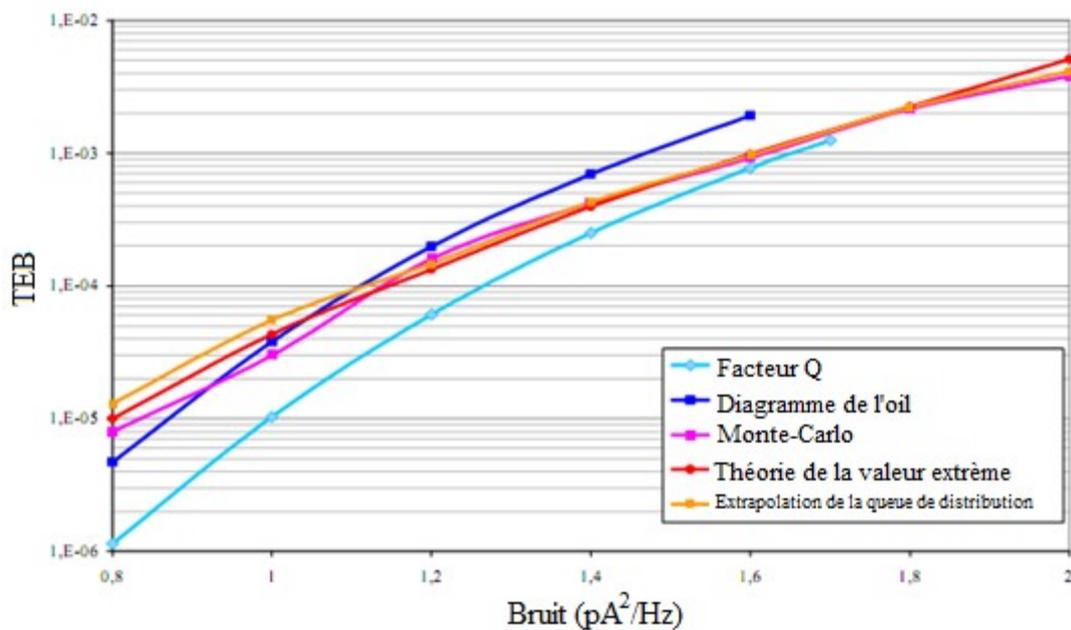


Figure II.13 : Comparaison des méthodes d'évaluation des performances des systèmes dans COMSIS.

II.5 Bilan de liaison

Deux facteurs limitent la longueur de la liaison :

- d'une part l'atténuation (la puissance de l'émetteur doit être suffisante pour que le niveau de signal reçu par le détecteur soit supérieur au bruit),

- d'autre part, la dispersion (les impulsions ne doivent pas se recouvrir en sortie). La limitation introduite par l'atténuation dépend des paramètres suivants :

- la puissance injectée dans la fibre,
- l'atténuation par unité de longueur de fibre,
- l'atténuation des connections,
- le niveau minimum nécessaire sur la photodiode.

La puissance injectée dans la fibre ou transmise par celle-ci est souvent exprimée en dBm; la relation suivante définit les dBm.

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \left(\frac{P_s(\text{mW})}{1\text{mW}} \right) \quad \text{II.13}$$

II.5.1 Bande passante (BP) et Capacité de transmission (CT)

La portée de transmission d'une liaison optique peut être également limitée par la bande passante. On évalue cette limitation en prenant en compte les paramètres suivants de la fibre :

- l'élargissement d'une impulsion $\Delta\tau$ (en ns.km⁻¹),
- la bande passante (BP) pour un signal analogique (en MHz.km) ou
- la capacité de transmission (CT) (en Mbits.s⁻¹.km) pour un signal numérique.

Afin de définir des relations entre les paramètres ci-dessus, il est utile de considérer la liaison optique comme une série de quadripôles qui transforment une grandeur $e(t)$ (le signal d'entrée) en une grandeur $s(t)$ (le signal en sortie) (figure ci-après).

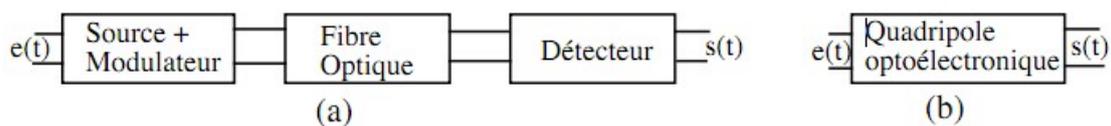


Figure II.14: schématisation d'une liaison optoélectronique

(a) : une suite de quadripôles qui transforment un signal $e(t)$ en un signal $s(t)$.

(b) : L'ensemble de la liaison assimilée à un quadripôle unique.

Les caractéristiques spectrales du quadripôle sont obtenues en considérant le spectre des signaux d'entrée et de sortie. On passe du signal temporel $s(t)$ au spectre par la transformation de Fourier :

$$S(\Omega) = \text{TF}[s(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\Omega t) dt \quad \text{II.14}$$

Et inversement :

$$s(t) \text{TF}^{-1}[S(\Omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\Omega) \exp(+j\Omega t) dt \quad \text{II.15}$$

On montre, que le spectre du signal de sortie est obtenu à partir de celui du signal d'entrée par la relation

$$S(\Omega) = Q(\Omega) \cdot E(\Omega) \quad \text{II.16}$$

$Q(\Omega)$ est la fonction de transfert (ou réponse fréquentielle) du quadripôle.

La fonction de transfert est obtenue en sortie, lorsqu'on injecte à l'entrée une impulsion infiniment courte (impulsion de Dirac).

Une fibre optique est assimilable à un filtre passe-bas. En prenant en 1ère approximation la fonction de transfert indiquée sur la figure ci-après, on peut obtenir la réponse impulsionnelle de la fibre en prenant la TF de $F(\Omega)$

La bande passante (BP) est donnée par

$$\text{BP} = \frac{\Omega_c}{2\pi} \quad \text{II.17}$$

La largeur $\Delta\tau$ de la courbe à mi-hauteur étant peu différente de $0,5 \frac{\Omega_c}{2\pi}$ on peut écrire la relation suivante entre BP et $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau \times \text{BP} \approx 0.5 \quad \text{II.18}$$

$\Delta\tau$ est l'élargissement de l'impulsion dû à la dispersion (la durée de l'impulsion d'entrée étant considérée comme négligeable).

Le paramètre $\Delta\tau$ varie linéairement avec la longueur de la fibre :

$\Delta\tau$ (pour fibre de longueur L) = $\Delta\tau$ (pour fibre de 1 km) x L (en km). En conséquence la bande passante d'une fibre varie comme l'inverse de sa longueur:

$$BP \text{ (pour une fibre de longueur L)} = \frac{BP \text{ (pour la fibre de 1 Km)}}{L \text{ (Km)}}$$

Une relation entre la dispersion et la capacité de transmission peut être trouvée en considérant le signal numérique de la figure suivante formée d'une suite d'impulsions carrées de durée T séparées par une période T. La dispersion provoque un allongement $\Delta\tau$ des impulsions. Le signal est correctement transmis si $\Delta\tau$ est inférieur à T. Le nombre maximum d'impulsions pouvant être transmis par seconde (ou capacité de transmission) est tel que :

$$CT = \frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta\tau} \quad \text{II.19}$$

Compte tenu de la relation ci-dessus entre $\Delta\tau$ et BP, on peut écrire la relation suivante :

$$CT = 2 \times BP \quad \text{II.20}$$

La longueur maximale L_{\max} (en km) d'une liaison de capacité CT, réalisée à l'aide d'une fibre de bande passante BP, est égale à :

$$L_{\max} = \frac{2 \times BP \text{ (de la fibre en Mhz.Km)}}{CT \text{ (de la liaison en Mbits/s)}} \quad \text{II.21}$$

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques caractéristiques principales d'une liaison optique en détaillant les différentes techniques de multiplexage de la TDM jusqu'à la CWDM.

Une étude sur les différents types de bruit a été faite, en citant les diverses sources qui les génèrent. Les différents critères de performances ont été présentés dans ce chapitre tels que le facteur de qualité Q et le taux d'erreur bit TEB qui seront la base de mesure de qualité du signal dans le chapitre suivant.

III.1 Introduction

Le développement des télécommunications par fibres optiques a multiplié les architectures des réseaux. La conception des systèmes associés est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important.

La méthode expérimentale est très coûteuse. Aussi, les outils de simulation constituent une solution très intéressante et très économique, parmi ces logiciels, on trouve COMSIS (COMmunication System Interactive Software), qui est un logiciel de simulation système développé par une société française, IPSIS (Ingénierie Pour Signaux et Systèmes).

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

A l'aide de ce logiciel on va faire quelques simulations qui nous permettent de mieux comprendre les choses.

III.2 Présentation du logiciel

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

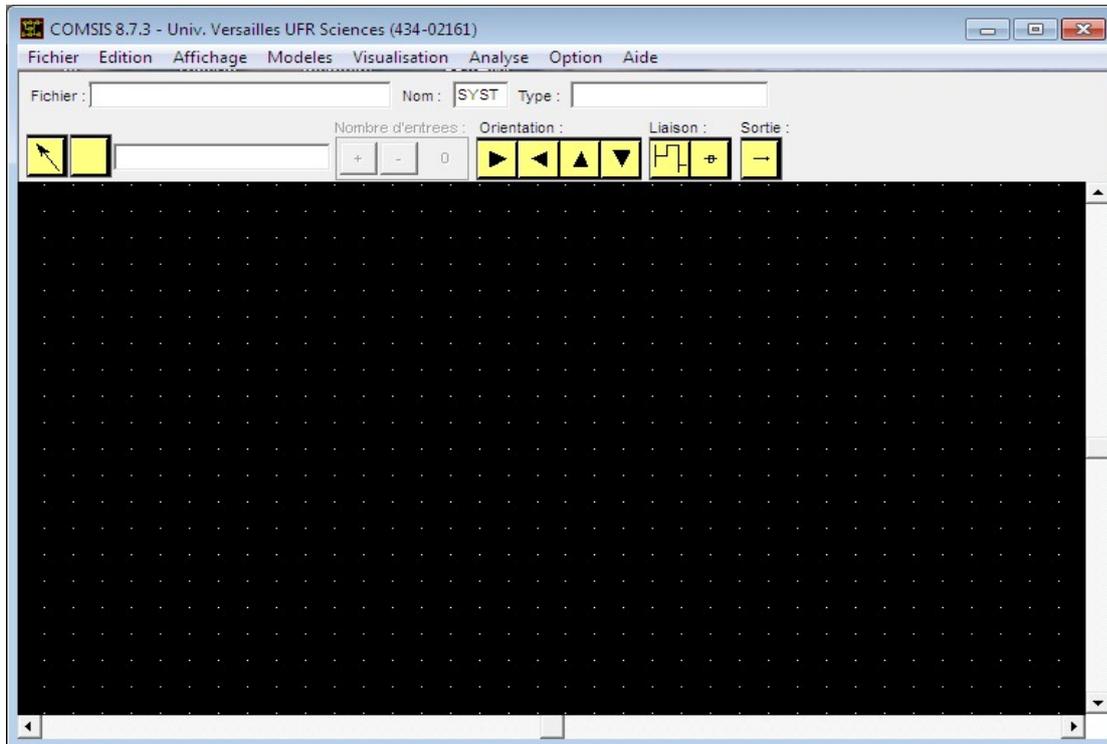


Figure III.1 : L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS

La figure III.1 présente le schéma bloc du logiciel COMSIS

Les principales fonctionnalités sont :

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

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

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

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

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

- On assemble les différents éléments au moyen de fils de connexion, on place des variables intermédiaires pour la visualisation à la sortie de chaque module et on les nomme, on spécifie une variable de sortie. Ces fonctions sont accessibles au niveau de la barre des tâches principale.

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

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

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

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

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

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

A ce stade, il n'est pas rare que l'on ne sache pas répondre d'emblée à toutes les questions, il est alors possible de faire appel à l'aide contextuelle de la fenêtre alphanumérique ou des

fenêtres de définition des modèles .une explication sur la procédure a suivre ou la nature des paramètres a renseigner est alors fournie .

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

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

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

- Lorsque l'un des choix est effectué, par exemple Visualisation Globale, la fenêtre

Variables et Pré-traitements à visualiser permet de choisir entre une visualisation temporelle simple de la variable sélectionnée (Réponse temporelle), sa fonction d'auto-corrélation, son diagramme de l'œil, sa puissance...

En résumé :

- On décrit l'ensemble des éléments du système à étudié ;

- L'analyse statistique fournit un certain nombre de courbes caractéristiques des éléments du système;

- L'analyse temporelle permet la simulation paramétrique du système a une entrée spécifiée, et s'appuie sur des outils de visualisations et d'analyse des résultats.

III.3 Simulation

III.3.1 Analyse statique

Dans cette partie on va prendre comme exemple un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium(EDFA), en visualisant les principales caractéristiques telles que le gain, la puissance de sortie et leurs spectres

III.3.1.1 Etude de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée

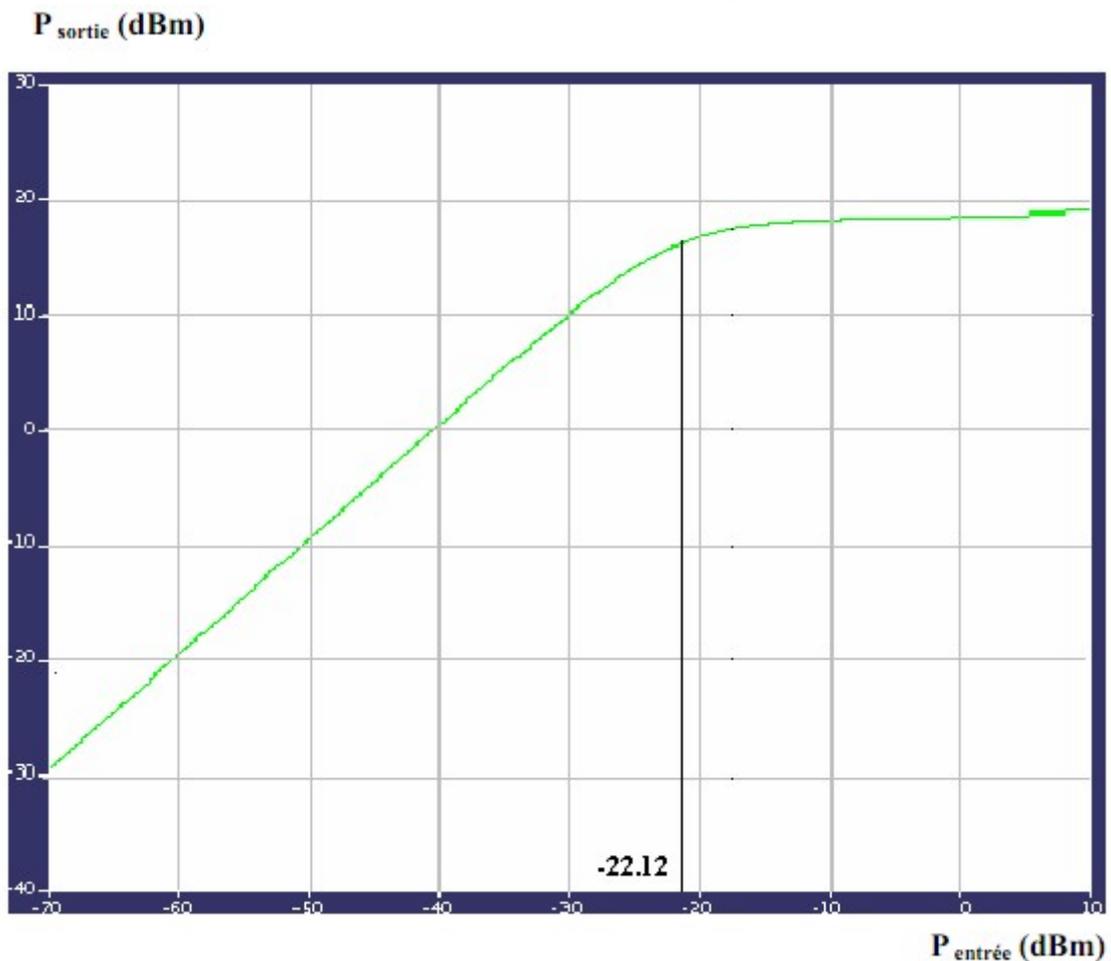


Figure III.2 : Puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée

D'après la figure III.2 on observe que la puissance de sortie varie dans deux intervalles, elle est croissante dans le premier intervalle, et stable autour de 20 dBm dans le deuxième à partir d'une valeur de -22.12 dBm de la puissance d'entrée, on appelle cette valeur la puissance de saturation.

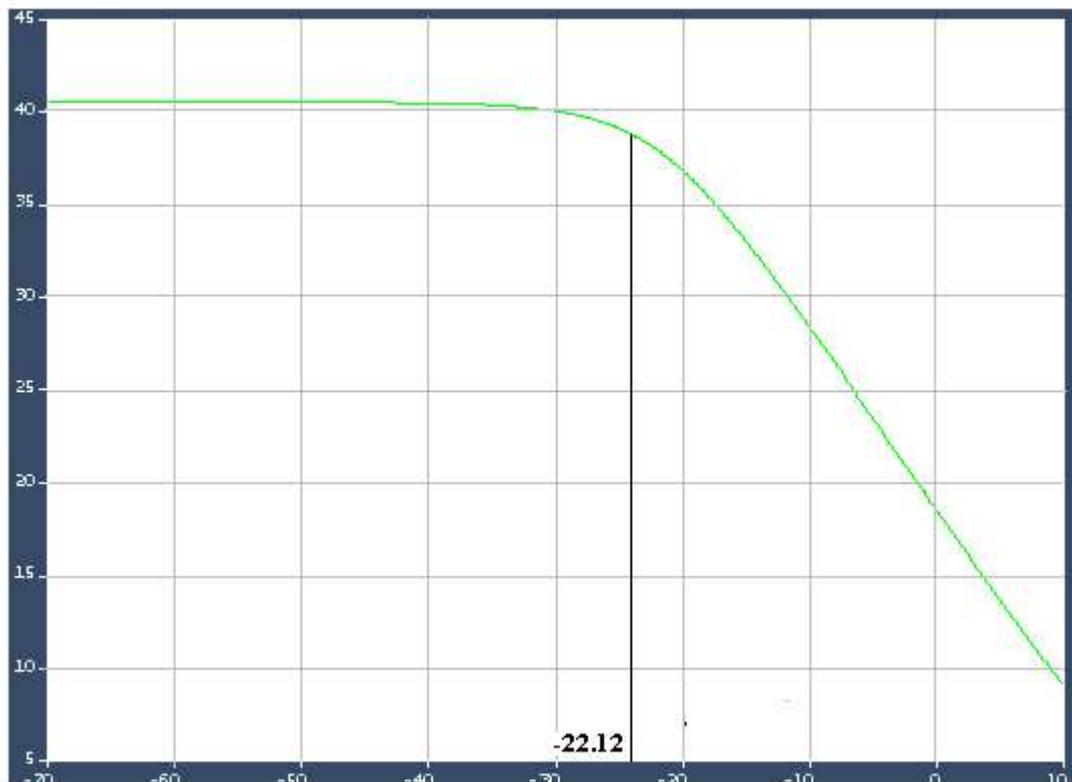
D'autre part on constate qu'il y a deux régimes pour réaliser l'amplification :

- Régime à faible signal
- Régime de saturation

Du point de vue analytique la saturation de la puissance dépend de l'effet de la puissance d'ESA (puissance d'émission spontanée amplifiée) ce dernier est responsable de la saturation de l'amplificateur. Elle dépend aussi de la puissance du signal d'entrée, lorsqu'elle prend des valeurs importantes.

III.3.1.2 Etude de gain en fonction de la puissance d'entrée

Gain (dB)



P_entrée (dBm)

Figure III.3: Variation du gain en fonction de la puissance d'entrée

Pour une puissance d'entrée variant dans l'intervalle $[-70, -30]$ dBm on obtient des valeurs maximales du gain de plus de 40 dB.

A partir de la valeur -30 dBm de la puissance d'entrée, on constate une décroissance du gain. Pour obtenir une puissance de sortie maximale et stable, et un gain important, il faut que l'amplificateur fonctionne en régime de saturation.

III.3.1.3 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde, et de la puissance d'entrée

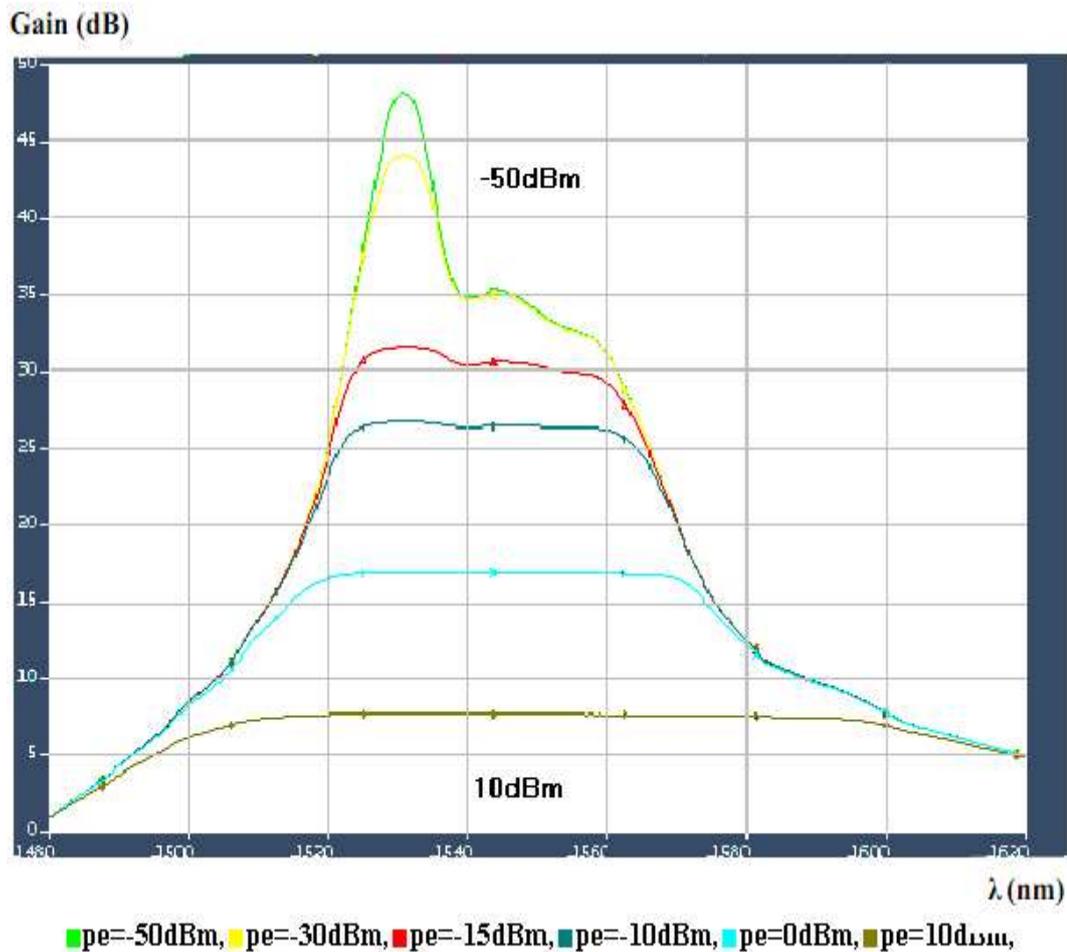


Figure III.4 : Variation du gain en fonction de la longueur d'onde pour une puissance d'entrée variant dans l'intervalle $[-50, 10]$ dBm.

A partir de la figure III.4, on observe que le gain décroît avec la croissance de la puissance d'entrée, donc pour obtenir un gain plat et peu élevé, et une bande passante importante, on prend la puissance du signal d'entrée autour de 10dBm, cette valeur est dans le

régime de saturation. Pour des valeurs de gain au voisinage de 25dB on aura une bande passante de 40nm d'environ.

III.3.1.4 Etude de la puissance d'ESA en fonction de la longueur d'onde et de la puissance d'entrée

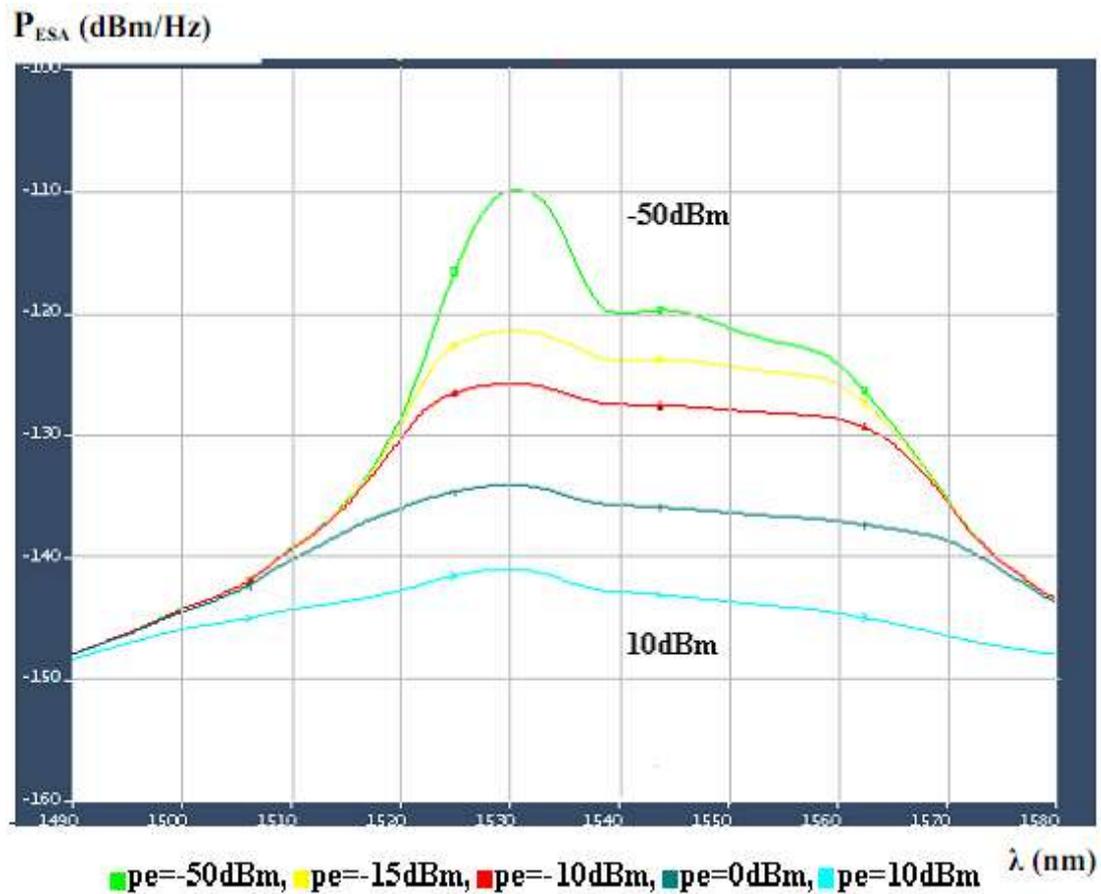


Figure III.5 : Puissance spontanée amplifiée en fonction de la longueur d'onde pour une puissance d'entrée variant dans l'intervalle [-50, 10] dBm

La figure III.5 représente l'influence de la puissance d'entrée sur la puissance spontanée amplifiée, les courbes d'ESA varient d'une manière décroissante lorsque la puissance d'entrée augmente.

III.3.1.5 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde, et de la longueur de la fibre amplificatrice

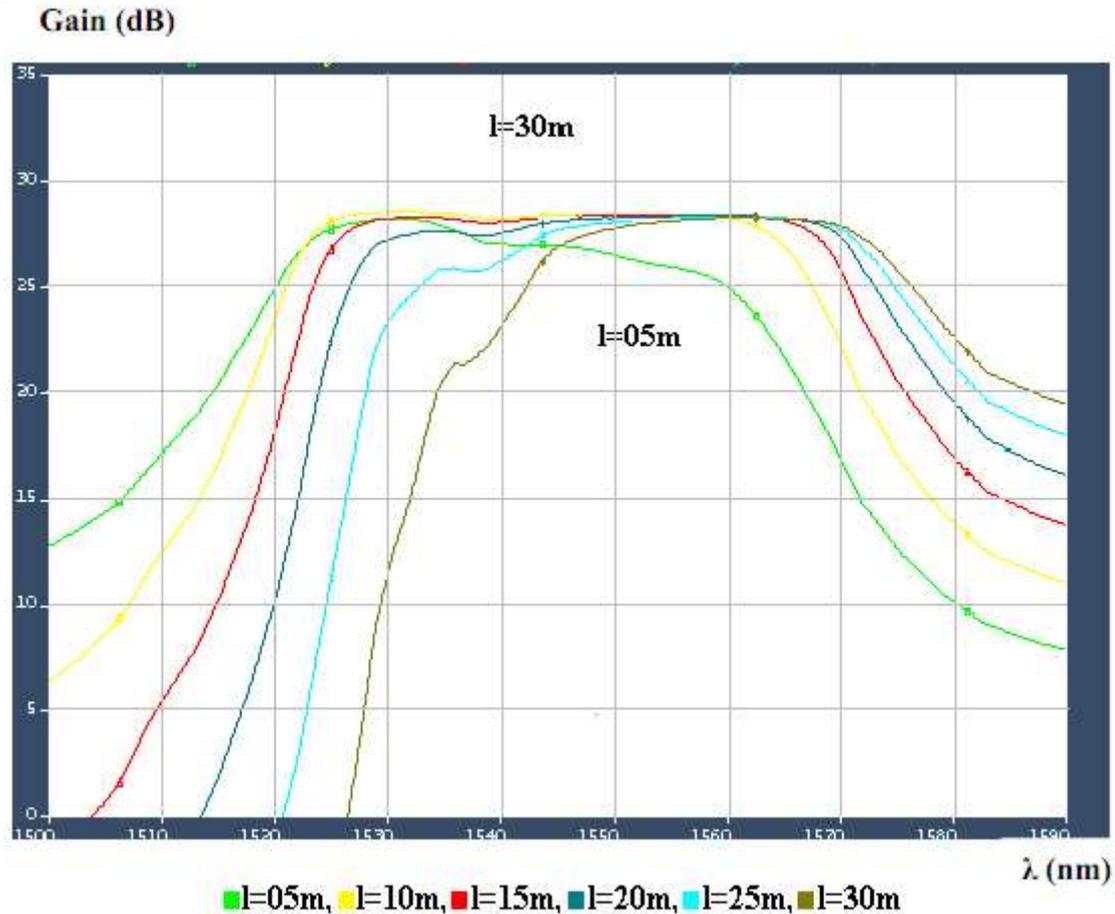


Figure III.6 : Spectre du gain en fonction de la longueur de la fibre amplificatrice

La longueur de la fibre amplificatrice influe directement sur le gain comme le présente la figure III.6. On observe que lorsque la longueur de la fibre amplificatrice a une valeur entre 10 et 20 m, exactement pour la longueur de 15m, elle donne un gain plat et de valeur importante. Ceci provient de la pompe et son efficacité à exciter tous les ions de l'erbium sur la longueur de la fibre amplificatrice.

III.3.1.6 Etude de la puissance d'ESA en fonction de la longueur d'onde, et de la longueur de la fibre amplificatrice

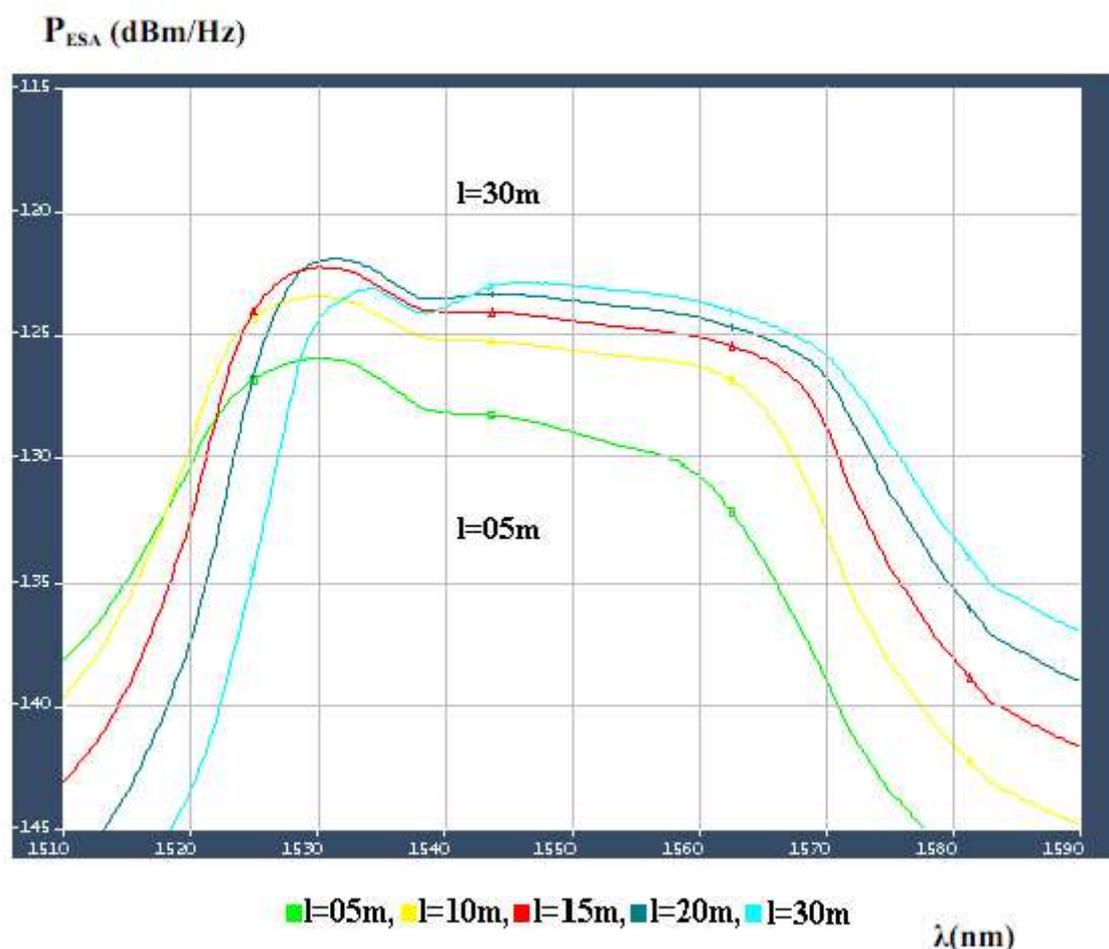


Figure III.7 : Spectre de la puissance d'ESA en fonction de la longueur

D'après les graphes de la figure III.7 la puissance d'ESA reste toujours dans l'intervalle $[-125, -120]$ (dBm/Hz) pour les longueurs de la fibre amplificatrice entre 10 et 20 m. Elle prend la valeur -122 (dBm/Hz) pour la longueur 15m qui est la longueur optimale pour obtenir une bonne amplification du signal.

III.3.1.7 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde, et du rayon du cœur de la fibre amplificatrice

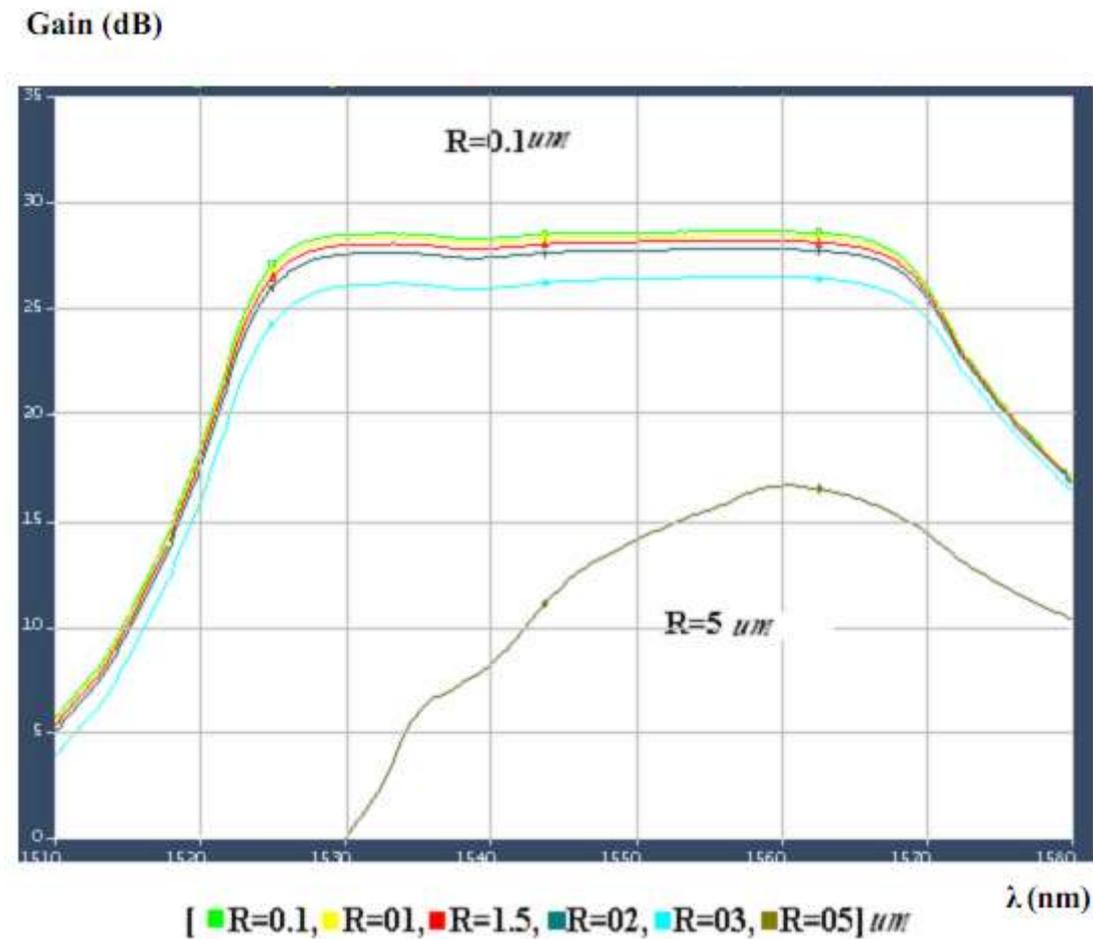


Figure III.8 : Spectre du gain en fonction de la longueur d'onde pour le rayon du cœur de la fibre amplificatrice variant entre 0.1 et 5 μm

D'après les courbes de la figure III.8, le gain varie en sens inverse avec la variation du rayon du cœur de la fibre amplificatrice. De même, elles montrent que le gain prend ces valeurs maximales, lorsque le rayon du cœur est dans l'intervalle entre 0.1 et 2 μm .

On constate que lorsque le rayon du cœur de la fibre est faible, le gain devient plus élevé.

III.3.1.8 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde et des valeurs optimales des paramètres d'EDFA

Gain (dB)



Figure III.9 : Spectre du gain

Nous avons pris une puissance d'entrée de -11 dBm, une puissance de la pompe de 120 mW, et une fibre amplificatrice de longueur 15 m, et de rayon du cœur égale 1.1 μm , comme des valeurs optimales qui donne un bon fonctionnement de l'EDFA ; nous avons obtenu la courbe de la figure III.9. D'après cette figure le gain est stable, et de valeur élevée autour de 28 dB. Ainsi qu'une bande passante très importante approchant les 50 nm.

III.3.2 Analyse temporelle

III.3.2.1 Etude comparative de différentes configurations des circuits de sortie

La figure III.10 présente une liaison optique dont le but est de comparer les différentes sorties de la chaîne en termes de qualité de signal sous forme d'un diagramme de l'œil, et on visualise aussi le signal à la sortie de chaque bloc.

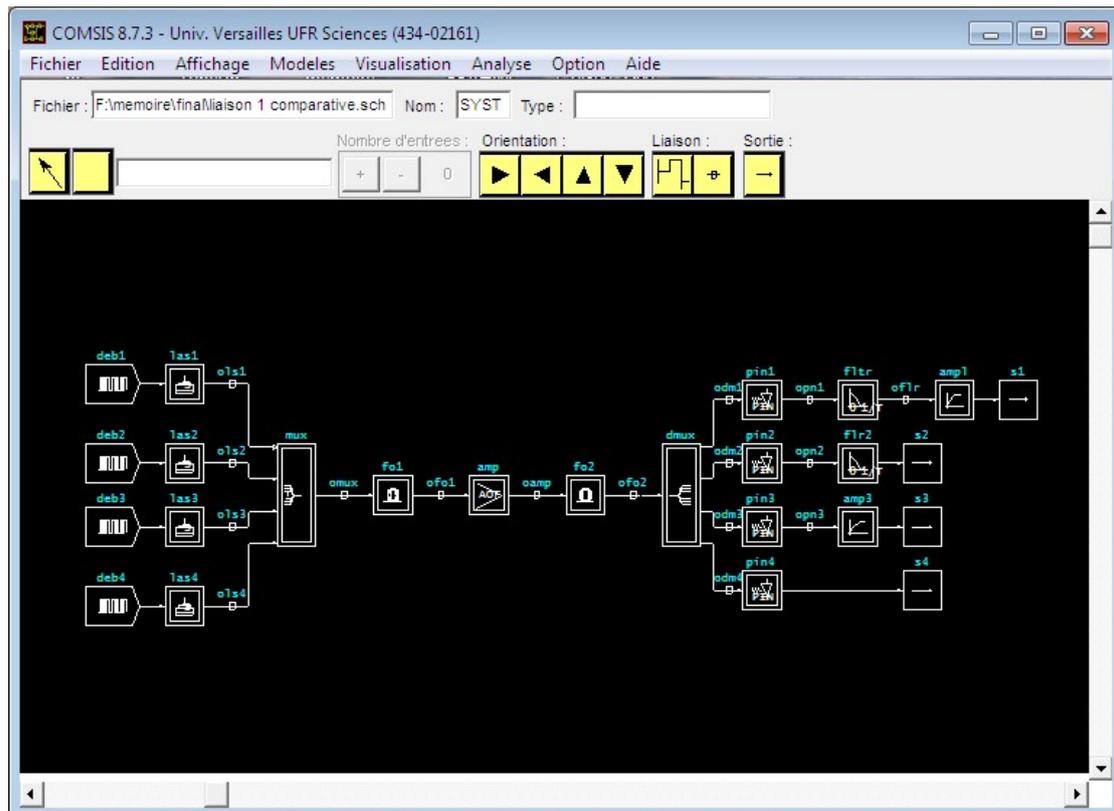


Figure III.10 : Schéma bloc de la liaison d'étude comparative

La figure est une liaison WDM avec quatre (04) entrées, elle est composée de :

- Quatre courants lasers qui ont le même débit.
- Quatre lasers systèmes avec des longueurs d'onde différentes.
- Un multiplexeur optique
- Deux fibres de mêmes caractéristiques.
- Un amplificateur optique
- Un démultiplexeur optique

- Quatre photodétecteurs de type PIN
- Deux filtres électriques.
- Deux amplificateurs électriques
- Quatre sorties pour la visualisation des signaux.

a. Définition des caractéristiques des éléments de la liaison

Avant de simuler notre liaison, on doit d'abord configurer chacun de ses éléments en donnant leurs paramètres caractéristiques comme suit :

- **courant laser**

The image shows a software dialog box titled "COMSIS : Definition des paramètres". It is divided into two sections: "Generalites" and "Caracteristiques".

Generalites:

- Nom : deb1
- Nature : COURANT-LASER
- Groupe : Composants Optiques
- Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques:

DEBIT BINAIRE (Mbits/s) :	3000
LONGUEUR DU REGISTRE :	8
COURANT MINIMUM (mA) :	25
COURANT MAXIMUM (mA) :	40

At the bottom of the dialog box, there are three buttons: "OK", "Annuler", and "Aide".

Figure III.11 : Paramètres du courant laser

La configuration des blocs deb2, deb3 et deb4 est la même que celle de deb1.

Laser système :

The image shows a software dialog box titled "COMSIS : Definition des parametres". It is divided into several sections:

- Generalites:** Contains fields for "Nom : las1", "Nature : LASER-SYSTEME", "Groupe : Composants Optiques", and "Type (en sortie) : INDEFINI".
- Caracteristiques:** Includes a "Type de definition" section with radio buttons for "Systeme" (selected) and "Physiques". Below are input fields for:
 - Longueur d'onde (nm) : 1550
 - Courant de seuil (mA) : 15
 - Rendement Puissance/Courant (W/A) : 0.15
 - Largeur de raie (MHz) : 5, with a secondary field "pour le courant (mA) : 50"
 - Taux d'amortissement (MHz) : 4000, with a secondary field "pour le courant (mA) : 50"
 - Bande a -3 dB (MHz) : 8000
- Donnees physiques modifiables :** A button labeled "Donnees...".
- Parametres Facultatifs:** Includes checked checkboxes and input fields for:
 - Espaceur entre modes (nm) : 1
 - Chirp (MHz/mA) : 100
 - Bruit RIN (dB/Hz) : -154, with a secondary field "pour le courant (mA) : 70"

At the bottom, there are buttons for "OK", "Annuler", and "Aide". A "Parametres physiques..." button is also present at the bottom of the main parameter area.

Figure III.12 : Paramètres du laser système

Les lasers las2, las3, las4 ont la même configuration que las1, en changeant seulement la longueur d'onde avec un pas de 0.8 nm

Multiplexeur

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : mux
Nature : MUX-NONPOLARISE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

LONGUEUR D'ONDE CENTRALE (nm) :	1551.2
ESPACEMENT ENTRE CANAUX (GHz) :	100
BANDE PASSANTE A -3 DB (GHz) :	10
REFLECTIVITE :	0.95
ISOLATION DU CANAL ADJACENT (dB) :	60
ISOLATION DES AUTRES CANAUX (dB) :	60
PERTES D'INSERTION TOTALES (dB) :	0

OK Annuler Aide

Figure III.13 : Paramètres du multiplexeur

Fibre optique

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : fo1
Nature : FIBRE-OPTIQUE-MONOMODE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Longueur de la fibre (km) : 25

Coefficient d'attenuation (dB/km) : 0.2

Dispersion chromatique (ps/nm/km) : Constante 16

Effet Kerr : Oui Non

Effet Raman : Oui Non

Coefficient de non linearite de la fibre (m²/W) : 3.2e-20

Gain Raman (m²/W) : 7.48e-21

Frequence de resonance (THz) : 12

Demi-largeur de raie Raman (THz) : 6.432

Aire effective de la section de la fibre (micro m²) : 80

Type de discretisation de la longueur : Fixe Variable

Valeur du pas (km) :

Valeur initiale du pas (km) :

Dispersion Modale de Polarisation : Oui Non

Birefringence lineique (ps/km) :

Longueur de couplage (km) :

Etat de la fibre

Retard introduit par la fibre (ns) : 0

OK Annuler Aide

Figure III.14 : Paramètres de fibre optique

Amplificateur optique

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : amp
Nature : AMPLI-OPTIQUE-FIBRE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Type des parametres de definition : Systeme Physique

Gain petit signal (dB) :

Puissance de saturation (dBm) :

Facteur de bruit (dB) :

Longueur d'onde de mesure des parametres (nm) :

Fibre : Verre Silice Verre Fluore Autre

Longueur d'onde de la pompe : 980 1480

Retard introduit par l'amplificateur (ns) :

Figure III.15 : Paramètres d'amplificateur optique

Démultiplexeur

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : dmux
Nature : DEMUX-NONPOLARISE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

LONGUEUR D'ONDE CENTRALE (nm) :	1551.2
ESPACEMENT ENTRE CANAUX (GHz) :	100
BANDE PASSANTE A -3 DB (GHz) :	10
REFLECTIVITE :	0.95
ISOLATION DU CANAL ADJACENT (dB) :	60
ISOLATION DES AUTRES CANAUX (dB) :	60
PERTES D'INSERTION TOTALES (dB) :	0

OK Annuler Aide

Figure III.16 : Paramètres du démultiplexeur

Photodiode PIN

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : pin1
Nature : PHOTODIODE-PIN
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

SENSIBILITE (A/W) :	0.9
COURANT D'OBSCURITE (nA) :	0

OK Annuler Aide

Figure III.17 : Paramètres de la photodiode

Cette configuration est la même pour les autres photodiodes.

Filtre

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : filtr
Nature : FILTRE-COSINUS-BF
Groupe : Filtrés
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

bande passante a 3 dB (MHz) : 3000
coefficient d'arrondi : 0.5
retard (Micro-sec) : 0

OK Annuler Aide

Figure III.18 : Paramètres de filtre

Amplificateur

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : ampl
Nature : AMPLIFICATEUR-RADIO
Groupe : Non Linearites
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Gain (dB) : 20
Type du parametre de non linearite : Sans non-linearite
Valeur du parametre en (dBm) : 2

OK Annuler Aide

Figure III.19 : Paramètres d'amplificateur

b. Résultats de simulation

Après avoir configuré et nommé tous les éléments de la liaison, on passe à l'étape de simulation, ainsi le calcul du facteur de qualité Q et le taux d'erreur TEB. Les graphes obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous.

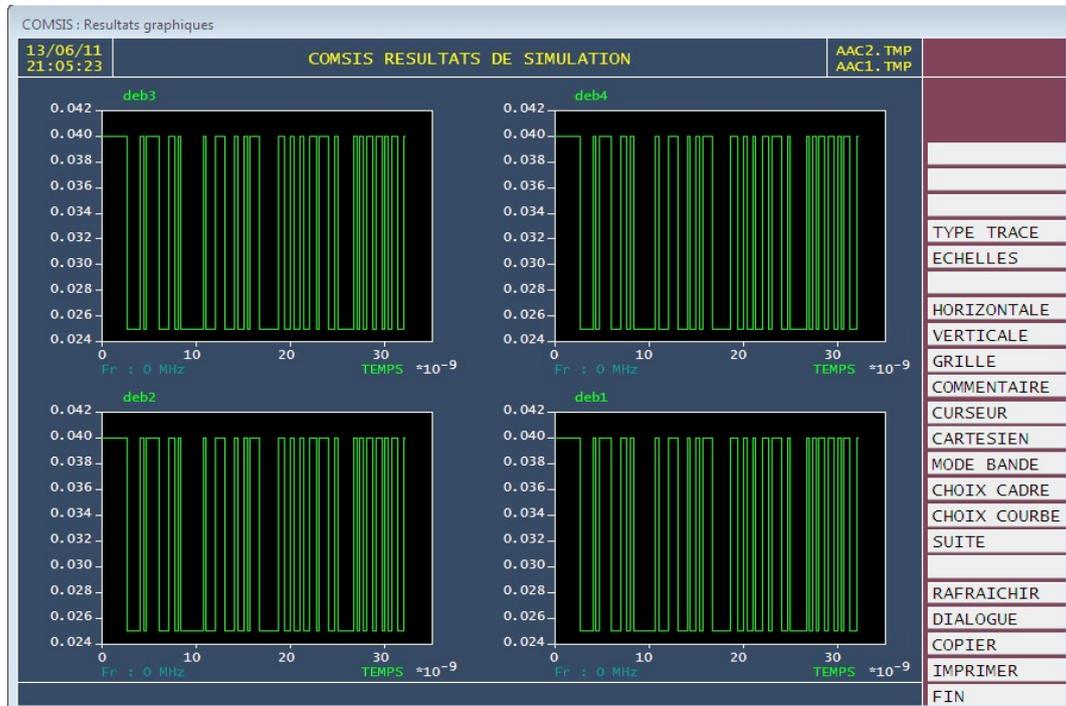


Figure III.20 : Réponse temporelle des courants lasers

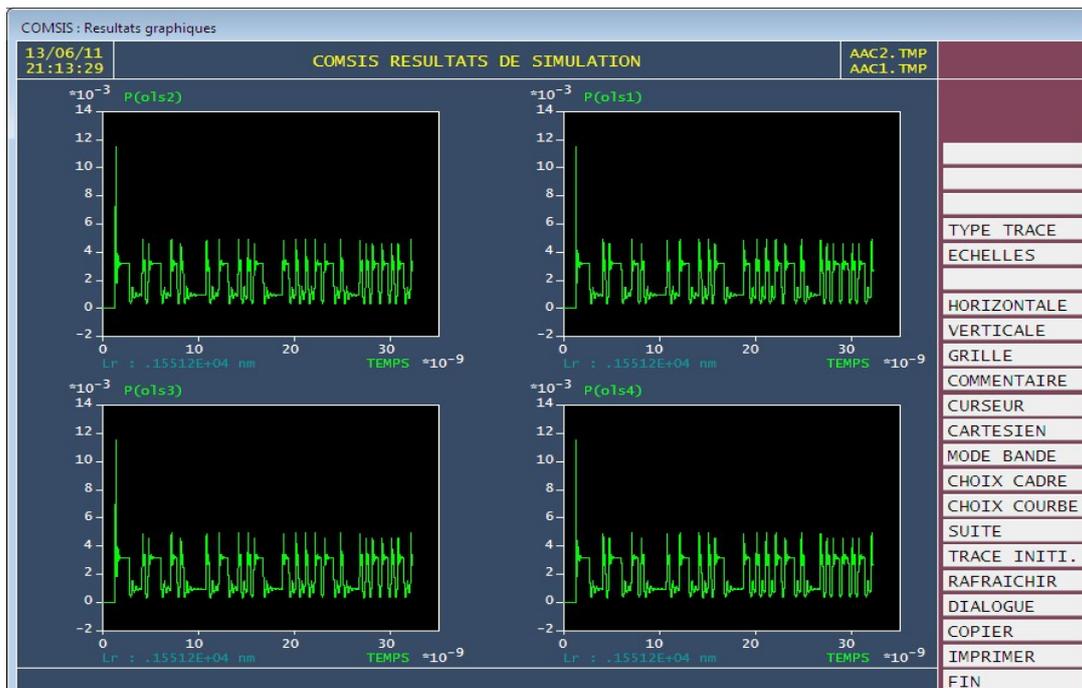


Figure III.21 : Puissance des lasers

On constate que le laser comporte un bruit qui va perturber le signal

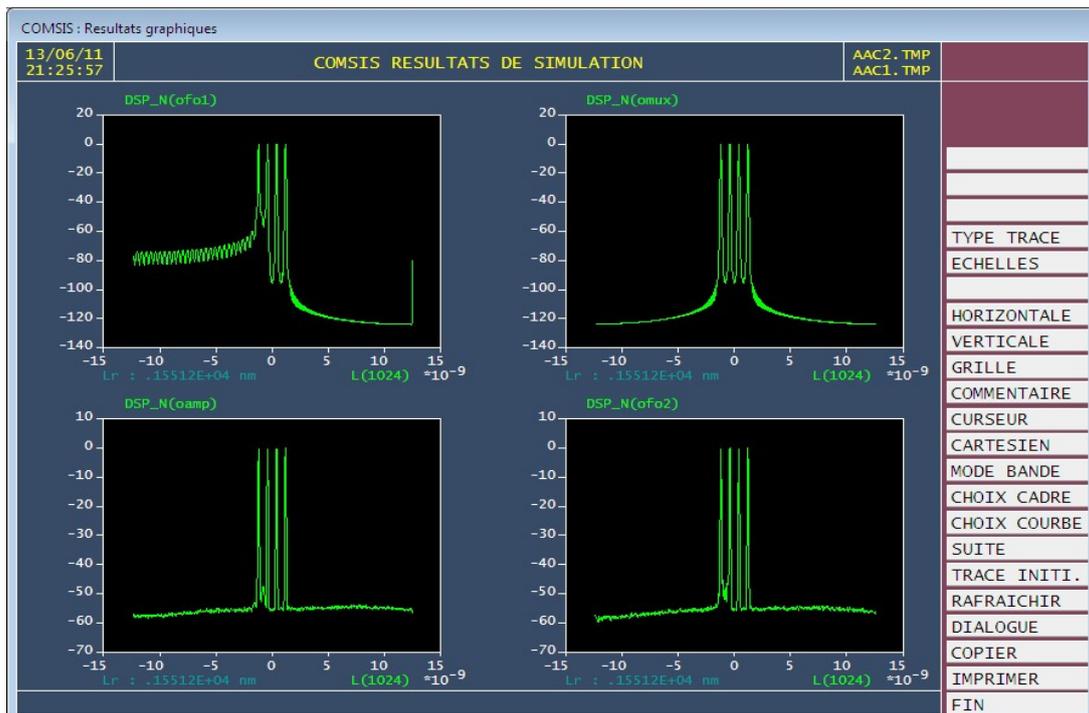


Figure III.22 : Densité spectrale des sorties de fibre1, amplificateur, multiplexeur et fibre2

Le signal de sortie de la fibre 1 présente une atténuation lorsqu'on le compare avec celle du multiplexeur, mais l'amplificateur a compensé ces pertes.

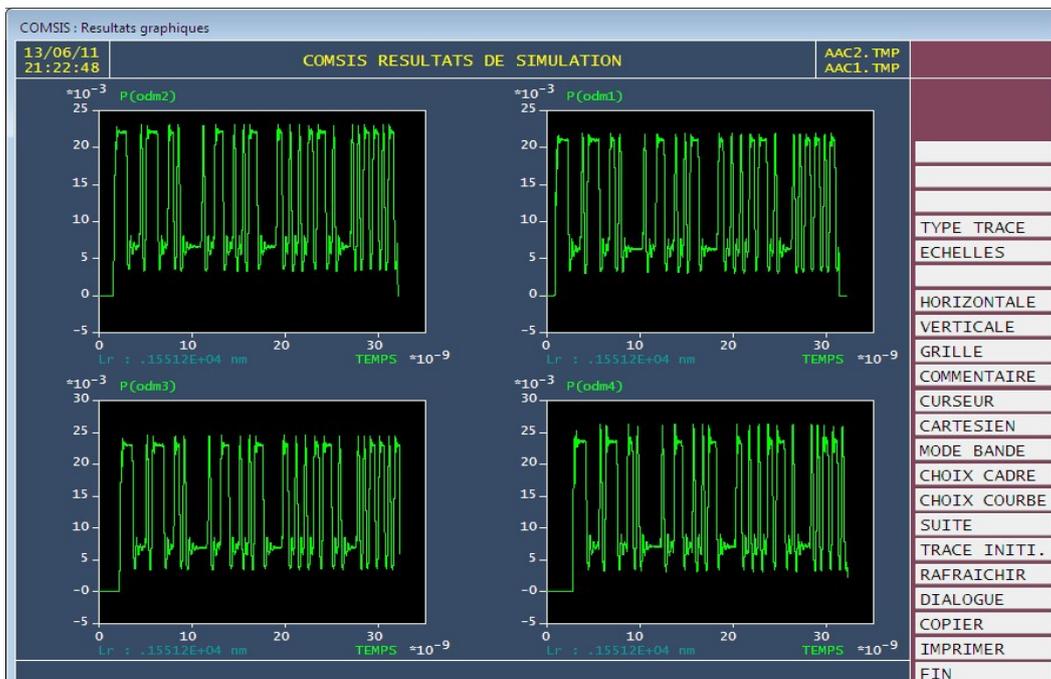


Figure III.23 : Puissance des sorties de démultiplexeur

Les sorties du démultiplexeur présentent un bruit dû au bruit du laser et une atténuation dû à la fibre optique et aux pertes de connexion.

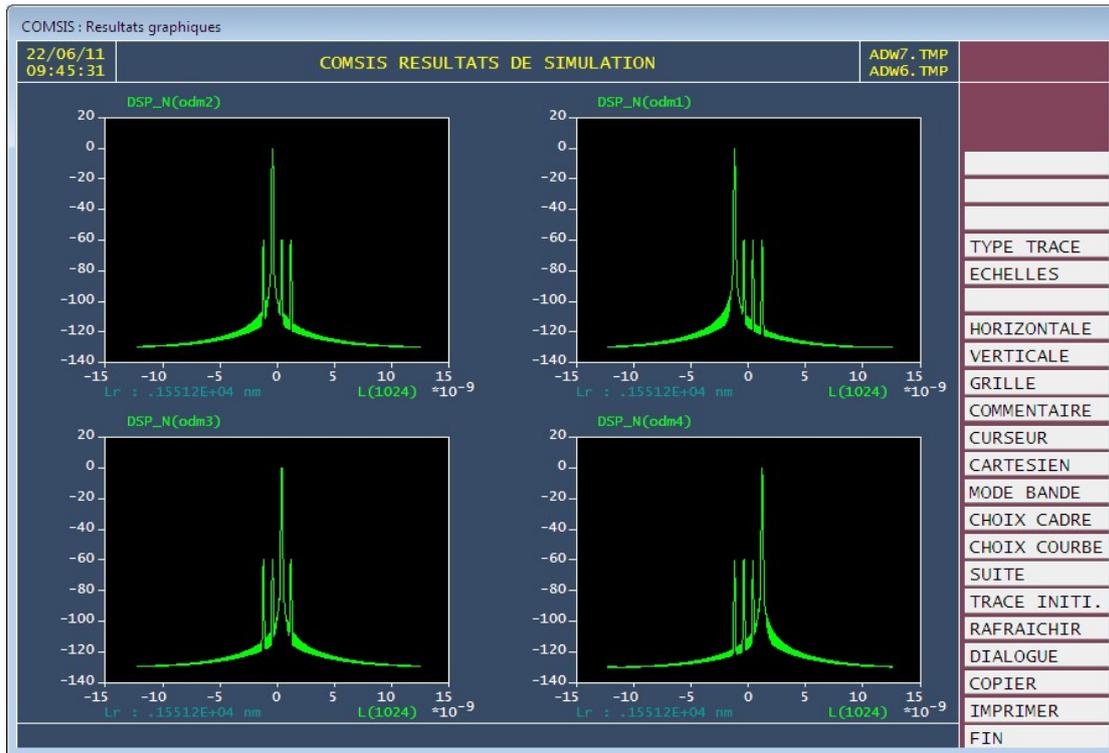


Figure III.24 : Densité spectrale des sorties du démultiplexeur

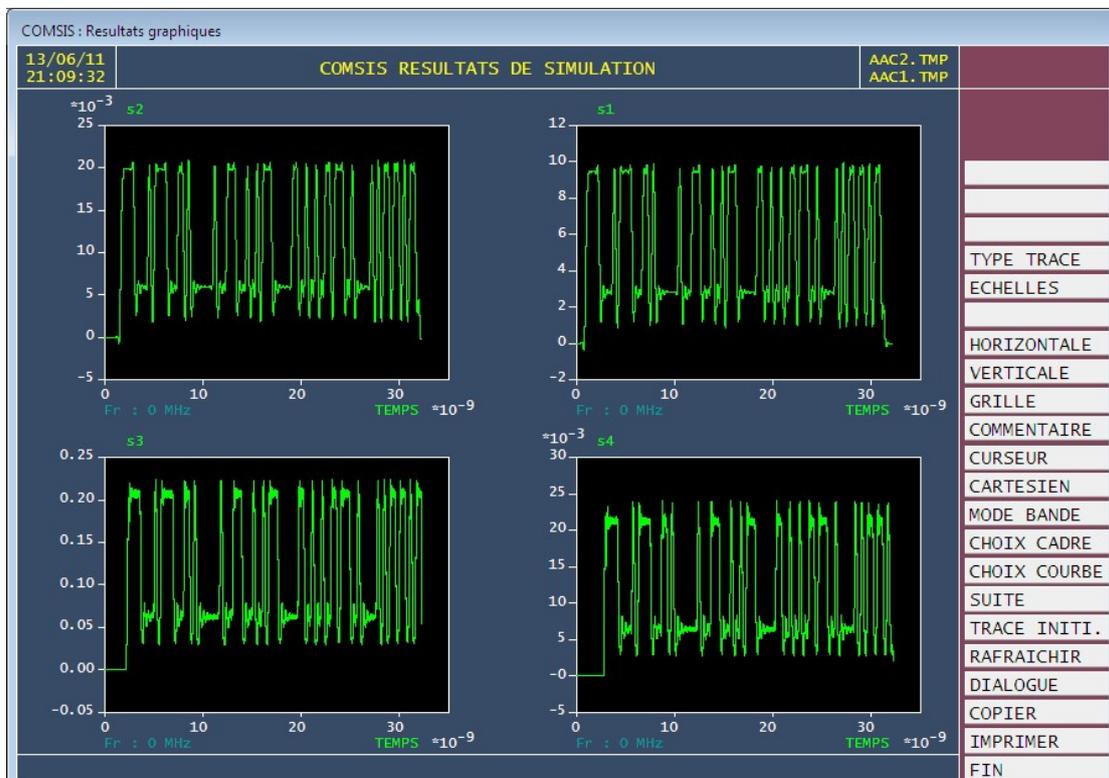


Figure III.25 : Réponse temporelle des sorties

Le signal des sorties S_2 et S_4 présente une dégradation due à l'atténuation de la fibre, les modules de l'émission et de la réception et les pertes de connexion. Par contre l'amplificateur a fait compenser ces pertes pour les sorties S_1 et S_3 .

Les sorties S_3 et S_4 comportent un bruit accumulé dans les blocs précédents de la liaison. Par contre le filtre a minimisé se bruit dans les sorties S_1 et S_2

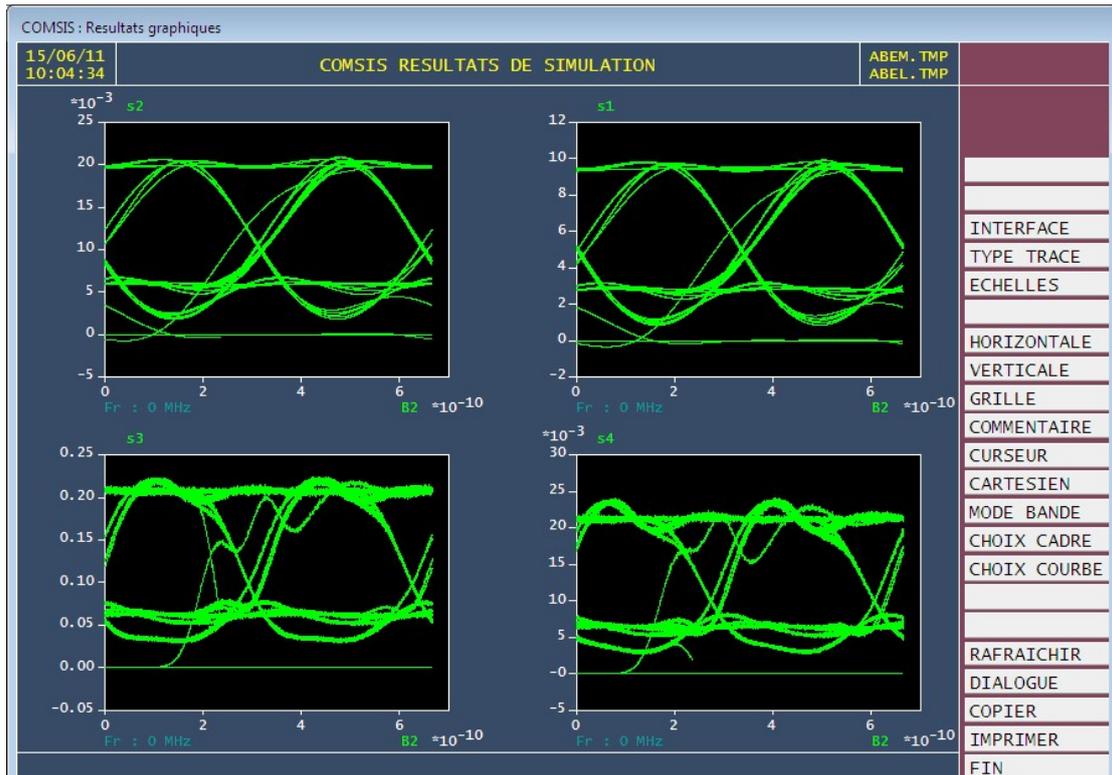


Figure III.26 : Diagramme de l'œil des sorties

La figure III.26 montre que la sortie S_1 présente le meilleur signal après le filtrage et l'amplification, le filtrage du signal S_2 permet d'éliminer le bruit mais il est atténué, en revanche le signal S_3 est amplifié avec le bruit à cause de l'absence du filtre, sans amplification et filtrage le signal S_4 a subit à une dégradation.

Les sorties	Facteur Q	TEB
S_1	6.34	0.120 e-9
S_2	6.30	0.570 e-8
S_3	5.60	0.112 e-7
S_4	4.48	0.682 e-6

Tableau III.1 : Facteur Q et TEB des sorties de la liaison d'étude comparative

III.3.2.2 Influence de la longueur de la fibre sur de la liaison

Comme on a vu dans la liaison précédente que la sortie S_1 est la meilleur parmi les quartes sorties, pour cela on va l'utiliser dans cette liaison et on va étudier le signal de sortie en fonction de la longueur de la fibre gardant le débit constant à 3Gbits/s. On prend la même longueur pour les deux morceaux de fibre.

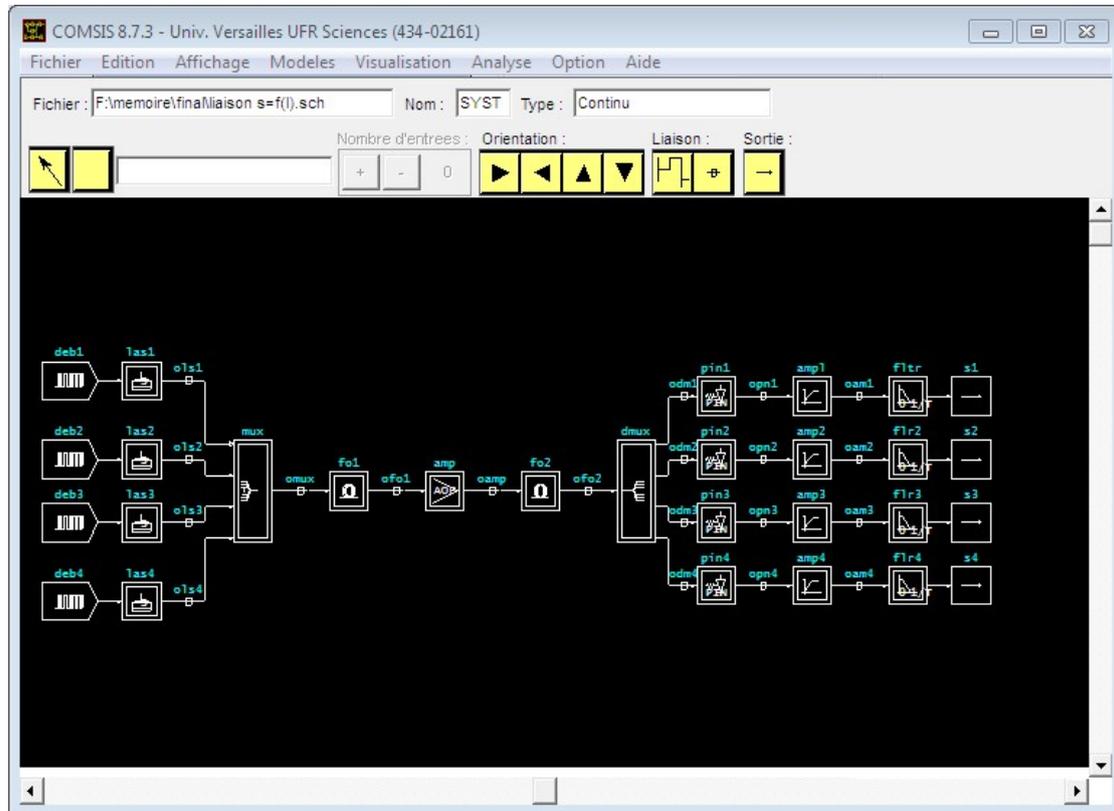


Figure III.27 : Schéma bloc de la liaison présentant l'influence de la longueur de fibre

a. Une liaison de 10km

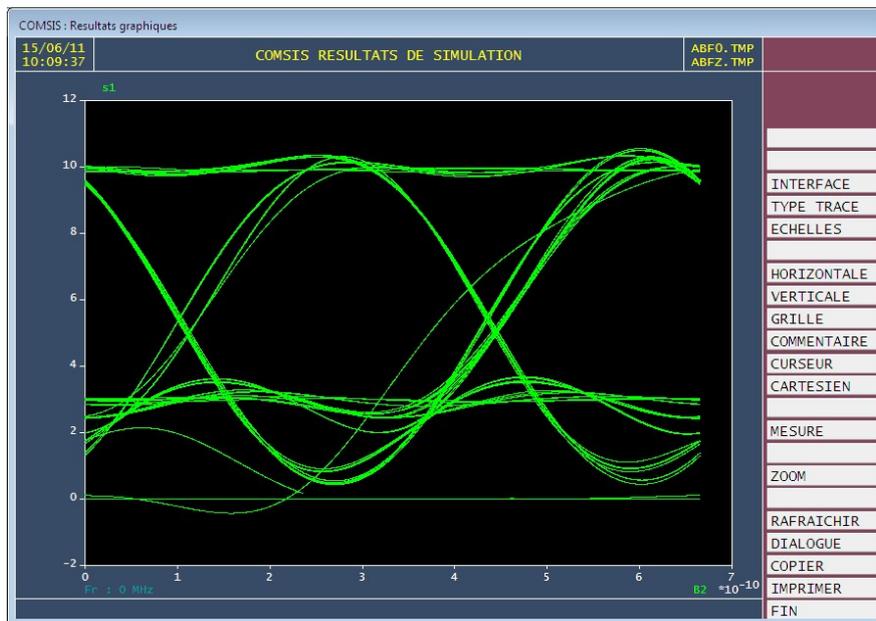


Figure III.28 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=10km

b. Une liaison de 50km

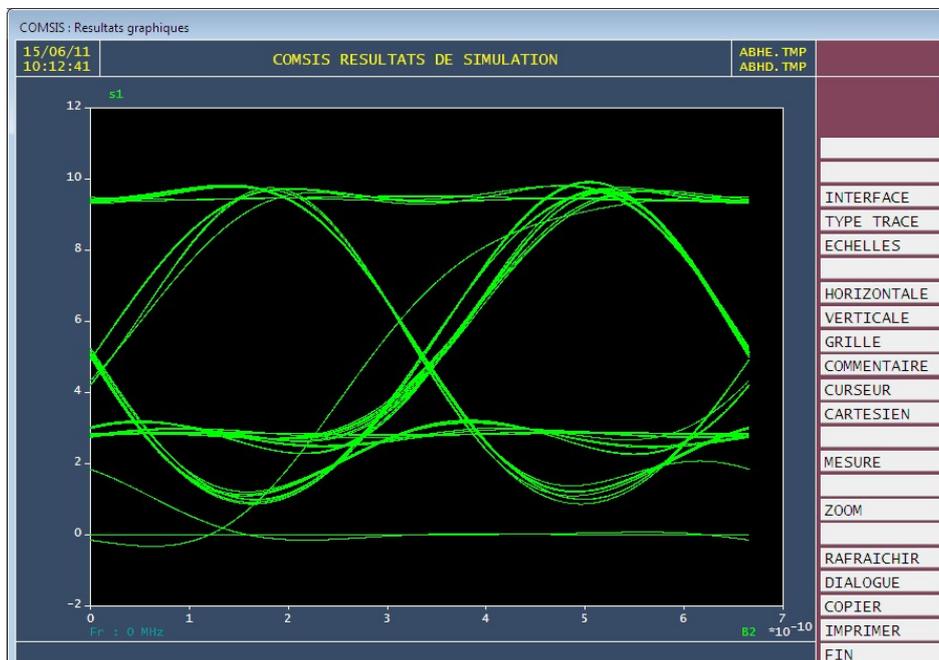


Figure III.29 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=50km

c. Une liaison de 100km

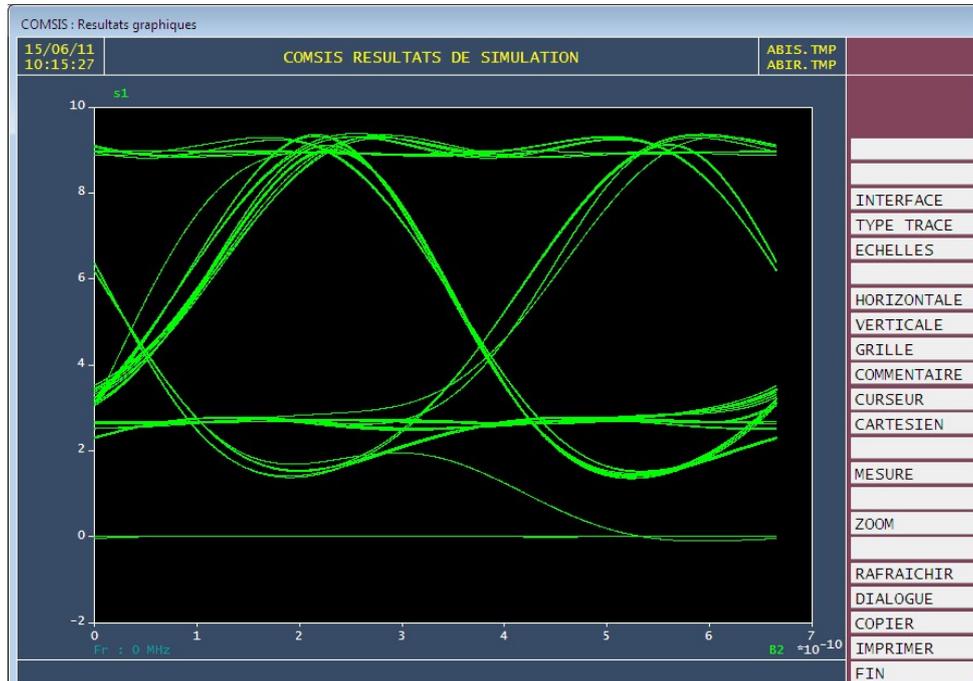


Figure III.30 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=100km

Longueur L (km)	Facteur Q	TEB
10	6.82	0.460 e-11
50	6.30	0.153 e-9
100	5.43	0.299 e-7

Tableau III.2 : Facteur Q et TEB de différentes longueurs de la fibre

A partir de ces trois figures et avec l'analyse du facteur Q et du TEB, on remarque que le signal de sortie a subit une déformation lors l'augmentation de longueur de la fibre et l'ouverture verticale du diagramme de l'œil commence à se diminuer à cause de l'interférence inter-symbole.

III.3.2.3 Influence du débit sur les caractéristiques de la liaison

Dans cette simulation on va étudier le signal de sortie S_1 en fonction du débit fixant la longueur de la liaison à 25 Km.

a. Une liaison de 1 Gbits/s

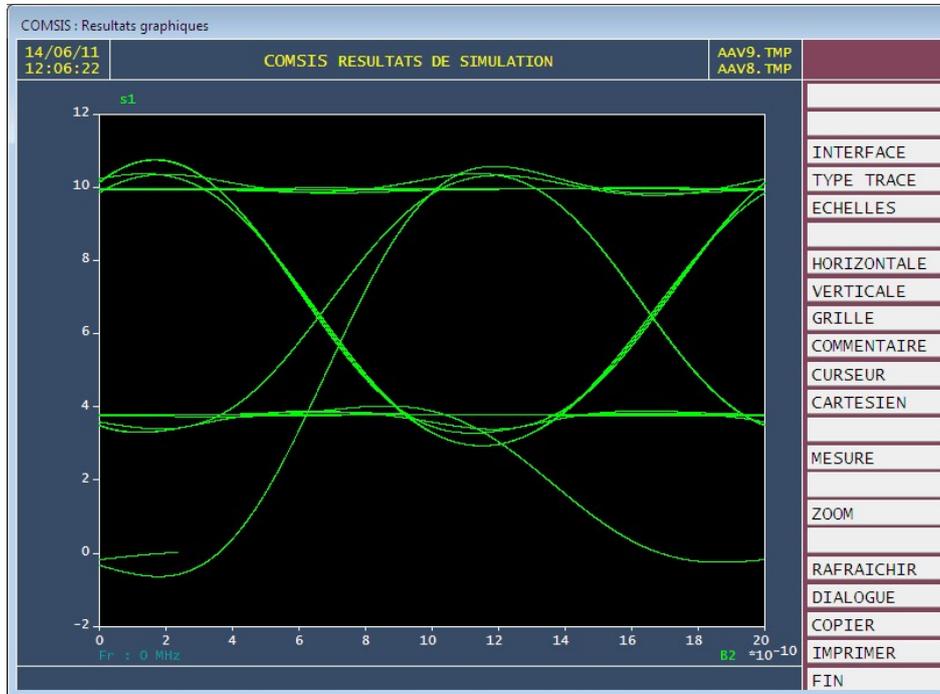


Figure III.31 : Diagramme de l'œil de la sortie s_1 pour $d=1\text{Gbits/s}$

b. Une liaison de 3 Gbits/s

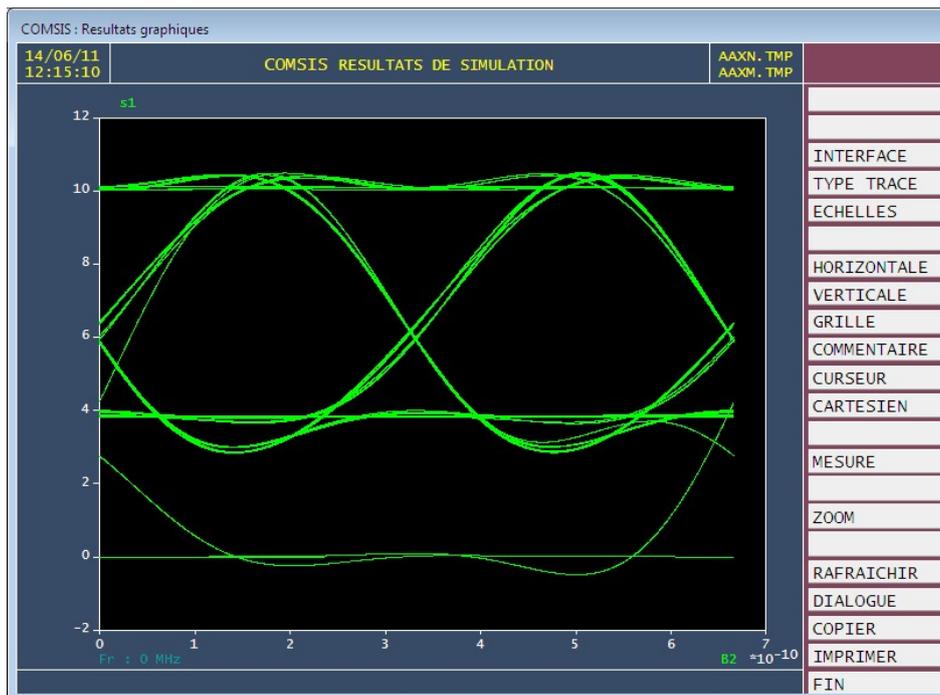


Figure III.32 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=3Gbits/s

c. Une liaison de 5 Gbits/s

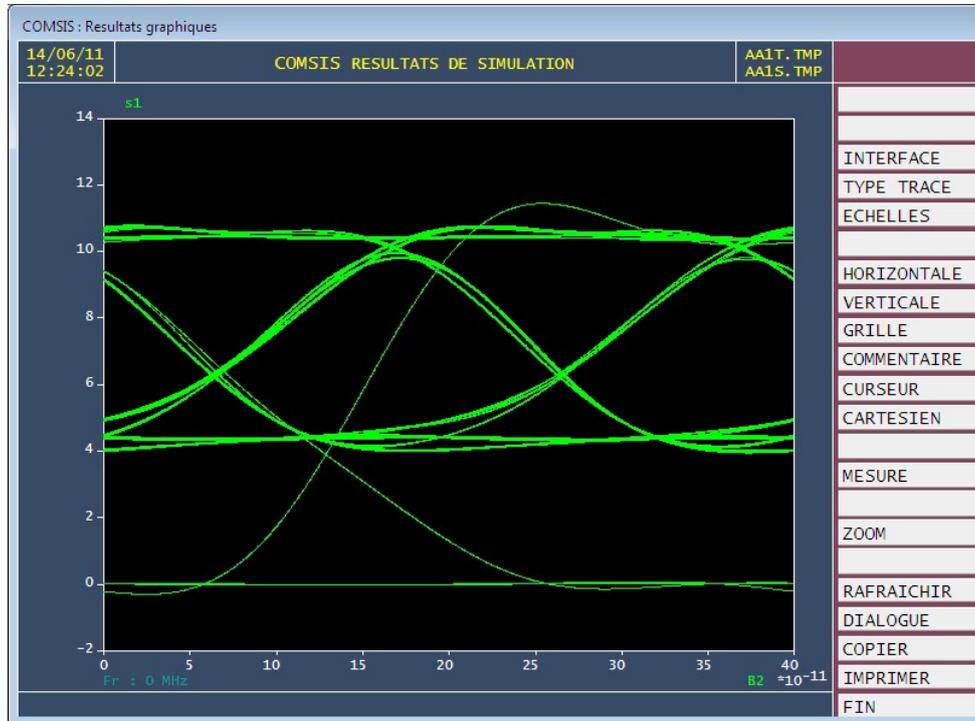


Figure III.33 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=5Gbits/s

Débit (Gbits/s)	Facteur Q	TEB
1	7.14	0.471 e-12
3	6.33	0.311 e-9
5	5.51	0.189 e-7

Tableau III.3 : Facteur Q et TEB des différents débits

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

III.4 Conclusion

Sommaire

Introduction générale

I.1 introduction	1
I.2 La fibre optique	1
I.2.1 Présentation générale des fibres	2
I.2.2 L'atténuation	5
I.2.3 La dispersion chromatique	6
I.2.3.1 Définition	6
I.2.3.2 Effets sur la transmission	7
I.2.4 La polarisation et la dispersion modale de polarisation	8
I.3 Module d'émission	10
I.3.1 Fonctionnement d'un laser à semi-conducteur	10
I.3.2 Les différents types de Laser à semi-conducteur	11
I.3.2.1 Les lasers Fabry-Pérot (FP)	11
I.3.2.2 Les lasers à réaction répartie (Distributed Feedback laser DFB)	11
I.3.2.3 les lasers à Réflecteur de Bragg distribué (Distributed Bragg Reflector laser DBR)	12
I.3.2.4 Les lasers à cavité verticale émettant par la Surface	12
I.4 Module de réception	13
I.4.1 Concepts de base	13
I.4.2 Principe de la photodétection	13
I.4.3 Les photodiodes PIN	14
I.5. Les amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (AFDE)	15
I.5.1 définition	15
I.5.2. Les principales caractéristiques de l'EDFA	16
I.5.2.1 Gain et puissance de saturation	16
I.5.2.2 Facteur de bruit	17
I.5.2.3 Rendement de l'amplificateur	17
I.5.3. Avantages et inconvénients	18
I.5.3.1 Avantages	18
I.5.3.2 Inconvénients	18
I.6 Multiplexeur/Démultiplexeur Optique	19
I.6.1 Introduction	19
I.6.2 Principe	19
I.7 Le filtrage	20

I.8 L'amplificateur électrique	20
I.9 Conclusion	21
II.1 introduction	22
II.2 Les techniques de multiplexage	23
II.2.1 Multiplexage TDM	23
II.2.2 Multiplexage temporel optique (OTDM: Optical Time Division Multiplexing)	24
II.2.3 Multiplexage temporelle électronique (ETDM: Electronic Time Division Multiplexing)	25
II.2.4 Multiplexage fréquentiel (FDM, Frequency Division Multiplex)	26
II.2.5 Multiplexage en longueur d'onde : (WDM : Wavelength Division Multiplexing)	27
II.2.5.1 Principe	27
II.2.5.2 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)	28
II.2.5.3 U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing)	28
II.2.5.4 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)	28
II.3 Le bruit de la liaison	28
II.3 .1 Perturbations externes	29
II.3 .2 Bruit propre des éléments de la chaîne optique	29
II.3 .2.1 Bruit du laser	29
II.3 .2.2 Bruit du photodétecteur	31
II.4 Critères de qualité	33
II.4.1 Probabilité d'erreur et le taux d'erreur binaire	33
II.4.2 Facteur Q	34
II.4.3 Diagramme de l'œil	36
II.4.4 Rapport signal à bruit	39
II.4.5 Comparaisons des critères	40
II.5 Bilan de liaison	41
II.5.1 Bande passante (BP) et Capacité de transmission (CT)	42
II.6 Conclusion	44
III.1 Introduction	45
III.2 Présentation du logiciel	46
III.3 Simulation	49
III.3.1 Analyse statique	49
III.3.1.1 Etude de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée	49
III.3.1.2 Etude de gain en fonction de la puissance d'entrée	50
III.3.1.3 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde, et de la puissance d'entrée	51

III.3.1.4 Etude de la puissance d'ESA en fonction de la longueur d'onde et de la puissance d'entrée	52
III.3.1.5 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde, et de la longueur de la fibre amplificatrice	53
III.3.1.6 Etude de la puissance d'ESA en fonction de la longueur d'onde, et de la longueur de la fibre amplificatrice	54
III.3.1.7 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde, et du rayon du cœur de la fibre amplificatrice	55
III.3.1.8 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde et des valeurs optimales des paramètres d'EDFA	56
III.3.2 Analyse temporelle	57
III.3.2.1 Etude comparative de différentes configurations des circuits de sortie	57
III.3.2.2 Influence de la longueur de la fibre sur de la liaison	69
III.3.2.3 Influence du dédit sur les caractéristiques de la liaison	72
III.4 Conclusion	74
Conclusion générale	

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Ma très chère mère, et mon très cher père, à leur grand sacrifice et le dévouement pour mon bonheur.
- Mes frères et mes sœurs, et toute ma famille.
- A mes amis et toute personne qui ma aidée de loin ou de prés.

BAKALEM Ahmed.

Je dédie ce modeste travail à :

- Ma très chère mère, et mon très cher père, à leur grand sacrifice et le dévouement pour mon bonheur.
- Mes frères et mes sœurs, et toute ma famille.
- A mes amis et toute personne qui ma aidée de loin ou de prés.

BOUREGA Adel.

Introduction générale

En effet la technologie des fibres optiques est la seule qui peut rivaliser avec celle du câble à bande large, ayant la capacité de fournir la même gamme des possibilités telles que la télévision numérique, la téléphonie et la connectivité des données. Elle augmentera 100 fois plus la vitesse de transmission des données que n'importe quelle autre technologie concurrentielle.

Le principe de la fibre optique : consiste à transmettre un signal lumineux à travers un milieu transparent.

Le but technique recherché est de toujours avoir la meilleure qualité possible du signal, la plus grande capacité ainsi la plus grande portée.

Nous nous intéresserons donc à la fibre optique qui a connu de nombreuses avancées depuis ses débuts et en annonce de bien plus prometteuses encore : la multiplicité des paramètres, qui jouent sur l'efficacité de la fibre, fait que l'on peut sans cesse améliorer les performances de celle-ci.

On peut modifier le trajet lumineux en choisissant un type de fibre particulier, qui permettra d'obtenir un chemin optique plus court et une dispersion modale moindre.

Ce travail de mémoire, repart en trois chapitres, consistera à décrire les différents éléments intervenant dans un système de transmission optique à haut débit et longue distance.

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

Le dernier chapitre, plutôt pratique, sera entièrement dédié à une série de simulations qui seront réalisées, dans notre cas, à l'aide du logiciel COMSIS (COMMunication System Interactive Software).

Chapitre I

Description des composants de la liaison

Chapitre II

Caractéristiques de la liaison optique

Chapitre III

*Simulation et résultats
obtenus*

I.1 Introduction

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

L'architecture d'une liaison, quelque soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée des mêmes briques de base, à savoir un émetteur, un module de transmission et un récepteur.

Pour chacun de ces éléments constitutifs d'une liaison sur fibre optique, nous tenterons de décrire leur rôle et leur fonctionnement. Nous débuterons par la fibre optique, élément essentiel puisqu'elle permet le transport de l'information et est à l'origine des efforts réalisés par la suite. Nous poursuivrons par la description de l'émetteur (laser), pour enchaîner sur les blocs constituant le récepteur (photodiode, amplificateur électrique, filtre électrique). 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.

I.2 Fibre optique

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

- 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.

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

I.2.1 Présentation générale des fibres

Une fibre est un guide d'onde cylindrique et diélectrique. Elle est constituée de deux diélectriques de même axe, le cœur et la gaine, entourés d'une gaine de protection

(Figure I.1).

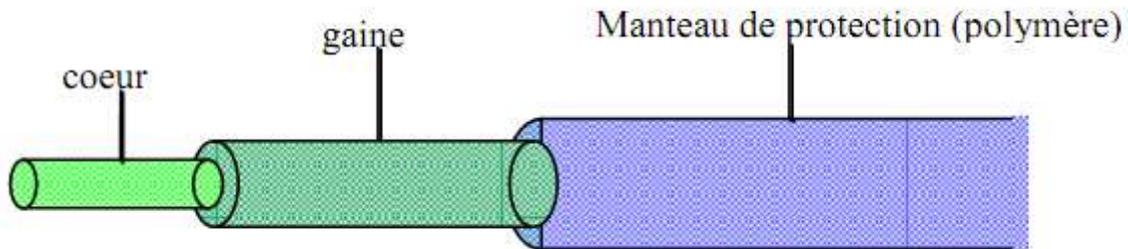


Figure I.1: Structure d'une fibre optique.

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine (Figure I.2). Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine n_2 est inférieur à celui du cœur n_1 (une différence de quelques % est suffisante). La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. L'ouverture numérique (O.N.) représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptré cœur-gaine de la fibre.

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

I.1

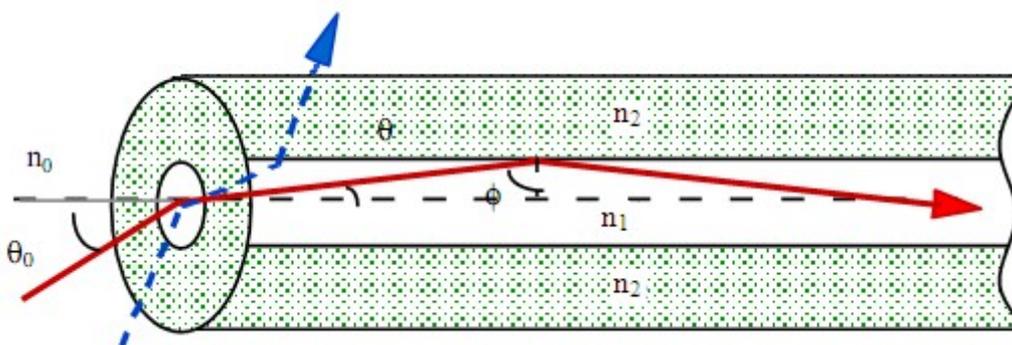


Figure I.2: principe de propagation du signal dans une fibre optique.

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

Il existe deux types de fibres : multimode et monomode. Dans une fibre multimode, les diamètres des diélectriques sont plus importants que ceux d'une fibre monomode (\varnothing du cœur ≈ 50 microns et \varnothing de la gaine ≈ 125 microns) et les différents rayons empruntent des trajectoires différentes. Leurs chemins optiques et donc leurs temps de propagation sont différents. Il en résulte donc une dispersion intermodale (Figure I.3). Pour diminuer cet effet, le profil d'indice du cœur peut être modifié de telle sorte à créer un « gradient d'indice » et non un saut d'indice (l'indice n_1 n'est pas constant mais possède une symétrie autour de l'axe) (Figure I.4). Cela permet de réduire les différences de temps de propagation en réduisant les écarts entre chemins optiques.

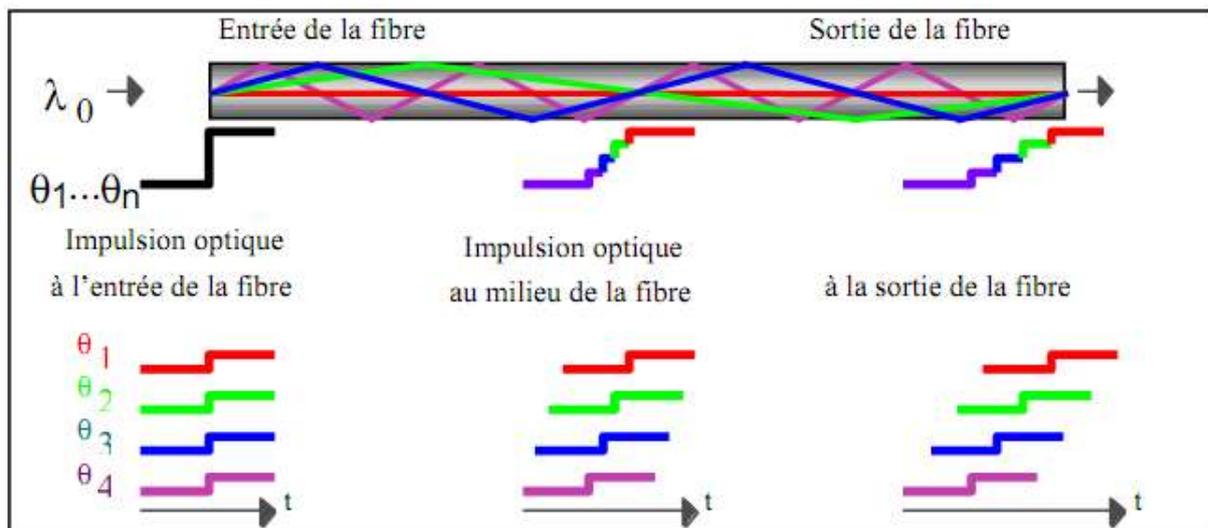


Figure I.3: Dispersion intermodale dans une fibre multimode à saut d'indice.

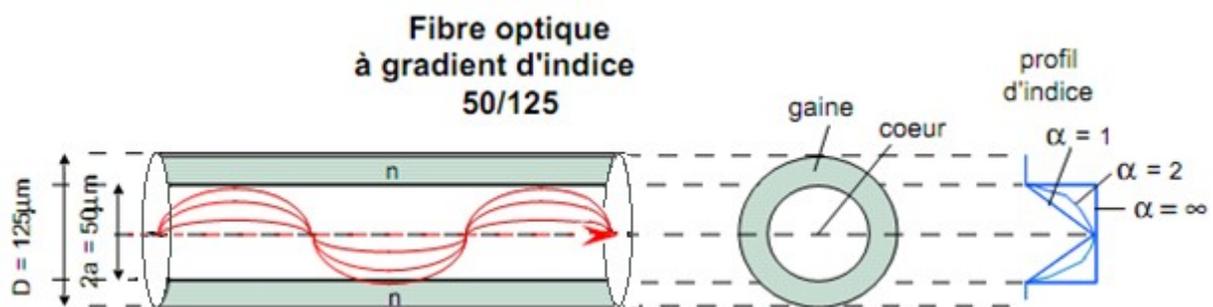


Figure I.4: Profil d'une fibre multimode à gradient d'indice.

Les fibres multimodes sont de préférence employées pour les réseaux locaux, pour les bas débits ou encore pour des longueurs d'onde proches de 850 nm. 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 (Figure I.5).

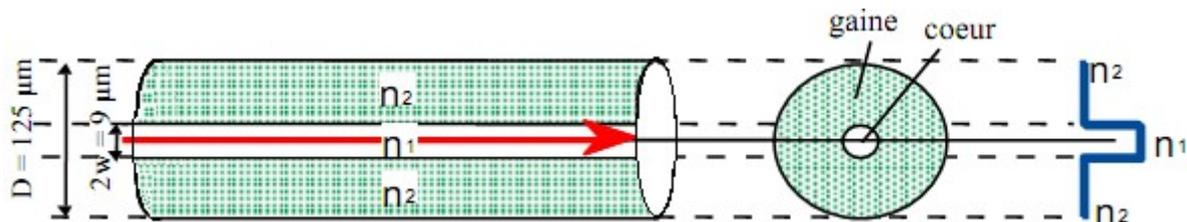


Figure I.5: Profil d'une fibre monomode à saut d'indice.

L'UIT-T (Union Internationale des Télécommunications) a instauré des normes internationales pour les fibres optiques déployées dans les réseaux de télécommunications.

Les recommandations G.650 à G.655 portent sur les paramètres géométriques, mécaniques et optiques des fibres et sur les tolérances admissibles (Tableau I.1).

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

Tableau I.1 : Exemples de caractéristiques de quelques fibres optiques de transmission.

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

I.2.2 Atténuation

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. Dans le cas de la silice pure, le minimum théorique d'atténuation devrait descendre à 0,14 dB/km vers $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les micro-courbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour les fibres standards 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 I.6 montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications.

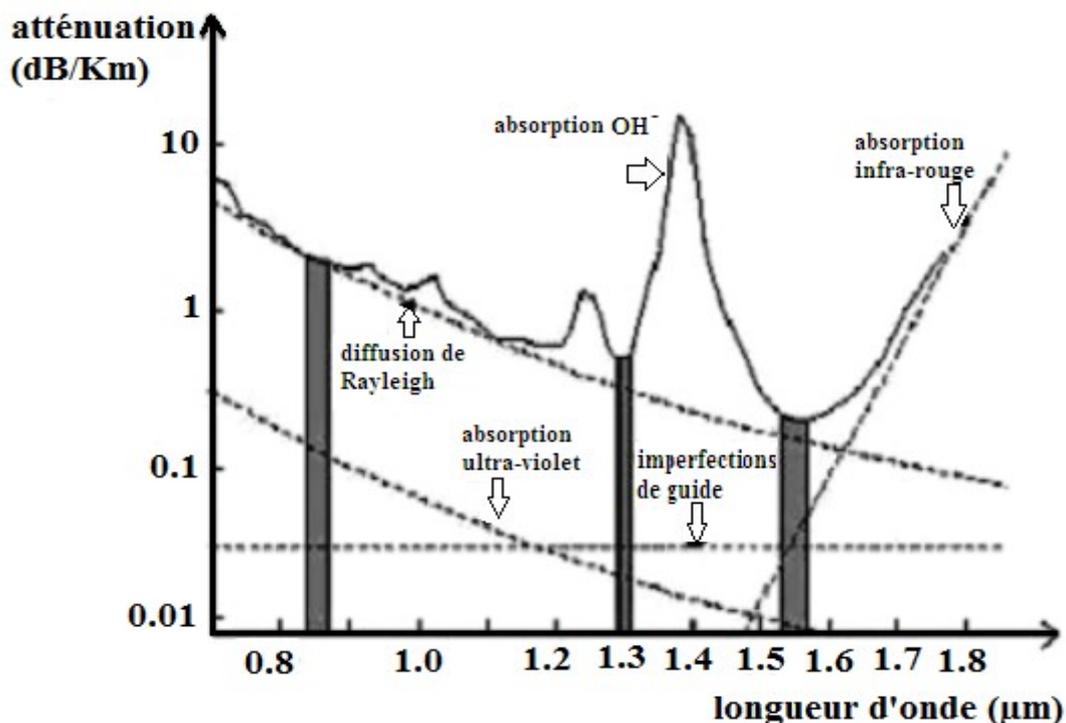


Figure I.6: Atténuation spectrale d'une fibre optique.

L'atténuation minimale de 0,22 dB/km n'est pas très loin du minimum théorique pour la silice. La différence s'explique par le fait que l'on ne peut pas utiliser de la silice pure. On doit doper soit le cœur, soit la gaine et cela augmente les fluctuations de composition et donc les pertes par diffusion. [1]

I.2.3 Dispersion chromatique

I.2.3.1 Définition

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 λ . 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.

En fait, la dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion modale). La Figure I.7 montre l'évolution avec λ du terme matériau pour la silice.

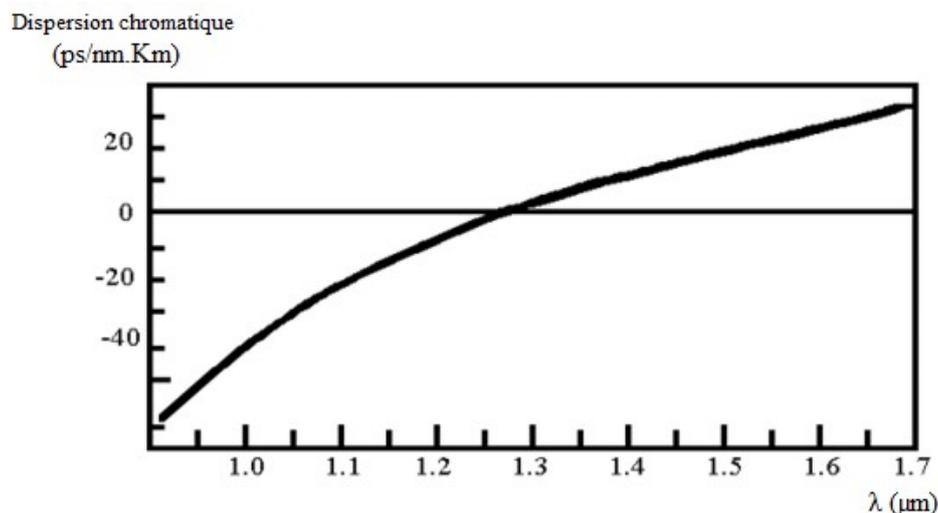


Figure I.7: Dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde.

On voit sur cette courbe, que la fibre monomode standard G.652 présente une dispersion maximale de 20 ps/(nm.km) à 1550 nm. Classiquement, on la considère de 17 ps/(nm.km). Dans la bande 1288 à 1359 nm, elle est de 3,5 ps/(nm.km). Ainsi, la capacité de

transmission est la plus grande possible pour une longueur d'onde d'environ 1,3 μm . Elle est donc idéale pour cette fenêtre spectrale et permet de transporter de très hauts débits.

Malheureusement, ce n'est pas là que l'atténuation est la plus faible (Figure I.8). On a donc cherché à déplacer le point de dispersion nulle vers 1,55 μm . On dit que ce genre de fibre, la G.653, est à dispersion décalée (Figure I.8). Il existe aussi des fibres à dispersion aplatie pour lesquelles la dispersion totale reste très faible, de l'ordre de quelques ps/(nm.km), sur plus d'une centaine de nanomètres (Figure I.8).

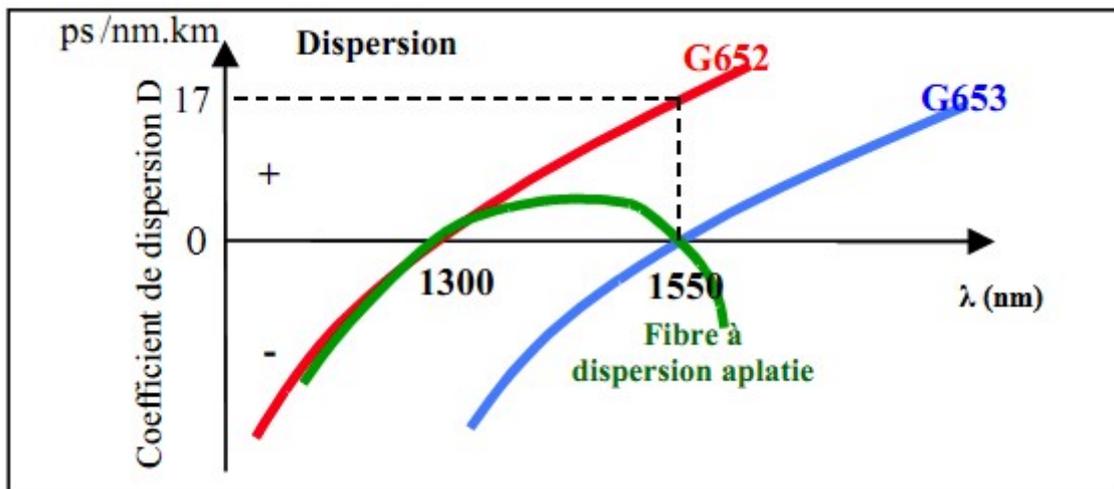


Figure I.8: Courbes de dispersion de quelques fibres optiques.

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

I.2.3.2 Effets sur la transmission

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne donc différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques. Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre symboles est possible. Cet élargissement τ se calcule ainsi :

$$\tau = D \text{ (ps/nm.km)} * L \text{ (km)} * \Delta\lambda \text{ (nm)} \quad \text{I.2}$$

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, car le milieu des télécommunications 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 usité dans les réseaux de télécommunications.

I.2.4 Polarisation et la dispersion modale de polarisation

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 due 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 I.9). On l'appelle dispersion modale de polarisation (Polarization Mode Dispersion, PMD, en anglo- américain).

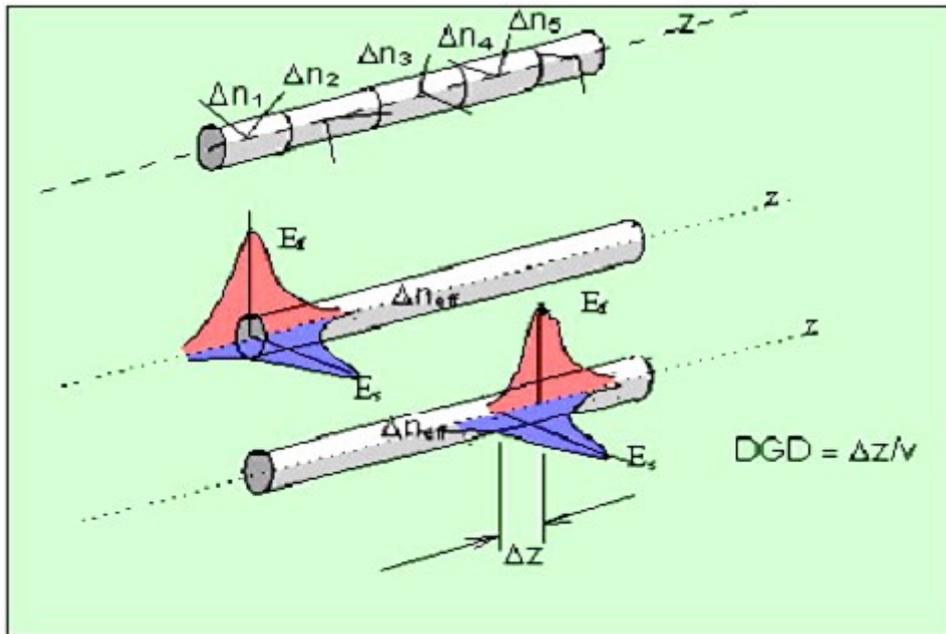


Figure I.9: Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à une biréfringence aléatoire de la PMD.

Une caractéristique essentielle de ce phénomène réside dans son caractère aléatoire, étant donné qu'il est principalement d'origine extrinsèque et dépend de la qualité de la pose de celle-ci. La fibre optique apparaît ainsi comme un milieu fluctuant. La valeur moyenne du retard n'est donc pas suffisante pour le décrire totalement et nous utiliserons donc des données statistiques. La mesure principale est le DGD (Differential Group Delay), retard différentiel entre les 2 composantes correspondant aux états principaux de la propagation.

$$\text{DGD} = \text{BL} \times \sqrt{L_c} \times \sqrt{L} \quad \text{I.3}$$

Où :

BL : Biréfringence Linéique

L_c : longueur de couplage

L : longueur de la fibre

Ce décalage a jusqu'à nos jours souvent été négligé car il reste minime. Cependant, l'allongement du support de transmission optique augmente la valeur de ce décalage temporel alors que la valeur critique diminue avec l'augmentation des débits.

I.3 Module d'émission

Compte tenu des propriétés des fibres optiques, des efforts sont nécessaires sur les composants micro-optoélectroniques pour permettre une utilisation optimale. D'importants progrès sur les lasers ont été réalisés dès la fin des années 60 et les premiers réseaux à fibres optiques ont pu être déployés.

La partie émission de notre liaison optique est composée d'un laser à semi-conducteur. Son rôle est de délivrer au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données.

I.3.1 Fonctionnement d'un laser à semi-conducteur

Dans les systèmes de communications optiques, la source optique la plus utilisée est la diode laser, (acronyme de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation »). La diode laser se base sur trois processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière. Ces processus sont l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée.

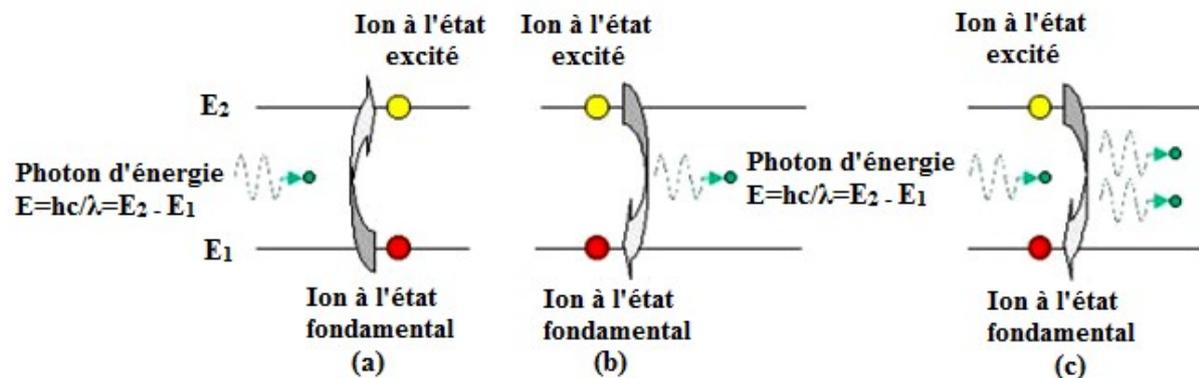


Figure I.10: Mécanismes fondamentaux de fonctionnement d'une diode laser.

Pour obtenir l'effet laser, il est nécessaire de privilégier l'émission stimulée au détriment des deux autres processus. Deux conditions doivent être réalisées pour favoriser cette émission stimulée et ainsi obtenir l'effet laser :

1. Il faut avoir suffisamment d'électrons dans l'état d'énergie supérieure. Dans un semi-conducteur, ceci est réalisé par une opération dite de pompage électrique qui consiste à promouvoir un maximum d'électrons dans la bande de conduction : c'est ce qu'on appelle une inversion de population.

2. Il faut favoriser l'émission stimulée : il faut donc avoir suffisamment de photons incidents (excitateurs). Pour cela, on enferme le semi-conducteur dans une cavité résonante constituée par exemple par un résonateur du type Fabry-Pérot, obligeant ainsi l'énergie lumineuse à s'accumuler.

I.3.2 Différents types de Laser à semi-conducteur

Les quatre principaux types de lasers à semi-conducteurs sont :

I.3.2.1 Lasers Fabry-Pérot (FP)

Sont peu performants en bruit mais sont peu coûteux ; ils sont multimodes et leur longueur d'onde atteint les 1550 nm; on les utilise par exemple comme source de puissance optique continue ou dans les liaisons numériques.

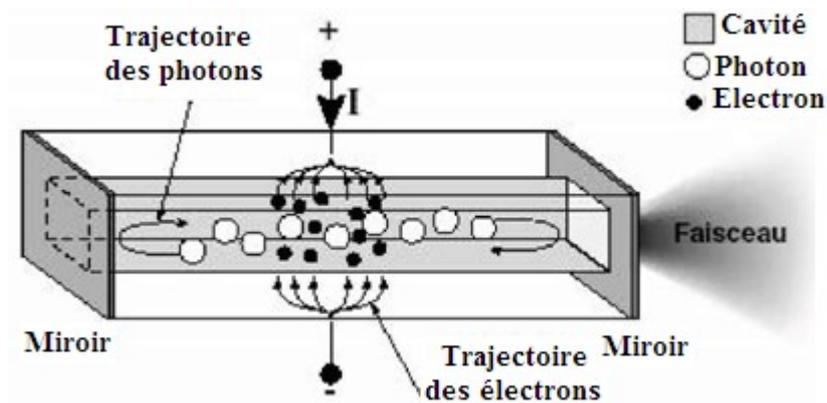


Figure I.11: Structure d'un laser classique Fabry-Pérot.

I.3.2.2 Lasers à réaction répartie (Distributed Feedback laser DFB)

Ont de très bonnes performances en bruit et sont largement utilisés pour les télécommunications ; ils sont monomodes et leur longueur d'onde atteint les 1550 nm.

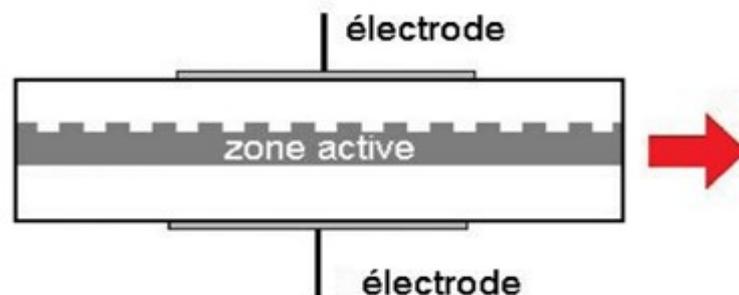


Figure I.12: structure d'un laser DFB.

I.3.2.3 Lasers à Réflecteur de Bragg distribué (Distributed Bragg Reflector laser DBR)

Contrairement aux lasers DFB (historiquement plus anciens), la contre-réaction ne se réalise pas à l'intérieur du milieu actif. En effet les extrémités d'un laser DBR se comportent comme des miroirs dont la réflectivité est maximale pour une longueur d'onde donnée. Ils restent plus difficiles à réaliser et présente un coût élevé.

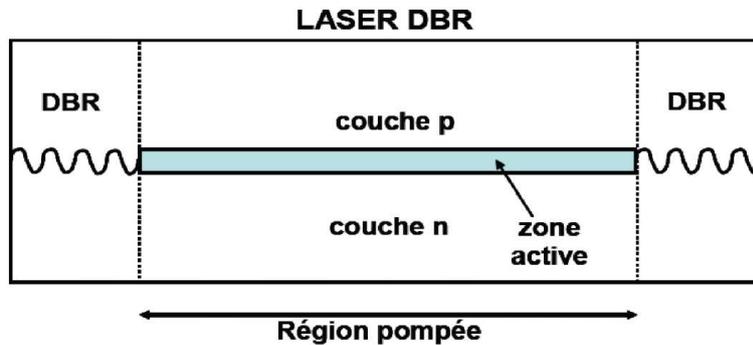


Figure I.12: Structure d'un laser DBR.

I.3.2.4 Lasers à cavité verticale émettant par la Surface

Leur longueur d'onde atteint pour l'instant les 1550 nm et leur intérêt principal est d'être plus adaptés à la fabrication en grand nombre. Cependant la technologie de fabrication des VCSELs (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) à 1550 nm n'est pas encore mature, et ils présentent encore quelques inconvénients : en comparaison aux DFBs leur puissance émise est plus faible et leurs propriétés spectrales et en bruit sont moins bonnes [2].

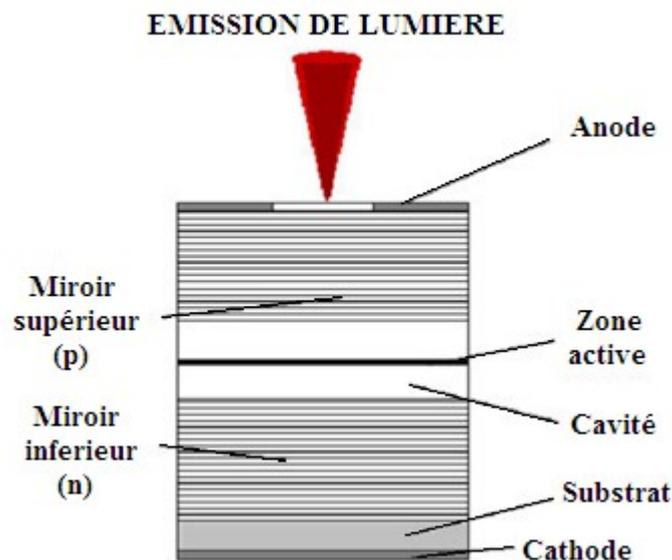


Figure I.13: Structure d'une diode laser à cavité verticale émettant par la surface (Typiquement VCSEL à 850 nm).

I.4 Module de réception

De même que pour les modules d'émission, de nombreux efforts ont été fournis pour rendre les modules de réception de plus en plus performants. Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Pour cela nous allons voir le photodétecteur comme module de réception.

I.4.1 Concepts de base

La transmission par fibre optique des données nécessite des conversions électrique - optique et optique - électrique du signal. L'interface de réception optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur qui, pour simplifier, se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité : il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10 Gbits/s ,40 Gbit/s voir même 80 Gbits/s. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit. Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles. Dans le paragraphe suivant, nous rappellerons le principe de la photodétection avant d'étudier plus précisément un exemple de photodétecteur : la photodiode PIN.

I.4.2 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 l'électron de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés. [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.

I.4.3 Photodiodes PIN

La principale qualité d'une photodiode PIN est que la composante d'entraînement du photocourant domine sur la composante diffusive simplement parce que la plupart de la puissance optique incidente est absorbée à l'intérieur de la zone intrinsèque (I). En effet, la zone I est placée entre la zone P et la zone N d'un semi-conducteur différent dont la bande interdite est choisie afin que les photons incidents soient absorbés seulement dans la zone I de la photodiode (figure I.14).

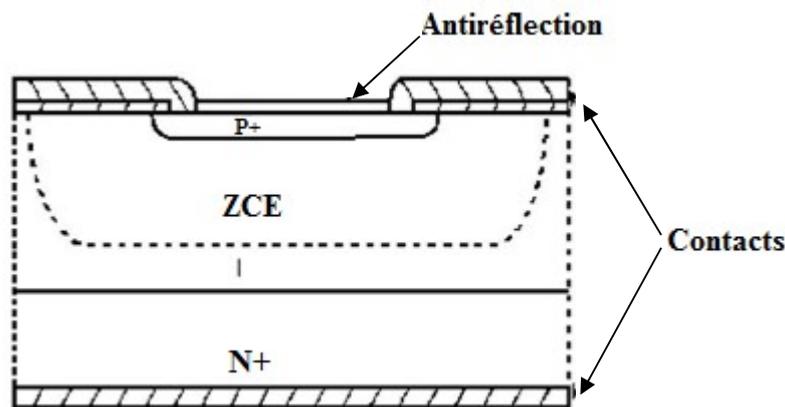


Figure I.14: Coupe transversale d'une photodiode PIN.

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

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

$$I_{ph} = S * P_{obs} + I_{obs} \quad I.4$$

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

$$S = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q}{hc} \lambda \quad \text{I.5}$$

I_{obs} est le courant d'obscurité 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... Dans la plupart des applications ce courant est négligeable ($I_{obs} < 10$ nA). En ce qui concerne le temps de réponse, les meilleurs photodétecteurs actuels sont utilisables jusqu'à plus de 100 GHz [2].

Pour les expérimentations, le choix d'une photodiode PIN s'imposait car le rapport signal à bruit est généralement meilleur qu'avec une photodiode à avalanche, pour peu que le niveau optique d'attaque soit assez fort.

I.5. Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (AFDE)

I.5.1 Définition

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 population. 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 30 mètres. Pour l'amplification autour de 1550 nm, fenêtre spectrale la plus utilisée car elle comporte de faible atténuation des fibres optiques en silice, les dopants sont des ions Erbium Er^{3+} . On parle alors d'amplificateur à fibre dopée à l'Erbium (AFDE ou EDFA, Erbium dope Fibre Amplifier en anglo-américain). 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées à l'AFDE. Et 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 en assurent aussi la stabilité en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval. Le signal de pompe peut être

couple dans la fibre en co-propagation (mêmes sens pour le signal et le signal de pompe) afin de réduire le facteur de bruit contre propagation (sens opposé 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 population et donc l'amplification du signal, un double pompage aux deux extrémités peut également être réalisé. La Figure I.15 représente la configuration d'un de ces amplificateurs à fibre dopée. [3]

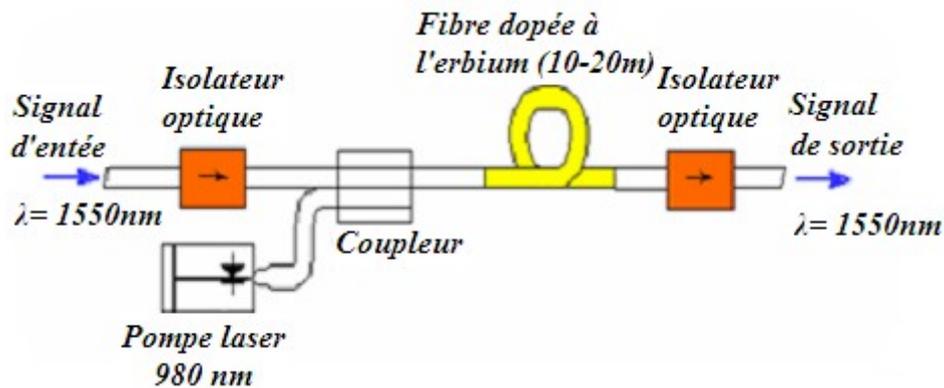


Figure I.15: Configuration d'un amplificateur optique a fibre dopée à l'erbium avec Pompage optique.

I.5.2. Principales caractéristiques de l'EDFA

I.5.2.1 Gain et puissance de saturation

Il est relativement aisé d'obtenir des gains optiques de l'ordre de 35 dB, pour une puissance de pompage optique de l'ordre de 15 dBm.

Cependant la puissance de saturation en sortie, c'est-à-dire à peu de chose près la puissance maximale disponible, est dans ce cas d'environ 11 à 13 dBm, ce qui est nettement insuffisant pour des amplificateurs en ligne capables de traiter une centaine de canaux simultanément. L'un des principaux efforts actuels concernant le développement de ces amplificateurs porte sur l'obtention de puissances voisines de 30 dBm, à l'aide de fibre à double cœur, un cœur monomode dopé entouré d'un cœur multimode non dopé beaucoup plus gros servant à confiner la puissance importante de pompage. [4]

La figure I.16 montre que la puissance de sortie P_s augmente proportionnellement à P_e pour les faibles puissances d'entrée ($P_e < -30 \text{ dBm}$) : c'est le régime « petit signal », dans lequel le gain est constant et égal à G_0 (voir figure b). On observe par contre un phénomène de saturation aux puissances plus importantes, qui se traduit par une diminution du gain en fonction de P_e .

Ce phénomène de saturation s'explique de la manière suivante : à partir d'une certaine puissance optique dans le milieu, la forte intensité de l'émission stimulée entraîne une réduction de l'inversion de population, ce qui réduit le gain optique G . On définit la puissance de saturation P_s^{sat} , comme étant la valeur de la puissance de sortie pour laquelle le gain G est égal $G_0/2$, ce qui représente une atténuation de 3 dB.

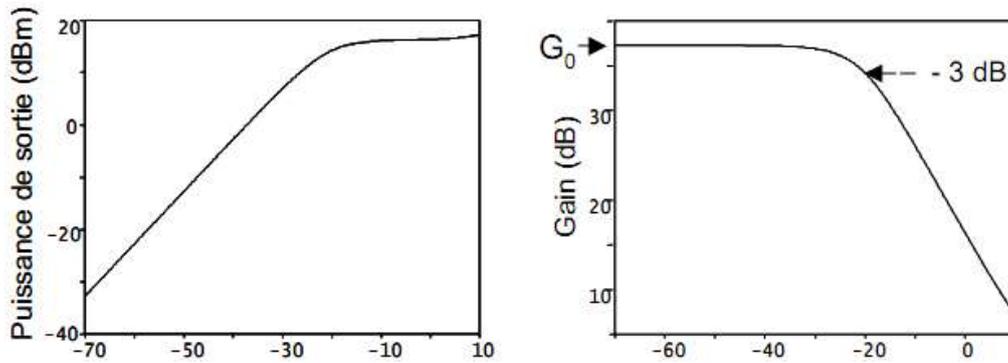


Figure I.16 : Saturation du gain ; a) Puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée ; b) Gain en fonction de la puissance d'entrée en dBm.

I.5.2.2 Facteur de bruit

Le bruit des amplificateurs optiques vient de l'émission spontanée amplifiée, accompagnant de manière inévitable l'émission stimulée. Si l'on utilise une définition du facteur de bruit très voisine de celle utilisée en électronique rapide, les valeurs typiques se situent autour de 1 à 3 dB. Il faut ajouter 3 dB une fois les signaux détectés, le mélange quadratique dû au processus de détection créant un bruit de battement que l'on ne retrouve pas en micro-ondes, l'énergie des photons "optiques" étant très supérieure à l'énergie thermique (kT). Ces facteurs de bruit peuvent paraître élevés, mais ils sont indépendants de la fréquence entre quelques MHz et une dizaine de THz. [4]

I.5.2.3 Rendement de l'amplificateur

On définit le rendement de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium comme le rapport entre le gain en décibel et la puissance de la pompe (en mW).

Le rendement considère comme un critère pour l'optimisation des fibres amplificatrices, aussi permis de comparer les paramètres optogéométriques (λ_c , dopage de centre du cœur), les constituants de la matrice (concentrations des dopants) et les longueurs d'onde de pompage. Il est maximale autour de la saturation de l'amplificateur par l'ESA.

Le rendement n'est pas un bon critère de choix de l'amplificateur, il permet de comparer l'effet des différentes longueurs d'onde de pompage comme démontre la figure (II.17)

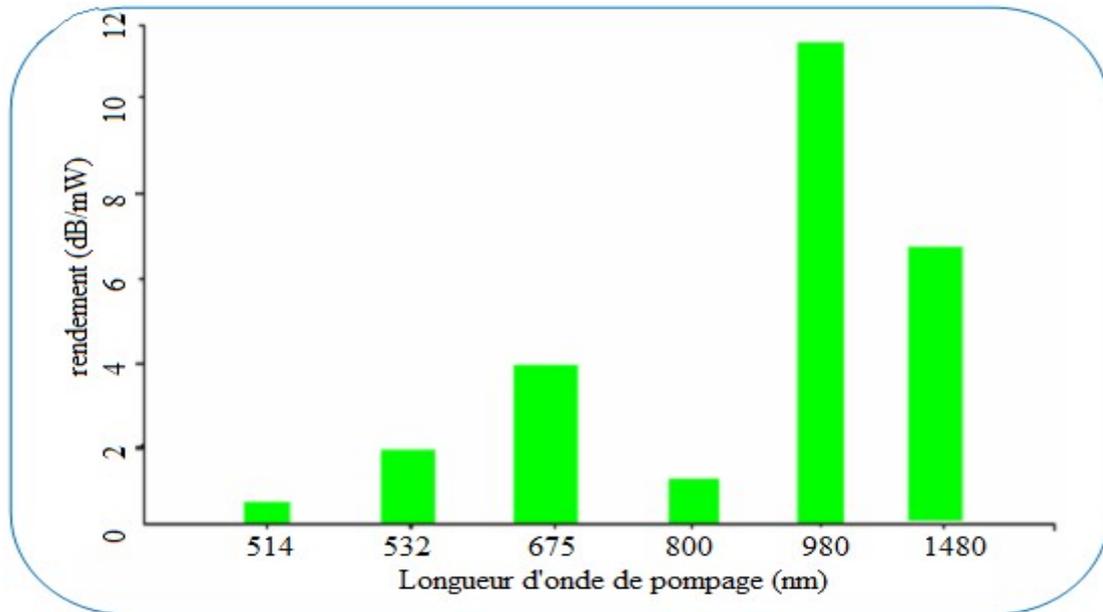


Figure (II.17) Rendements maximaux de pompage des amplificateurs pour différentes longueurs de pompage. [5]

I.5.3. Avantages et inconvénients

I.5.3.1 Avantages

- Excellent couplage : le milieu amplificateur est une fibre monomode à gain important.
- Pas de distorsion à haut débit (grande bande passante).
- Peu sensible à la température.
- Amplification simultanée des signaux multiplexée en longueur d'onde sur 30nm.

I.5.3.2 Inconvénients

- Nécessité d'un laser de pompage.
- Difficulté d'intégration.

I.6 Multiplexeur/Démultiplexeur Optique

I.6.1 Introduction

Le multiplexeur en longueur d'onde est défini comme étant un dispositif de dérivation avec deux accès d'entrée ou plus et un accès de sortie, où la lumière à chaque accès d'entrée est restreinte à une gamme de longueurs d'onde présélectionnée et la sortie est une combinaison de la lumière provenant des accès d'entrée.

Par contre, le démultiplexeur en longueur d'onde est un dispositif qui effectue l'opération inverse.

I.6.2 Principe

Disposant des sources $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ émettant à des longueurs d'ondes différentes, on a la possibilité de les coupler à une même fibre optique. A l'autre extrémité de la fibre, les signaux $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ seront séparés spatialement vers des détecteurs différents. Le composant d'entrée devra introduire dans la fibre avec le minimum de pertes possible, les signaux issus de sources différentes: c'est le multiplexeur. Le composant effectuant l'opération inverse est le démultiplexeur. [6]

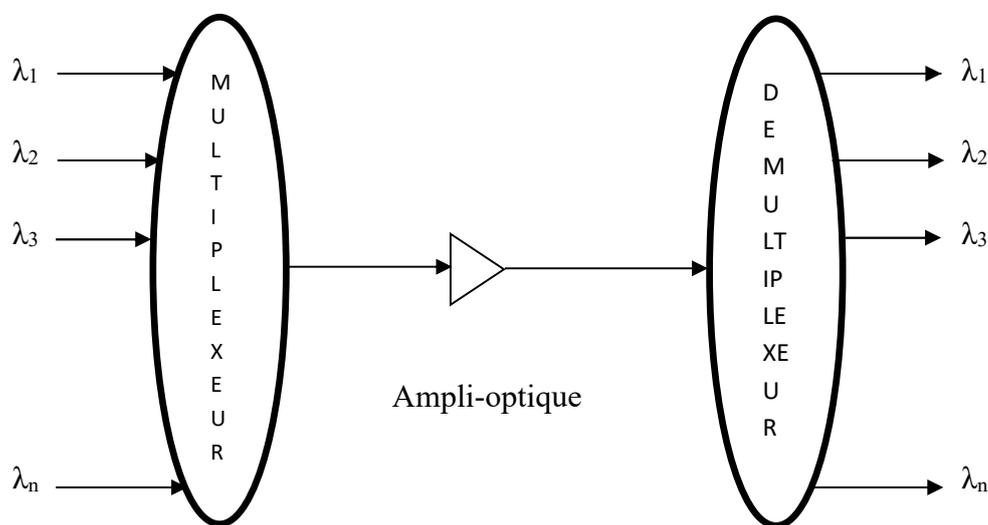


Figure I.18: Multiplexeur/Démultiplexeur.

Ce modèle, disponible dans COMSIS, permet de simuler un multiplexeur à base de réseaux de Bragg ne tenant pas compte de la polarisation.

I.7 Filtrage

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

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

On utilise donc le "filtre pratique de Nyquist" (Figure I.19) dont la largeur de bande de bruit, dans les conditions habituelles, vaut approximativement $\Delta F = 0,8 \times F_r$.

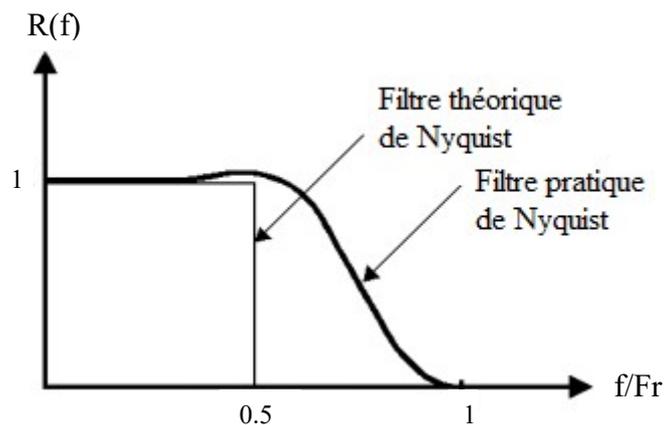


Figure I.19 : Réponses fréquentielles du filtre théorique et du filtre pratique de Nyquist.

I.8 Amplificateur électrique

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

Le modèle d'amplificateur électrique, disponible dans COMSIS, est un opérateur de gain, nommé GAIN (Figure I.20). Ce modèle permet de multiplier le signal d'entrée par une constante.

GAIN

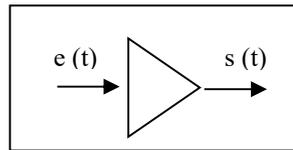


Figure I.20 : Modèle de simulation de l'amplificateur électrique.

$$s(t) = G \cdot e(t)$$

$$G_{dB} = 20 \cdot \text{Log}(G)$$

I.8

Il est important de noter que le modèle ne prend pas en compte les contributions au bruit de l'amplificateur. Ainsi, le signal de sortie est de qualité identique au signal entrant. La valeur du gain est un paramètre formel.

I.9 Conclusion

Une description détaillée de tous les composants présents dans notre 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 étudiée. Une fois le choix des composants fait, nous avons détaillé le fonctionnement de chacun d'eux.

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 l'atténuation) et des solutions sont proposées pour les corriger (par exemple l'amplificateur EDFA).

Le principe de la photodétection a également été rappelé, avec une description de photodétecteur. La photodiode PIN associée à un préamplificateur a été choisie pour la conception de la liaison de notre projet. Les techniques de remise en forme du signal ont été abordées.

II.1 introduction

Les télécommunications optiques ont acquis une importance considérable dans les réseaux de communication longues distances. L'un des principaux critères de cette réussite tient à la grande bande passante de la fibre, mais surtout dans les très faibles pertes qu'elle présente. L'autre avantage de l'utilisation d'une porteuse optique est la localisation du signal à l'intérieur de la fibre. Ceci fait de la fibre un élément indispensable des réseaux métropolitains, transnationaux et intercontinentaux.

Comme la fréquence optique est très grande, la porteuse optique peut supporter un grand nombre de sous porteuses sans que cela touche les performances des systèmes s'il y a un petit décalage dans la fréquence optique. Compte tenu de la bande passante très grande de la porteuse optique, cette porteuse peut contenir simultanément de multiples canaux de données, de télévision ou de téléphonie, etc. Ceci peut être obtenu par multiplexage temporel et fréquentiel. Un premier multiplexage consiste à utiliser un multiplexage temporel (Time Division Multiplexing ou TDM). Un autre multiplexage est celui de la fréquence qui consiste à transmettre plusieurs sous porteuses optiques espacées entre elles de plusieurs GHz. Il s'agit des techniques WDM (Wavelength Division Multiplexing) et DWDM (Dense WDM). Chacune des sous-porteuses peut être modulée par des signaux ou des débits différents. L'ensemble de ces deux multiplexages permet à une onde optique de transmettre des débits très élevés, par exemple 5 Tbit/s.

Historiquement, les technologies de télécommunications optiques visent donc en premier lieu à transmettre des données et de l'information avec des débits très élevés.

Un autre domaine d'utilisation des communications optiques a débuté en 1960, il s'agit du domaine de la photonique microonde. Dans ce domaine, la fibre profite en complément de ses caractéristiques précédentes d'une grande immunité face aux interférences

électromagnétiques, et d'un faible poids. C'est pour cela que la transmission dans une fibre optique ou dans un guide d'onde diélectrique devient très utilisée dans les domaines civils et militaires. Le seul obstacle reste le coût de l'installation et des composants, qui limite ces applications aux lieux nécessitant de hauts débits. Néanmoins un grand effort est fait pour intégrer les fonctions sur des substrats faibles coûts, dont le Silicium.

Dans les technologies photoniques-microondes, les débits ou les largeurs de bande sont transmis sur des porteuses radios modulant elle-même le signal optique. Dans ces applications, les fréquences de porteuses vont de quelques dizaines de kHz (radio) à quelques centaines de THz (optique). Le rapport entre la fréquence de la porteuse et la bande passante du signal varie en fonction du type de modulation. Il peut varier de quelques milliers (modulation optique en amplitude) à quelques dizaines (Modulation MQAM ou OFDM).

Dans ce chapitre on va se baser sur l'étude des différents types de multiplexage temporel et fréquentiel, les différents types du bruit de la liaison et les critères de qualité qui permet d'évaluer le signal.

II.2 Les techniques de multiplexage

II.2.1 Multiplexage TDM

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing) ou MRT (Multiplexage à répartition dans le temps) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant et à tour de rôle pour chaque utilisateur (figure II.1).

L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminée (Figure II.2). Un intervalle de temps fixe (IT) est successivement assigné à une source.

Le multiplexage TDM permet alors de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé (par exemple, conception d'un débit 40 Gbits/s, à partir de 4 séquences à 10 Gbits/s).

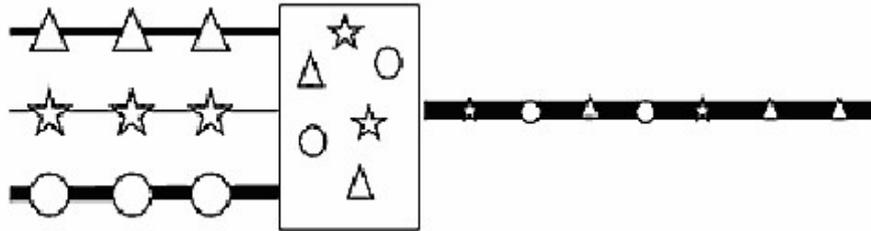


Figure II.1: Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps.

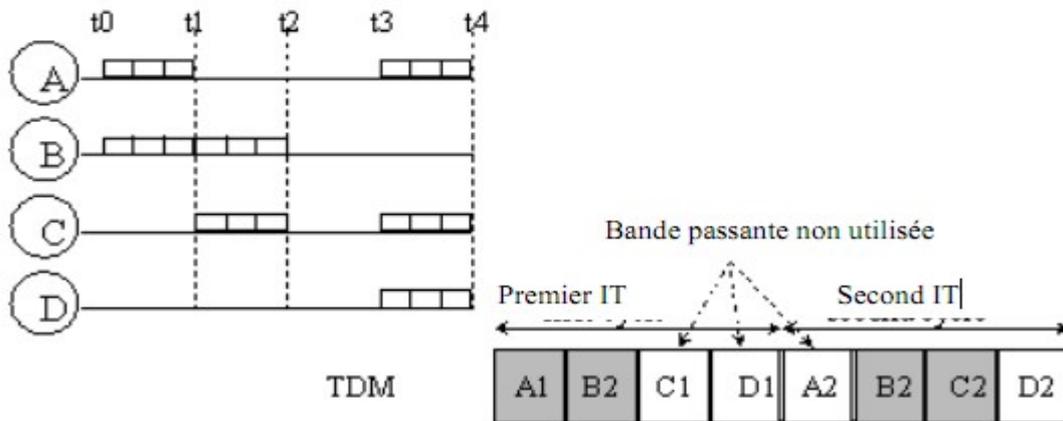


Figure II.2 : Représentation d'un multiplex TDM (4 voies vers 1) en fonction des données initiales.

II.2.2 Multiplexage temporel optique (OTDM: Optical Time Division Multiplexing)

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

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

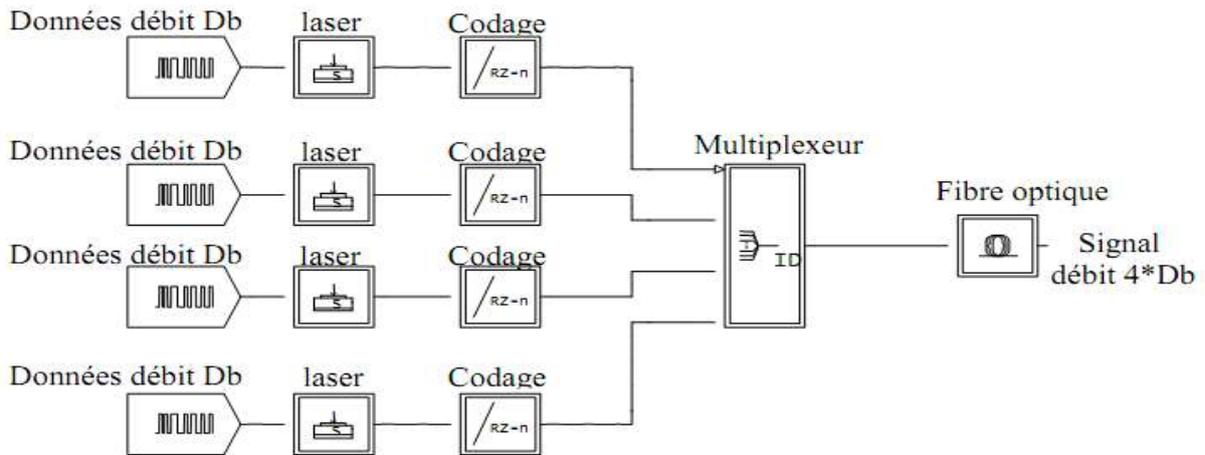


Figure II.2 : Schéma du multiplexage OTDM.

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

II.2.3 Multiplexage temporelle électronique (ETDM: Electronic Time Division Multiplexing)

Dans le cas de l'ETDM, le codage RZ et "l'assemblage" des données se font électriquement.

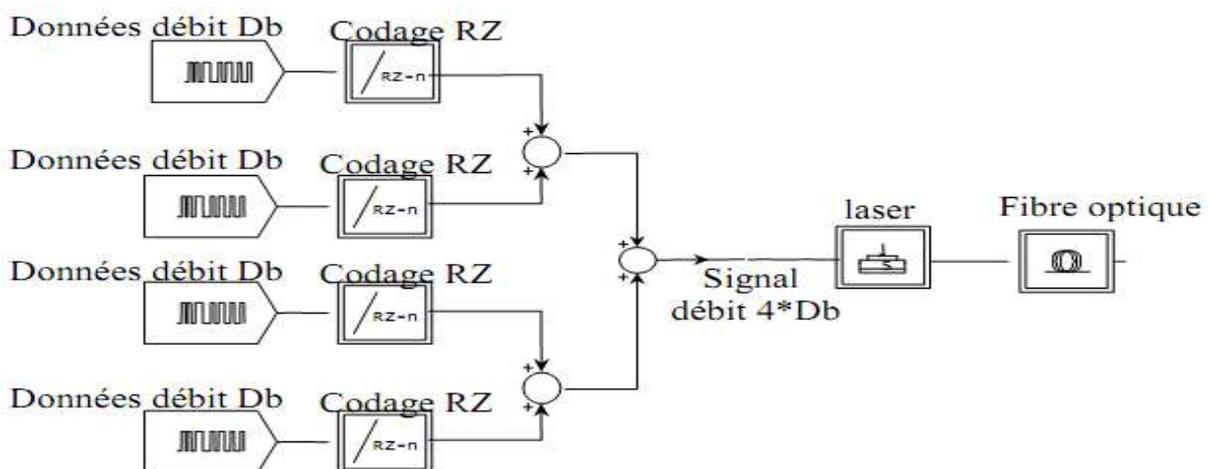


Figure II.3 : Schéma du multiplexage ETDM.

Le haut débit obtenu est ensuite utilisé pour la modulation du courant de polarisation d'une diode laser et il n'y a qu'un seul signal lumineux émis. Cette étape est schématisée sur la

figure suivante par la présence de trois circuits électroniques et d'un multiplexeur électronique (circuit rapide). [1]

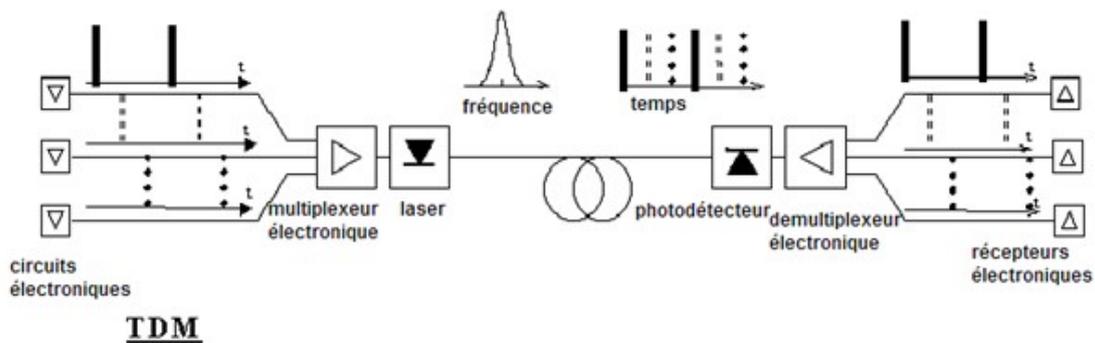


Figure II.4: Schéma de principe du multiplexage ETDM dans les communications par fibre optique.

II.2.4 Multiplexage fréquentiel (FDM, Frequency Division Multiplex)

C'est une ancienne hiérarchie de la téléphonie analogique, la transmission ne s'effectue pas en Bande de base mais avec différentes translations de fréquence sur un même support Physique, chaque canal étant associé à une bande de fréquence et une porteuse (10 000 Voies entre 4 et 60 Mhz). Mais elle est défavorable en numérique.

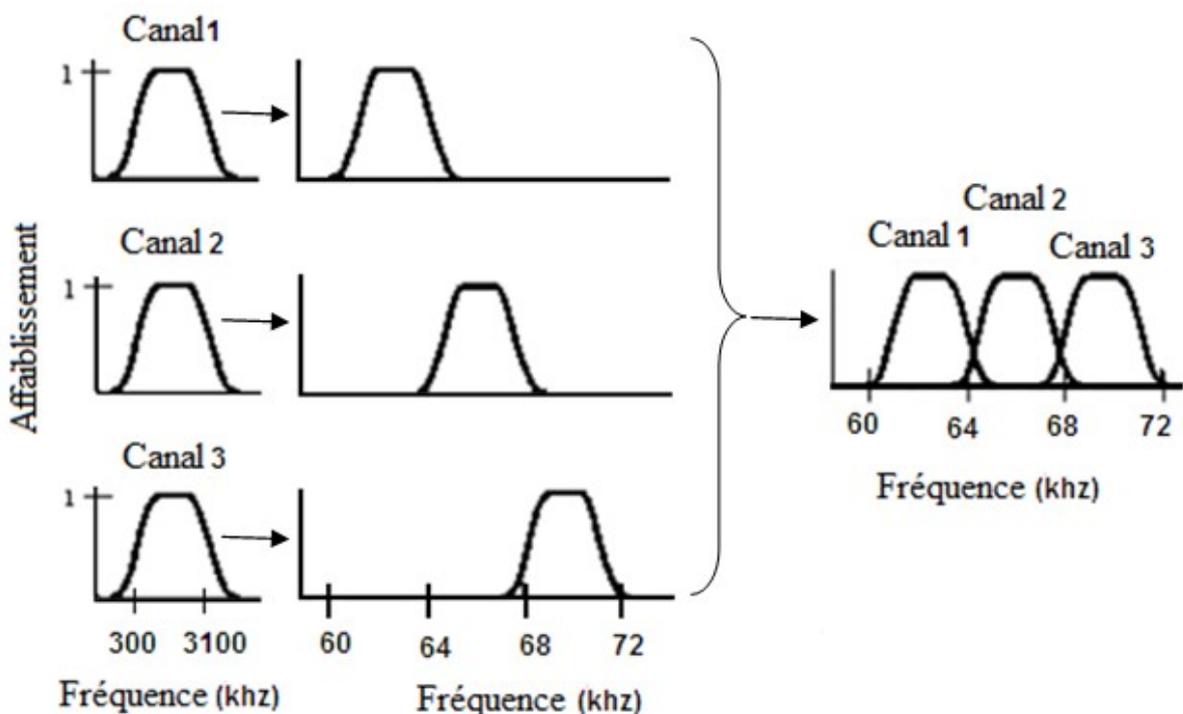


Figure II.5 : Multiplexage fréquentiel.

II.2.5 Multiplexage en longueur d'onde : (WDM : Wavelength Division Multiplexing)

II.2.5.1 Principe

La technologie WDM est née de l'idée d'injecter simultanément dans la même fibre optique plusieurs trains de signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais chacun à une longueur d'onde distincte.

A l'émission, on multiplexe N canaux au débit nominal D , à la réception, on démultiplexe le signal global $N \times D$ en N canaux : la fibre transporte un multiple de N canaux ce qui est par conséquent équivalent en terme de capacité à N fibres transportant chacune un canal.

Avant l'avènement du multiplexage en longueur d'onde, la seule manière d'accroître la capacité d'une liaison optique était de rajouter des lignes de transmission et l'empilement des répéteurs-régénérateurs.

De ce fait, en technologie WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux. Ce fut le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission longue portée (typiquement entre 150 et 600 km).

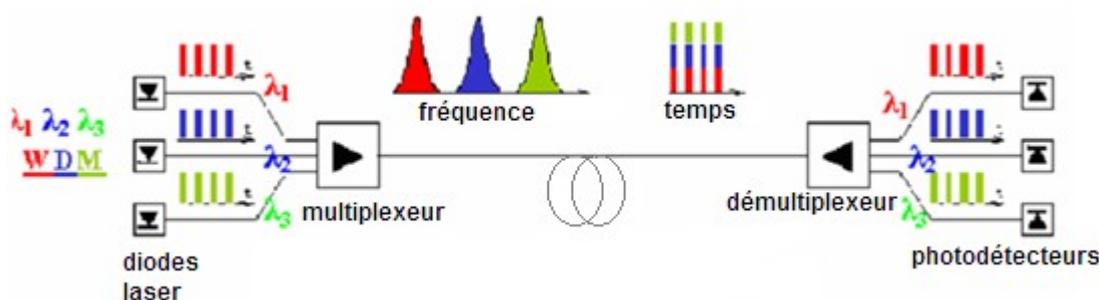


Figure II.6 : Schéma de principe du multiplexage WDM.

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes lasers émettant à des longueurs d'onde différentes mais assez proches (dans le voisinage des 1550 nm), et de multiplexeurs/démultiplexeurs optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans/de la fibre.

II.2.5.2 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

La technologie WDM est dite dense lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'onde est égal ou inférieur à 100 GHz. On l'emploie désormais pour les transmissions longue distance. Dans la pratique, cela signifie que l'on fait passer dans une même fibre beaucoup de signaux portés par des fréquences très rapprochées les unes des autres.

II.2.5.3 U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing)

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

II.2.5.4 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

La technologie CWDM présente des coûts assez élevés:

f - fibre haute performance.

f -lasers refroidis.

f -contrôle fin des longueurs d'onde qui sont très proches les unes des autres.

La technologie CWDM est une solution WDM économique. Les canaux sont plus écartés. De fait, selon sa qualité, on ne dispose que de 8 ou 16 canaux par fibre.

Le matériel utilisé, d'un coût modéré et d'une utilisation sans contraintes importantes, permet une installation dans les équipements locaux (boucles locales, entreprises).

Le CWDM est une alternative beaucoup moins onéreuse, mais également moins performante. C'est pourquoi il est destiné à être utilisé sur des réseaux locaux ou métropolitains.

II.3 Le bruit de la liaison

On peut distinguer deux types de perturbations : les perturbations externes à la liaison et le bruit propre des éléments de la chaîne optique.

II.3 .1 Perturbations externes

Il existe plusieurs causes de perturbations d'une transmission optique :

- bruit du canal de transmission (fluctuations de température de la fibre...);
- couplage de signaux parasites au niveau du récepteur (blindage...);
- bruit lié aux alimentations (secteur mal filtré...);
- vibrations mécaniques (vibrations des connecteurs optiques de la fibre...)

Aux basses fréquences, on retrouve en particulier les perturbations dues aux alimentations, aux vibrations ou aux variations de température.

Mais d'autre part il y a plusieurs techniques qui permettent de protéger les liaisons optiques :

- contre les vibrations : mises en boîtier des composants, collages, protections contre les poussières, nettoyage préalable des fibres ;
- contre les fluctuations thermiques : isolation, modules Peltier sur le laser ;
- contre les signaux parasites : blindage type cage de Faraday, filtrage des alimentations par capacités de découplage.

Ces perturbations sont surtout nuisibles aux basses fréquences et donc près de la porteuse.

Avec une bonne mise en boîtier des composants et des alimentations sur batteries, on évite déjà une part importante des perturbations de l'environnement.

II.3 .2 Bruit propre des éléments de la chaîne optique

II.3 .2.1 Bruit du laser

Le signal optique délivré par une diode laser présente des fluctuations en amplitude et en fréquence, même si le laser est polarisé avec un courant constant. Les deux mécanismes fondamentaux qui concourent à la génération du bruit sont l'émission spontanée et la recombinaison électron-trou.

On définit le bruit relatif d'intensité RIN (de l'anglais, « Relative Intensity Noise ») comme le rapport entre la densité spectrale des fluctuations du nombre de photons et le nombre de photons au carré, ou entre la densité spectrale de fluctuations de puissance optique et le carré de la puissance optique moyenne :

$$\text{RIN}(f) = \frac{\Delta P_{\text{opto}}^2}{P_{\text{opto}}^2} \quad \text{II.1}$$

Le RIN s'exprime en Hz^{-1} mais il est généralement présenté en décibel et donc s'exprime alors en dB/Hz , puisque le bruit est intégré dans 1 Hz de bande.

Un exemple de résultats de mesure du RIN haute fréquence est représenté en figure II.7. Ces courbes montrent clairement la diminution du RIN quand le courant de polarisation augmente. On observe aussi la fréquence de résonance du laser et le pic de RIN correspondant.

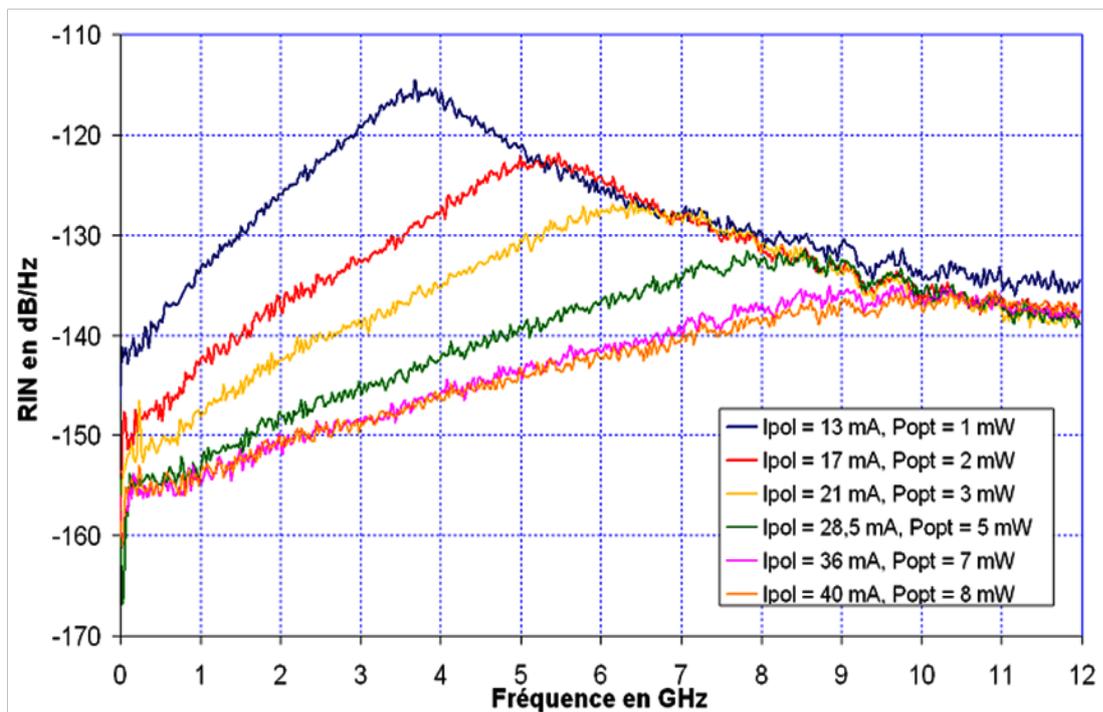


Figure II.7 RIN aux hautes fréquences du laser en fonction de son courant de polarisation et de la puissance optique émise.

Comme tout composant électronique, le laser possède aussi à des fréquences inférieures à quelques MHz une distribution spectrale du bruit qui est caractérisée par une remontée rapide du bruit suivant une pente en $1/f$, à laquelle se superposent parfois des composantes spectrales différentes (par exemple du bruit de génération recombinaison).

L'origine du bruit en $1/f$, en particulier dans les lasers, est malheureusement peu détaillée [9]

Dans une diode laser, les fluctuations optiques basse fréquence sont attribuées à des fluctuations électriques basse fréquence. C'est pour cette raison qu'il a été nécessaire, afin de modéliser correctement le bruit basse fréquence, d'introduire une source de bruit de Langevin.

II.3 .2.2 Bruit du photodétecteur

Les principales composantes de bruit liées aux récepteurs optiques sont le bruit de grenaille (de l'anglais, « shot noise »), le bruit thermique, le bruit en $1/f$ et le bruit de courant d'obscurité.

Nous allons maintenant définir les caractéristiques de chacune de ces composantes de bruit.

a. Le bruit de grenaille ou « shot noise »

Le bruit associé au passage de porteurs à travers une barrière de potentiel est normalement connu comme bruit de grenaille.

Dans le cas d'un photodétecteur, il est impossible d'effectuer une distinction entre le bruit de grenaille quantique qui dérive des photons détectés par la photodiode et le bruit de grenaille électronique qui dérive du flux de photocourant dans la jonction p-n à l'intérieur de la photodiode.

La densité spectrale normalisée du bruit de grenaille en courant s'écrit de la façon suivante :

$$i_n^2(f) = 2q I_{ph} \quad \text{II.2}$$

Où :

- I_{ph} est le photocourant .
- $q = 1,6 \times 10^{-19}$ c'est la charge d'un électron.

b. Le bruit thermique

Le bruit thermique, ou bruit Johnson, est le résultat des fluctuations aléatoires des porteurs à l'intérieur d'une résistance par cause de l'agitation thermique et il est tout à fait comparable au mouvement brownien des particules.

La densité spectrale de courant de bruit thermique liée à la résistance de charge de la photodiode est donnée par la relation suivante :

$$i_{\text{th}}^2(f) = \frac{4 k T}{R} \quad (\text{A}^2/\text{Hz}) \quad \text{II.3}$$

Où :

- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann.
- T est la température en Kelvin.
- R est la résistance de charge de la photodiode.

c. Le bruit en 1/f

Les deux types de bruit précédents étaient des bruits blancs. Mais il existe d'autres types de bruits fondamentaux dont la densité spectrale n'est pas constante en fréquence. Il s'agit principalement de bruits à basse fréquence. Le plus connu est le bruit « en 1/f », connu aussi par bruit de scintillation (ou flicker noise) [17]. Ce dernier est présent dans tout composant parcouru par un courant et il est proportionnel à ce courant à la puissance β .

$$i_{1/f}^2(f) = K \frac{I_0^\beta}{f^\gamma} \quad (\text{A}^2/\text{Hz}) \quad \text{II.4}$$

Avec $\gamma \approx 1$ et $\beta \approx 2$ suivant les composants et les matériaux.

d. Le bruit de courant d'obscurité

Comme il a été expliqué antérieurement, avec ou sans illumination, le photodétecteur présente un courant de pertes qui dérive dans le cas d'une photodiode de la présence de recombinaison en surfaces et de parcours de fuite dans le matériau massif. Ce type de courant non souhaité et qui doit être de très faible valeur est appelé courant d'obscurité. La densité spectrale normalisée du bruit de courant d'obscurité s'écrit de la façon suivante :

$$i_{\text{obs}}^2(f) = 2q I_{\text{obs}} \quad \text{II.5}$$

Où I_{obs} est la valeur moyenne du courant d'obscurité. [2]

II.4 Critères de qualité

La transmission réelle d'un message diffère de la transmission idéale, du fait des défauts des extrémités (émetteur et récepteur) et des perturbations introduites par le canal de propagation. Généralement, le signal est déformé et du bruit s'est progressivement superposé au message. Si l'information envoyée est analogique, la qualité est appréciée par le destinataire et se mesure sur des critères difficilement quantifiables mais essentiels. C'est la qualité du message reçu qui constitue le critère pertinent.

Dans le cas d'une information numérique (cas de cette étude), le bloc de réception prend des décisions, à partir du signal reçu, pour reconstituer une suite de données qui soit aussi similaire que possible à celle émise. Pour cela, l'organe de décision, composé entre autres d'un comparateur à seuil, assigne à chaque pulse un bit 0 si le niveau du pulse est en dessous du seuil ou un bit 1 si ce niveau est au-dessus du seuil. Cependant, l'atténuation, la dispersion et les différents bruits que subit le signal entraînent des erreurs. L'important n'est plus vraiment la qualité du signal reçu mais le nombre d'erreurs existant dans le signal régénéré. Le critère de qualité le plus communément utilisé est le taux d'erreur binaire.

Cependant, il est possible aussi de mesurer les performances des transmissions avec le facteur Q. Une autre approche, plus qualitative, consiste à tracer le diagramme de l'œil du signal.

Dans ce paragraphe, nous décrirons ces trois critères de qualité, et nous aborderons le rapport signal à bruit en considérant une transmission de signaux numériques.

II.4.1 Probabilité d'erreur et le taux d'erreur binaire

On peut mesurer la qualité de la réception par l'évaluation de la probabilité d'erreur, qui correspond à la probabilité que la décision prise par le détecteur soit erronée. Il convient de bien faire la distinction entre deux grandeurs qui sont souvent, à tort, confondues, la probabilité d'erreur qui vient d'être définie et le taux d'erreur binaire (TEB, ou BER, Bit Error Rate en anglo-américain).

Ce dernier est défini comme le rapport du nombre d'erreurs au nombre total N d'éléments binaires transmis. C'est une grandeur aléatoire qui constitue une estimation de la probabilité d'erreur.

Lorsque N est suffisamment grand, on peut considérer, d'après le théorème de la limite centrale, que le TEB est une variable aléatoire gaussienne. Pour obtenir une estimation de la probabilité d'erreur avec un intervalle de confiance donné, il suffit de calculer le nombre N nécessaire de bits à envoyer ou à simuler. Plus la probabilité d'erreur est faible, plus le nombre N doit être grand. La mesure devient donc impossible pour des probabilités d'erreur trop faibles et la limite est d'autant plus grande que le débit est faible. Les mêmes limites sont imposées aux méthodes de simulation. Il existe, néanmoins, pour la simulation comme pour la mesure, des techniques d'approximation qui permettent de réduire le nombre N , mais il existe toujours une limite.

Si les symboles sont émis avec la même probabilité, le taux d'erreur peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$TEB = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q_0}{\sqrt{2}} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q_1}{\sqrt{2}} \right] \quad \text{II.6}$$

Où erfc est la fonction d'erreur corrigée :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt \quad \text{II.7}$$

Paradoxalement, les excellentes performances des systèmes optiques (taux d'erreur inférieurs à 10^{-9} , voire même 10^{-12}), sont un problème ! En effet, devant des taux d'erreur aussi faibles, il n'est plus envisageable d'utiliser des méthodes de comptages d'erreurs pour évaluer les performances des systèmes. Alors, on peut estimer le TEB par l'intermédiaire du facteur de qualité (Facteur Q).

II.4.2 Facteur Q

Considérons que le bruit apporté par la transmission des données binaires est gaussien. On définit alors un facteur Q pour les niveaux hauts et un pour les niveaux bas :

$$Q_i = \left| \frac{D - \mu_i}{\sigma_i} \right| ; i = 0,1 \quad \text{II.8}$$

μ_i est la moyenne sur les niveaux i et σ_i est l'écart-type ;

D est le seuil de décision du récepteur, c'est-à-dire le niveau en dessous duquel on considérera qu'il s'agit d'un 0 et au-dessus d'un 1. D est compris entre μ_1 et μ_0 .

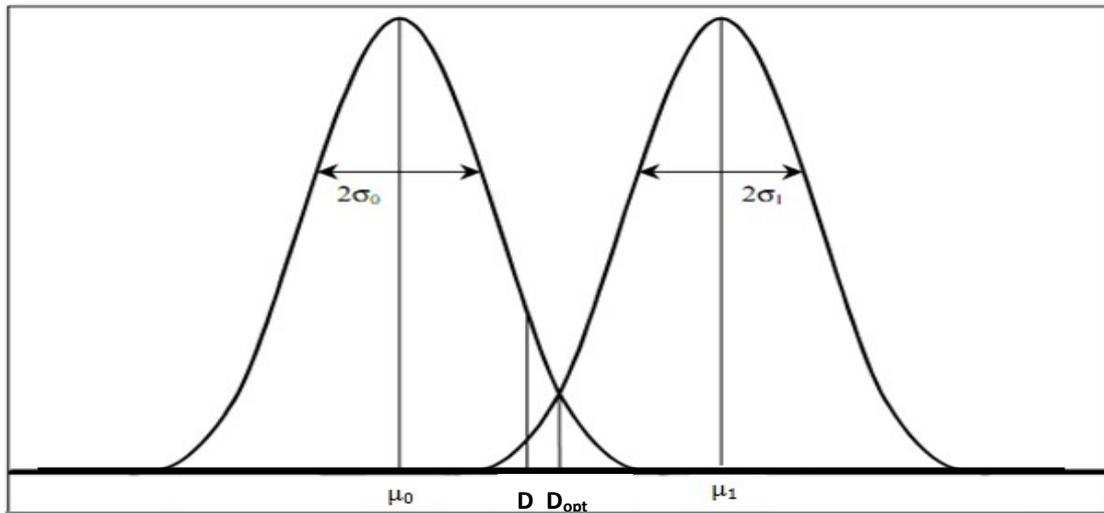


Figure II.8 : Représentation schématique des densités de probabilités et du seuil de décision.

Lorsque les niveaux hauts et bas sont équiprobables, le TEB est défini en fonction du facteur de qualité par la relation II.6

On peut optimiser le TEB en optimisant la position du seuil de décision. Cette position est approximativement donnée par la formule suivante :

$$D_{\text{opt}} = \frac{\sigma_1 \mu_0 + \sigma_0 \mu_1}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad \text{II.9}$$

Le facteur Q et le taux d'erreur deviennent alors :

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad \text{II.10}$$

$$TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \quad \text{II.11}$$

Le TEB varie très vite en fonction de Q. La Figure II.9 représente bien cette forte évolution du TEB en fonction du facteur de qualité.

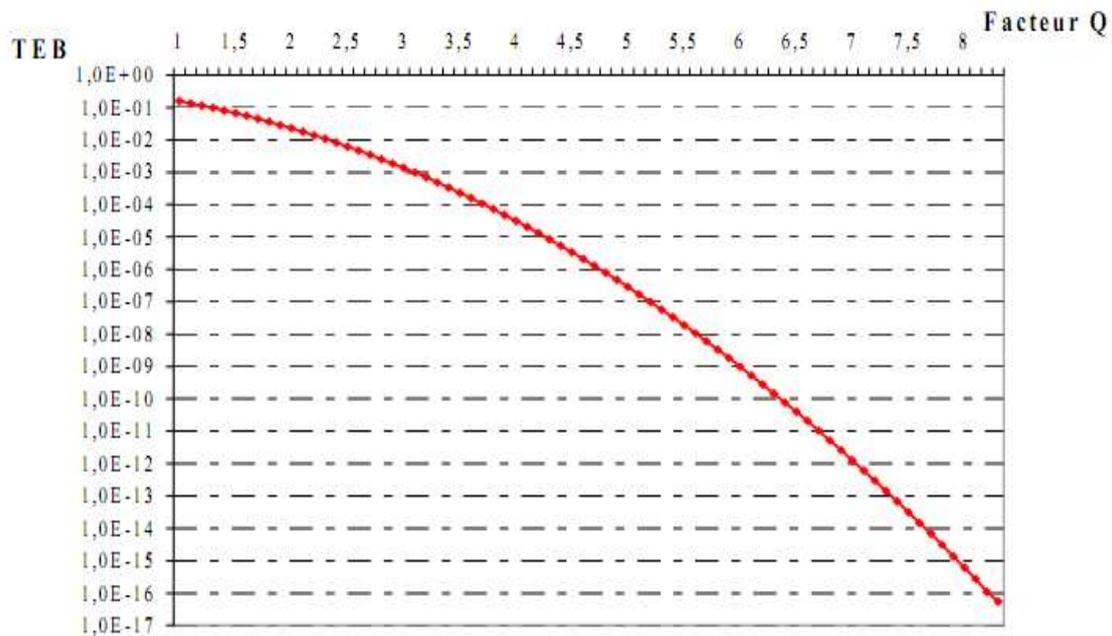


Figure II.9: Courbe représentant la relation entre le taux d'erreur binaire et le facteur Q.

En complément de ces estimations quantitatives, des méthodes qualitatives peuvent être utilisées, comme par exemple l'étude du diagramme de l'œil.

II.4.3 Diagramme de l'œil

L'évaluation des performances d'une liaison optique peut également se faire au travers de l'observation du diagramme de l'œil. Cette manière assez simple d'apprécier la qualité des signaux numériques reçus avant qu'ils atteignent le dispositif de démodulation est considérée comme une des mesures de base en transmission numérique.

L'émission d'une suite aléatoire d'éléments binaires, dont les bits ont une durée T_b , conduit à la réception à un signal $x(t)$ qui est la somme des réponses du système à chacun de ces symboles. Or, par suite du caractère passe-bas des canaux usuels, ces différentes réponses se perturbent mutuellement. La superposition graphique de tous les intervalles T_b associés au signal $x(t)$ permet d'apprécier ces perturbations. Elle fait apparaître des ouvertures en forme de losanges arrondis qui lui ont valu son nom de diagramme de l'œil.

La Figure II.10 représente un exemple de diagramme de l'œil regroupant sur une durée de 2 bits les changements d'amplitudes des "1 vers 0" (+A vers -A) et des "0 vers 1" (-A vers +A) pour une très longue suite (aléatoire) de symboles "1" et "0".

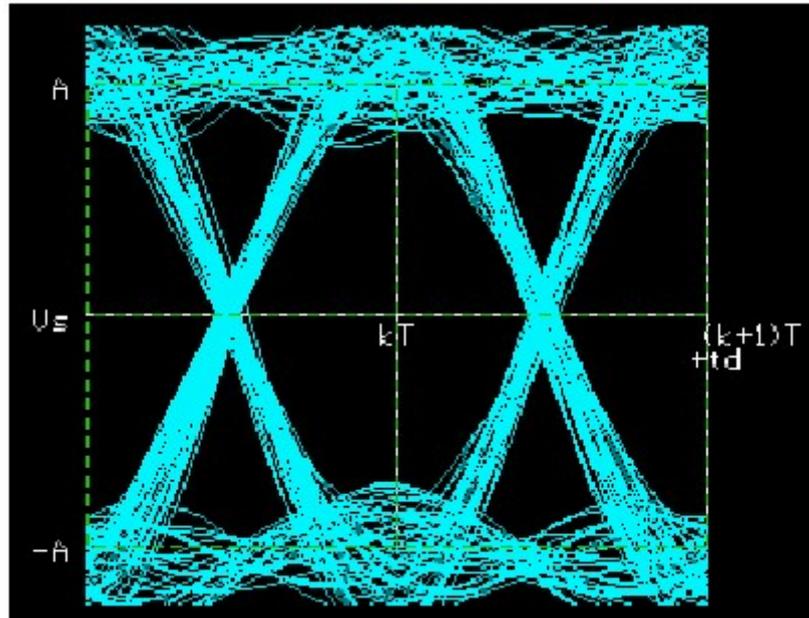


Figure II.10 : Exemple de diagramme de l'œil.

Un tel diagramme représente le degré de discrimination des différents niveaux du signal $x(t)$ et fournit, par conséquent, de bons renseignements sur l'immunité aux erreurs de la liaison. Ces rebondissements d'amplitudes sont la conséquence de la réponse impulsionnelle du canal de transmission (les spécialistes parlent "d'interférences inter-symboles"). Il permet, d'une part, d'apprécier l'interférence entre symboles (IES) et, d'autre part, d'ajuster l'instant d'échantillonnage dans le régénérateur au moment précis d'interférence minimale (Figure II.11).

A l'instant $t_0 + nT$, la valeur maximale du signal lorsque le symbole est égal à 0 est obtenue lorsque tous les symboles encadrant sont égaux à 1. La valeur minimale lorsque le symbole est égal à 1 est obtenue lorsque tous les symboles encadrant sont nuls. La différence entre ces deux niveaux extrêmes est appelée ouverture verticale ou hauteur de l'œil, à l'instant d'échantillonnage. En l'absence de bruit, l'œil est ouvert, si bien qu'il serait possible de détecter les données sans erreur en plaçant un seuil de décision entre les deux valeurs extrêmes. En présence de bruit, on observe des traces brouillées et élargies et la dégradation de la probabilité d'erreur due à l'IES est d'autant plus grande que l'œil est fermé.

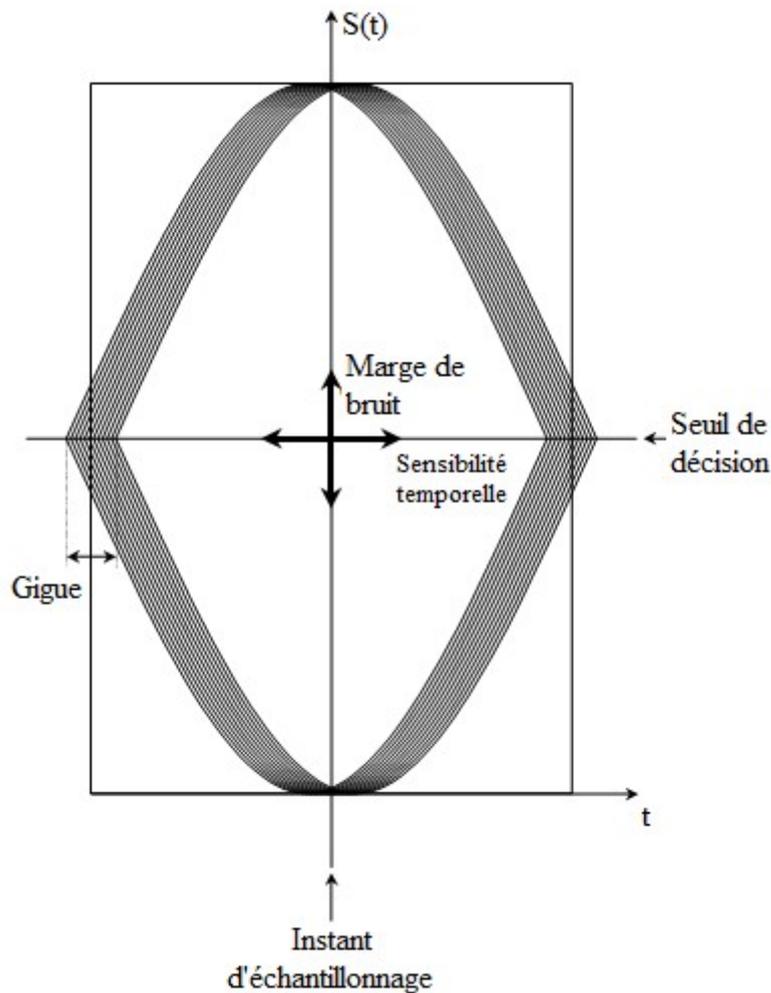


Figure II.11 : Représentation graphique de quelques interprétations d'un diagramme de l'œil.

L'ouverture verticale de l'œil dépend de l'instant d'échantillonnage : quand on décale ce dernier par rapport à sa valeur optimale, correspondant au minimum de la probabilité d'erreur, la dégradation de celle-ci est d'autant plus rapide que l'ouverture décroît rapidement.

Autrement dit, la largeur de l'œil détermine la sensibilité à un décalage de l'instant d'échantillonnage. Or, dans tout système de transmission numérique, l'horloge est toujours affectée de fluctuations aléatoires : c'est ce qui s'appelle la gigue (jitter).

A l'aide de la représentation du type "diagramme de l'œil" (Figure II.11), nous pouvons donc observer :

- Une marge de bruit sur les seuils de détection des "1" et des "0".

– Une gigue de phase (jitter) au niveau des passages par la valeur zéro de l'amplitude ce qui aura comme conséquence des imprécisions dans la récupération du signal "horloge bit".

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

Une approche du facteur de qualité peut facilement être obtenue à partir d'un diagramme de l'œil. Pour cela, il suffit de calculer, dans un intervalle encadrant les niveaux extrêmes, les valeurs moyennes μ_i et les écarts-types σ_i des niveaux "1" et "0". L'équation II.10.

Le dernier paramètre que nous aborderons, aidant à l'évaluation des performances est le rapport signal à bruit.

II.4.4 Rapport signal à bruit

Cette grandeur est le critère principalement utilisé dans le cas des informations analogiques (téléphone, téléviseur, ...). Elle mesure la qualité du signal perçu par le destinataire. Mais elle est également souvent utilisée pour les transmissions numériques.

Elle permet par exemple de contrôler, en tout point de la liaison, la qualité du signal.

Elle permet aussi de mesurer l'impact d'un composant, d'un bloc sur la qualité du signal. Les composants, les appareils sont d'ailleurs souvent caractérisés par le paramètre « Facteur de bruit », qui permet d'évaluer leurs performances.

Si on considère un système, un quadripôle ou un composant Q, et si on note S_e (respectivement S_s) la puissance moyenne du signal utile à l'entrée (resp. en sortie) et N_e (resp. N_s) la puissance moyenne du bruit à l'entrée (resp. en sortie),

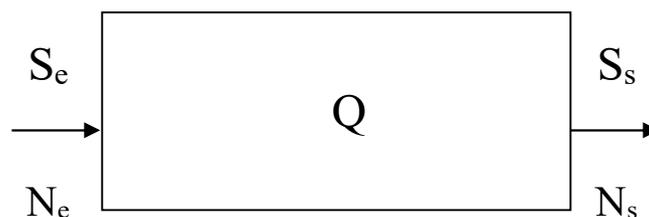


Figure II.12 : Schématisation du calcul du rapport Signal à Bruit d'un système.

Alors, le rapport Signal sur Bruit, ou rapport Signal à Bruit, et on le note également souvent SNR, de l'anglais Signal to Noise Ratio. Ce rapport permet d'estimer le degré de contamination du signal par le bruit. On définit ensuite le facteur de bruit F du quadripôle Q par :

$$F = \frac{S_e \cdot N_s}{N_e \cdot S_s} \quad \text{II.12}$$

Ce critère peut s'exprimer en dB, selon que l'on a calculé ou non son logarithme ($10\log_{10}(S/B)$ ou $10\log_{10}(F)$).

Le SNR est un calcul toujours effectué à partir de signaux électriques. Il a son équivalent pour le domaine optique avec le terme OSNR (Optical Signal to Noise Ratio)

II.4.5 Comparaisons des critères

Pour connaître les performances d'une liaison de télécommunications par fibre optique, il existe donc plusieurs méthodes d'évaluation. Mais selon les projets, selon les systèmes à mesurer, certaines sont plus adaptées que d'autres. Ce paragraphe présente la comparaison des méthodes utilisables avec le logiciel de simulation.

La mesure la plus précise est le calcul du taux d'erreur binaire. C'est également la plus difficile à mettre en œuvre et elle nécessite des temps de calcul parfois extrêmement longs. Il existe néanmoins différentes approximations du TEB, qui n'ont pas les mêmes exigences. En effet, la méthode de Monte Carlo, basée sur le comptage des erreurs, demande un grand nombre de bits simulés (la mesure d'un TEB = 10^{-9} signifie l'envoi minimum de 10^{+10} bits pour observer 10 erreurs). Les autres méthodes de mesures du taux d'erreur basées sur des estimations permettent d'obtenir des résultats cohérents en envoyant moins de bits, tout en restant complexes à mettre en place.

Les évaluations des performances de la liaison peuvent se faire en mesurant le facteur de qualité. Deux méthodes sont disponibles :

- On utilisant le tracé du diagramme de l'œil, mais le résultat restera assez approximatif, car il s'appuie sur une approche visuelle, qui dépend du positionnement de la fenêtre de calcul sur le graphique ;

- On utilisant une méthode de calcul accessible dans le logiciel, pour laquelle la fenêtre de mesure est fixée par le simulateur.

Le choix du critère d'évaluation de la liaison est fortement dépendant du type d'étude à effectuer. Les performances d'une liaison sont à mesurer et à améliorer en apportant des modifications à cette liaison. Les normes fixées dans le domaine des télécommunications demandent, pour maintenir la qualité de service (image, voix, données, etc...), un taux d'erreur binaire inférieur à 10^{-9} , ce qui équivaut à un facteur de qualité supérieur à 6. Compte tenu de ce qui a été présenté précédemment, les besoins en temps de calculs et en ressources informatiques s'avèrent être très importants pour le calcul du TEB. Une comparaison de ces différentes méthodes a été réalisée pour une liaison à 40 Gbits/s (Figure II.13) [1]. Le TEB est calculé avec chacune de ces méthodes sur plusieurs liaisons ayant seulement un niveau de bruit différent. Cette étude a montré que les résultats sont assez comparables. [7][5] [10]

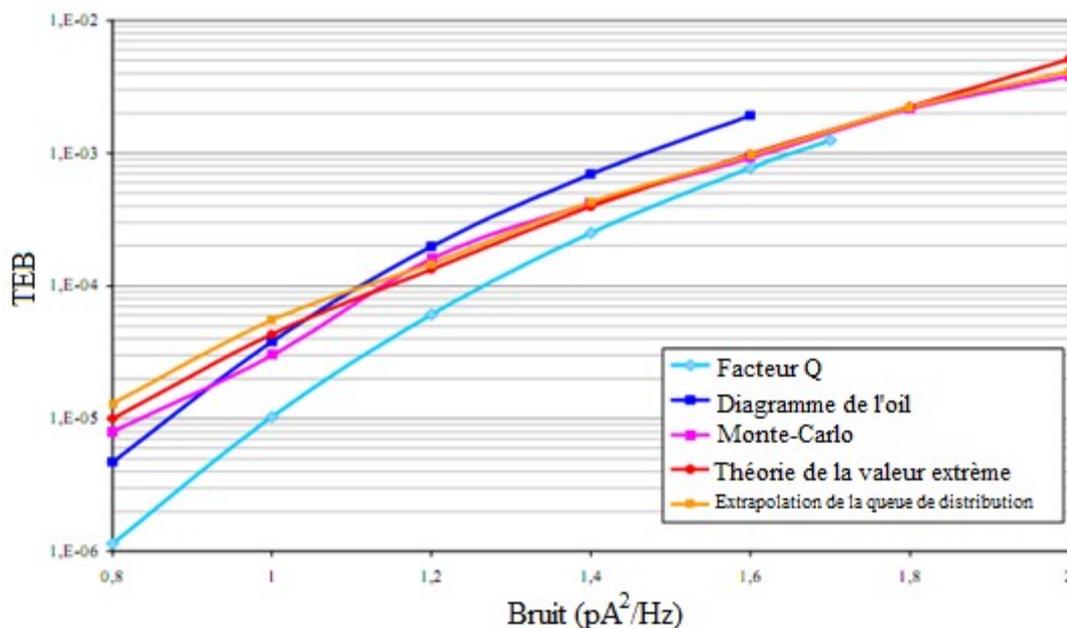


Figure II.13 : Comparaison des méthodes d'évaluation des performances des systèmes dans COMSIS.

II.5 Bilan de liaison

Deux facteurs limitent la longueur de la liaison :

- d'une part l'atténuation (la puissance de l'émetteur doit être suffisante pour que le niveau du signal reçu par le détecteur soit supérieur au bruit),

- d'autre part, la dispersion (les impulsions ne doivent pas se recouvrir en sortie).

La limitation introduite par l'atténuation dépend des paramètres suivants :

- la puissance injectée dans la fibre,
- l'atténuation par unité de longueur de fibre,
- l'atténuation des connexions,
- le niveau minimum nécessaire sur la photodiode.

La puissance injectée dans la fibre ou transmise par celle-ci est souvent exprimée en dBm; la relation suivante définit les dBm.

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \left(\frac{P_s(\text{mW})}{1\text{mW}} \right) \quad \text{II.13}$$

II.5.1 Bande passante (BP) et Capacité de transmission (CT)

La portée de transmission d'une liaison optique peut être également limitée par la bande passante. On évalue cette limitation en prenant en compte les paramètres suivants de la fibre :

- l'élargissement d'une impulsion $\Delta\tau$ (en ns.km⁻¹),
- la bande passante (BP) pour un signal analogique (en MHz.km) ou
- la capacité de transmission (CT) (en Mbits.s⁻¹.km) pour un signal numérique.

Afin de définir des relations entre les paramètres ci-dessus, il est utile de considérer la liaison optique comme une série de quadripôles qui transforment une grandeur $e(t)$ (le signal d'entrée) en une grandeur $s(t)$ (le signal en sortie) (figure ci-après).

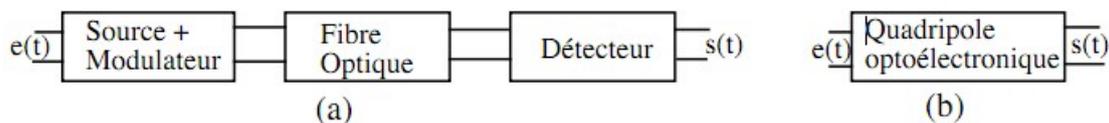


Figure II.14: schématisation d'une liaison optoélectronique.

(a) : une suite de quadripôles qui transforment un signal $e(t)$ en un signal $s(t)$.

(b) : L'ensemble de la liaison assimilée à un quadripôle unique.

Les caractéristiques spectrales du quadripôle sont obtenues en considérant le spectre des signaux d'entrée et de sortie. On passe du signal temporel $s(t)$ au spectre par la transformation de Fourier :

$$S(\Omega) = \text{TF}[s(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\Omega t) dt \quad \text{II.14}$$

Et inversement :

$$s(t) \text{TF}^{-1}[S(\Omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\Omega) \exp(+j\Omega t) dt \quad \text{II.15}$$

On montre que le spectre du signal de sortie est obtenu à partir de celui du signal d'entrée par la relation

$$S(\Omega) = Q(\Omega) \cdot E(\Omega) \quad \text{II.16}$$

$Q(\Omega)$ est la fonction de transfert (ou réponse fréquentielle) du quadripôle.

La fonction de transfert est obtenue en sortie, lorsqu'on injecte à l'entrée une impulsion infiniment courte (impulsion de Dirac).

Une fibre optique est assimilable à un filtre passe-bas. En prenant en 1ère approximation la fonction de transfert, on peut obtenir la réponse impulsionnelle de la fibre en prenant la TF de $F(\Omega)$.

La bande passante (BP) est donnée par :

$$\text{BP} = \frac{\Omega_c}{2\pi} \quad \text{II.17}$$

La largeur $\Delta\tau$ de la courbe à mi-hauteur étant peu différente de $0,5 \frac{\Omega_c}{2\pi}$ on peut écrire la relation suivante entre BP et $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau \times \text{BP} \approx 0.5 \quad \text{II.18}$$

$\Delta\tau$ est l'élargissement de l'impulsion dû à la dispersion (la durée de l'impulsion d'entrée étant considérée comme négligeable).

Le paramètre $\Delta\tau$ varie linéairement avec la longueur de la fibre :

$\Delta\tau$ (pour fibre de longueur L) = $\Delta\tau$ (pour fibre de 1 km) x L (en km). En conséquence la bande passante d'une fibre varie comme l'inverse de sa longueur:

$$BP \text{ (pour une fibre de longueur L)} = \frac{BP \text{ (pour la fibre de 1 Km)}}{L \text{ (Km)}}$$

Une relation entre la dispersion et la capacité de transmission peut être trouvée en considérant le signal numérique de la figure suivante formée d'une suite d'impulsions carrées de durée T séparées par une période T. La dispersion provoque un allongement $\Delta\tau$ des impulsions. Le signal est correctement transmis si $\Delta\tau$ est inférieur à T. Le nombre maximum d'impulsions pouvant être transmis par seconde (ou capacité de transmission) est tel que :

$$CT = \frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta\tau} \tag{II.19}$$

Compte tenu de la relation ci-dessus entre $\Delta\tau$ et BP, on peut écrire la relation suivante:

$$CT = 2 \times BP \tag{II.20}$$

La longueur maximale L_{max} (en km) d'une liaison de capacité CT, réalisée à l'aide d'une fibre de bande passante BP, est égale à :

$$L_{max} = \frac{2 \times BP \text{ (de la fibre en Mhz.Km)}}{CT \text{ (de la liaison en Mbits/s)}} \tag{II.21}$$

II.5.2 Bilan énergétique

Bilan énergétique d'une liaison à fibre optique

Le diagramme des pertes d'une liaison à fibre optique s'établit ainsi :

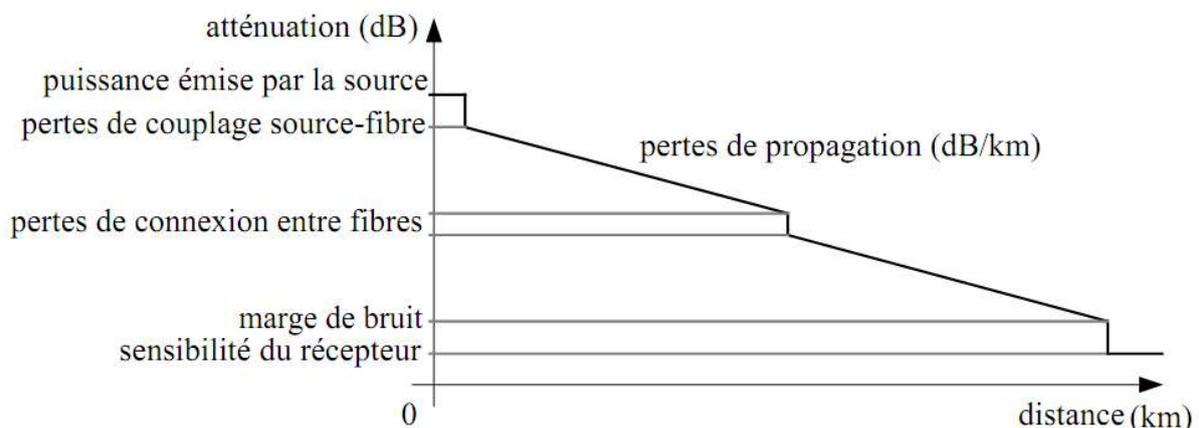


Figure II.15 Diagramme des pertes d'une liaison à fibre optique.

On définit l'équation du bilan énergétique par :

$$p_{om} + M \leq p - (D_t + A) \quad \text{II.22}$$

Où : P_{om} : Seuil de détection du récepteur.

P : puissance optique émise par la source.

D_t (dB) : pertes totales de couplage.

A (dB) : pertes de la fibre.

M : marge de sécurité.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques caractéristiques principales d'une liaison optique en détaillant les différentes techniques de multiplexage de la TDM jusqu' à la CWDM.

Une étude sur les différents types de bruit a été faite, en citant les diverses sources qui les génèrent. Les différents critères de performances ont été présentés dans ce chapitre tels que le facteur de qualité Q et le taux d'erreur bit TEB, qui seront la base de mesure de qualité du signal dans le chapitre suivant.

Bibliographie :

- [1] VERNEUIL Jean-Louis. Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s, L'UNIVERSITE DE LIMOGES, N° d'ordre : 49/2003.
- [2] BRAHIMI H. Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences « Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence » Université Paul Sabatier – Toulouse III.
- [3] 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.
- [4] SIMON Jean-Claude. Amplificateurs optiques pour les télécommunications à haut débit, Laboratoire d'Optronique/UMR 6082, Université de Rennes1.
- [5] JOINDOT Irène et Michel. Les télécommunications par fibre optique.
- [6] Laude Jean-Pierre. Le multiplexage de longueur d'onde. MASSON 1992.
- [7] GLAVIEUX A. et JOINDOT M., "Communications numériques : introduction", Collection Pédagogique de Télécommunication, Edition Masson, 1996.
- [8] POUPRIX B. "Introduction à la transmission par fibres optiques", Bull. de l'Union des Physiciens, N°685, p 1035-1053, 1990.
- [9] MILOTTI E. « Le bruit en $1/f$ », Pour la science, n°246 Avril 1998, pp 88-93.
- [10] IPSIS, Manuel d'utilisation du logiciel COMSIS.

III.1 Introduction :

Le développement des télécommunications par fibres optiques a multiplié les architectures des réseaux. La conception des systèmes associés est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important.

La méthode expérimentale est très coûteuse. Aussi, les outils de simulation constituent une solution très intéressante et très économique. Parmi ces logiciels, on trouve COMSIS (COMmunication System Interactive Software), qui est un logiciel de simulation système développé par une société française, IPSIS (Ingénierie Pour SIgnaux et Systèmes).

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

A l'aide de ce logiciel on va faire quelques simulations qui nous permettent de mieux comprendre les choses.

III.2 Présentation du logiciel :

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

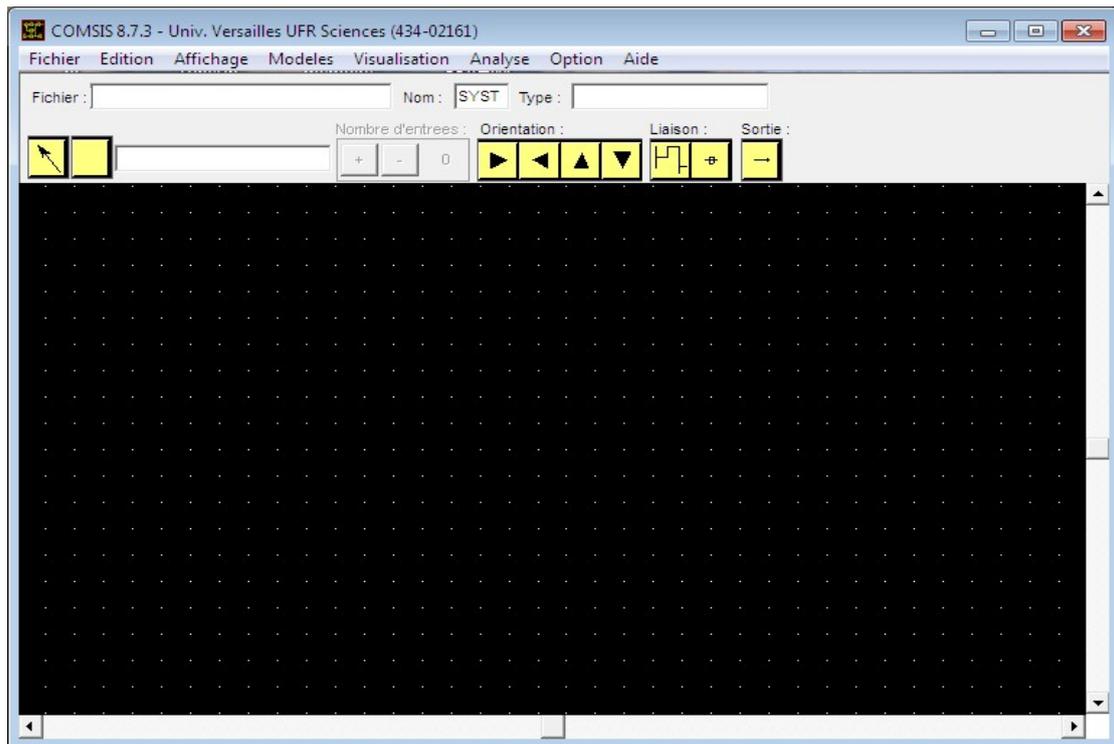


Figure III.1 : L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS.

La figure III.1 présente le schéma bloc du logiciel COMSIS

Les principales fonctionnalités sont :

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

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

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

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

- On accède aux modèles (composants, sous-systèmes, canaux de propagation...) par le menu déroulant Modèle.
- On assemble les différents éléments au moyen de fils de connexion, on place des variables intermédiaires pour la visualisation à la sortie de chaque module et on les nomme, on spécifie une variable de sortie. Ces fonctions sont accessibles au niveau de la barre des tâches principales.

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

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

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

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

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

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

A ce stade, il n'est pas rare que l'on ne sache pas répondre d'emblée à toutes les questions, il est alors possible de faire appel à l'aide contextuelle de la fenêtre

alphanumérique ou des fenêtres de définition des modèles. Une explication sur la procédure à suivre ou la nature des paramètres à renseigner est alors fournie.

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

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

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

- Lorsque l'un des choix est effectué, par exemple Visualisation Globale, la fenêtre Variables et Pré-traitements à visualiser permet de choisir entre une visualisation temporelle simple de la variable sélectionnée (Réponse temporelle), sa fonction d'auto-corrélation, son diagramme de l'œil, sa puissance...

En résumé :

- On décrit l'ensemble des éléments du système à étudier ;
- L'analyse statistique fournit un certain nombre de courbes caractéristiques des éléments du système;
- L'analyse temporelle permet la simulation paramétrique du système à une entrée spécifiée, et s'appuie sur des outils de visualisations et d'analyse des résultats.

III.3 Simulations :

Elle contient deux parties : une analyse statique et une analyse temporelle.

III.3.1 Analyse statique

Dans cette partie on va prendre comme exemple un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium (EDFA), en visualisant les principales caractéristiques telles que le gain, la puissance de sortie et leurs spectres ...

III.3.1.1 Etude de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée :



Figure III.2 : Puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée.

D'après la figure III.2, on observe que la puissance de sortie varie dans deux intervalles. Elle est croissante dans le premier intervalle et stable autour de 20 dBm dans le deuxième à partir d'une valeur de -22.12 dBm de la puissance d'entrée, on appelle cette valeur la puissance de saturation.

D'autre part on constate qu'il y a deux régimes pour réaliser l'amplification :

- Régime à faible signal
- Régime de saturation

Du point de vue analytique, la saturation de la puissance dépend de l'effet de la puissance d'ESA (puissance d'émission spontanée amplifiée), ce dernier est responsable de la saturation de l'amplificateur. Elle dépend aussi de la puissance du signal d'entrée, lorsqu'elle prend des valeurs importantes.

III.3.1.2 Etude du gain en fonction de la puissance d'entrée :

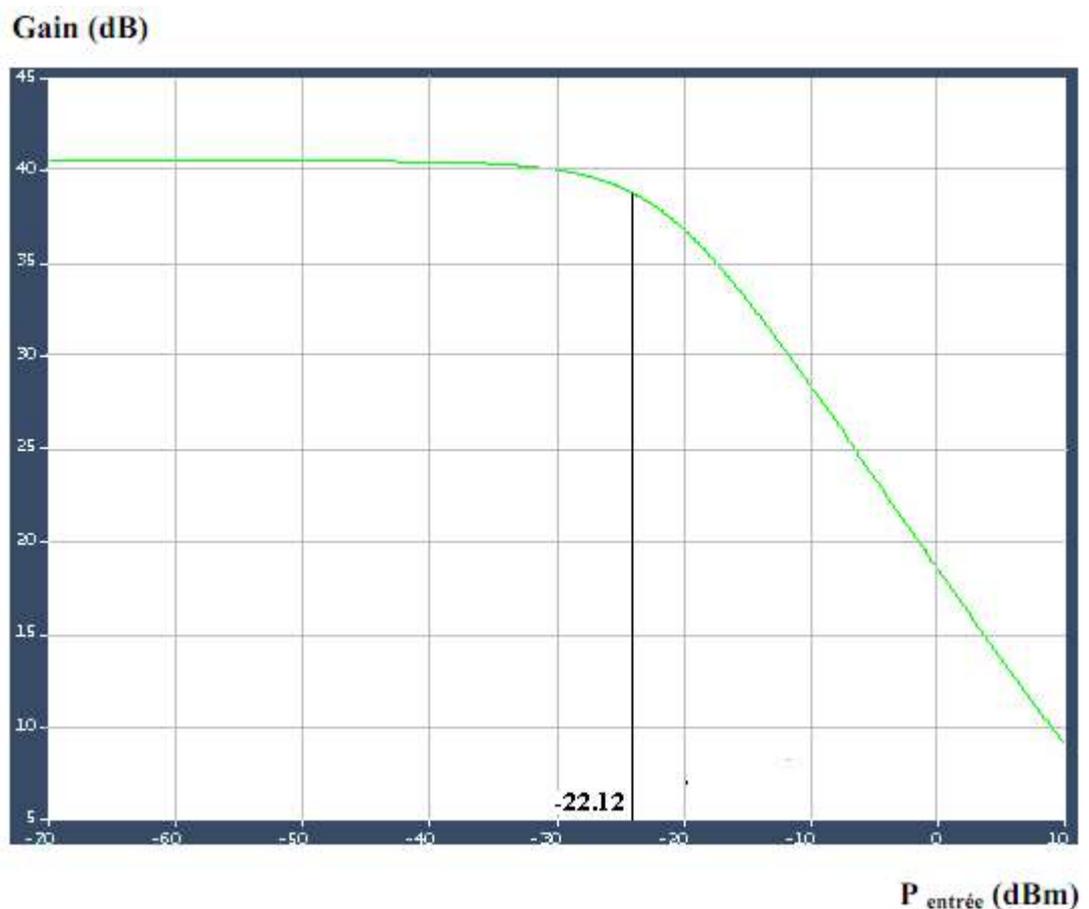


Figure III.3: Variation du gain en fonction de la puissance d'entrée.

Pour une puissance d'entrée variant dans l'intervalle $[-70, -30]$ dBm on obtient des valeurs maximales du gain de plus de 40 dB.

A partir de la valeur -30 dBm de la puissance d'entrée, on constate une décroissance du gain. Pour obtenir une puissance de sortie maximale et stable, et un gain important, il faut que l'amplificateur fonctionne en régime de saturation.

III.3.1.3 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde et de la puissance d'entrée

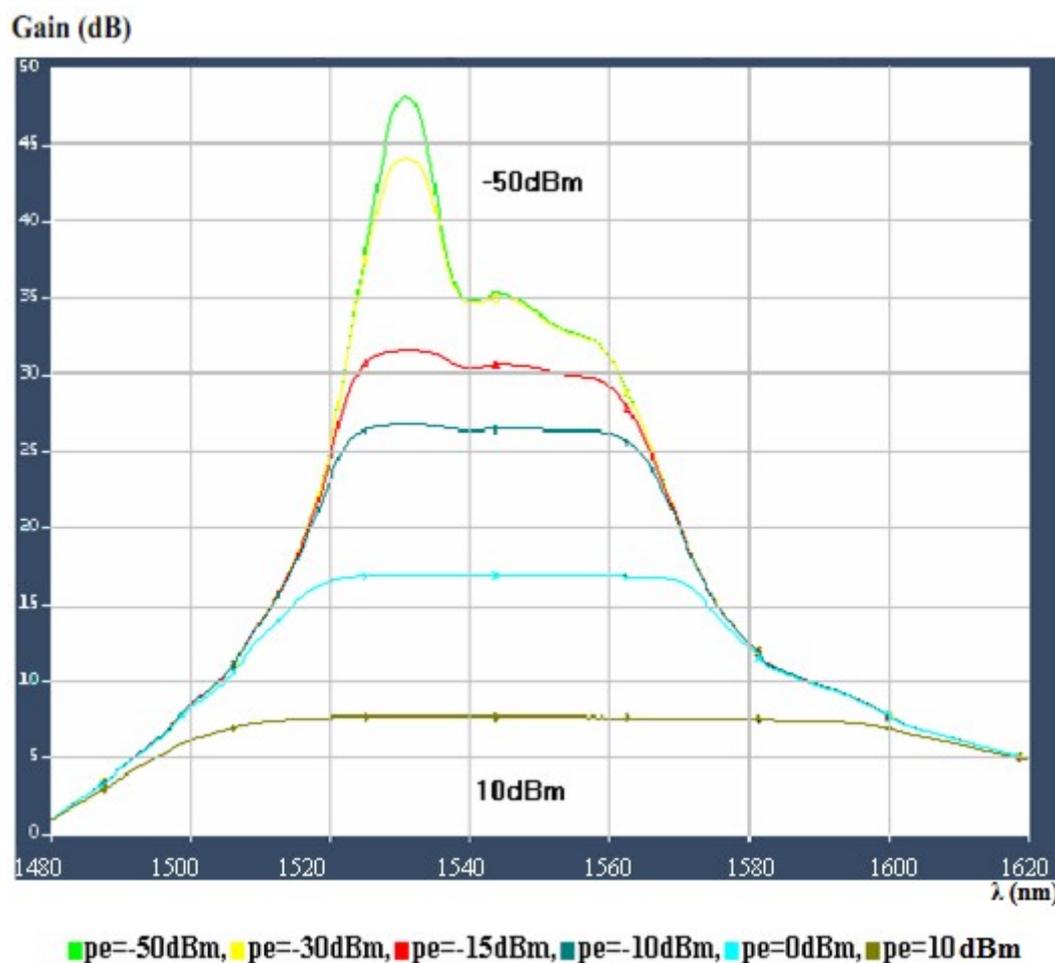


Figure III.4 : Variation du gain en fonction de la longueur d'onde pour une puissance d'entrée variant dans l'intervalle $[-50, 10]$ dBm.

A partir de la figure III.4, on observe que le gain décroît avec la croissance de la puissance d'entrée, donc pour obtenir un gain plat et peu élevé, et une bande passante importante, on prend la puissance du signal d'entrée autour de 10 dBm, cette valeur est dans le régime de saturation. Pour des valeurs de gain au voisinage de 25 dB on aura une bande passante de 40 nm d'environ.

III.3.1.4 Etude de la puissance d'ESA en fonction de la longueur d'onde et de la puissance d'entrée

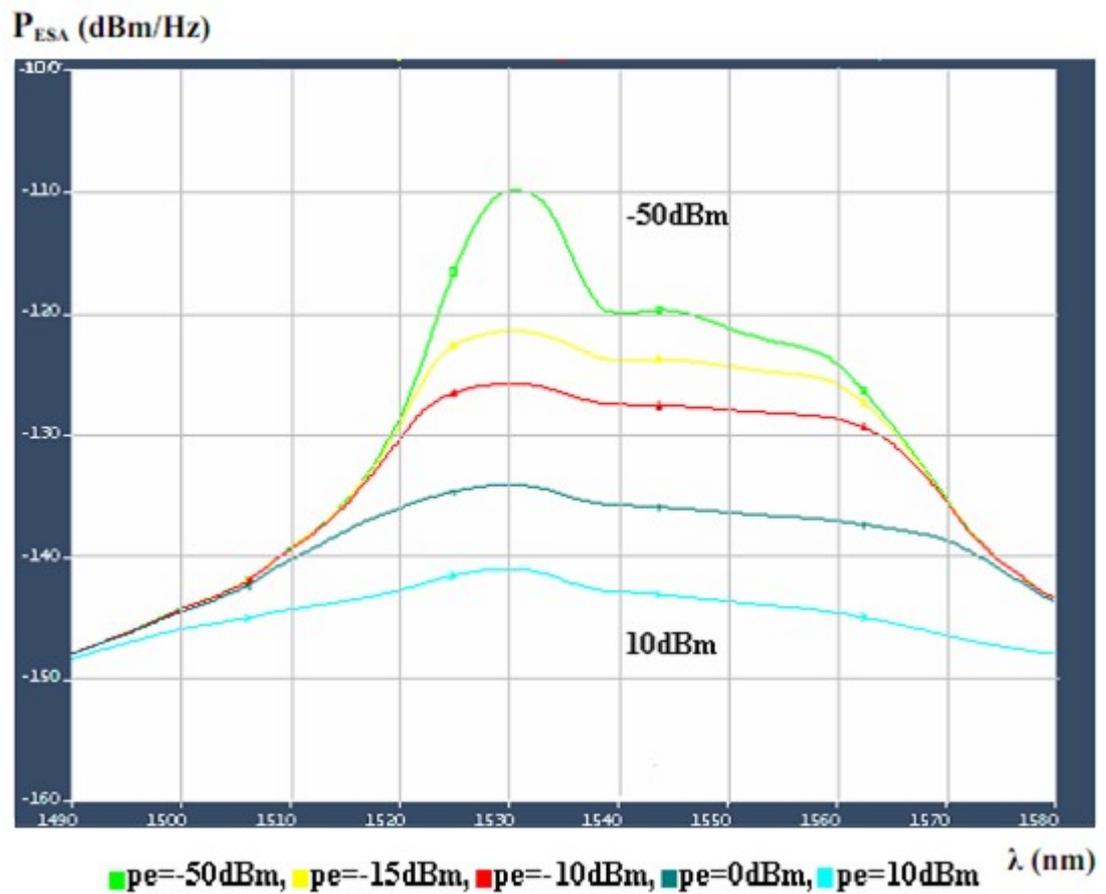


Figure III.5 : Puissance spontanée amplifiée en fonction de la longueur d'onde. pour une puissance d'entrée variant dans l'intervalle [-50, 10] dBm

La figure III.5 représente l'influence de la puissance d'entrée sur la puissance spontanée amplifiée, les courbes d'ESA varient d'une manière décroissante lorsque la puissance d'entrée augmente.

III.3.1.5 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde et de la longueur de la fibre amplificatrice

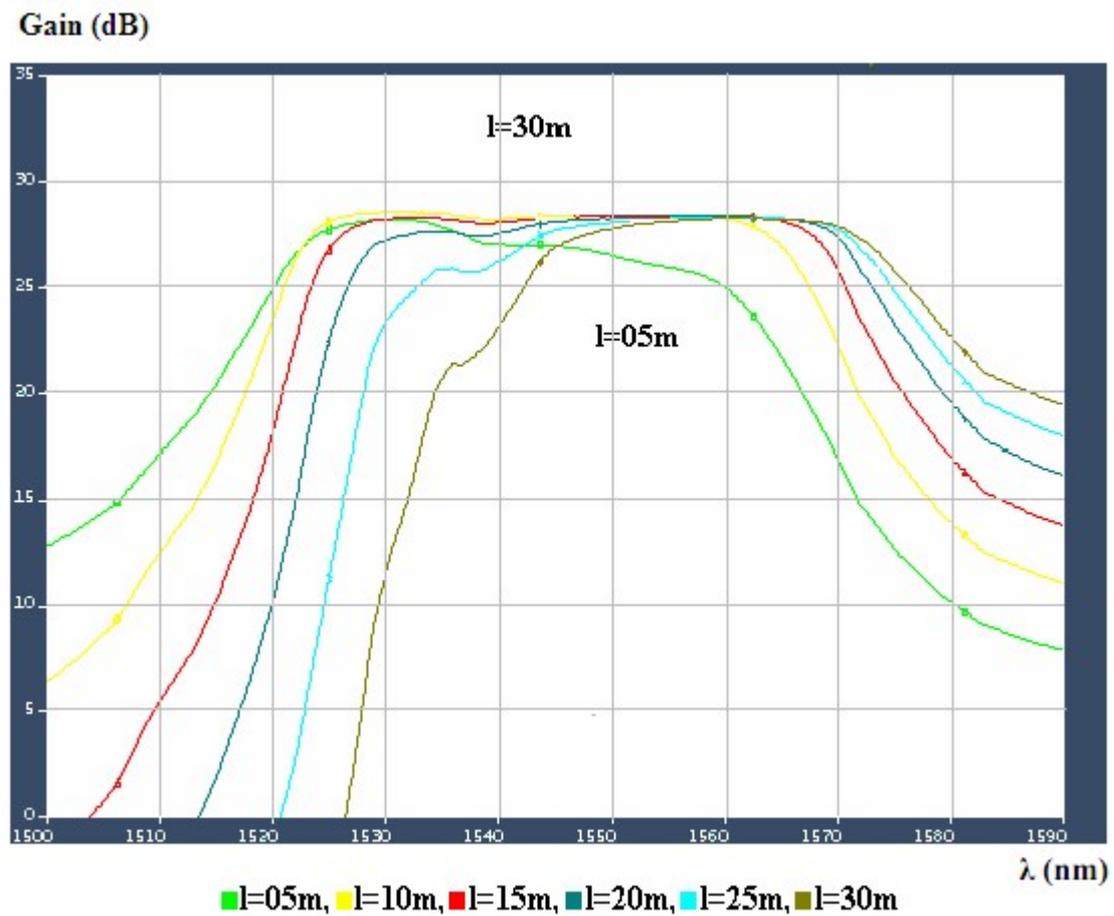


Figure III.6 : Spectre du gain en fonction de la longueur de la fibre amplificatrice.

La longueur de la fibre amplificatrice influe directement sur le gain comme le présente la figure III.6. On observe que lorsque la longueur de la fibre amplificatrice a une valeur entre 10 et 20 m, exactement pour la longueur de 15m, elle donne un gain plat et de valeur importante. Ceci provient de la pompe et son efficacité à exciter tous les ions de l'erbium sur la longueur de la fibre amplificatrice.

III.3.1.6 Etude de la puissance d'ESA en fonction de la longueur d'onde et de la longueur de la fibre amplificatrice

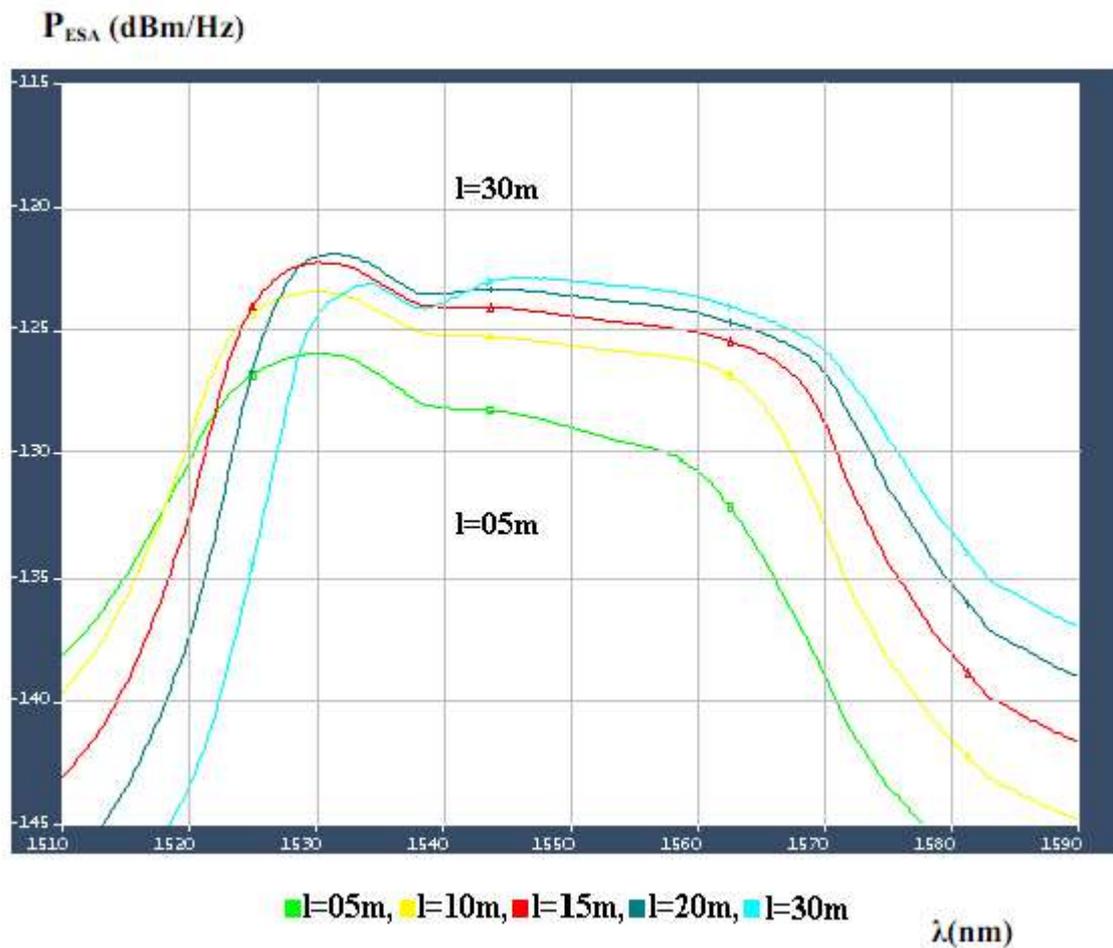


Figure III.7 : Spectre de la puissance d'ESA en fonction de la longueur.

D'après les graphes de la figure III.7, la puissance d'ESA reste toujours dans l'intervalle $[-125, -120]$ (dBm/Hz) pour les longueurs de la fibre amplificatrice entre 10 et 20 m. Elle prend la valeur -122 (dBm/Hz) pour la longueur 15m qui est la longueur optimale pour obtenir une bonne amplification du signal.

III.3.1.7 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde et du rayon du cœur de la fibre amplificatrice

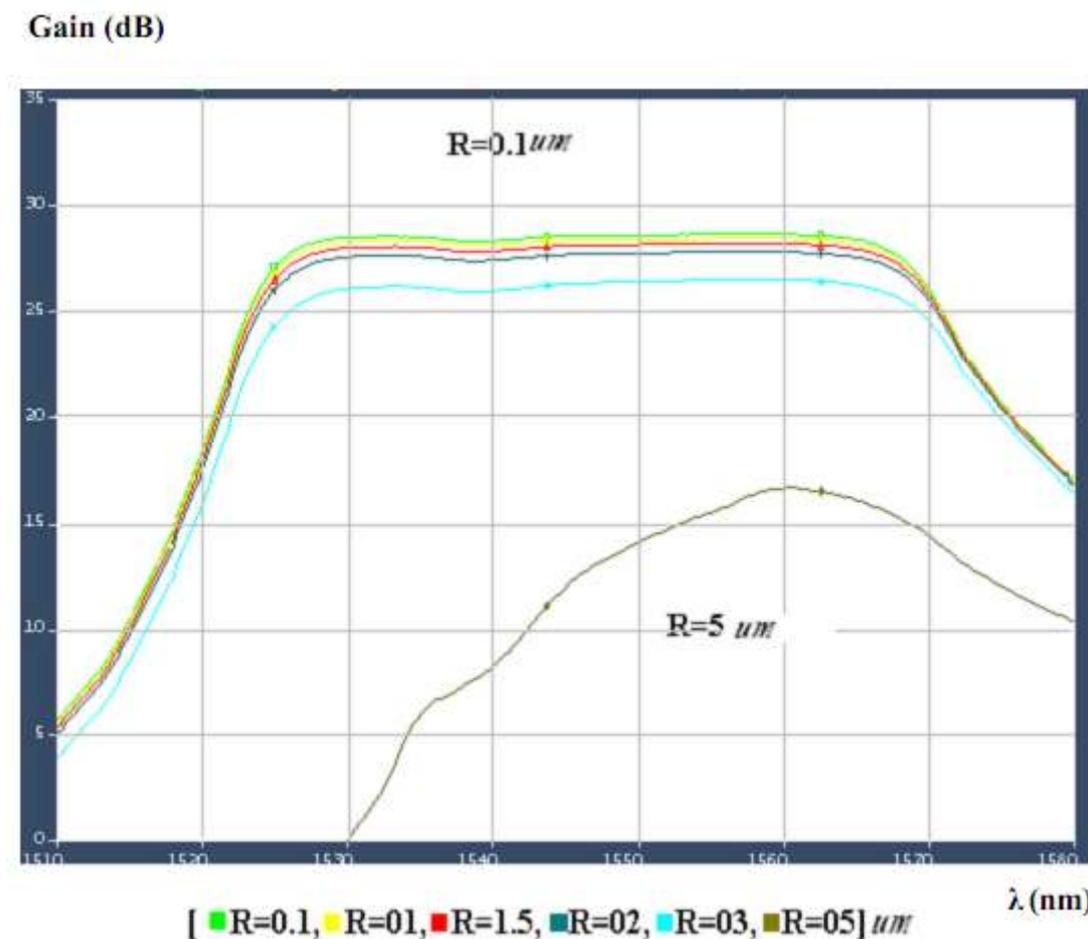


Figure III.8 : Spectre du gain en fonction de la longueur d'onde pour le rayon du cœur de la fibre amplificatrice variant entre 0.1 et 5 μm .

D'après les courbes de la figure III.8, le gain varie en sens inverse avec la variation du rayon du cœur de la fibre amplificatrice. De même, elles montrent que le gain prend ses valeurs maximales, lorsque le rayon du cœur est dans l'intervalle [0,1-2 μm].

On constate que lorsque le rayon du cœur de la fibre est faible, le gain devient plus élevé.

III.3.1.8 Etude du gain en fonction de la longueur d'onde et des valeurs optimales des paramètres d'EDFA

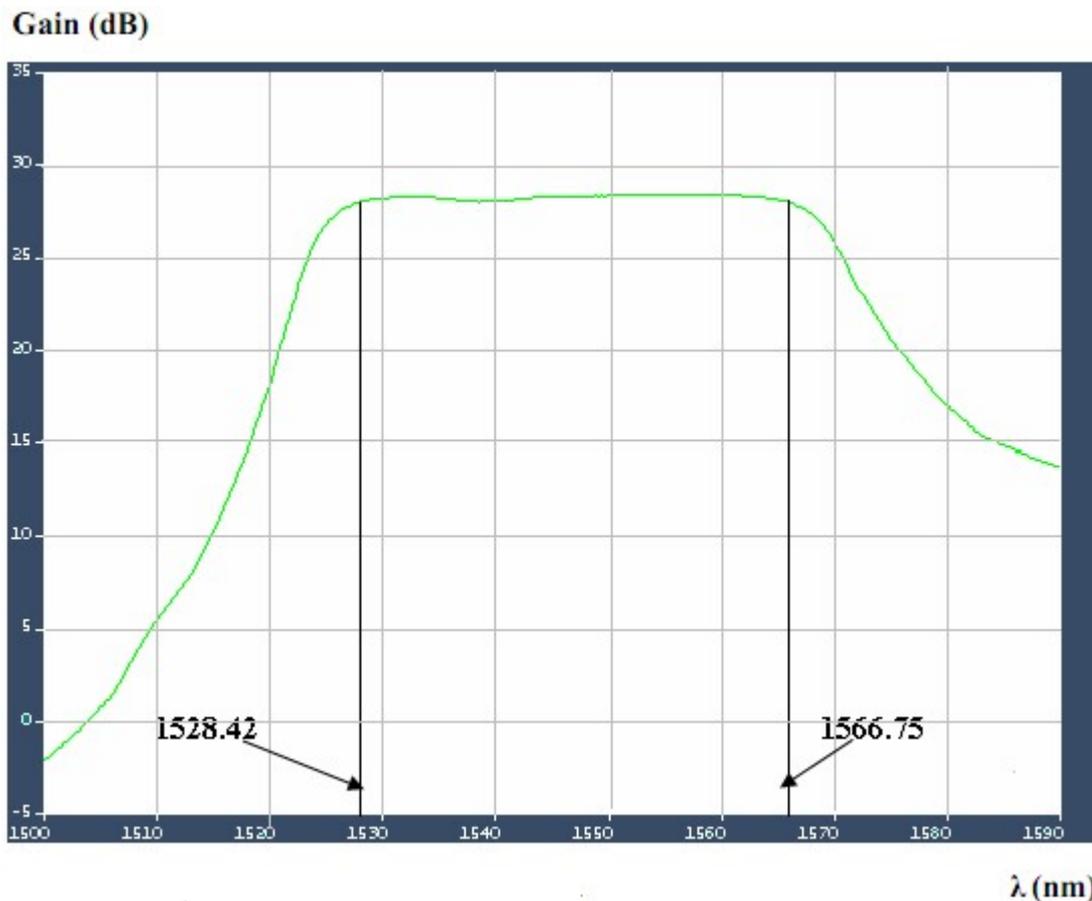


Figure III.9 : Spectre du gain.

Nous avons pris une puissance d'entrée de -11 dBm, une puissance de la pompe de 120 mW, et une fibre amplificatrice de longueur 15 m et de rayon du cœur égale 1,1 μm , comme des valeurs optimales qui donnent un bon fonctionnement de l'EDFA ; nous avons obtenu la courbe de la figure III.9. D'après cette figure le gain est stable et de valeur élevée autour de 28 dB, ainsi qu'une bande passante très importante approchant les 50 nm.

III.3.2 Analyse temporelle

III.3.2.1 Etude comparative de différentes configurations des circuits de sortie

La figure III.10 présente une liaison optique dont le but est de comparer les différentes sorties de la chaine en termes de qualité du signal sous forme d'un diagramme de l'œil et on visualise aussi le signal à la sortie de chaque bloc.

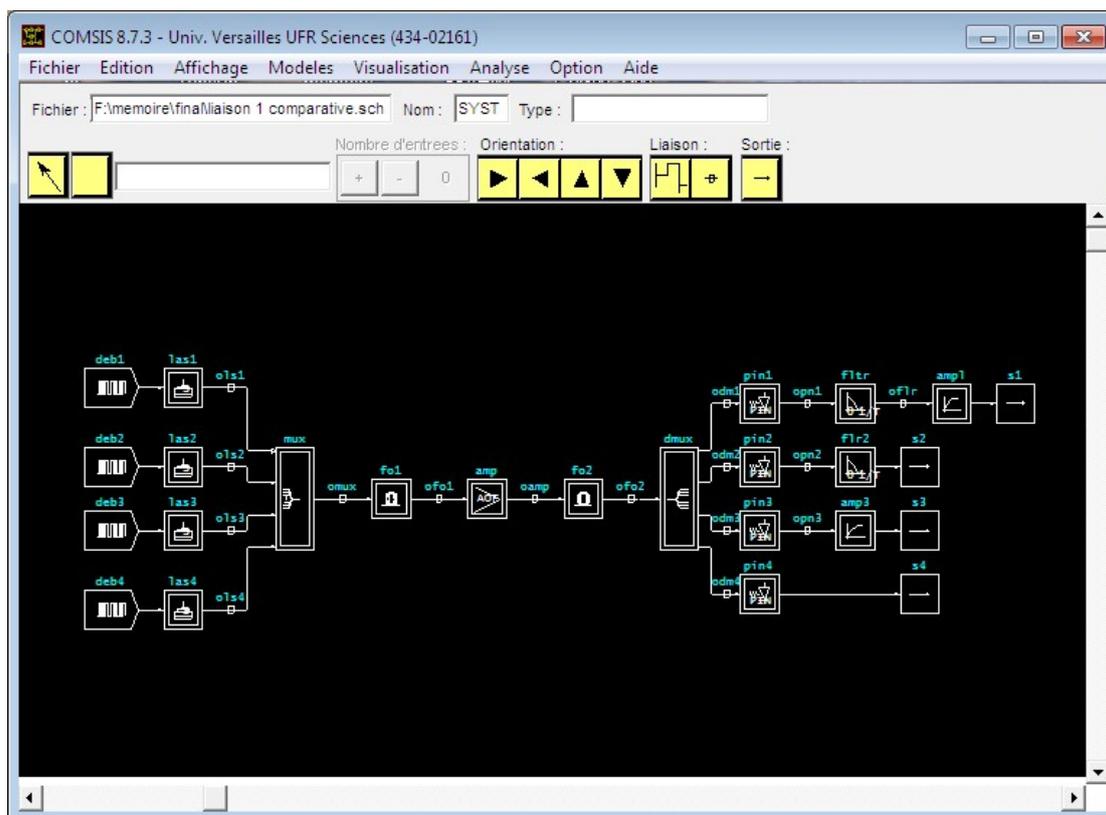


Figure III.10 : Schéma bloc de la liaison d'étude comparative.

La figure III.10 représente une liaison WDM avec quatre (04) entées, elle est composée de :

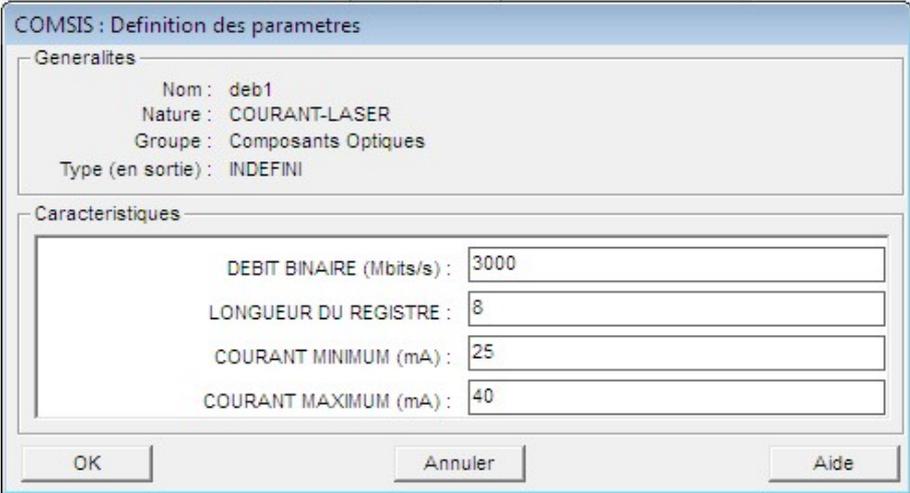
- Quatre courants lasers qui ont le même débit.
- Quatre lasers systèmes avec des longueurs d'onde différentes.
- Un multiplexeur optique
- Deux fibres de mêmes caractéristiques.

- Un amplificateur optique
- Un démultiplexeur optique
- Quatre photodétecteurs de type PIN
- Deux filtres électriques.
- Deux amplificateurs électriques
- Quatre sorties pour la visualisation des signaux.

a. Définition des caractéristiques des éléments de la liaison

Avant de simuler notre liaison, on doit d'abord configurer chacun de ses éléments en donnant leurs paramètres caractéristiques comme suit :

- **courant laser**



The image shows a software dialog box titled "COMSIS : Definition des paramètres". It is divided into two sections: "Generalites" and "Caracteristiques".

Generalites:

- Nom : deb1
- Nature : COURANT-LASER
- Groupe : Composants Optiques
- Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques:

DEBIT BINAIRE (Mbits/s) :	3000
LONGUEUR DU REGISTRE :	8
COURANT MINIMUM (mA) :	25
COURANT MAXIMUM (mA) :	40

At the bottom of the dialog box, there are three buttons: "OK", "Annuler", and "Aide".

Figure III.11 : Paramètres du courant laser.

La configuration des blocs deb2, deb3 et deb4 est la même que celle de deb1.

Laser système :

The image shows a software dialog box titled "COMSIS : Definition des parametres". It is divided into several sections:

- Generalites:** Nom : las1, Nature : LASER-SYSTEME, Groupe : Composants Optiques, Type (en sortie) : INDEFINI.
- Caracteristiques:** Type de definition : Systeme Physiques.
- Parameters:** Longueur d'onde (nm) : 1550, Courant de seuil (mA) : 15, Rendement Puissance/Courant (W/A) : 0.15, Largeur de raie (MHz) : 5 pour le courant (mA) : 50, Taux d'amortissement (MHz) : 4000 pour le courant (mA) : 50, Bande a -3 dB (MHz) : 8000.
- Donnees physiques modifiables:** A button labeled "Donnees...".
- Parametres Facultatifs:** Espacement entre modes (nm) : 1, Chirp (MHz/mA) : 100, Bruit RIN (dB/Hz) : -154 pour le courant (mA) : 70.
- Buttons:** "Parametres physiques...", "OK", "Annuler", "Aide".

Figure III.12 : Paramètres du laser système.

Les lasers las2, las3, las4 ont la même configuration que las1, en changeant seulement la longueur d'onde avec un pas de 0,8 nm

Multiplexeur

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : mux
Nature : MUX-NONPOLARISE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

LONGUEUR D'ONDE CENTRALE (nm) :	1551.2
ESPACEMENT ENTRE CANAUX (GHz) :	100
BANDE PASSANTE A -3 DB (GHz) :	10
REFLECTIVITE :	0.95
ISOLATION DU CANAL ADJACENT (dB) :	60
ISOLATION DES AUTRES CANAUX (dB) :	60
PERTES D'INSERTION TOTALES (dB) :	0

OK Annuler Aide

Figure III.13 : Paramètres du multiplexeur.

Fibre optique

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : fo1
Nature : FIBRE-OPTIQUE-MONOMODE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Longueur de la fibre (km) : 25

Coefficient d'attenuation (dB/km) : 0.2

Dispersion chromatique (ps/nm/km) : Constante 16

Effet Kerr : Oui Non

Effet Raman : Oui Non

Coefficient de non linearite de la fibre (m²/W) : 3.2e-20

Gain Raman (m²/W) : 7.48e-21

Frequence de resonance (THz) : 12

Demi-largeur de raie Raman (THz) : 6.432

Aire effective de la section de la fibre (micro m²) : 80

Type de discretisation de la longueur : Fixe Variable

Valeur du pas (km) :

Valeur initiale du pas (km) :

Dispersion Modale de Polarisation : Oui Non

Birefringence lineique (ps/km) :

Longueur de couplage (km) :

Etat de la fibre

Retard introduit par la fibre (ns) : 0

OK Annuler Aide

Figure III.14 : Paramètres de la fibre optique.

Amplificateur optique

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : amp
Nature : AMPLI-OPTIQUE-FIBRE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Type des parametres de definition : Systeme Physique

Gain petit signal (dB) :

Puissance de saturation (dBm) :

Facteur de bruit (dB) :

Longueur d'onde de mesure des parametres (nm) :

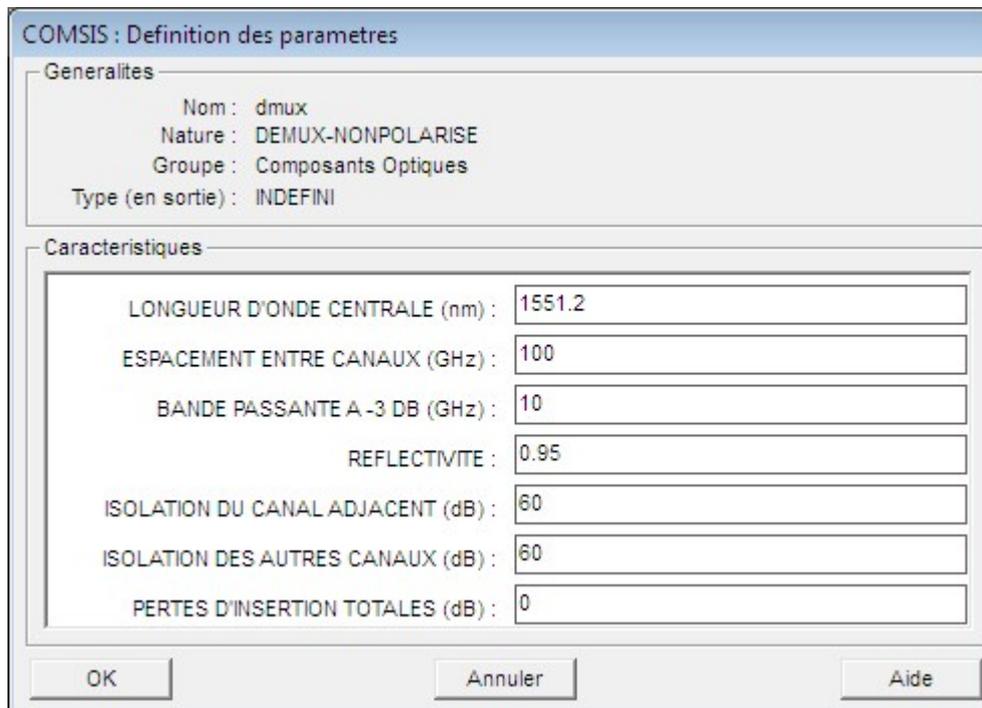
Fibre : Verre Silice Verre Fluore Autre

Longueur d'onde de la pompe : 980 1480

Retard introduit par l'amplificateur (ns) :

Figure III.15 : Paramètres de l'amplificateur optique.

Démultiplexeur



COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : dmux
Nature : DEMUX-NONPOLARISE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

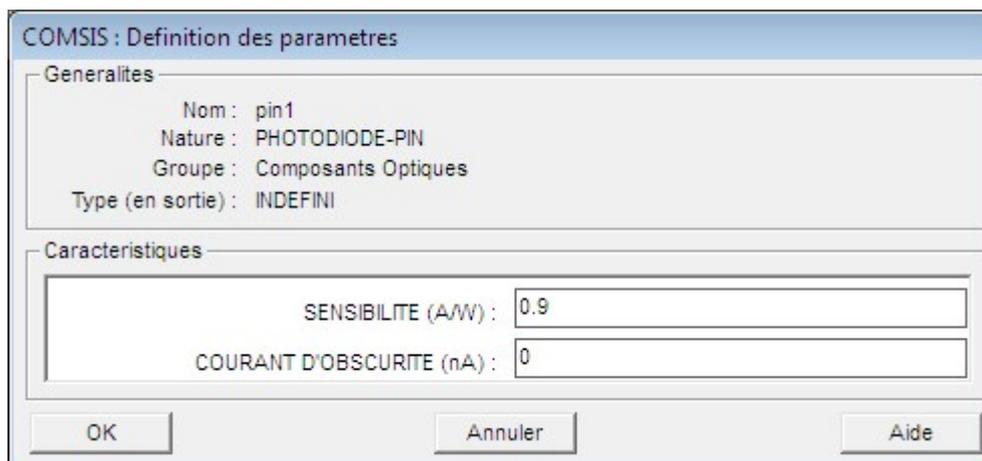
Caracteristiques

LONGUEUR D'ONDE CENTRALE (nm) :	1551.2
ESPACEMENT ENTRE CANAUX (GHz) :	100
BANDE PASSANTE A -3 DB (GHz) :	10
REFLECTIVITE :	0.95
ISOLATION DU CANAL ADJACENT (dB) :	60
ISOLATION DES AUTRES CANAUX (dB) :	60
PERTES D'INSERTION TOTALES (dB) :	0

OK Annuler Aide

Figure III.16 : Paramètres du démultiplexeur.

Photodiode PIN



COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : pin1
Nature : PHOTODIODE-PIN
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

SENSIBILITE (A/W) :	0.9
COURANT D'OBSCURITE (nA) :	0

OK Annuler Aide

Figure III.17 : Paramètres de la photodiode

Cette configuration est la même pour les autres photodiodes.

Filtre

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : filtr
Nature : FILTRE-COSINUS-BF
Groupe : Filtres
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

bande passante a 3 dB (MHz) : 3000
coefficient d'arrondi : 0.5
retard (Micro-sec) : 0

OK Annuler Aide

Figure III.18 : Paramètres du filtre.**Amplificateur électrique**

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : ampl
Nature : AMPLIFICATEUR-RADIO
Groupe : Non Linearites
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Gain (dB) : 20
Type du parametre de non linearite : Sans non-linearite
Valeur du parametre en (dBm) : 2

OK Annuler Aide

Figure III.19 : Paramètres de l'amplificateur électrique.

b. Résultats de simulation

Après avoir configuré et nommé tous les éléments de la liaison, on passe à l'étape de simulation, ainsi que le calcul du facteur de qualité Q et le taux d'erreurs TEB. Les graphes obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous.

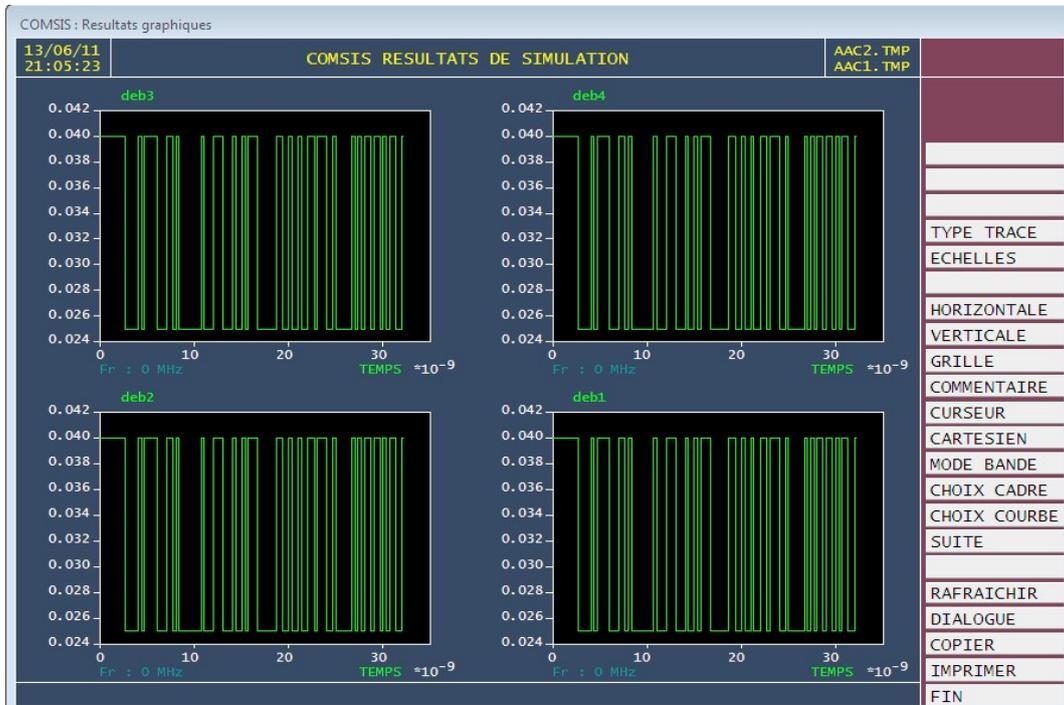


Figure III.20 : Réponse temporelle des courants lasers.

On a pris le même débit pour que la comparaison soit raisonnable.

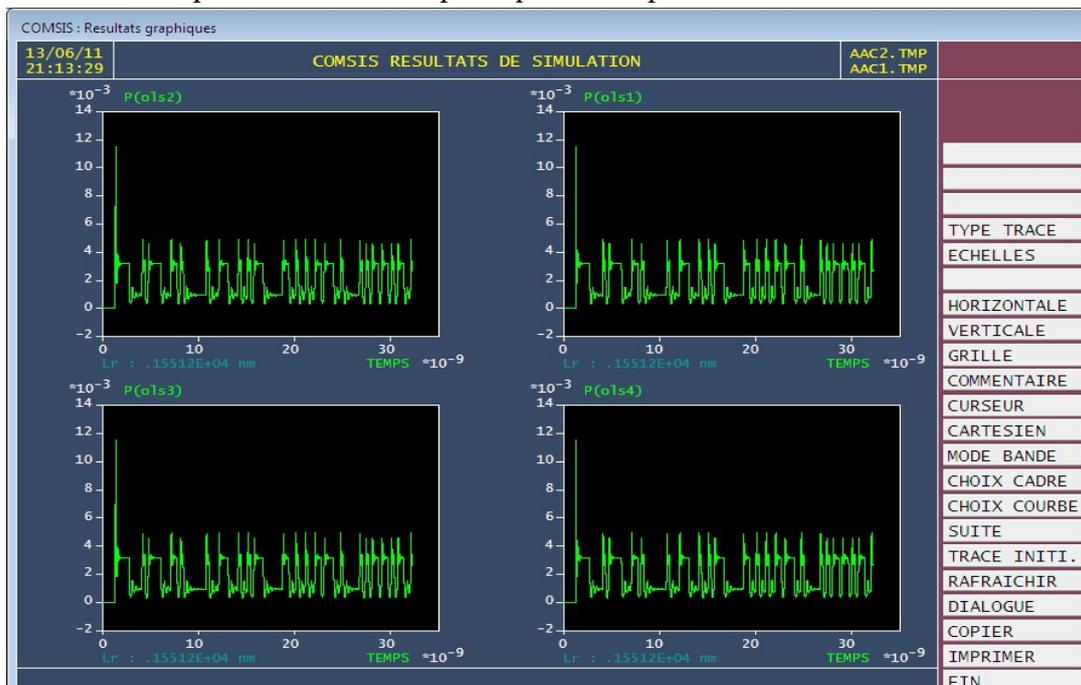


Figure III.21 : Puissance des lasers.

On constate que le laser comporte un bruit qui va perturber le signal

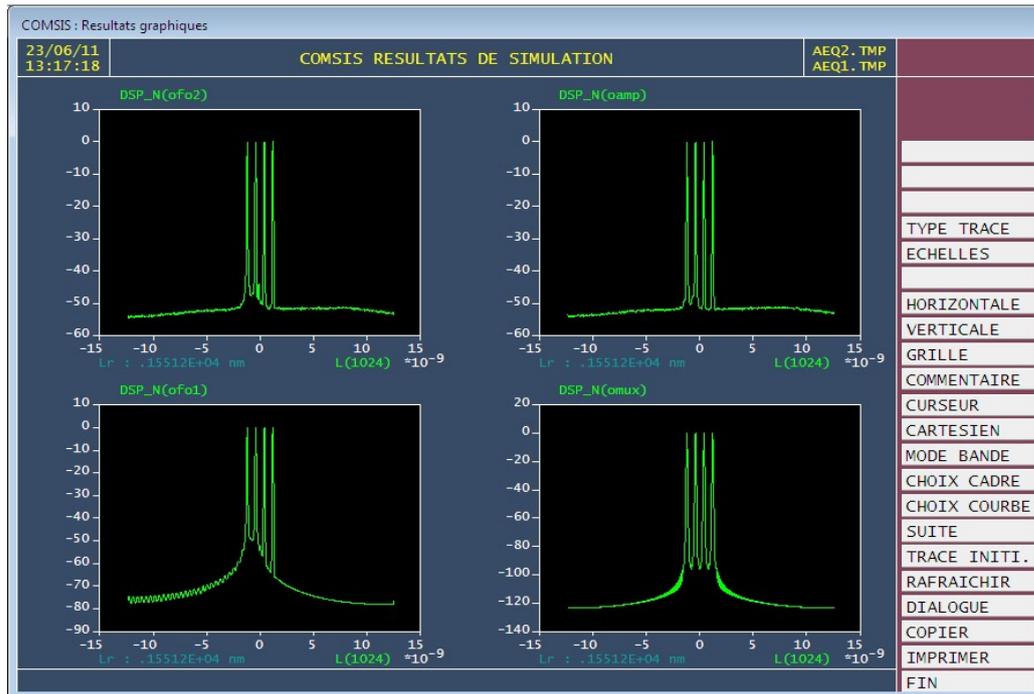


Figure III.22 : Densité spectrale des sorties de la fibre1, de l'amplificateur, du multiplexeur et de la fibre2.

Le signal de sortie de la fibre 1 présente une déformation lorsqu'on le compare avec le multiplexeur, qui est due à la réponse impulsionnelle de la fibre.

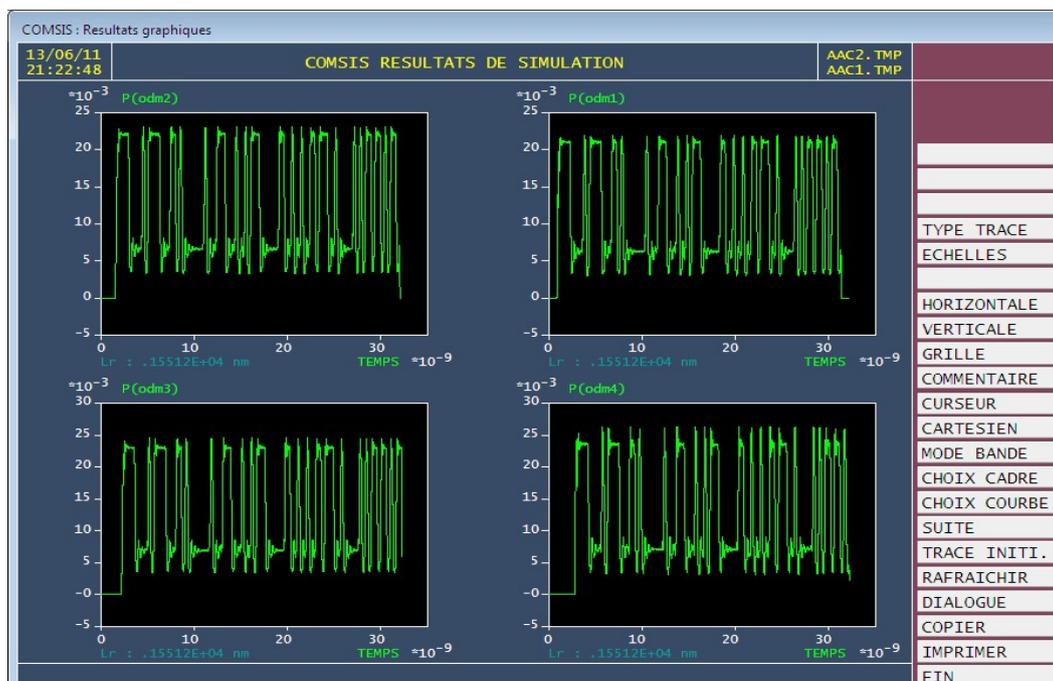


Figure III.23 : Puissance des sorties du démultiplexeur.

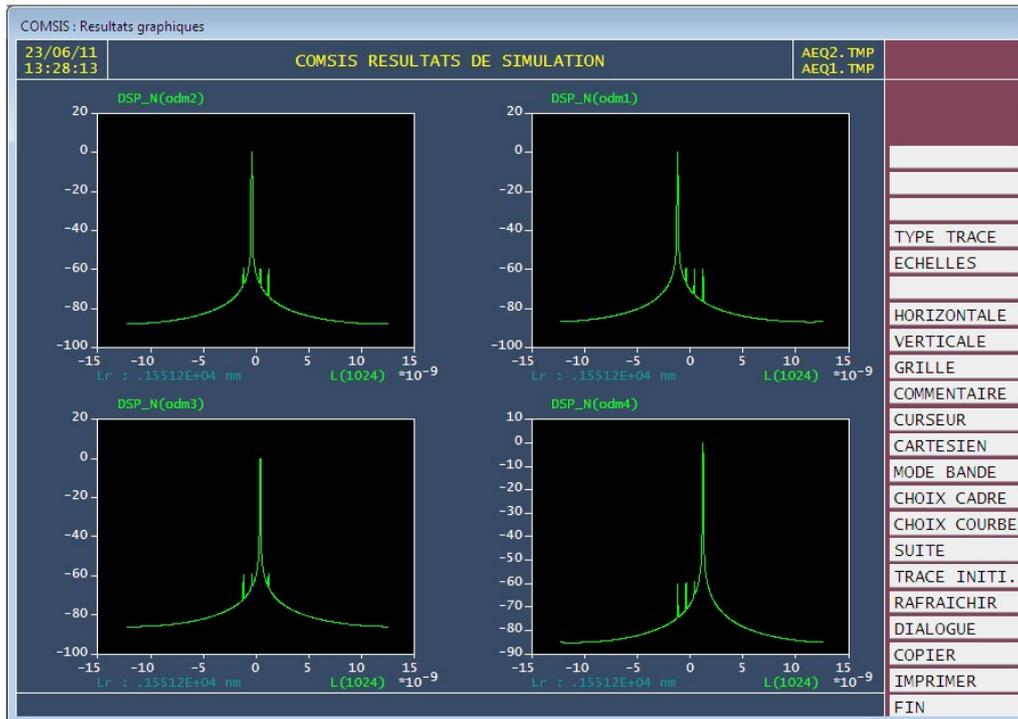


Figure III.24 : Densité spectrale des sorties du démultiplexeur.

On constate que les signaux comportent des raies secondaires, ce qu'on appelle le bruit des canaux adjacents.

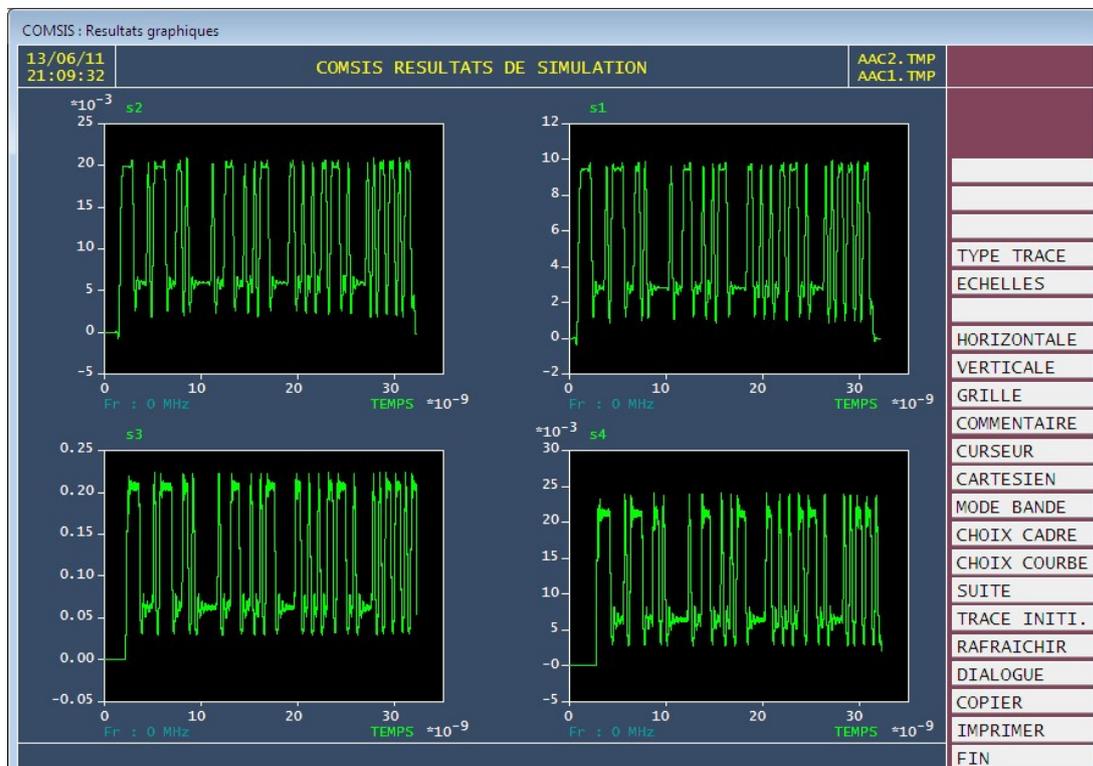


Figure III.25 : Réponse temporelle des sorties.

Les signaux des sorties S₂ et S₄ ont subi une dégradation due à l'atténuation de la fibre, les modules de l'émission et de la réception et les pertes de connexions. Par contre l'amplificateur a compensé ces pertes pour les sorties S₁ et S₃.

Les sorties S₃ et S₄ comportent un bruit accumulé dans les blocs précédents de la liaison. Par contre le filtre a minimisé ce bruit dans les sorties S₁ et S₂.

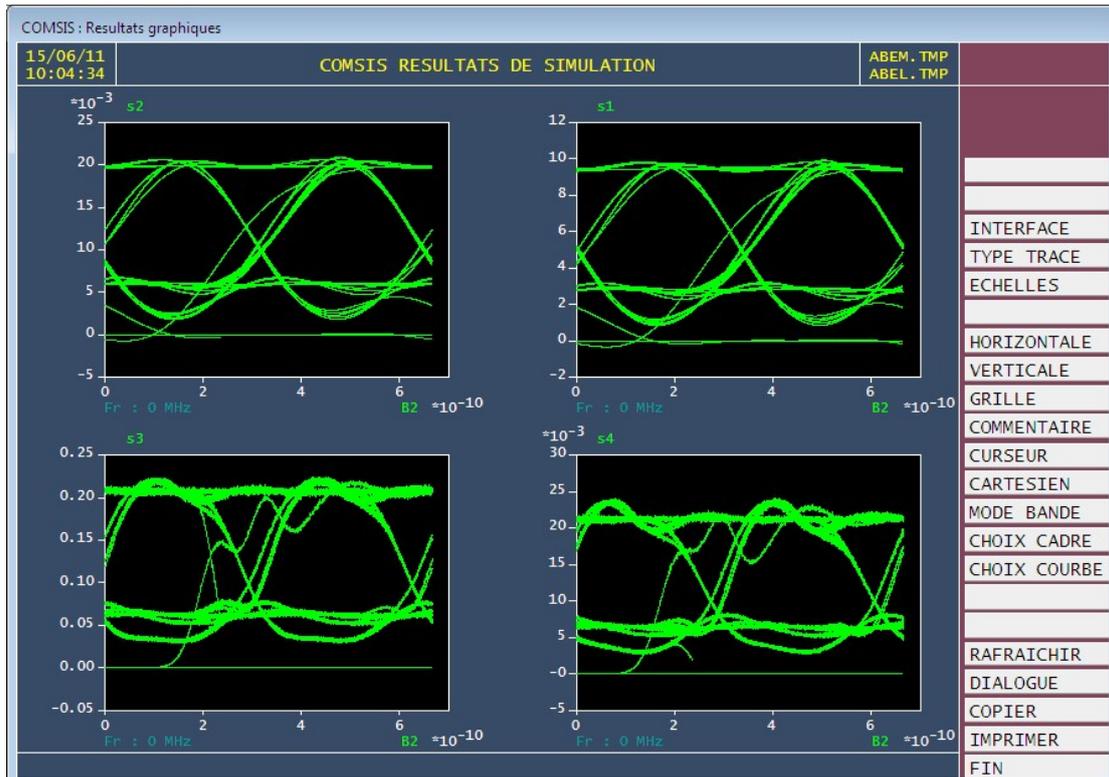


Figure III.26 : Diagramme de l'œil des sorties.

La figure III.26 montre que la sortie S₁ présente le meilleur signal après le filtrage et l'amplification. Le filtrage du signal S₂ permet d'éliminer le bruit mais il est atténué. En revanche le signal S₃ est amplifié avec le bruit à cause de l'absence du filtre. Sans amplification et filtrage, le signal S₄ a subi une dégradation.

Les sorties	Facteur Q	TEB
S ₁	6.34	0.120 e-9
S ₂	6.30	0.570 e-8
S ₃	5.60	0.112 e-7
S ₄	4.48	0.682 e-6

Tableau III.1 : Facteur Q et TEB des sorties de la liaison de l'étude comparative.

III.3.2.2 Influence de la longueur de la fibre sur la qualité de la liaison

Comme on a vu précédemment, la sortie S_1 est la meilleure parmi les quartes sorties, pour cela on va l'utiliser dans cette liaison et on va étudier le signal de sortie en fonction de la longueur de la fibre gardant le débit constant à 3Gbits/s. On prend la même longueur pour les deux morceaux de fibre.

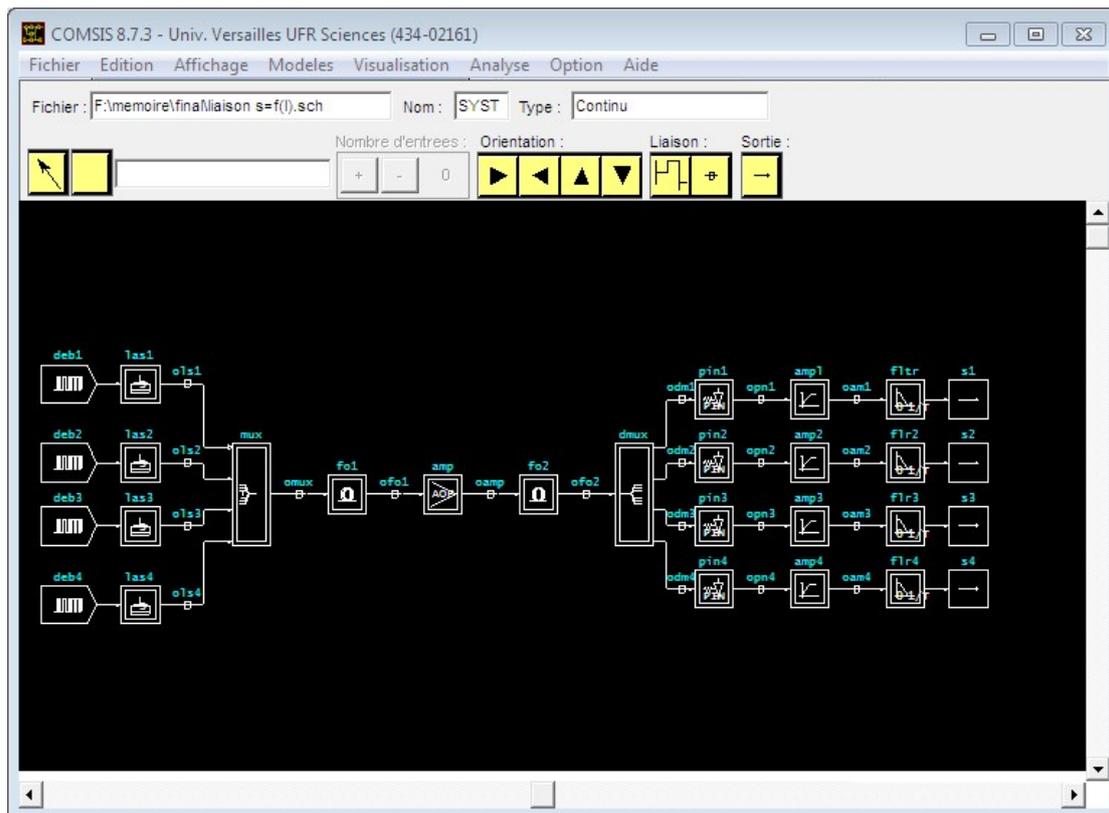


Figure III.27 : Schéma bloc de la liaison présentant l'influence de la longueur de fibre.

a. Une liaison de 10km

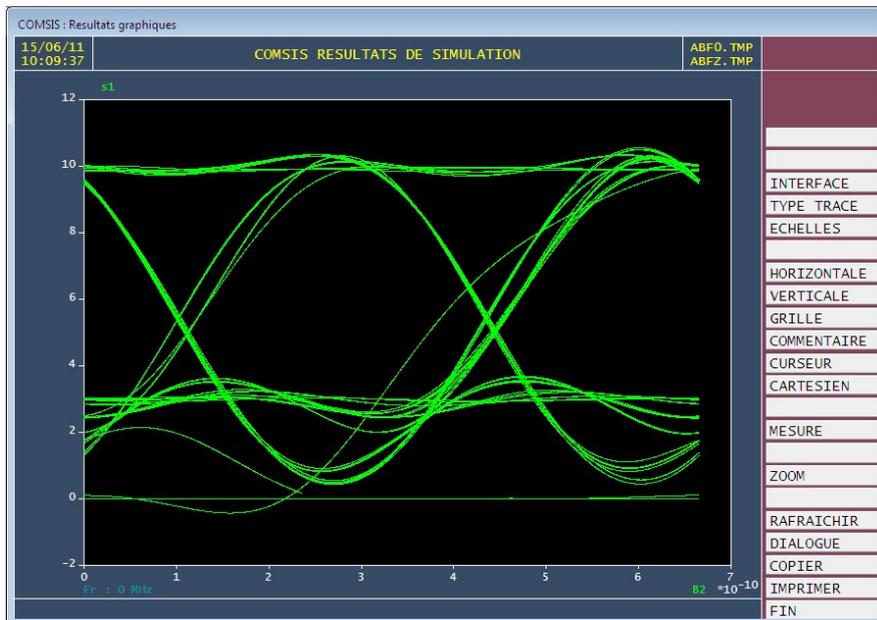


Figure III.28 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=10km.

b. Une liaison de 50km

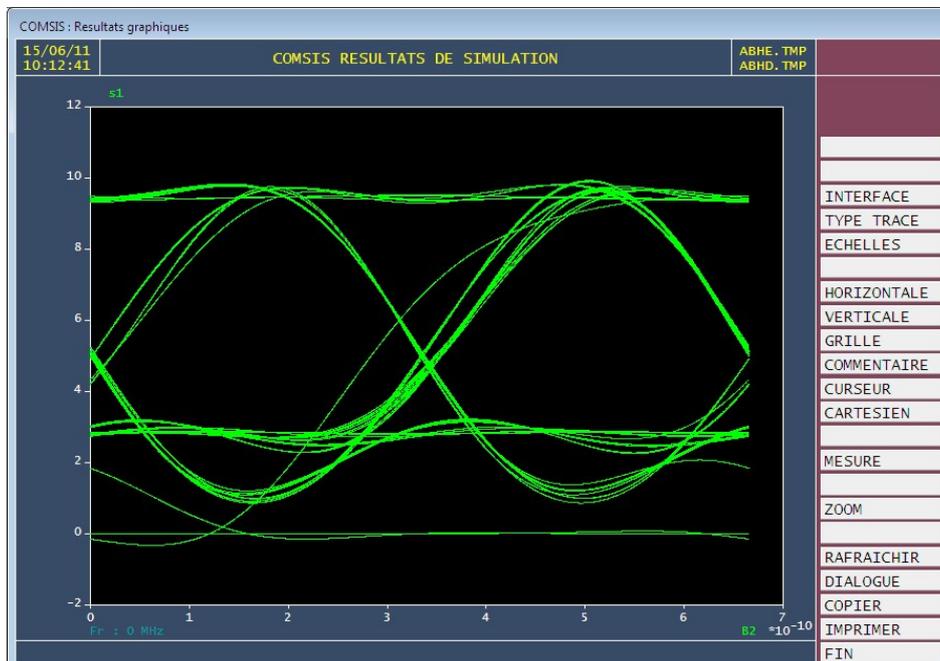


Figure III.29 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=50km.

c. Une liaison de 100km

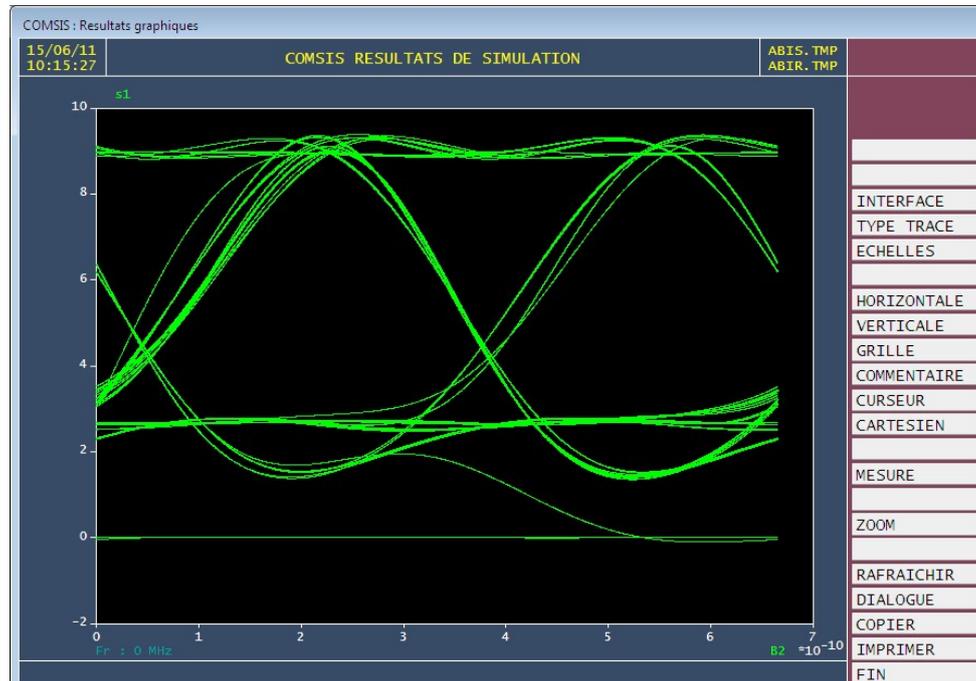


Figure III.30 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=100km.

Longueur L (km)	Facteur Q	TEB
10	6.82	0.460 e-11
50	6.30	0.153 e-9
100	5.43	0.299 e-7

Tableau III.2 : Facteur Q et TEB pour différentes longueurs de la fibre

A partir de ces trois figures et avec l'analyse du facteur Q et du TEB, on remarque que le signal de sortie a subi une déformation lors de l'augmentation de la longueur de la fibre, et l'ouverture verticale du diagramme de l'œil diminue à cause de l'interférence inter-symboles.

III.3.2.3 Influence du débit sur les caractéristiques de la liaison

Dans cette simulation, on va étudier le signal de sortie S_1 en fonction du débit en fixant la longueur de la liaison à 25 Km.

a. Une liaison de 1 Gbits/s

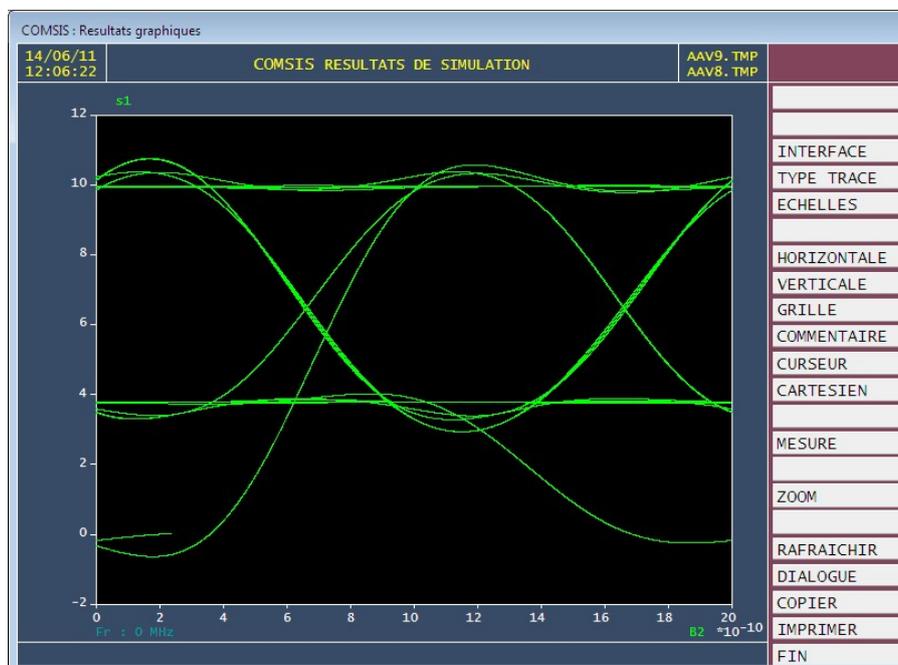


Figure III.31 : Diagramme de l'œil de la sortie s_1 pour $d=1\text{Gbits/s}$.

b. Une liaison de 3 Gbits/s

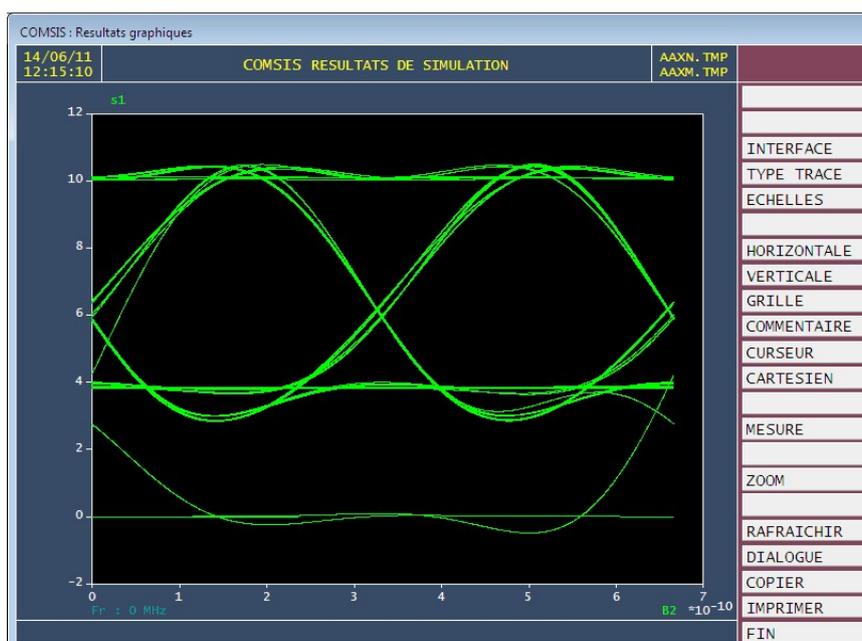


Figure III.32 : Diagramme de l'œil de la sortie s_1 pour $d=3\text{Gbits/s}$.

c. Une liaison de 5 Gbits/s

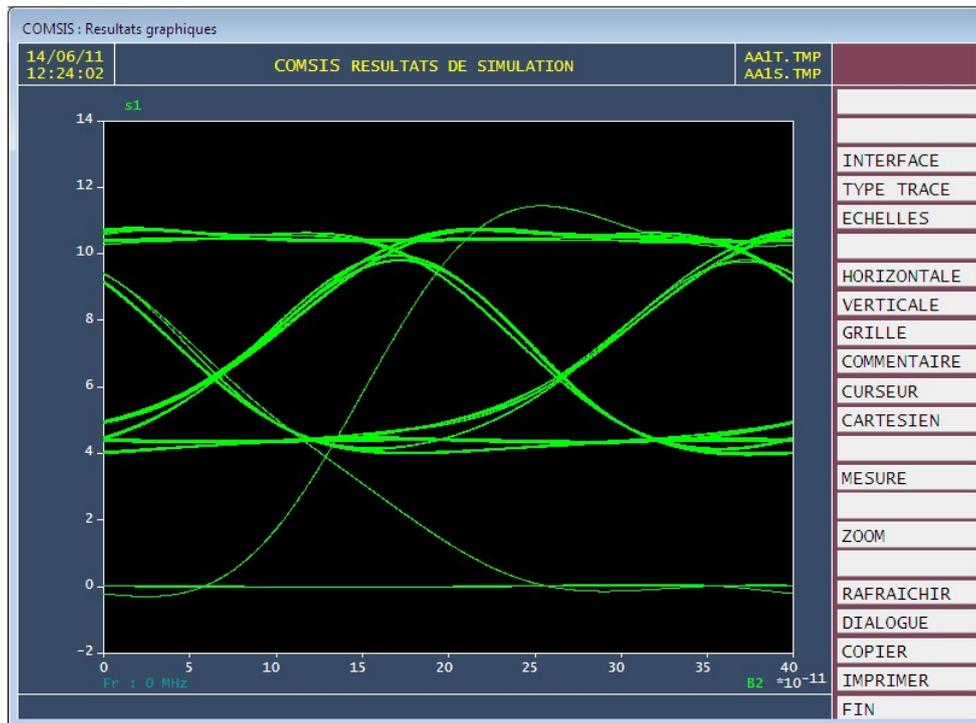


Figure III.33 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=5Gbits/s.

Débit (Gbits/s)	Facteur Q	TEB
1	7.14	0.471 e-12
3	6.33	0.311 e-9
5	5.51	0.189 e-7

Tableau III.3 : Facteur Q et TEB des différents débits

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

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre et à l'aide de COMSIS nous avons mis en évidence des lignes de transmission par fibre optique. Pour cela nous avons commencé par une analyse statique d'un amplificateur optique puis on a simulé une liaison avec des circuits de sortie différents. En suite on a étudié l'influence de la longueur de la fibre et du débit sur la qualité de la liaison.

Le logiciel COMSIS devenu aujourd'hui un outil important pour des études sur plusieurs domaines, citant par exemple les communications optiques, GSM...

Liste des figures :

1	Figure I.1: Structure d'une fibre optique.	2
	Figure I.2: principe de propagation du signal dans une fibre optique.....	2
	Figure I.3: Dispersion intermodale dans une fibre multimode à saut d'indice.	3
	Figure I.4: Profil d'une fibre multimode à gradient d'indice.	3
	Figure I.5: Profil d'une fibre monomode à saut d'indice.	4
	Figure I.6: Atténuation spectrale d'une fibre optique.	5
	Figure I.7: Dispersion matériau dans la silice pure en fonction de la longueur d'onde.	6
	Figure I.8: Courbes de dispersion de quelques fibres optiques.	7
	Figure I.9: Décalage temporel entre les composantes orthogonales du signal optique dû à une biréfringence aléatoire de la PMD.	9
	Figure I.10: Mécanismes fondamentaux de fonctionnement d'une diode laser.	10
	Figure I.11: Structure d'un laser classique Fabry-Pérot.	11
	Figure I.12: structure d'un laser DFB.	11
	Figure I.12: Structure d'un laser DBR.	12
	Figure I.13: Structure d'une diode laser à cavité verticale émettant par la surface (Typiquement VCSEL à 850 nm).	12
	Figure I.14: Coupe transversale d'une photodiode PIN.	14
	Figure I.15: Configuration d'un amplificateur optique a fibre dopée à l'erbium avec Pompage optique.	16
	Figure I.16 : Saturation du gain ; a) Puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée ; b) Gain en fonction de la puissance d'entrée en dBm.	17
	Figure (II.17) Rendements maximaux de pompage des amplificateurs pour différentes longueurs de pompage.	18
	Figure I.16: Multiplexeur/Démultiplexeur.	19
	Figure I.17 : Réponses fréquentielles du filtre théorique et du filtre pratique de Nyquist.	20
	Figure I.18 : Modèle de simulation de l'amplificateur électrique.	20
	Figure II.1: Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps.	23

Figure II.2: Représentation d'un multiplex TDM (4 voies vers 1) en fonction des données initiales.	24
Figure II.2: Schéma du multiplexage OTDM.	24
Figure II.3: Schéma du multiplexage ETDM.	25
Figure II.4: Schéma de principe du multiplexage ETDM dans les communications par fibre optique.	25
Figure II.5: Multiplexage fréquentiel.	26
Figure II.6: Schéma de principe du multiplexage WDM.	27
Figure II.7: RIN aux hautes fréquences du laser en fonction de son courant de polarisation et de la puissance optique émise.	30
Figure II.8 : Représentation schématique des densités de probabilités et du seuil de décision.	34
Figure II.9 : Courbe représentant la relation entre le taux d'erreur binaire et le facteur Q. ...	35
Figure II.10 : Exemple de diagramme de l'œil.	36
Figure II.11 : Représentation graphique de quelques interprétations d'un diagramme de l'œil.	37
Figure II.12 : Schématisation du calcul du rapport Signal à Bruit d'un système.	39
Figure II.13 : Comparaison des méthodes d'évaluation des performances des systèmes dans COMSIS.	41
Figure II.14: Schématisation d'une liaison optoélectronique.	42
Figure III.1 : L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS.	47
Figure III.2 : Puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée.	50
Figure III.3: Variation du gain en fonction de la puissance d'entrée.	51
Figure III.4 : Variation du gain en fonction de la longueur d'onde pour une puissance d'entrée variant dans l'intervalle [-50, 10] dBm.	52
Figure III.5 : Puissance spontanée amplifiée en fonction de la longueur d'onde pour une puissance d'entrée variant dans l'intervalle [-50, 10] dBm.	53
Figure III.6 : Spectre du gain en fonction de la longueur de la fibre amplificatrice.	54

Figure III.7 : Spectre de la puissance d'ESA en fonction de la longueur.	55
Figure III.8 : Spectre du gain en fonction de la longueur d'onde pour le rayon du cœur de la fibre amplificatrice variant entre 0.1 et 5 μm	56
Figure III.9 : Spectre du gain.	57
Figure III.10 : Schéma bloc de la liaison d'étude comparative.	58
Figure III.11 : Paramètres du courant laser.	59
Figure III.12 : Paramètres du laser système.	60
Figure III.13 : Paramètres du multiplexeur.	61
Figure III.14 : Paramètres de fibre optique.	62
Figure III.15 : Paramètres d'amplificateur optique.	63
Figure III.16 : Paramètres du démultiplexeur.	64
Figure III.17 : Paramètres de la photodiode.	64
Figure III.18 : Paramètres de filtre.	66
Figure III.19 : Paramètres d'amplificateur.	65
Figure III.20 : Réponse temporelle des courants lasers.	66
Figure III.21 : Puissance des lasers.	66
Figure III.22 : Densité spectrale des sorties de fibre1, amplificateur, multiplexeur et fibre2..	67
Figure III.23 : Puissance des sorties de démultiplexeur.	67
Figure III.24 : Densité spectrale des sorties du démultiplexeur.	68
Figure III.25 : Réponse temporelle des sorties.	68
Figure III.26 : Diagramme de l'œil des sorties.	69
Figure III.27 : Schéma bloc de la liaison présentant l'influence de la longueur de fibre.....	70
Figure III.28 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=10km.	71
Figure III.29 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=50km.	71
Figure III.30 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=100km.	72
Figure III.31 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=1Gbits/s.	73
Figure III.32 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=3Gbits/s.	73

Figure III.33 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=5Gbits/s.74

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Exemples de caractéristiques de quelques fibres optiques.4

Tableau III.1 : Facteur Q et TEB pour les sorties de la liaison d'étude comparative.69

Tableau III.2 : Facteur Q et TEB pour les différentes longueurs de la fibre.72

Tableau III.3 : Facteur Q et TEB pour les différents débits.74

Conclusion générale

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

Les performances des systèmes des communications optiques haut débit et longue distance se trouvent influencées par l'atténuation et dispersion chromatique de la fibre optique. Des solutions proposées sont apparues sur le marché après un inventaire de quelques-uns de ces modèles, l'EDFA répond parfaitement aux besoins de l'étude.

Les améliorations que l'on peut attendre se situent d'abord dans l'exploitation du maximum de bande passante de la fibre. Pour cela, on retrouve les deux axes déjà mentionnés : augmentation du nombre de canaux et augmentation du débit par canal.

Cependant, la conception de nouveaux systèmes, toujours plus performants, est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances d'une liaison est important. Aussi, les outils de simulation sont de plus en plus utilisés, dans notre cas nous avons utilisé le logiciel COMSIS. Ils permettent des gains de temps et d'argent en évitant les expérimentations itératives sur des démonstrateurs de systèmes.

Ce travail nous a permis d'une part, de nous familiariser avec le logiciel COMSIS et d'autre part de mener un certain nombre de simulations élémentaires. Nos premiers pas ont été lents et difficiles mais tout de même concluants par rapport aux résultats obtenus à l'issue de premières semaines. On avait pour ambition de simuler des liaisons longues distances et haut débit avec le multiplexage en longueur d'onde et de réaliser la liaison simulée en coopération avec le CA (centre d'amplification) et

le CEL (centre d'entretien des lignes) de Blida, mais la réalisation n'était pas possible à cause du manque de moyens. L'obstacle majeur qu'on a rencontré pendant la préparation de ce projet était le temps, puisqu'on n'a pas pu accéder au logiciel à temps comme on l'avait espéré, donc on ne l'a pas encore bien maîtrisé.

En bref notre objectif final n'a pas été totalement atteint malgré tous nos efforts et certains résultats satisfaisants ont été obtenus.