

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد حطاب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

BOULILA Rachid

&

HAOUCHE Salim

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option Réseaux & Télécoms

Thème

Etude des différents multiplexages dans les liaisons par fibre optique

Proposé par : NACER Saïd

Année Universitaire 2011-2012

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 m'a aidée de loin ou de près.

BOULILA Rachid.

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 ma fiancée, et à ses parents.
- A mes amis et toute personne qui m'a aidée de loin ou de près.

HAUCHE Salim. .

Remerciements

Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail.

Nous remercions vivement notre promoteur Mr –NACER SAÏD pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant notre étude et réalisation de ce projet.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du présent travail.

Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant tout, trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation de Master dans les meilleures conditions.

RACHID & SALIM

ملخص:

تحتاج الأنظمة البصرية إلى تكنولوجيا غالباً ما تكون معقدة ومتخصصة، ولهذا فمن الضروري تحديد المكونات والتنبؤ بالأداء قبل تجسيد هذه الأنظمة.

وفي هذا العمل قمنا بدراسة مختلف أنماط تعدد الإرسال المستعمل في شبكة الألياف البصرية. وكتطبيق، قمنا بإظهار نوعين من هذه الأنماط وهما (WDM و ETDM) باستعمال برنامج المحاكاة COMSIS. والنتائج المتحصل عليها تم إظهارها ومناقشتها.

كلمات المفاتيح: الروابط البصرية؛ تعدد الإرسال؛ المحاكاة.

Résumé :

Les systèmes optiques font appel à une technologie souvent très complexe et pointue. Il s'avère nécessaire de pouvoir prédire les performances et choisir les composants avant la réalisation d'un système, et ceci par l'utilisation de logiciel de simulation performants.

Dans ce travail, nous avons étudié les différents types de multiplexages utilisés dans les liaisons par fibres optiques. Comme application, nous avons simulé deux types de multiplexages (WDM et ETDM) par le logiciel COMSIS, et les résultats obtenus sont présentés et interprétés.

Mots clés : liaisons optiques; multiplexages; simulations.

Abstract:

Optical systems use a technology often very complex and specialized. It is necessary to predict performance and select the components before the realization of a system. Case studies are performed using simulation software (COMSIS).

In this work, we have study different type of multiplexing use in the link by optical fiber. Like application, we have simule two types of multiplex (WDM and ETDM), by softwore COMSIS, the result abtain were present and interpret.

Keywords: optical link; multiplex; simulation.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 principales caractéristiques de la source optique.	5
Tableau 1.2 caractéristiques Souhaitables de la source optique.	5
Tableaux 1.3 Caractéristique de diodes électroluminescentes	9
Tableau 1.4 Comparaison entre DEL et DL.....	10
Tableau 1.5 Comparaison entre fibre monomode et multimode	16
Tableau 2.1 Les débits standards de PDH	49
Tableau 2.2 Les débits standards de SDH	49
Tableau 3.1 Facteur Q et TEB des différents débits	72
Tableau 3.2 Facteur Q et TEB pour différentes longueurs de la fibre	74

Liste des figures

Figure 1.1	Liaison optique point à point	3
Figure 1.2	phénomène d'absorption, d'émission spontané et d'émission stimulée.	7
Figure 1.3	spectre d'émission d'une DL.....	7
Figure 1.4	Code RZ.....	12
Figure 1.5	Code NRZ.	12
Figure 1.6	Code Manchester.	13
Figure 1.7	Structure d'une fibre optique.....	14
Figure 1.8	principe de propagation du signal dans une fibre optique.	14
Figure 1.9	Schéma d'une fibre multi-modes à saut d'indice.....	15
Figure 1.10	Schéma d'une fibre multi-modes à gradient d'indice.....	16
Figure 1.11	Schéma d'une fibre monomode.....	16
Figure 1.12	Phénomène d'atténuation.	17
Figure 1.13	Atténuation spectrale d'une fibre optique.....	18
Figure 1.14	Phénomène de dispersion	18
Figure 1.15	Dispersion modale.....	19
Figure 1.16	Dispersion chromatique	20
Figure 1.17	Configuration d'un amplificateur optique a fibre dopée à l'erbium avec Pompage optique.....	21
Figure 1.18	Multiplexeur/Démultiplexeur.	21
Figure 1.19	Schéma de bande d'énergie pour photodiode à jonction polarisée en inverse.....	22
Figure 1.20	photodiode PIN.....	23
Figure 1.21	structure d'une photodiode à avalanche APD.	24
Figure 1.22	Courbe représentant la relation entre le taux d'erreur binaire et le facteur Q	28
Figure 1.23	Exemple de diagramme de l'œil.....	29
Figure 1.24	Représentation graphique de quelques interprétations d'un diagramme de l'œil.	30
Figure 1.25	Schématisation du calcul du rapport Signal à Bruit d'un système	31

Figure 1.26 Comparaison des méthodes d'évaluation des performances des systèmes dans COMSIS.	33
Figure 2.1 Réseau local à répartition en longueur d'onde.	35
Figure 2.2 Répartition des sous-bandes dans le cas d'un multiplexage WDM.	36
Figure. 2.3 Schéma de principe du multiplexage WDM.	36
Figure 2.4 Courbe de transmission d'un filtre dichroïque (0,8/1,3 μm)	38
Figure 2.5 Courbe de transmission d'un filtre Fabry-pérot.....	38
Figure 2.6 Répartition des périodes dans le cas du TDM	41
Figure 2.7 Représentation d'un multiplex TDM (4 voies vers 1) en fonction des données Initiales.....	42
Figure 2.8 Réseau local à répartition temporelle	42
Figure 2.9 Synoptique d'un multiplexage OTDM.	43
Figure 2.10 Système d'émission optique OTDM pour N utilisateur.....	44
Figure 2.11 Le système de multiplexage OTDM pour 4 utilisateurs.	45
Figure 2.12 La réception du système OTDM.	46
Figure 2.13 Schéma de principe du multiplexage ETDM dans les communications par fibre optique.	46
Figure 2.14 L'émission du système ETDM pour N utilisateurs.....	47
Figure 2.15 Réception du système ETDM.....	48
Figure 2.16 Position de SDH dans le Modèle OSI.	49
Figure 2.17 Diagramme du codage des données d'un utilisateur.....	50
Figure 2.18 Différentes techniques OCDM.....	51
Figure 2.19 Chaîne de transmission en CDMA.	51
Figure. 2.20 Multiplexage fréquentiel.....	53
Figure 3.1 L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS.	56
Figure 3.2 Le menu d'analyse de COMSIS.	58
Figure 3.3 L'écran de visualisation des résultats de COMSIS.	59
Figure 3.4 Fenêtre d'évaluation des performances.	60
Figure 3.5 Fenêtre des variables et prétraitements à visualise.....	61
Figure 3.6 Schéma bloc de la liaison WDM.	62
Figure 3.7 Paramètres du courant laser	63
Figure 3.8 Paramètres du laser système.	63

Figure 3.9 Paramètres du multiplexeur.....	64
Figure 3.10 Paramètres de fibre optique	65
Figure 3.11 Paramètres de l'amplificateur optique	66
Figure 3.12 Paramètres du démultiplexeur.....	66
Figure 3.13 Paramètres de la photodiode.....	67
Figure 3.14 Paramètres du filtre	67
Figure 3.15 paramètre de l'amplificateur radio	67
Figure 3.16 Réponse temporelle des courants lasers.	68
Figure 3.17 Densité spectrale des sorties de fibre1, amplificateur, multiplexeur et fibre2	68
Figure 3.18 Réponse temporelle des sorties.	69
Figure 3.19 Diagramme de l'œil des sorties (s1, s2, s3, s4).....	69
Figure 3.20 Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=500Mbits/s.....	70
Figure 3.21 Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=700Mbits/s.....	70
Figure 3.22 Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=800Mbits/s.....	71
Figure 3.23 Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=1Gbits/s.....	71
Figure 3.24 Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=10km.	72
Figure 3.25 Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=50km.	73
Figure 3.26 Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=70km.	73
Figure 3.27 Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=80km.	74
Figure 3.28 Schéma bloc de la liaison ETDM.....	75
Figure 3.29 Paramètres Séquence-binaire-aléatoire.....	76
Figure 3.30 Paramètres Codeur-RZ-binaire.....	76
Figure 3.31 Paramètres Convertisseur courant-tension	77
Figure 3.32 paramètre multiplexeur et Démultiplexeur électrique.....	77
Figure 3.33 paramètre Détection-seuils.....	77
Figure 3.34 paramètre Décodeur-RZ-binaire	78
Figure 3.35 Réponse temporelle de la séquence binaire aléatoire.....	78
Figure 3.36 La puissance du laser.....	79
Figure 3.37 Réponse temporelle des sorties.	79
Figure 3.38 Diagramme de l'œil des sorties (s1, s2, s3, s4).....	80

Introduction générale

La grande quantité d'informations véhiculées à travers le monde a donné naissance, depuis quelques années, à un besoin croissant en débit de transmission dans les systèmes de télécommunications. De nombreux services et applications multimédia se sont développées, et nécessitent aujourd'hui d'importantes capacités de transmission. Un besoin d'autant plus important que les informations échangées grâce à ces applications (données, téléphonie sur voix IP, vidéo,...) ont souvent besoin d'être transmises simultanément, par multiplexage. Ces systèmes ont permis d'accroître les débits de transmission grâce à des techniques de multiplexage en longueur d'onde (WDM), en code (CDM), ou encore en temporel (TDM).

La révolution technologique va se produire avec l'apparition du multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing), multiplexage par répartition de temps TDM (Time Division Multiplexing) et multiplexage par répartition de code CDM (Code Division Multiplexing) qu'ont amené donc une multiplication par un facteur considérable de la capacité du réseau.

L'intérêt principal de ces techniques, qui ont fait leur popularité, est de pouvoir réutiliser la fibre déjà installée, ce qui n'entraîne pas de surcoût pour de nouvelles infrastructures.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous rappelons les notions de base importantes sur la transmission optique (émission, transmission et réception), ainsi que les critères de qualité.

Le deuxième chapitre, présente les différentes techniques de multiplexages (WDM, DWDM, U-DWDM, TDM, CDM).

Le troisième chapitre est une partie expérimentale de notre projet, dans lequel nous avons simulées les techniques de multiplexages WDM et ETDM avec le logiciel **COMSIS**.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion.

Chapitre 1 La liaison optique

1.1 Introduction

Les systèmes de communication à base de fibres optiques ont une conception similaire à n'importe quel système de communication classique.

L'information primaire que l'on veut transmettre à distance est convertie en un signal électrique qui, modulé (analogiquement ou numériquement) par un émetteur (Laser ou Diode Electroluminescente) est convertie en un signal optique. Le signal émis par la source est ensuite injecté dans la fibre où il se propage avec une certaine atténuation et une certaine distorsion. Ces deux phénomènes se traduisent par une limitation de la longueur de la liaison au-delà de laquelle se détériore. Le signal reçu est ensuite démodulé en un signal électrique par l'intermédiaire d'une photodiode (PIN ou à Avalanche).

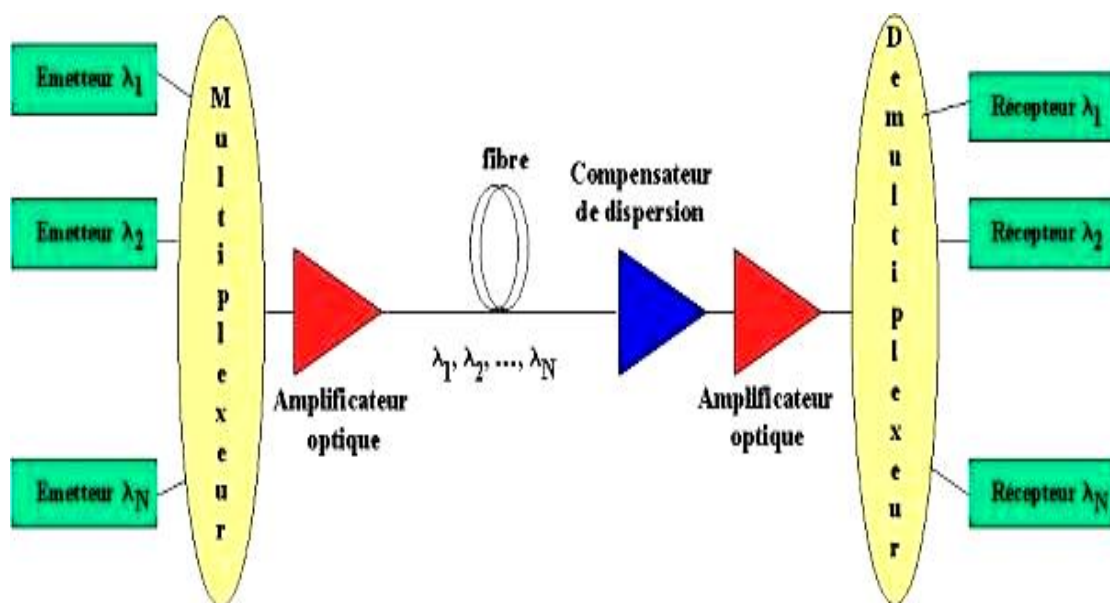


Figure 1.1 : Liaison optique point à point

Un système de transmission optique se compose de:

- ✓ Un émetteur.

- ✓ Un multiplexeur/démultiplexeur.
- ✓ Une ligne de transmission : composé par les fibres optiques et les amplificateurs optiques qui substituent les régénérateurs électriques.
- ✓ Un récepteur.

1.2 Emetteur optique [1] [2]

Dans un système de télécommunication utilisant une fibre optique comme un canal (support) de transmission par la lumière, on a besoin d'une source optique.

L'interface optique d'émission a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Il contient principalement le composant optoélectronique d'émission, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL). L'interface contient également des circuits d'adaptation et de protection ; il est relié au câble soit par une embase de connecteur, soit par une fibre amorce qu'il faut raccorder.

1.2.1 Sources [1]

Le système de télécommunication est d'autant plus performant que l'on peut transmettre une grande quantité d'informations à une grande distance.

Les deux tableaux suivant représentent les principales et Souhaitables caractéristiques requises pour les sources optiques de la télécommunication optique.

Caractéristiques principales	Conditions nécessaires	But
Longueur d'onde	Doit fonctionner à une longueur d'onde donnant faible atténuation et faible dispersion dans les fibres.	0,85 ; 1,3 ; 1,6 μ m
Fiabilité	Il faut une longue durée de vie, un fonctionnement bien stable et une bonne reproductibilité des caractéristiques de sortie.	Durée de vie =10 ⁶ h
Puissance de sortie	Il faut répondre aux demandes du système	1 mW
Rendement en puissance	Doit fonctionner avec une alimentation électrique à faible tensions ; les pertes par chaleur rayonnée doivent être faibles.	

Tableau 1.1: principales caractéristiques de la source optique.

Caractéristiques Souhaitables	Conditions nécessaires	But
Largeur spectrale (cohérence temporelle)	une largeur spectrale permettant d'obtenir la bande passante maximale de la fibre optique.	Le but doit être déterminé par l'échelle du système.
Effet de focalisation (diagramme de Rayonnement)	Il doit être possible de focaliser la sortie dans la fibre optique et d'obtenir un rendement de couplage élevé.	
Modulation	La modulation directe doit être possible ou bien une modulation extérieure doit être rendue facile.	
Coût	Production en série et faible coût sont souhaitables.	

Tableau 1.2 : caractéristiques Souhaitables de la source optique.

1.2.2 Les diodes laser

a caractéristique des diodes laser [1] [3] [4]

La diode laser à semi-conducteur est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre.

Les lasers à semi-conducteur sont constitués :

- D'un milieu amplificateur qui utilise la propriété d'émission stimulée de photons dans une jonction PN, où l'inversion de population entre les bandes de valence et de conduction est assurée par une injection de charges électriques.
- D'une cavité résonnante permettant de sélectionner les modes d'oscillation.

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

- L'absorption d'un photon incident. En absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de la bande de valence vers la bande de conduction.
- L'émission spontanée. La recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence, permet l'émission d'un photon.
- L'émission stimulée. Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident.

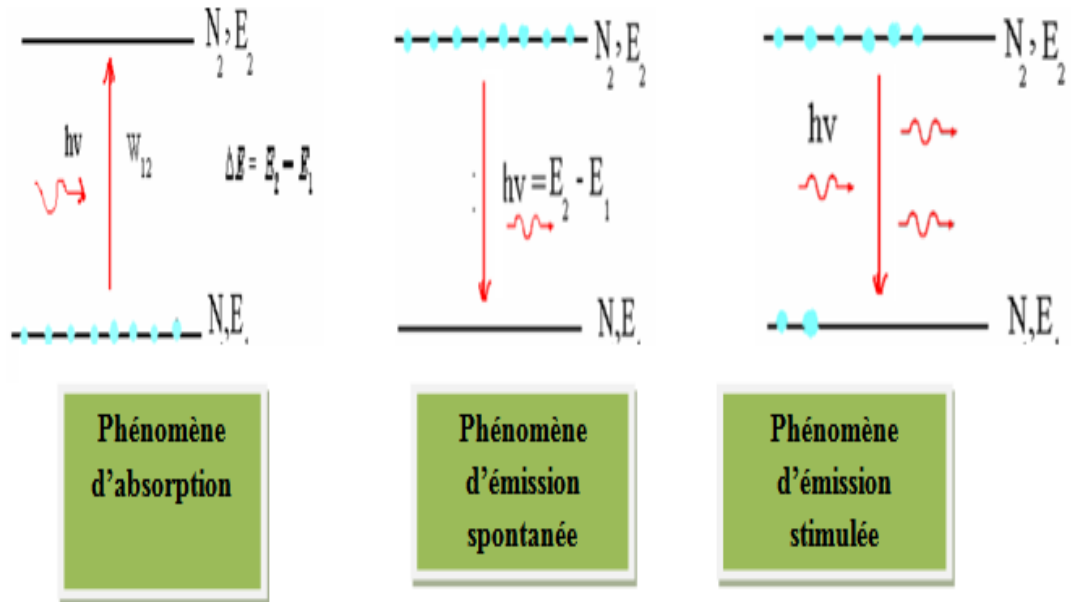


Figure 1.2:phénomène d'absorption, d'émission spontanée et d'émission stimulée.

Le laser (Light Amplification by Stimulated Emission Radiation) est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée. La diode laser possède les caractéristiques suivantes:

- La source DL est cohérente et monochromatique.
- Largeur de spectre étroite.
- Les émissions se font dans la même direction (diagramme de rayonnement directif).
- Utilisée dans les systèmes de transmission à grand distance.

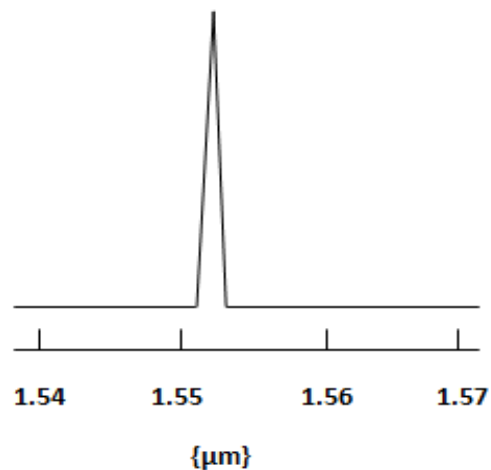


Figure 1.3: spectre d'émission d'une DL.

b Différents types de Laser à semi-conducteur

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

➤ ***Lasers Fabry-Pérot***

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.

➤ ***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.

➤ ***Lasers à Réflecteur de Bragg distribué (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 sont monomodes et leur longueur d'onde atteint les 1550 nm.

1.2.3 Les diodes électroluminescentes [2]

Une diode semi-conductrice qui émet de la lumière par émission spontanée, est appelée diode électroluminescente. La qualité de conversion du courant électrique en lumière est décrite par le rendement quantique, qui désigne le rapport entre le nombre de photons émis par unité de temps et le nombre de charges transportées à travers la jonction-PN de la diode semi-conductrice.

Les différentes caractéristiques des diodes électroluminescentes sont représentées dans Ce tableau

Caractéristiques	Type		
	IRED	PRED à haute Radiance	IRED à haute Radiance
Longueur d'onde (nm)	880 à 950	800 à 885	1300 à 1550
Largeur spectrale (nm)	50	45	100
Matériaux semi-conducteur	Ga As	Al Ga As Ga As	In Ga As P In P
Structure	Planaire	Double Hétérostructur	Double Hétérostructur
Emission	Spontanée	Spontanée	Spontanée
Temps de montée (ns)	20 à 100	5 à 20	5 à 20
Puissance lumineuse injectable dans une fibre optique ayant un diamètre de cœur de 50 μm (mW)	2	30 à 100	50 à 100
Débit numérique (Mbit/s)	5 à 10	30 à 100	50 à 200

Tableaux 1.3 : Caractéristique de diodes électroluminescentes :

1.2.4 Comparaison entre DEL et DL.

Ce tableau représente une comparaison entre les diodes électroluminescentes et les diodes laser.

Caractéristiques	DEL	DL
Coût	Moins chère	Plus chère
Durée de vie	Plus grande	Moins grande
Bande passante	Moins de 200MHZ	Plus de 1GHZ
Diagramme de rayonnement	Moins directif	Très directif
Puissance émise	Faible	Relativement moyenne
Spectre d'émission	Assez large	Plus étroit
Rendement de couplage	Faible	Plus grand

Tableau 1.4 : Comparaison entre DEL et DL

1.2.5 Modulateurs [4]

Un modulateur, c'est un système capable de modifier le paramètre de la lumière (essentiellement amplitude et –ou phase ; mais cela pourrait être : polarisation, direction de propagation, fréquence, répartition de modes, etc.) en fonction d'un signal de commande.

Un modulateur est un système d'interaction. Les interactions entre phénomènes physiques de nature différente - mécanique (ou élastique), acoustique, magnétique, etc. On peut moduler ces sources de deux manières différentes.

a Modulation directe

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

b Modulation externe

Le champ émis par la source n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial où l'on peut provoquer une modulation de phase ou d'amplitude. Les modulateurs d'amplitude ne présentent aucune propriété de linéarité mais introduisent beaucoup moins de conversion amplitude-fréquence. Le signal modulé envoyé dans la fibre est donc nettement moins affecté par ce phénomène mais également moins puissant que dans le cas de la modulation directe. Le principe physique utilisé dans ces modulateurs externes est soit la variation de l'indice de réfraction soit la variation de l'absorption (dispositifs à base de semi-conducteurs).

1.2.6 codage de la source [5]

La transmission de données en mode série consiste à émettre dans le temps une suite d'éléments binaires (bits) ayant pour valeur "0" ou "1". En mode série synchrone cette transmission s'effectue au rythme d'une horloge associée. Le codage de la source, c'est la représentation électrique de l'information binaire. Il existe de nombreux codes ayant chacun des propriétés bien précises.

D'une manière générale, le code utilisé est choisi en fonction du médium (lié à la densité spectrale de puissance du code) et de la technique de modulation employée (liée à la forme d'onde temporelle). Par exemple, les codes Biphase sont souvent utilisés pour les communications en bande de base (filaire) car leur énergie est nulle à la fréquence nulle, ce qui leur permet d'immuniser l'information transmise du bruit BF. Les codes NRZ, eux, sont préférés pour la modulation de phase car la multiplication du signal avec une porteuse produit directement des sauts de phase de 90°.

Parmi les codes les plus utilisés nous citerons les codes RZ, NRZ et Manchester. Pour l'ensemble des différents codes décrits, nous prendrons la même suite binaire afin de permettre la comparaison : 11010011.

a Codage RZ (Return to Zero)

Le format RZ nécessite une bande passante plus large (les impulsions sont plus courtes). Il permet une meilleure récupération de la fréquence horloge (d'avantage de transitions)

Le codage RZ code un 0 par -V et 0, un 1 par +V et 0.

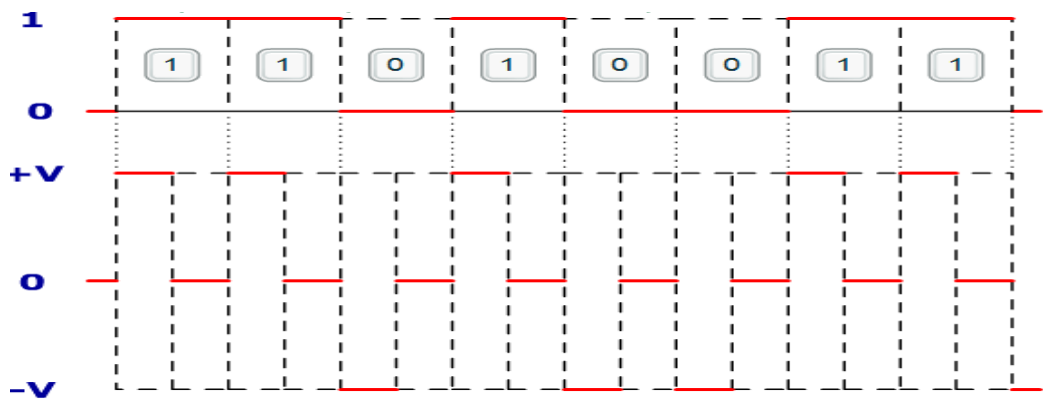


Figure 1.4 : Code RZ.

L'avantage de codage RZ est la présence front de synchronisation.

b Codage NRZ (Non Return to Zero)

Le codage NRZ très proche du codage binaire de base, il code un 0 par +V, un 1 par -V.

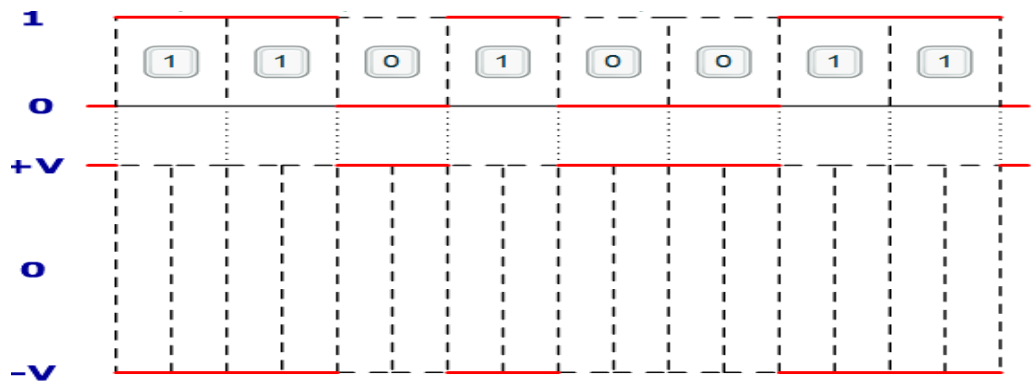


Figure 1.5 : Code NRZ.

Le Codage NRZ améliore légèrement le codage binaire de base en augmentant la différence d'amplitude du signal entre les 0 et les 1. Toutefois les longues séries de bits identiques (0 ou 1) provoquent un signal sans transition pendant une longue période de temps, ce qui peut engendrer une perte de synchronisation.

Le débit maximum théorique est le double de la fréquence utilisée pour le signal : on transmet deux bits pour un hertz.

c Codage Manchester

Dans le codage Manchester, l'idée de base est de provoquer une transition du signal pour chaque bit transmis. Un 0 est représenté par le passage de +V à -V, un 1 est représenté par le passage de -V à +V.

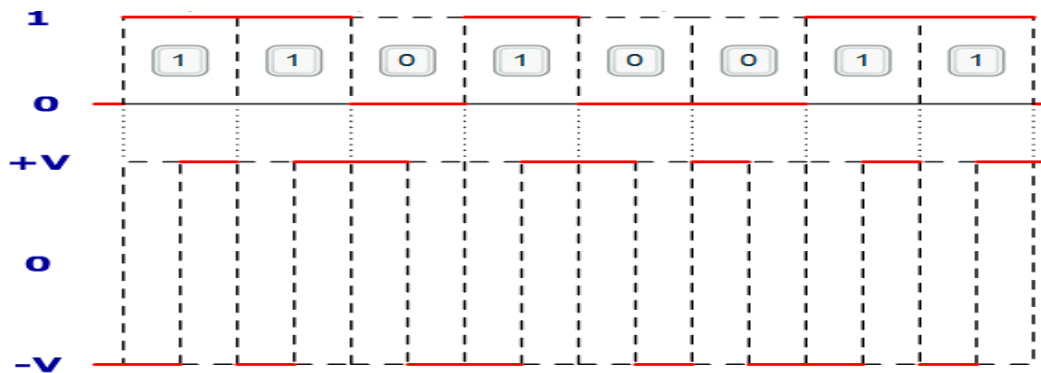


Figure 1.6 : Code Manchester.

La synchronisation des échanges entre émetteur et récepteur est toujours assurée, même lors de l'envoi de longues séries de 0 ou de 1. Par ailleurs, un bit 0 ou 1 étant caractérisé par une transition du signal et non par un état comme dans les autres codages, il est très peu sensible aux erreurs de transmission.

1.3 Ligne de transmission

1.3.1 la fibre optique

a 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.

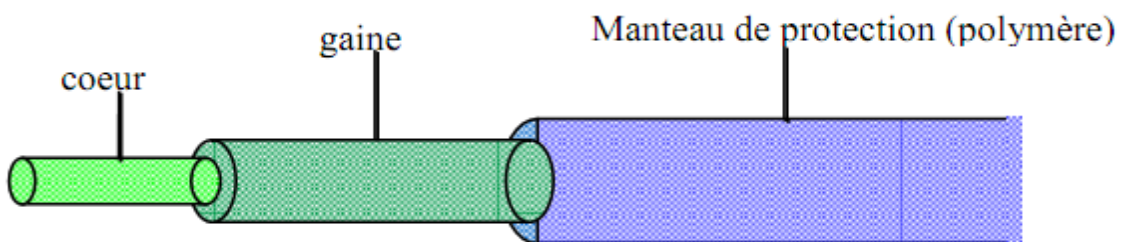


Figure 1.7 : Structure d'une fibre optique.

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. 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.

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad 1.1$$

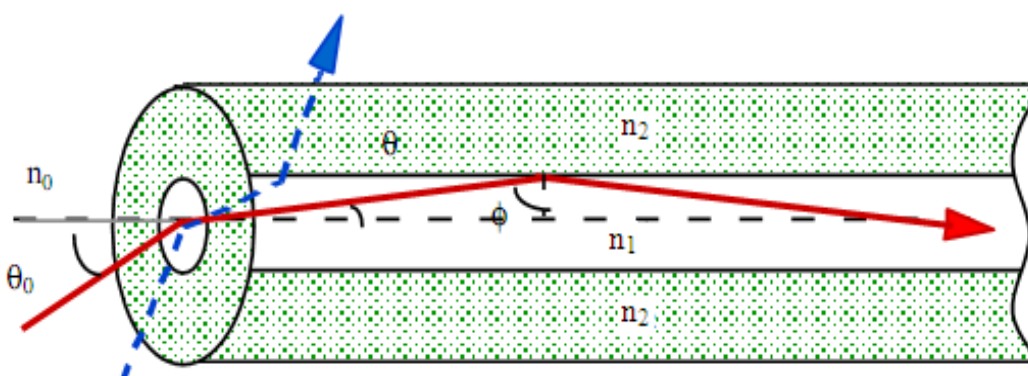


Figure 1.8: principe de propagation du signal dans une fibre optique.

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).

b Classification des fibres optiques

En fonction des indices et des diamètres du cœur, nous pouvons classer les fibres en deux catégories :

➤ **fibre optiques multi-modes**

Le diamètre du cœur des fibres optiques multi-modes varie de 25 μm à 100 μm et plus. Dans ce type de fibres optiques on distingue deux genres :

- **Fibres à saut d'indice**

C'est une fibre qui laisse propager plusieurs modes en zigzag, c'est-à-dire qu'ils subissent plusieurs réflexions multiples (totales) à l'interface cœur-gaine.

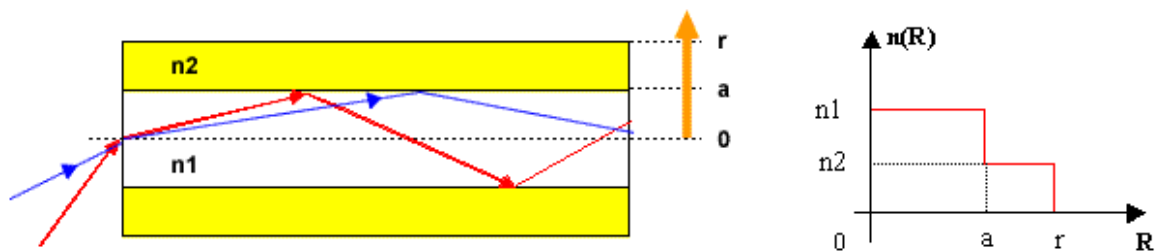


Figure 1.9 : Schéma d'une fibre multi-modes à saut d'indice

- **Fibres à gradient d'indice**

C'est une fibre optique qui permet la propagation de plusieurs modes, mais selon des trajectoires courbées, tels que les rayons lumineux oscillent autour de l'axe de la fibre.

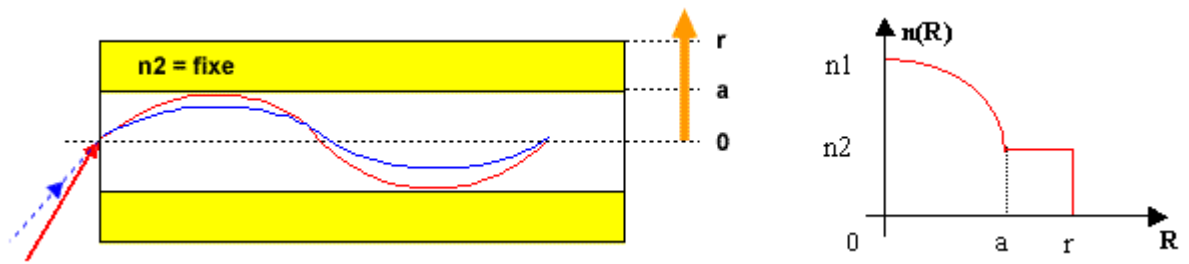


Figure 1.10: Schéma d'une fibre multi-mode à gradient d'indice.

➤ **fibre monomode**

Le diamètre du cœur de ces fibres varie de 5 μm à 8 μm . Dans ces fibres il y a un seul mode de propagation possible. Il s'agit du mode d'ordre zéro.

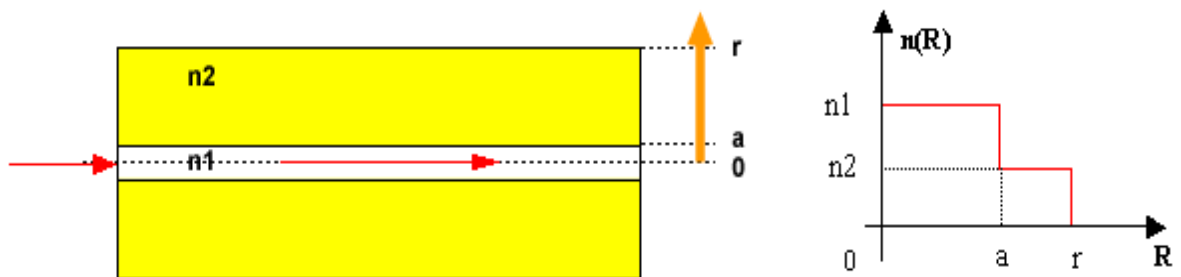


Figure 1.11: Schéma d'une fibre monomode

c Comparaison entre fibre monomode et multimode

Fibre	Monomode	Multimode
Dispersion	Faible	Forte
Connexion	Délicate	Facile
Atténuation	Faible	Forte
Utilisation	Haut débit, longue distance	Réseaux locaux

Tableau 1.5 : Comparaison entre fibre monomode et multimode

d Caractéristiques des fibres optiques

➤ **Atténuation**

C'est le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée. L'objectif de tout système de transmission et de transmettre une information le plus loin possible (atténuation la plus faible possible) avec la plus grande bande passante possible.

L'atténuation est une caractéristique qui a une double origine intrinsèque et extrinsèque.

L'atténuation intrinsèque est due principalement au matériau utilisé ainsi qu'aux impuretés qui s'y trouvent. L'atténuation extrinsèque est essentiellement due aux imperfections des techniques de fabrication ainsi qu'aux raccordements.

En effet lorsqu'on injecte une puissance lumineuse P_0 à l'extrémité d'une fibre, on ne récupère qu'une fraction P_{out} de P_{in} à l'autre extrémité. L'atténuation de la fibre est le rendement exprimé en décibel sous la forme :

$$A \text{ (dB)} = 10 \log (P_{in}/P_{out}) \quad 1.2$$

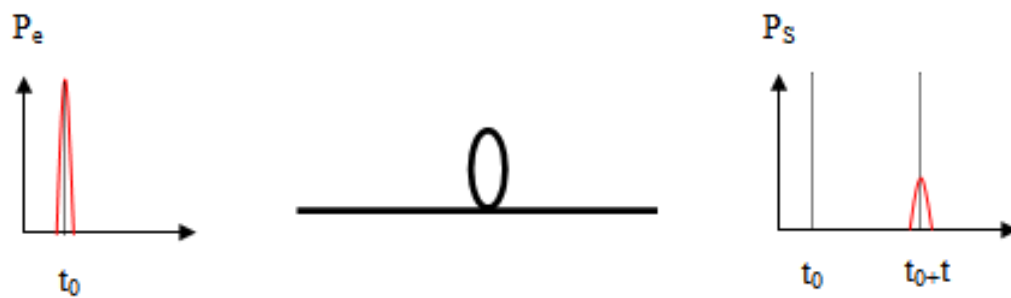


Figure 1.12: Phénomène d'atténuation.

Les causes des pertes dans les fibres sont multiples. On distingue généralement :

- L'absorption
- La Diffusion de RAYLEIGH
- Les Pertes par micro courbures
- Les Pertes par courbures
- Les Pertes de couplage (pertes par épissurage)
 - Pertes dues à la qualité des fibres à raccorder
 - Pertes dues à la préparation des fibres
 - Pertes de Fresnel

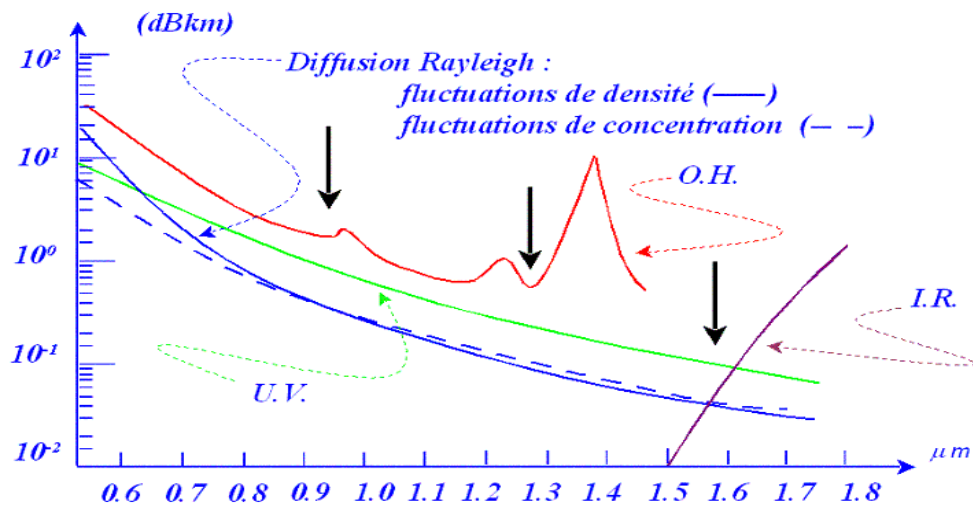


Figure 1.13 : Atténuation spectrale d'une fibre optique

➤ **Dispersion**

Le phénomène de dispersion se traduit par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation, cet élargissement limite la bande passante du canal de fibre optique.

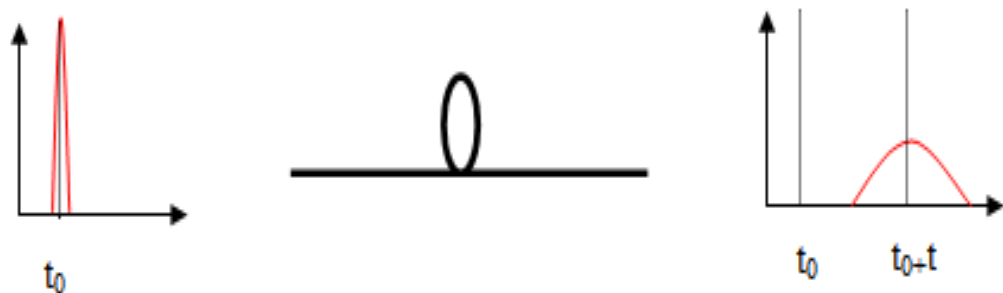


Figure 1.14: Phénomène de dispersion

Il existe deux types de dispersion :

- **La dispersion modale** [6]

Dans une fibre optique, les modes ne se propagent pas tous suivant les mêmes trajectoires. Les modes d'ordre faible sont pratiquement en ligne droite, alors que les modes d'ordre élevé subissent un grand nombre de réflexions.

$$\Delta T_m = \frac{L}{2n_1 c} \cdot (0. N)^2 \quad 1.3$$

ΔT_m : la dispersion modale

L : longueur de la fibre

n_1 : Indice de cœur de la fibre

c : vitesse de la lumière dans le vide

(0.N) : Ouverture numérique de la fibre

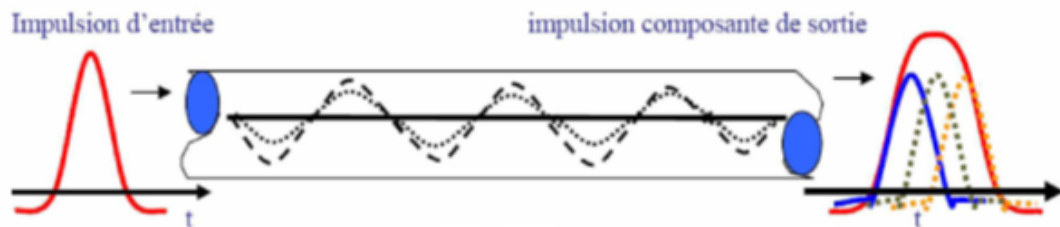


Figure 1.15: Dispersion modale

- **La dispersion chromatique**

Les sources de lumière ne sont jamais monochromatiques. la lumière émise par ces sources est constituée d'une somme d'ondes. Comme l'indice de réfraction des matériaux constituant la fibre varie avec la longueur d'onde. Donc un délai apparaît entre les différentes longueurs d'ondes en bout de fibre même si elles ont été injectées au même instant. Ce délai est ce qu'on appelle dispersion chromatique ΔT_c ou dispersion matériau.

$$\Delta T_c = -\lambda_0 \frac{\Delta \lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d \lambda^2} \cdot L \quad 1.4$$

λ_0 : Longueur d'onde centrale

$\Delta \lambda$: Largeur spectrale de la fibre

L : longueur de la fibre

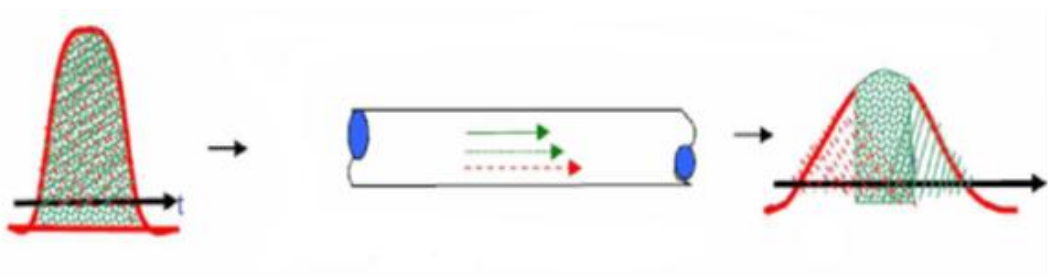


Figure 1.16 : Dispersion chromatique

1.3.2 Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (AFDE) [6]

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 doped 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 1.17 représente la configuration d'un de ces amplificateurs à fibre dopée.

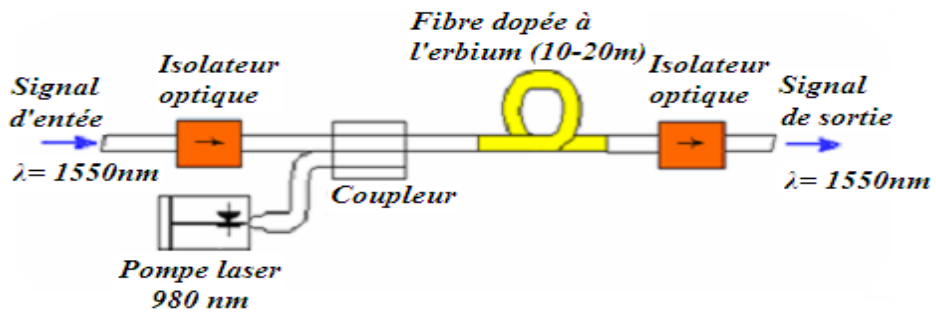


Figure 1.17 : Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec Pompage optique.

1.3.3 Multiplexeur/Démultiplexeur Optique [4]

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. 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.

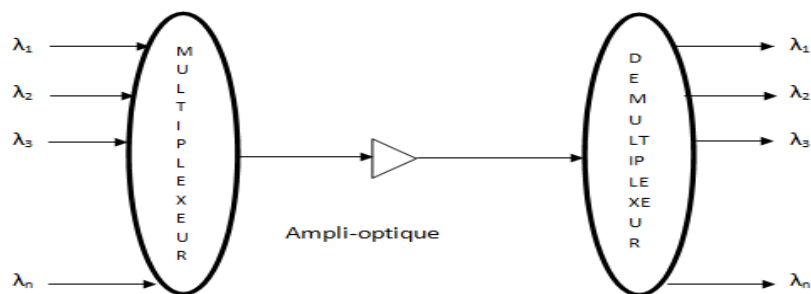


Figure1.18. Multiplexeur/Démultiplexeur.

1.4 Récepteur optique [3]

Dans un récepteur optique, le détecteur remplit la fonction de base de conversion du signal optique entrant en un signal électrique. Le reste du récepteur optique est responsable de l'amplification et, dans le cas de transmission numérique, de la régénération du signal soit pour la réception terminale, soit pour entraîner la phase suivante dans un récepteur optique.

1.4.1 principe de détection de base

L'énergie d'un photon est donnée par $h\nu$, « h » étant la constante de planck et « ν » fréquence de photon. Les photons qui ont une énergie $h\nu$ plus grande que la largeur de bande interdite E_g entrant dans le semi-conducteur et sont capables d'exciter les électrons de la bande valence à la bande de conduction. Ils atteignent la jonction ou sont créés dans la zone de charge d'espace, les électrons et les trous produits peuvent être balayés à travers le dispositif et créent un courant photoélectrique.

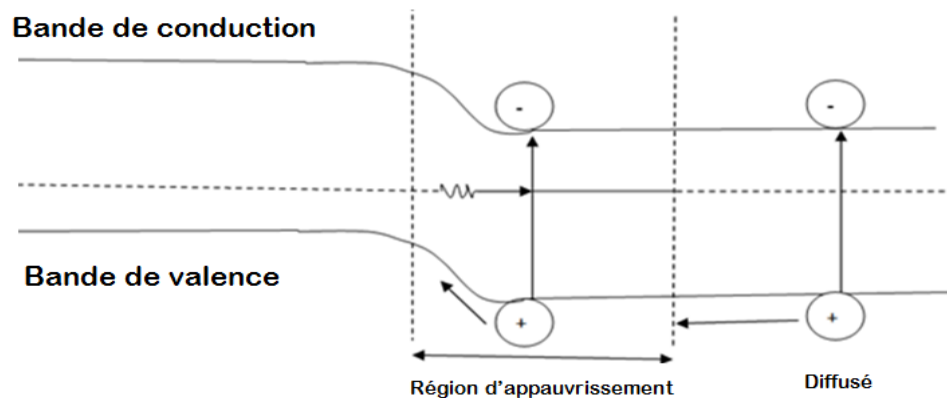


Figure 1.19 : Schéma de bande d'énergie pour photodiode à jonction polarisée en inverse

1.4.2 Le photo-détecteur [3]

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée reconverter le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par la photo-détecteur, 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 voire même 40 Gbits/s. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit.

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

Les photodiodes peuvent être classées en deux catégories : celles qui n'ont aucun gain interne PN et PIN, et celles qui ont un gain interne AVALANCHE (APD).

a Les 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.

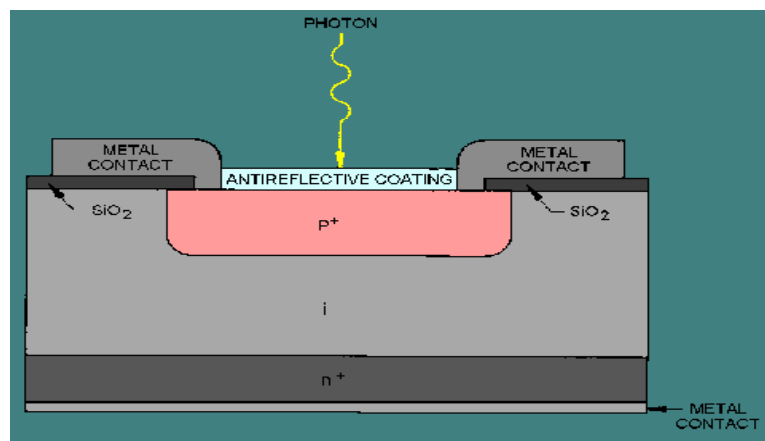


Figure 1.20: photodiode PIN.

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:

$$I_{ph} = S * P_{opt} + I_0 \quad 1.5$$

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 :

$$S = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q}{hc} \lambda \quad 1.6$$

I_0 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 ($I_0 < 10$ nA). En ce qui concerne le temps de réponse, les meilleurs photodétecteurs actuels sont utilisables jusqu'à plus de 100 GHz.

b APD (Avalanche Photo Diode)

Ce sont des composants semi-conducteurs qui réagissent à l'intrusion de photon dans la zone de jonction PN par le déclenchement d'une avalanche électronique. Ce phénomène crée un courant électrique conséquent à partir de très peu de Photon incident.

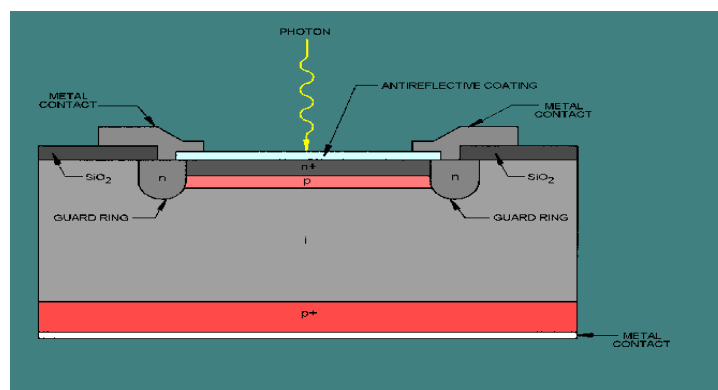


Figure 1.21: structure d'une photodiode à avalanche APD.

Les photos détecteurs de type APD présentent de meilleures performances à 2,5 et 10 Gb/s que les types PIN. Leur coût est également plus élevé. Néanmoins, pour les débits élevés à 40 Gb/s, des prototypes de photodiodes de type PIN surpassent les

types APD. Les types PIN Pourraient alors reprendre du terrain à ces fréquences sur le type APD.

1.4.3 Caractéristique d'un photo-détecteur

Le photo- détecteur est caractérisé par :

a Le rendement quantique

Il nous renseigne sur le taux de conversion des photons en paires électron-trous. Il est défini comme étant le rapport entre nombre d'électron créés (n_e), et le nombre de photon incident (n_p).

$$N_q = n_e / n_p \quad 1.7$$

b La longueur d'onde de coupure

Elle correspond à la longueur d'onde maximale λ_c qui peut être absorbée par un matériau donné.

$\lambda \leq \lambda_c \rightarrow$ Photon incident absorbé (création d'une paire électron-trou).

$\lambda > \lambda_c \rightarrow$ Photon incident non absorbé.

c La sensibilité

Elle caractérise le rendement global de conversion de la puissance lumineuse.

1.5 Critères de Qualité [7] [9]

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, 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.

1.5.1 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 est le nombre N nécessaire de bits à envoyer ou à simuler. Plus la probabilité d'erreur 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 :

$$TEB = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q_0}{\sqrt{2}} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q_1}{\sqrt{2}} \right] \quad 1.8$$

Où erfc est la fonction d'erreur corrigée :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt \quad 1.9$$

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).

1.5.2 Facteur Q [7]

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 :

$$Q_i = \left| \frac{D - \mu_i}{\sigma_i} \right| ; i = 0,1 \quad 1.10$$

μ_i : est la moyenne sur les niveaux i.

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 .

Lorsque les niveaux hauts et bas sont équiprobables, le TEB est défini en fonction du facteur de qualité par la relation 1.13.

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

$$D_{\text{opt}} = \frac{\sigma_1 \mu_0 + \sigma_0 \mu_1}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad 1.11$$

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

$$Q = \left| \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \right| \quad 1.12$$

$$TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \quad 1.13$$

Le TEB varie très vite en fonction de Q. La (Figure 1.22) représente bien cette forte évolution du TEB en fonction du facteur de qualité.

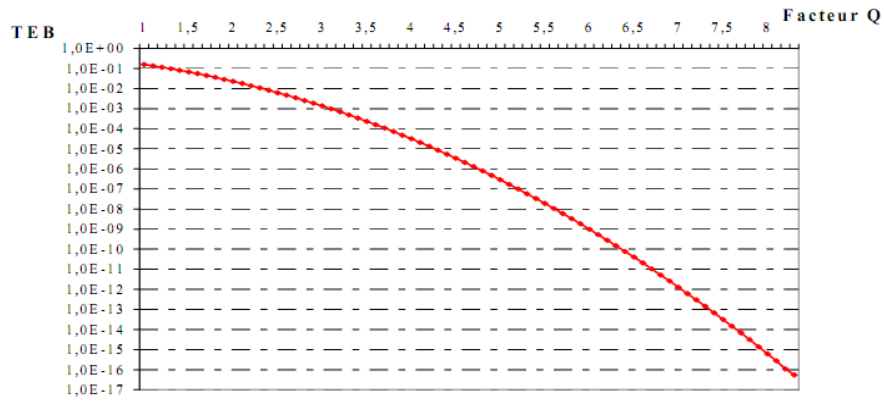


Figure 1.22: Courbe représentant la relation entre le taux d'erreur binaire et le facteur Q.

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

1.5.3 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 1.23) 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".

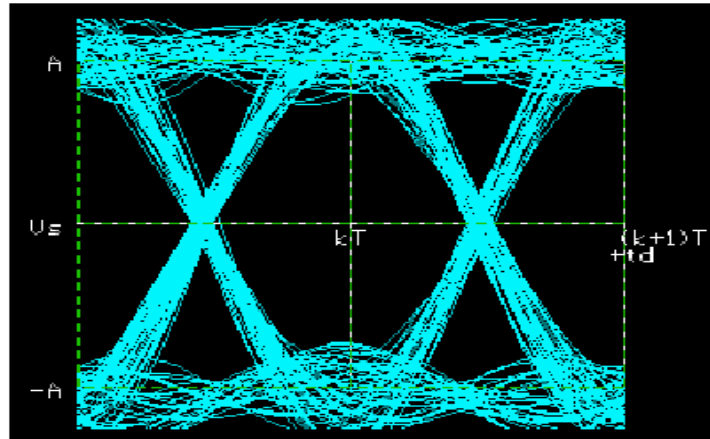


Figure 1.23 : Exemple de diagramme de l'œil.

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.

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.

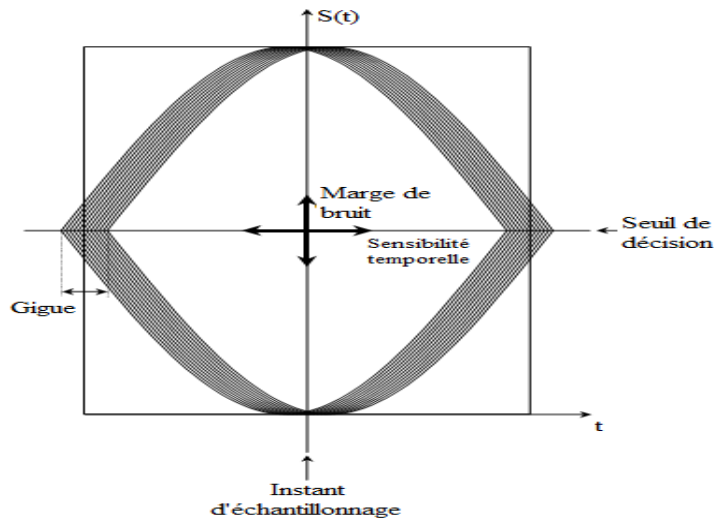


Figure 1.24: Représentation graphique de quelques interprétations d'un diagramme de l'œil.

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

1.5.4 Rapport signal à bruit [10] [11]

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),

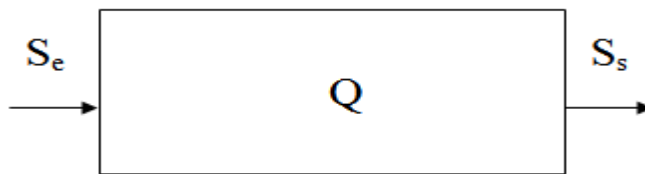


Figure 1.25: Schématisation du calcul du rapport Signal à Bruit d'un système

Alors, le rapport Signal sur Bruit, ou rapport Signal à Bruit, est noté également souvent SNR, de l'anglais Signal to Noise Ratio. Ce rapport permet d'estimer le degré de contamination du signal par le bruit. 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).

1.5.5 Comparaisons des critères [7] [8] [9]

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 :

- en 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 ;
- en 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. 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.

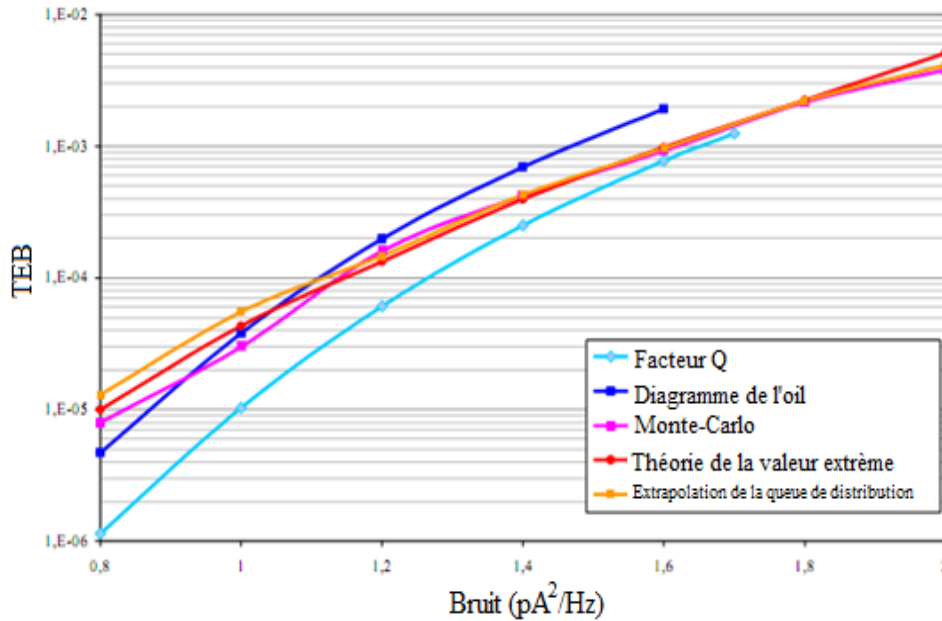


Figure 1.26 : Comparaison des méthodes d'évaluation des performances des systèmes dans COMSIS.

1.6 Conclusion

Ce chapitre contient une description détaillée de tous les composants utilisés dans notre système de transmission par fibre optique, ainsi que les critères de performances.

Les émetteurs optiques 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 comme l'atténuation. Il y a des solutions proposées pour les corriger (par exemple l'amplificateur EDFA). Le principe de la photodétection a également été rappelé, avec une description du Photodétecteur.

Les différents critères de performance ont été présentés, tels que le facteur de qualité Q et le taux d'erreur sur bit TEB, qui seront la base des mesures.

Chapitre 2 Les techniques de multiplexages

2.1 Introduction

La bande passante potentielle d'une fibre optique, définie comme la fenêtre sur laquelle l'atténuation reste suffisamment faible pour permettre la transmission, est très importante.

Elle est de 15 THz autour de chacune des fenêtres $1.55 \mu m$ et $1.3 \mu m$. Théoriquement, on peut atteindre des débits extrêmement élevés. Cependant, l'utilisation de cette capacité rencontre de nombreux problèmes, ne serait-ce que la dégradation due à l'interférence entre symboles provoquée par la dispersion de la fibre, qui devient de plus en plus importante lorsque le débit augmente, et le traitement électronique des signaux avant la modulation et après la détection.

C'est pourquoi diverses solutions ont été imaginées pour profiter des capacités de la fibre optique et donc augmenter le transfert d'informations sur un même support. Dans la plupart des cas, le principe reste identique : utiliser N signaux au débit nominal D équivalent en termes de capacité à un signal au débit $N \cdot D$: c'est ce qu'on appelle le multiplexage. Les débits transportés sont désormais plus importants. Le signal concentré des flux d'origines diverses est appelé signal multiplex.

Pour préserver l'intégrité de chaque signal sur le canal, le multiplexage introduit, entre les signaux, une séparation temporelle, spatiale ou fréquentielle.

2.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Multiplexing)

2.2.1 Principe de WDM [6]

Alors que les systèmes de transmission ne reposaient que sur l'utilisation du multiplexage temporel (ou TDM pour Time Division Multiplexing), pour la transmission de 155 Mb/s, 622 Mb/s, 2,5 Gb/s, 10 Gb/s, 40 Gb/s sur une seule longueur d'onde, une nouvelle génération de systèmes est apparue au début des années 90, mettant en œuvre le multiplexage de longueurs d'onde (ou WDM pour Wavelength Division Multiplexing).

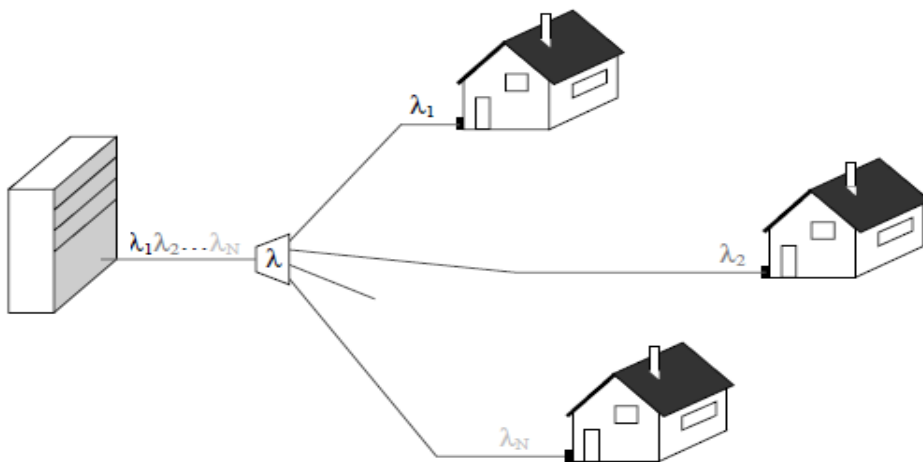


Figure 2.1. Réseau local à répartition en longueur d'onde.

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 démultiplie le signal global $n \times D$ en n canaux nominaux.

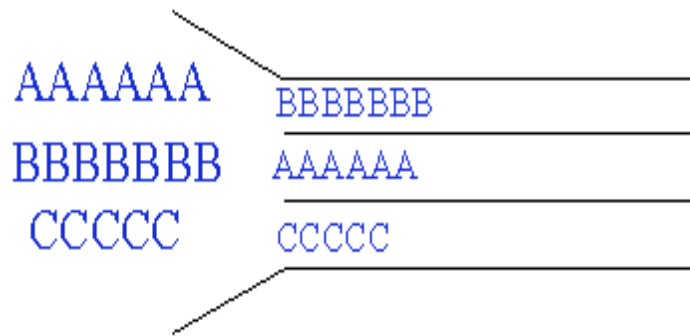


Figure 2. 2. Répartition des sous-bandes dans le cas d'un multiplexage WDM.

Les données émises par des sources optiques à longueurs d'ondes distinctes sont transmises simultanément sur la même fibre optique. Le débit total obtenu est la somme des débits de tous les utilisateurs.

À la réception, les données de chaque utilisateur sont extraites à partir des signaux multiplexés, par filtrage optique à la longueur d'onde correspondant aux données de l'utilisateur souhaité, avant d'être détectées pour le traitement dans le domaine électrique.

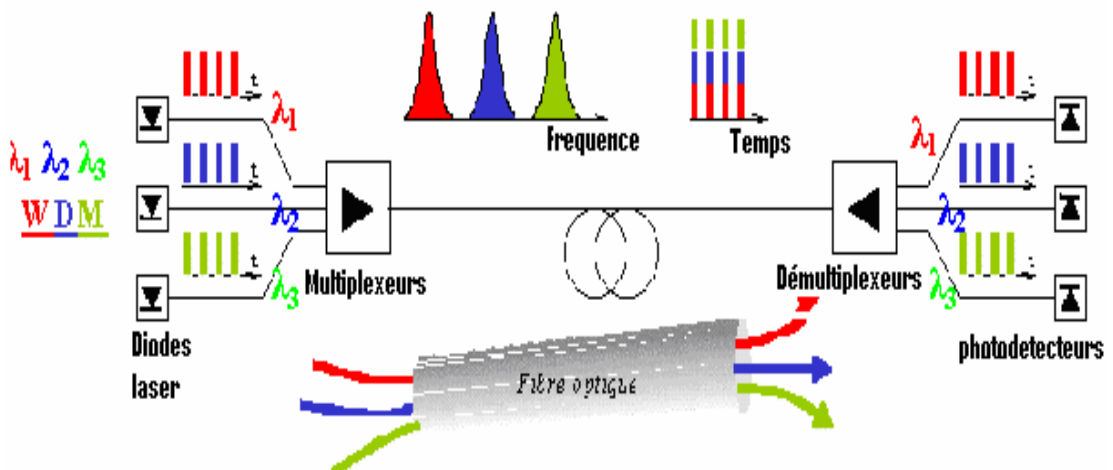


Figure. 2.3. Schéma de principe du multiplexage WDM.

Beaucoup de techniques d'extraction de longueur d'onde ont été développées dans ce sens, dont on citera principalement les réseaux de coupleur 3dB associés à des filtres Fabry-Perot, des réseaux de Bragg sur fibres et des circulateurs montés en cascade, ou encore les Phasars (Phased-Array demultiplexer).

2.2.2 Les technologies de multiplexage

On distingue trois techniques de multiplexages:

- Multiplexage à filtre optique.
- Multiplexage à coupleurs sélectifs.
- *Multiplexage à réseau de diffraction.*

a Multiplexage à Filtre Optique

Les filtres permettent la séparation spectrale en réfléchissant certain gamme de longueurs d'onde et en transmettant les autres. En effet Le filtrage a pour but de limiter l'occupation spectrale d'un signal. D'autre part Le multiplexage optique regroupe les signaux occupant des gammes de longueurs d'onde différentes tandis que la fonction réciproque le démultiplexage, permet de séparer des signaux occupant des bandes de longueurs d'onde différentes.

On caractérisera le filtre par sa bande passante, c-à-d le domaine de longueur d'onde dans lesquelles il laisse passer la lumière, et sa bande atténuée c'est-à-dire le domaine de longueur d'onde dans lesquelles il réfléchit la lumière incidente.

Deux types de filtre sont utilisés :

- **Les filtres dichroïques**

Ces dispositifs présentent un pic de réflexion à une longueur d'onde donnée. Il est possible d'accroître le domaine de réflexion en empilant des couches successives et d'obtenir ainsi des filtres passe haut et passe bas. Les filtres dichroïques sont donc constitués par un empilement des couches diélectrique d'indice alternativement haut et bas.

Le filtre est caractérisé par son coefficient de transmission T en bande passante, et son coefficient de réflexion R en bande atténuée.

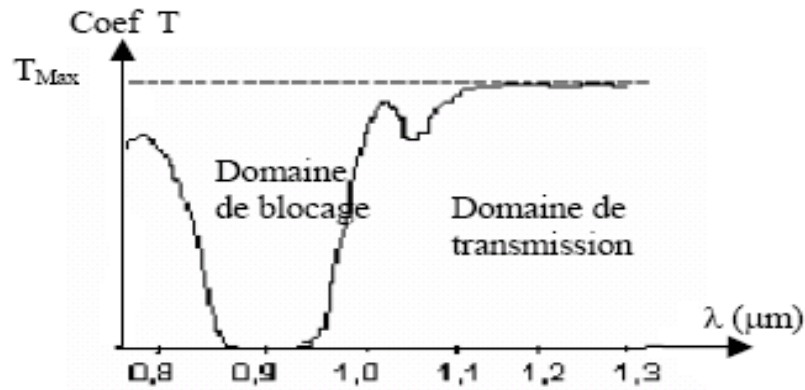


Figure 2.4. Courbe de transmission d'un filtre dichroïque (0,8/1,3 μm)

En générale les filtres passe haut ont des meilleures performances que les filtres passe bas, le coefficient de réflexion est supérieur à 99% et le coefficient de transmission est en pratique limité à des valeurs d'environ 95%. Pour obtenir ses performances, un contrôle précis des épaisseurs déposées s'impose. En pratique, on arrive à une séparation spectrale $\Delta\lambda > 0,05\lambda$ (soit 50nm à la longueur d'onde de 1μm).

$\Delta\lambda$: Largeur du domaine de transition entre tous les bandes.

- **Les filtres Fabry-Perot**

Ils ont une caractéristique de transmission passe bas, ils présentent un pic de transmission étroit autour d'une longueur d'onde λ_0 et les deux domaines spectraux adjacents sont réfléchis.

Pour accroître la raideur du filtre, on peut répéter l'empilement pour un assemblage deux ou trois cavités.

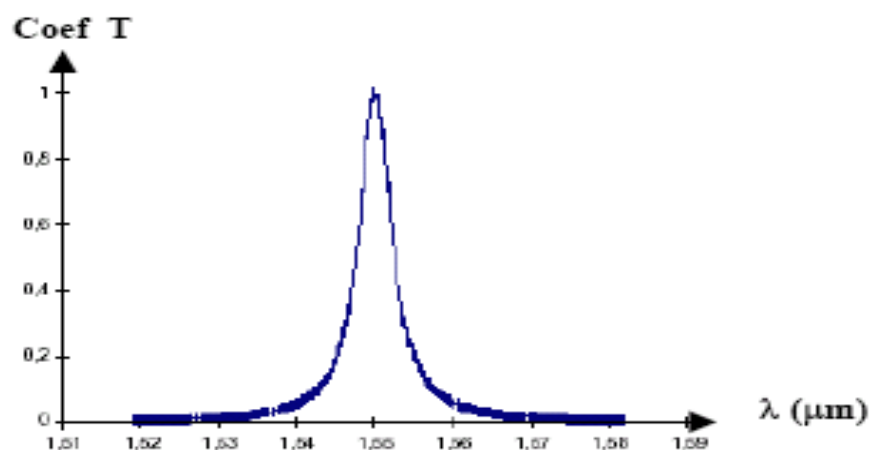


Figure 2.5. Courbe de transmission d'un filtre Fabry-pérot

Comme pour le filtre dichroïque, le coefficient de réflexion est supérieur à 99%, le coefficient de transmission peut atteindre 95%.

b Multiplexage à coupleurs sélectif

Le principe de ces composants est l'interaction cohérente entre deux guides optique, ils sont appelés les coupleurs de puissance, qui sont utilisés pour additionner ou diviser les signaux. Ils sont plus utilisés dans les systèmes multiplexés.

c Multiplexage à réseau de diffraction

Le réseau à l'avantage de traiter simultanément un grand nombre de voies à l'intérieur de la même fenêtre.

Un réseau se compose d'une surface optique qui transmet ou réfléchit la lumière et sur laquelle un grand nombre de traits sont gravés au diamant.

Le réseau à la propriété de renvoyer, séparer angulairement, les différentes longueurs d'ondes contenues dans un même faisceau incident. En vertu du principe de retour inverse de la lumière, le réseau peut combiner dans une même direction des faisceaux incidents séparés angulairement et des longueurs d'onde adéquates.

2.2.3 L'avenir du WDM

La capacité des systèmes de transmission à la multiplexage en longueur d'onde (WDM) à récemment augmenté d'une manière spéculaire, en raison notamment de la multiplication du nombre de canaux, toutefois pour atteindre des capacités encore plus grandes, il faudra augmenter le débit binaire par canal (de 10Gbits/s vers 40Gbits/s), rapprocher les canaux et élargir la bande passante optique exploitée.

Aujourd'hui, la technologie DWDM n'a pas encore atteint ses limites. De plus, de nouvelles techniques en cours de développement vont permettre à priori de multiplier encore plus les capacités des systèmes optiques. On peut citer :

- Des amplificateurs optiques à faible bruit, de grande puissance, à large bande.
- Une fibre optique optimisée et des techniques de gestion de la dispersion.
- la transmission soliton permettant le transport d'impulsions très étroites sur des milliers de kilomètres sans déformation, tout en conservant une bande passante très large.

- Des composants électroniques et optoélectroniques rapides pour les équipements émetteurs et récepteurs.
- La réduction de la dispersion en polarisation.
- Des modules de compensations de dispersion compatibles avec de larges bandes passantes optiques.
- Une technologie de traitement optique rapide pour la régénération 2R, 3R autorisant une régénération efficace mais peu coûteuse par comparaison avec les équipements d'émission-réception.
- Des équipements à très haut débit binaire mettant en oeuvre le multiplexage temporel électronique (ETDM) conjointement avec le multiplexage temporel optique (OTDM).
- Une nouvelle génération de technique de correction d'erreurs directe pour faciliter la transmission en présence de bruit.
- Des filtres optiques à forme d'amplitude et de phase bien définies pour un filtrage très étroit (plus étroit que la bande passante de canal WDM).

2.3 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)[6]

La technologie WDM est dite dense (DWDM) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 100 GHz. Des systèmes à 50 GHz (0,4 nm) et à 25 GHz (0,2 nm) permettent d'obtenir respectivement 80 et 160 canaux optiques.

2.4 U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing)[6]

Pour des espacements encore plus faibles, parlera de U-DWDM (Ultra-dence-Wavelength division Multiplexing) Ainsi des systèmes à 10 GHz (0.08 nm) permettent d'obtenir 400 canaux optiques.

2.5 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) [6]

En effet, dans les équipements CWDM, on peut utiliser des lasers non régulés en température, d'un coût moindre et qui émettent à des longueurs d'onde espacées de 20 nm dans la fenêtre de transmission 1270-1610 nm. CWDM fait l'objet de la recommandation ITU-T G.695 qui prévoit des solutions souples et modulables, notamment la solution de 8 à 16 canaux optiques avec deux fibres (une pour chaque sens de transmission), offrant des débits de 1,25 Gb/s à 2,5 Gb/s par canal. Cependant, les systèmes CDWM n'étant pas compatibles avec les amplificateurs optiques, sont limités en portée. Deux longueurs de liaison indicatives sont spécifiées dans la recommandation G.695 : jusqu'à 40 Km et jusqu'à environ 80 Km, ce qui est généralement suffisant pour les besoins des réseaux métropolitains.

2.6 Multiplexage à répartition temporelle MRT (TDM : Time Division Multiplexing) [14]

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

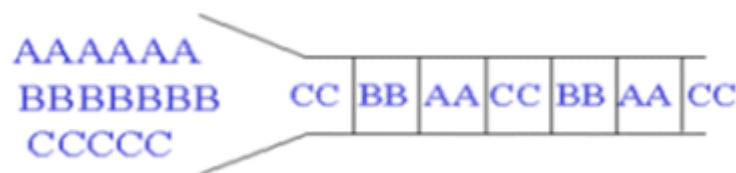


Figure 2.6. Répartition des périodes dans le cas du TDM

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

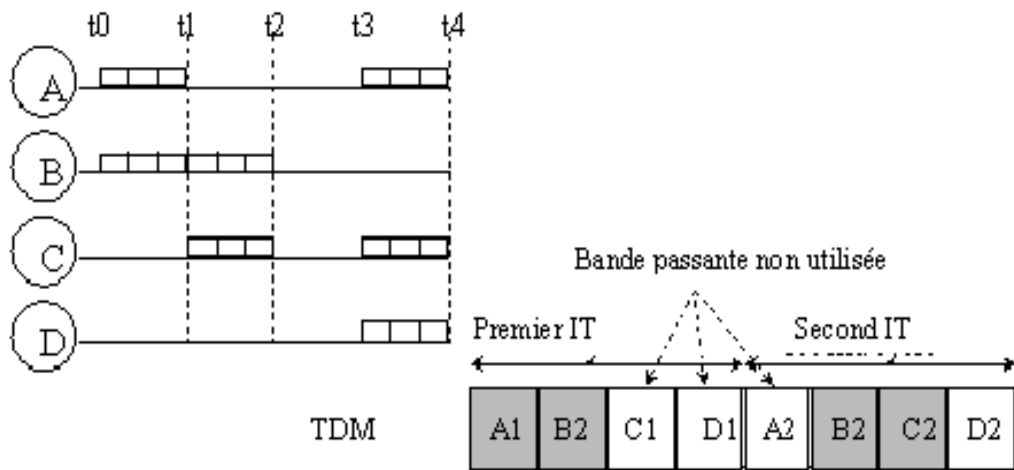


Figure 2.7 Représentation d'un multiplex TDM (4 voies vers 1) en fonction des données Initiales.

La méthode TDM est basée sur la répartition des ressources en temps. Les utilisateurs partagent la même bande passante et émettent les données dans les différents intervalles de temps ou « slot » qui leur sont alloués. Le récepteur effectue l'opération du démultiplexage pour récupérer les données.

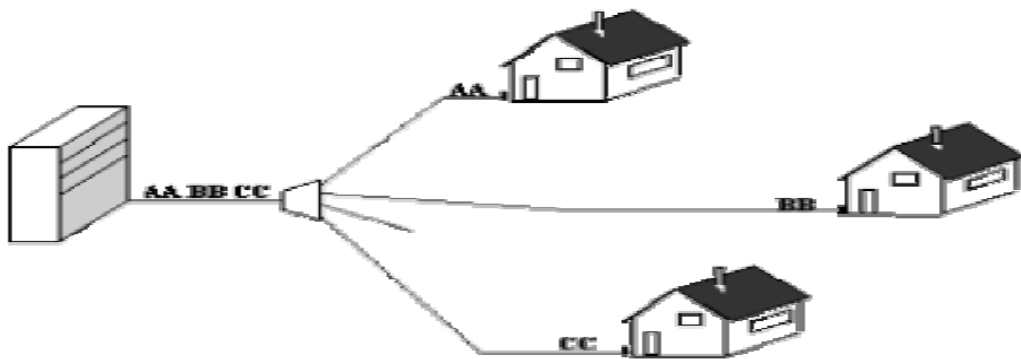


Figure 2.8 Réseau local à répartition temporelle

2.6.1 Le multiplexage temporel optique (OTDM) [12] [16]

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

L'émetteur possède N sources optiques en parallèle modulées au débit D bits/s. Ensuite, les signaux optiques sont codés en RZ (pour que le multiplexage optique puisse se faire sans recouvrement optique (figure 2.9).

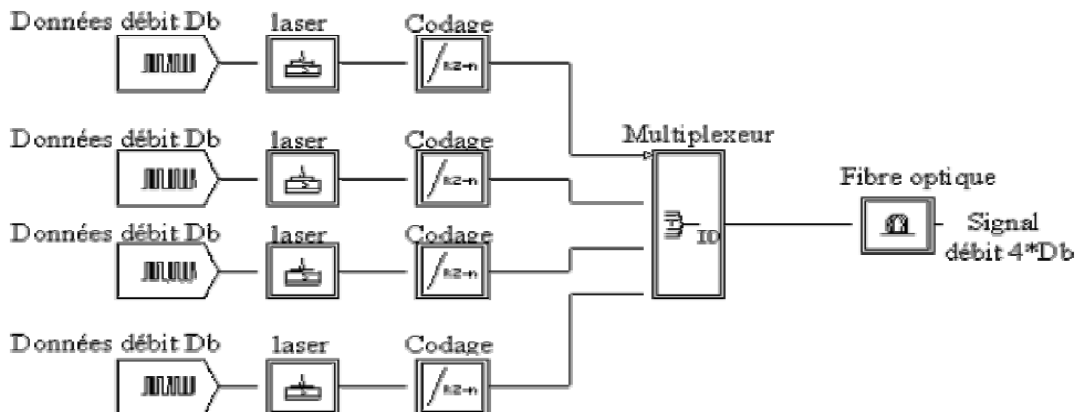


Figure 2.9. Synoptique d'un multiplexage OTDM.

Le multiplexage optique temporel fournit une technique d'accès utilisable dans les réseaux locaux. 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.

La technique OTDM consiste à multiplexer en temps des trains d'impulsion optique de manière purement optique. Le système OTDM consiste à l'émission d'une source laser qui émet des impulsions optiques de durée T_c . Ces impulsions sont appliquées à l'entrée d'un modulateur optique, commandé par un signal électrique de durée T_b qui représente les données à transmettre d'un utilisateur. Le débit des données D est tel que : $D=1/T_b \ll 1/T_c$.

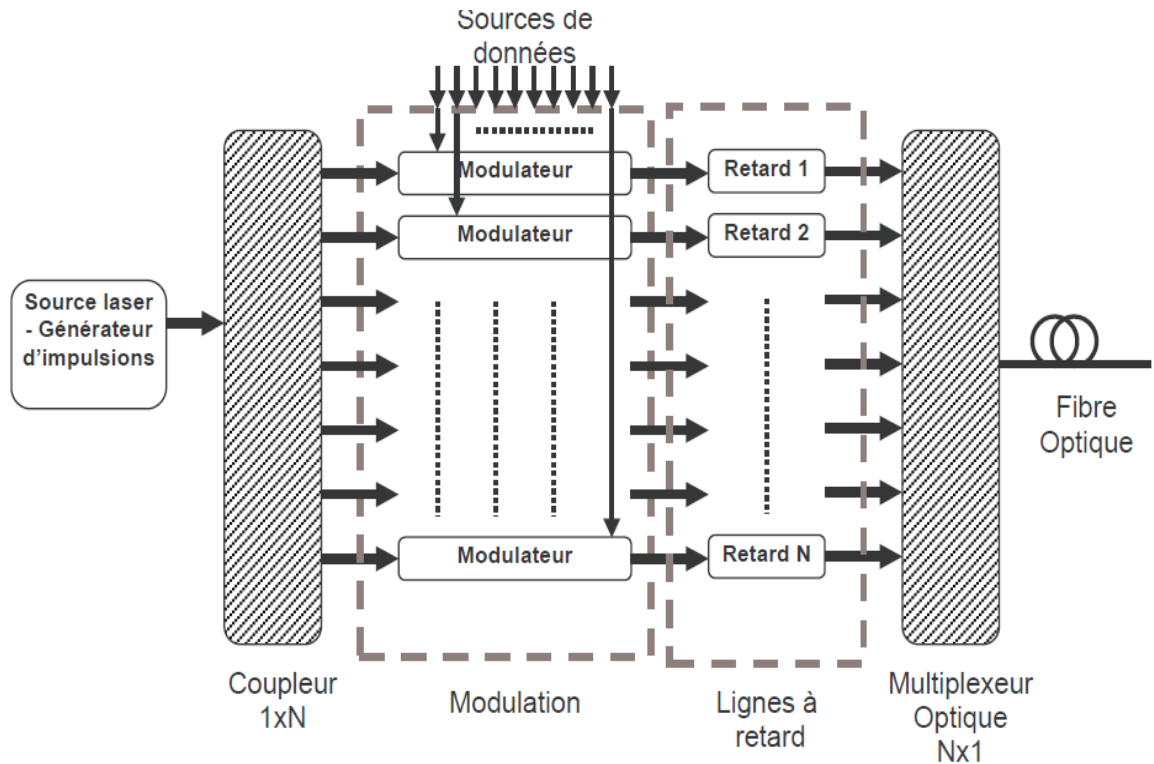


Figure 2.10 Système d'émission optique OTDM pour N utilisateur

Pour un système à N utilisateur, les trains optiques en sortie des modulateurs sont décalés en temps et multiplexés en un train optique unique de débit $R=N \cdot D$ (bit/s) envoyé dans le milieu de transmission, la fibre optique. Par exemple un système de $N=4$ utilisateurs de débit de 10Mb/s, on peut obtenir en sortie un multiplexe temporel tel que le débit à l'entrée de la fibre est 40Mb/s. La source laser doit émettre au débit D, des impulsions ultracourtes de largeur : $T_c = 1/40 \cdot 10^6 = 25$ ns.

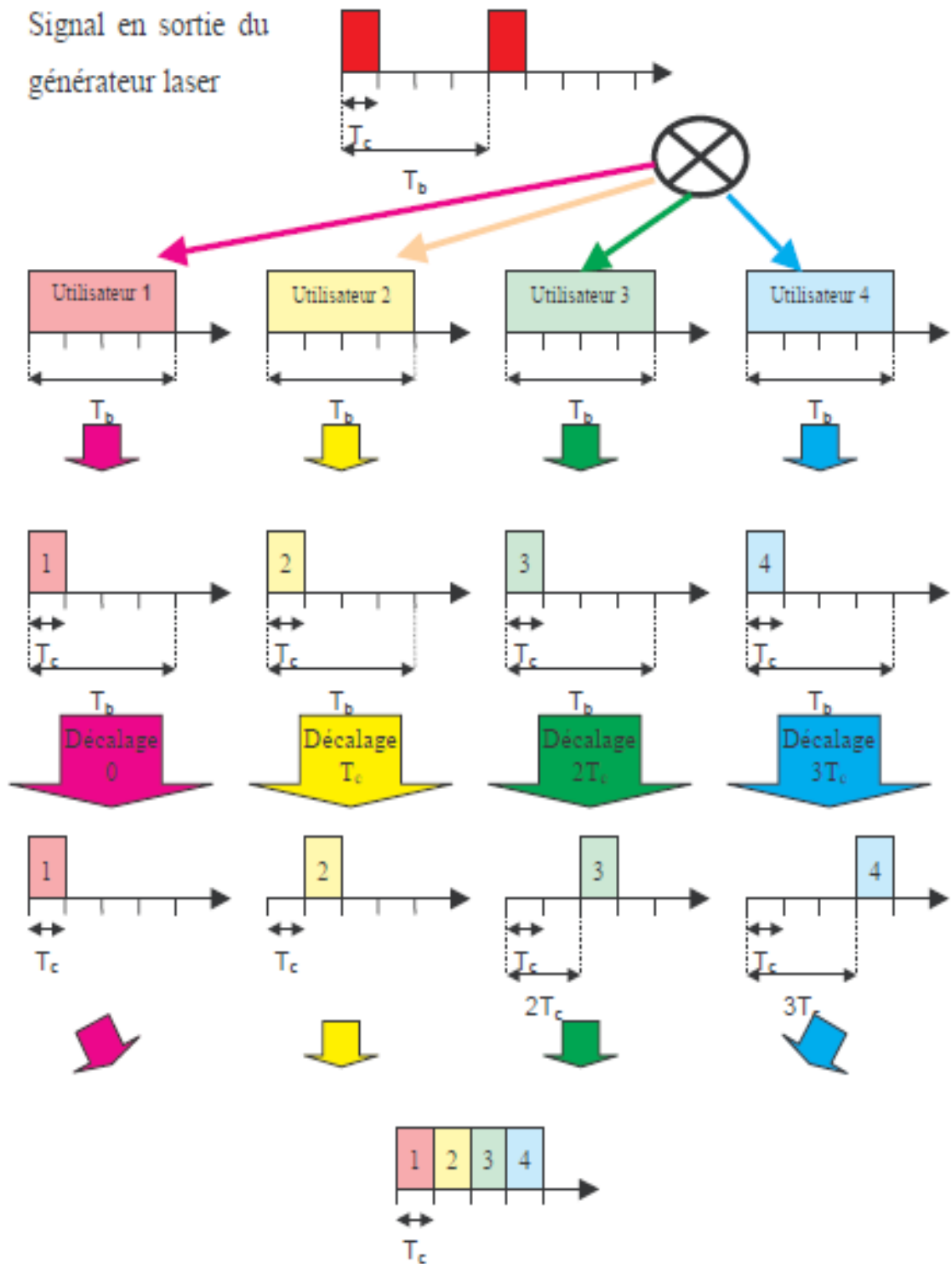


Figure 2.11. Le système de multiplexage OTDM pour 4 utilisateurs.

Pour récupérer en réception par démultiplexage temporelle des informations d'un utilisateur, le système nécessite un signal de synchronisation du rythme des données émises T_b .

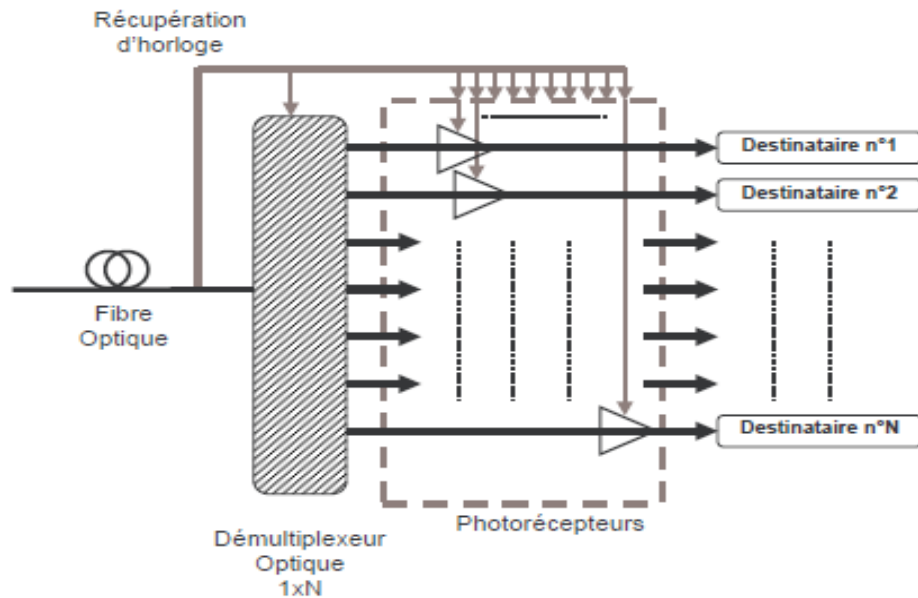


Figure 2.12. La réception du système OTDM.

2.6.2 Le multiplexage temporel électronique (ETDM) [12] [16]

Dans la technique ETDM, le multiplexage des données électrique à transmettre s'effectue à l'aide de dispositif électronique. Le signal de sortie de multiplexeur est appliqué à l'entrée d'un modulateur optique qui permet la transmission sur la fibre optique.

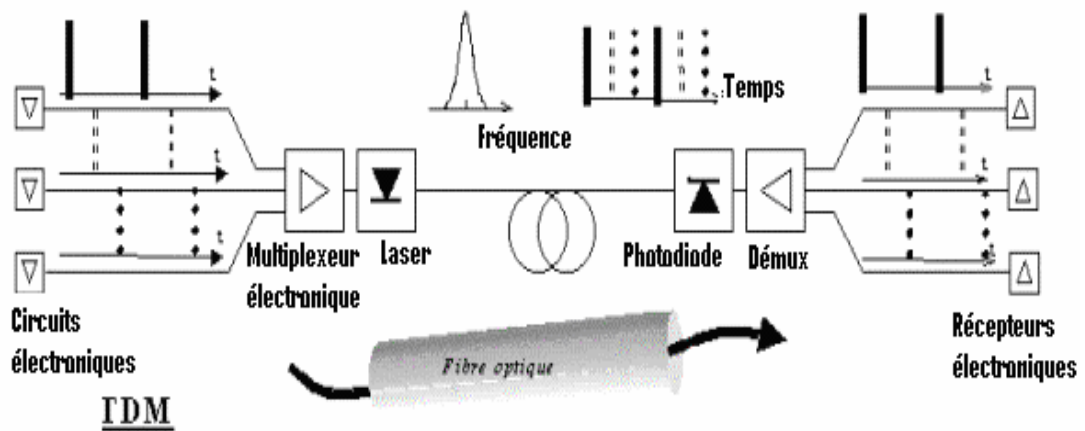


Figure 2.13. Schéma de principe du multiplexage ETDM dans les communications par fibre optique.

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

$$R = N \cdot D \quad 2.1$$

Plus le nombre d'utilisateur augmente et plus le débit R est élevé ce qui constitue la principale limitation de cette technique.

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

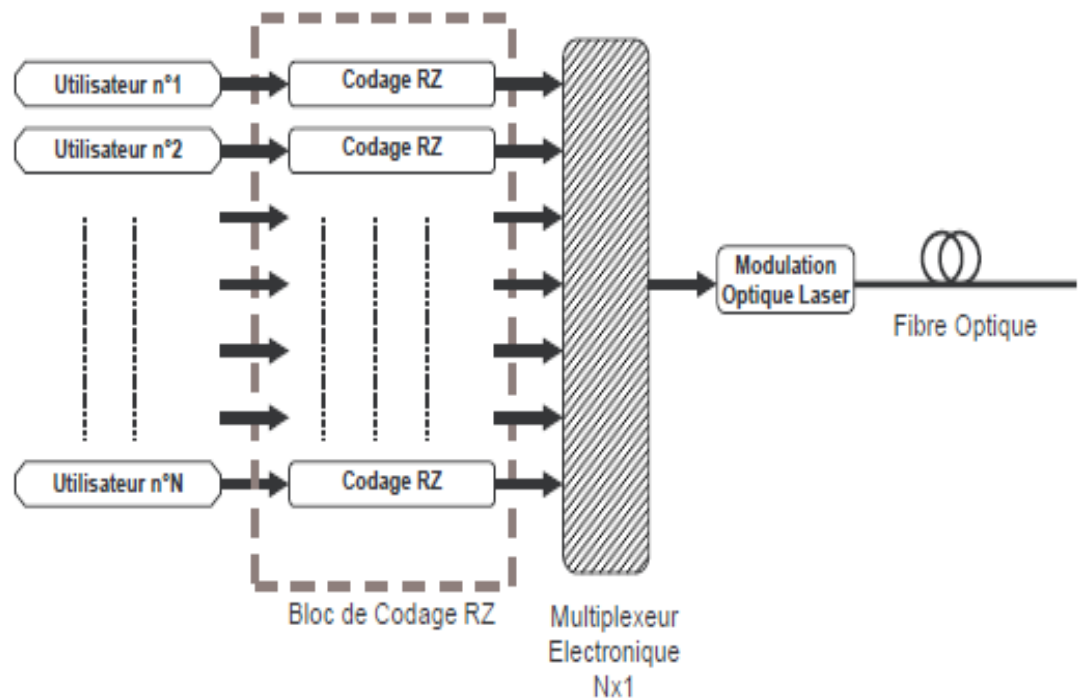


Figure 2.14. L'émission du système ETDM pour N utilisateurs.

A la réception, un Photodétecteur convertit le signal optique en électrique. Un dispositif électronique de démultiplexage synchronisé permet de restituer les données au destinataire.

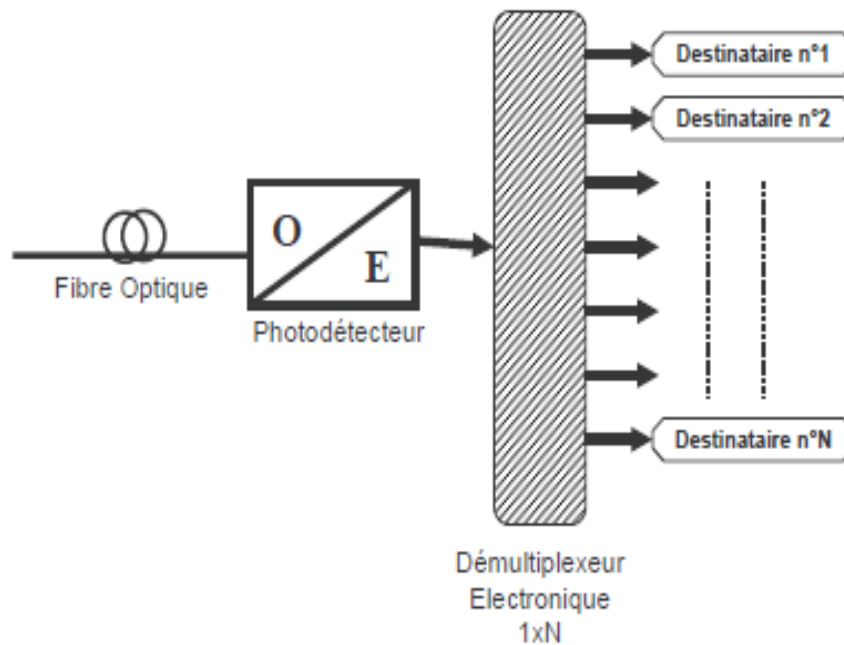


Figure 2.15 Réception du système ETDM

Cette technique est limitée par la difficulté de générer des impulsions de plus en plus courtes, de les transmettre correctement (effet de la dispersion) et de récupérer le signal de synchronisation aux niveaux de démultiplexeur.

2.6.3 Les protocoles SONET et SDH [6]

Les concepts de la SDH répondent à un certain nombre d'objectifs qui sont la flexibilité, la visibilité, la facilité d'exploitation, la prise en compte des évolutions futures vers les hauts débits et l'interconnexion des systèmes.

C'est ainsi qu'en 1988 le C.C.I.T.T. élabore une série de recommandations qui sont écrites en s'inspirant du réseau optique américain (SONET) et des normes européennes. Le débit de la trame de base STM1 (Synchronous Transport Module) est le 155,520Mbit/s compatible avec le premier ordre de multiplexage des hiérarchies américaines (1544kbit/s) et le premier ordre européen (2048kbit/s).

Tableau récapitulatif des débits en SONET et en SDH

Niveaux SONET	Débit correspondant en Kbit/s
STS -1	51.840
STS -3	155.520
STS -12	622.080
STS -48	2.488 .320

Tableau 2.1. Les débits standards de PDH

Niveaux SDH	Débit correspondant en Kbit/s
STM -1	155.520
STM -4	622.080
STM -16	2.488.320
STM -64	9.953.280

Tableau 2.2. Les débits standards de SDH

SDH se situe au niveau 1 et 2 du modèle OSI.

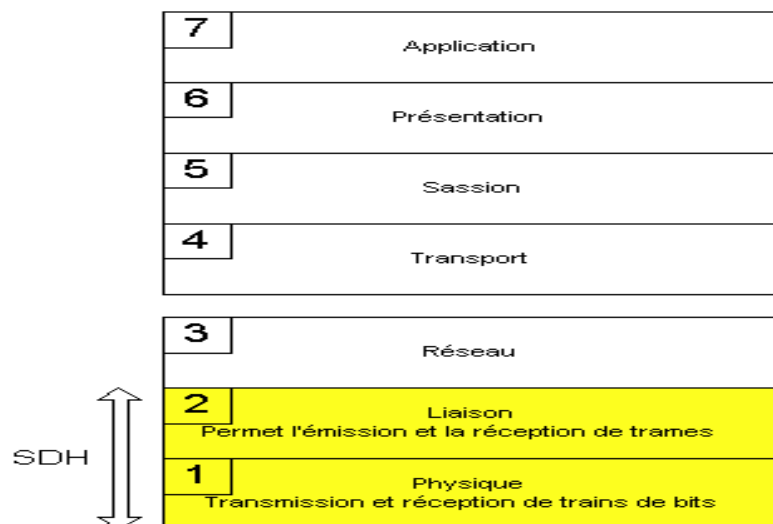


Figure 2.16. Position de SDH dans le Modèle OSI.

2.7 multiplexage à répartition par code (CDM) [16]

Cette technique permet la transmission des données des utilisateurs sur la même bande de fréquence et en même temps. Le principe consiste à attribuer à chaque utilisateur un code, appelé également «signature», constitué d'une suite de bits rapides appelés «chips» pour les distinguer des bits de données de l'utilisateur). Le débit après codage est celui des données utilisateur multiplié par la longueur de la séquence de codes.

Le multiplexage par répartition de code permet d'étaler spectralement le signal transmis sur une bande N fois plus large que celle du signal initial, N étant la longueur de la séquence de code. Cependant, tous les utilisateurs exploitent la même bande spectrale, mais leurs données transmises se distinguent par le code propre à chaque utilisateur, ce qui permet d'éviter les interférences d'accès multiples, à condition que les codes utilisés soient orthogonaux.

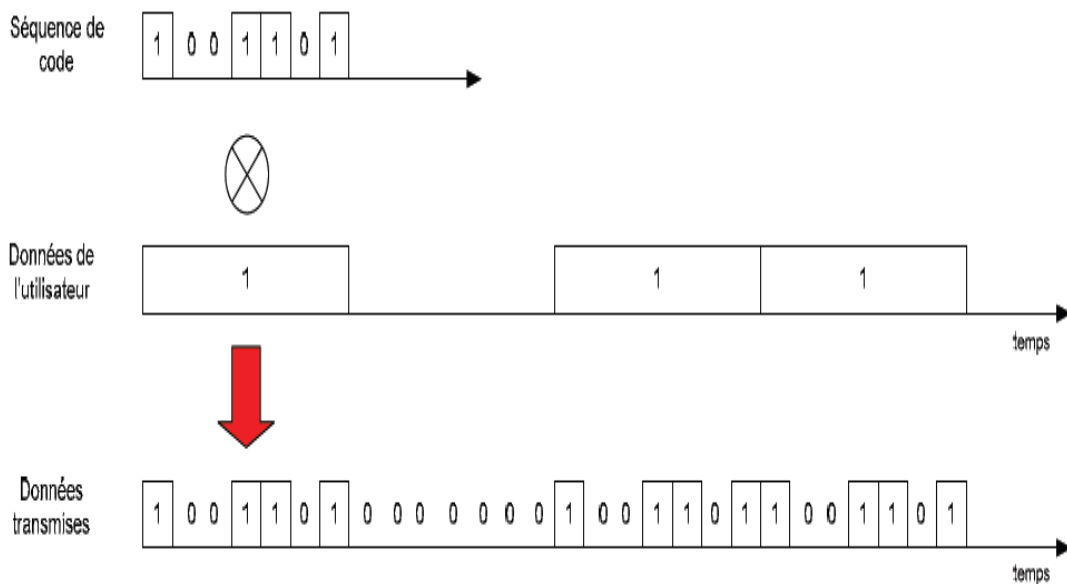


Figure 2.17. Diagramme du codage des données d'un utilisateur.

Le CDMA se décline en deux catégories de codage : le CDMA direct et le CDMA hybride.

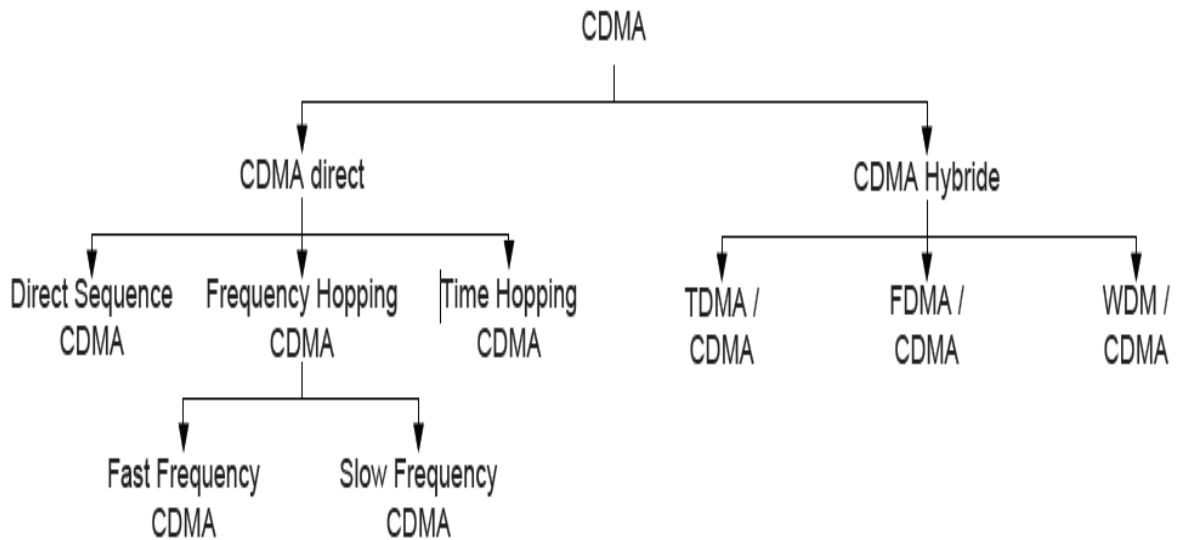


Figure 2.18. Différentes techniques de CDMA.

Le CDMA hybride consiste à associer la technique du CDMA aux autres techniques de multiplexage. Le CDMA direct se divise en CDMA à séquence directe, ainsi que le CDMA à saut de fréquence et le CDMA à saut temporel. Utilisée initialement dans le domaine de la radiofréquence, l'adaptation du CDMA à l'optique, appelé Optical Code Division Multiplexing (OCDM) a été étudiée à partir de 1986.

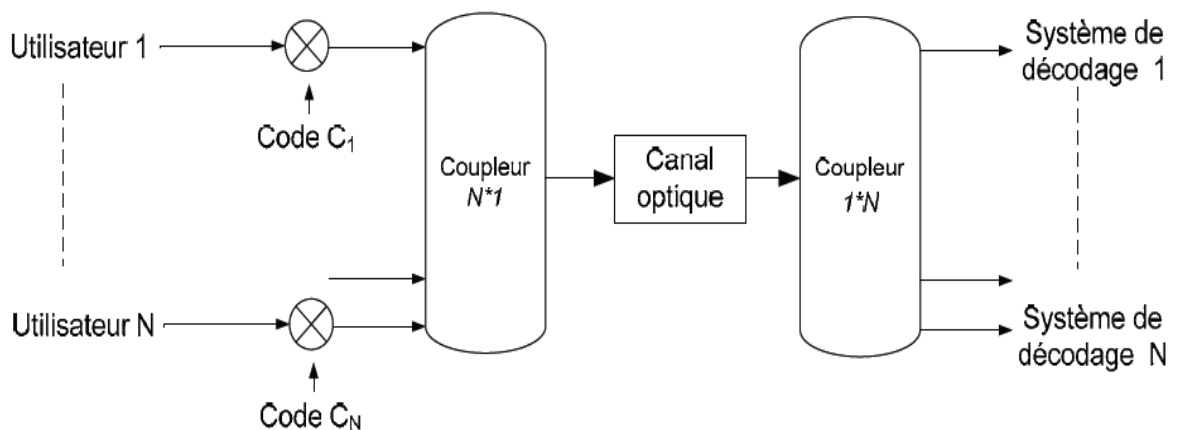


Figure 2.19. Chaîne de transmission en CDMA.

Les données d'un utilisateur i sont codées avec le code C_i avant d'être combinées dans un coupleur $N \times 1$, N étant le nombre d'utilisateurs. Après transmission, un second coupleur $1 \times N$ permet de distribuer le signal optique sur N voies, associées chacune à un système de décodage. Chaque système de décodage possède le code C_i lui permettant d'extraire les données de l'utilisateur i avant conversion dans le domaine électrique.

La principale méthode de codage en optique des données consiste à utiliser un ensemble de lignes à retard. Le décodage optique, utilise un système de lignes à retard dans l'ordre inversé de celui utilisé pour le codage.

L'intensité lumineuse ne pouvant avoir que des valeurs positives ou nulles, l'une des principales limitations du OCDM réside dans le fait qu'il n'est pas possible d'utiliser des codes bipolaires, contrairement au domaine de la radiofréquence. Or, le nombre de codes orthogonaux est très réduit dans une famille de codes dont la longueur est inférieure à 100 chips. Afin de résoudre ce problème, l'OCDM cohérente a été développée. Elle consiste à coder la phase de l'onde lumineuse, qui peut prendre des valeurs positives ou négatives, au lieu de l'amplitude du signal lumineux. Cela permet de tirer profit de tous les codes bipolaires, qui ont été développés pour la radiofréquence, et dont un bien plus grand nombre permet de constituer des familles de codes orthogonaux de même longueur.

2.8 Multiplexage fréquentiel (FDM, Frequency Division

Multiplex) [17].

FDM (Frequency Division Multiplexing) est une technique de multiplexage par répartition de fréquence (MRF). Elle est utilisée pour accroître les débits sur paires torsadées et plus particulièrement des lignes téléphoniques.

Le multiplexage fréquentiel consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous-bandes plus étroites et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur ou à un usage exclusif.

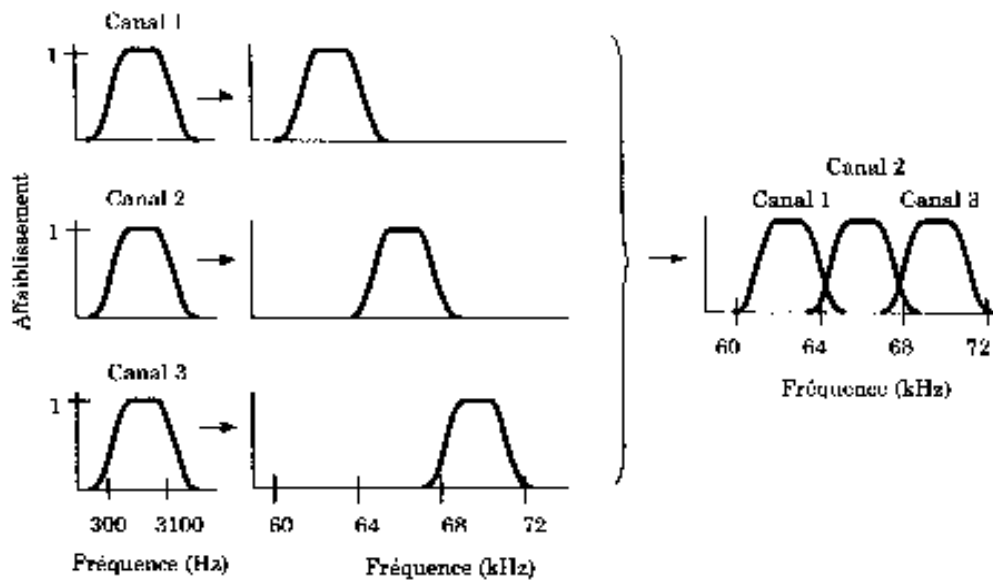


Figure. 2.20 Multiplexage fréquentiel

L'organisation du groupe primaire ou groupe de base utilisé en téléphonie est basé sur un multiplexage fréquentiel. Ce dernier consiste à regrouper 12 voix téléphoniques de 4000 Hz chacune (3000 Hz utilisables plus 2 espaces inter-bandes de 500 Hz) ce qui donne une largeur de bande de 48 kHz répartie entre 60 et 108 kHz.

2.9 multiplexage de sous porteuse (SCM) [6]

Au lieu de transmettre un signal numérique sur une porteuse optique λ , on peut aussi le transmettre sur plusieurs sous-porteuses proches de λ , séparé par quelques Ghz, pour garder la compatibilité avec un signal initialement porté par une porteuse hyperfréquence. Il s'agit alors d'une combinaison entre le FDM et le WDM, appelée SCM.

2.10 multiplexage spatial (SDM) [6]

Pour transmettre le même débit D , une autre technique consiste à utiliser N fibre, chacune d'elles possèdent une seul longueur d'onde. Il s'agit alors de multiplexage spatial (SDM). Il est souvent préféré au WDM pour de courtes distances de transmission et les fibres multi modes sont alors utilisée. Mais pour de longues distances, le WDM reprend l'avantage car le SDM doit utiliser N amplificateur là où le WDM n'en utilise qu'un seul par fibre.

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de multiplexages, tout en expliquant leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques.

Chapitre 3 Simulations et résultats obtenues

3.1 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. De plus, il est demandé à ces derniers à la fois de transporter des capacités d'informations de plus en plus importantes, et de se renouveler très rapidement.

La méthode expérimentale, qui consiste en des mesures itératives sur un banc de test, est très coûteuse en temps et en argent. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance intéressante pour trouver des solutions, aussi bien au niveau du composant que du système. Les logiciels peuvent être une aide à la conception et à la prise de décision, tout en évitant la multiplication d'essais compliqués et onéreux.

Ils permettent de prendre en compte les améliorations technologiques des composants, parfois même avant qu'ils ne soient disponibles sur le marché. Non seulement ils vont mesurer la qualité de transmission d'une liaison, mais aider à en optimiser les performances.

En plus de l'aide précieuse qu'ils sont à même d'apporter pour le développement des systèmes actuels, les simulateurs de systèmes de transmissions optiques peuvent être d'une grande utilité pour la recherche et l'investigation des futurs systèmes. Ils sont pour la plupart très ouverts et offrent la possibilité d'introduire de nouveaux modèles au sein du programme. Cependant contrairement à l'électronique et aux micro-ondes, il n'existe pas d'outils standards et bien admis dans le domaine des transmissions optiques. Il est apparu, récemment, sur le marché, un certain nombre de logiciels

permettant la simulation des systèmes de communications optiques, parmi lesquels le logiciel COMSIS.

3.2 Présentation du logiciel : [18] [16]

L'acronyme de COMSIS signifie Communications System Interactive Software. Ce logiciel est un outil qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal allant du dispositif le plus élémentaire au système complet de communication. C'est un environnement interactif qui allie des outils numériques à des fonctionnalités graphiques et une interface utilisateur. Il permet d'analyser des systèmes analogiques ou numériques décrits sous la forme de schémas blocs.

3.2.1 L'éditeur de schéma-bloc

COMSIS offre un environnement intégré où toutes les fonctions d'éditations et de traitements s'articulent autour de l'éditeur de schéma-bloc.

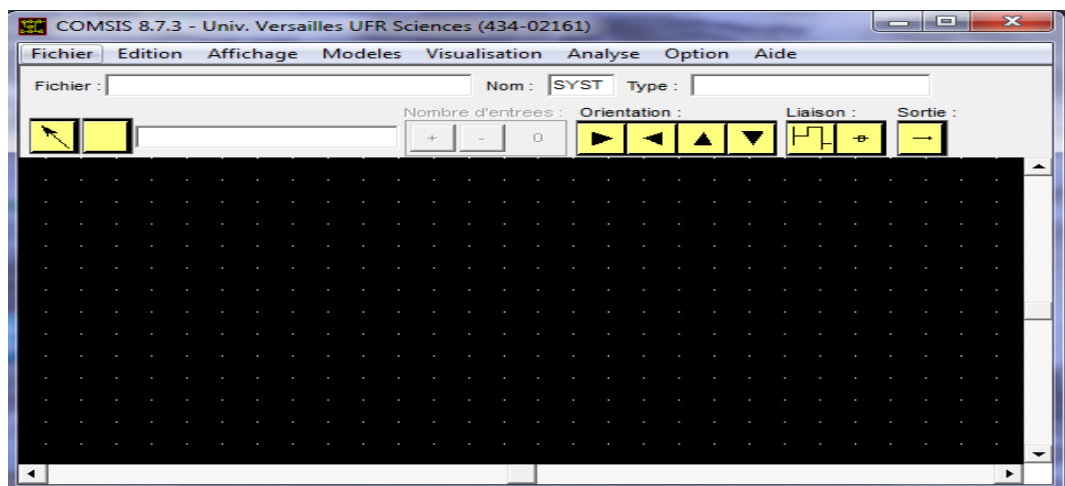


Figure 3.1 : L'éditeur de schéma-bloc de COMSIS.

3.2.2 La bibliothèque

Parmi les modèles disponibles dans la bibliothèque de COMSIS citons par exemple : Les entrée, sommateurs, Opérateur, classiques, Les filtres, Convertisseurs, Fonctions logiques, Codeurs et décodeurs, Modulateurs, Fonction mathématiques, Canaux de propagation, Composants optique.....

3.2.3 La simulation

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

a La modélisation du système

Le terme système est utilisé dans une quantité de contexte et de sens différents. Dans le domaine des télécommunications, le terme système désigne un ensemble d'éléments interdépendants ayant pour finalité commune d'acheminer, de manière aussi fidèle et fiable que possible, des informations entre divers usagers.

b L'analyse du système

L'analyse d'un système a un double objectif. D'une part, elle doit mener à la simplification formelle du système pour réduire le temps de simulation et augmenter la précision sur les résultats obtenus. Et d'autre part, elle permet de déterminer les fréquences de référence des variables qui doivent être simulées.

c La simulation d'un système

COMSIS propose de traiter des systèmes continus, discrets et échantillonnés. Les systèmes continus, dont les variables sont représentées dans l'espace réel du temps, nous intéressent plus particulièrement. La suite du paragraphe ne concerne donc que ce type de système.

- La simulation temporelle des systèmes continus

La simulation temporelle pose trois problèmes : quelles variables du système vont être simulées, dans quel ordre et de quelle manière ? Il est impossible de traiter séparément chacun des problèmes. En effet, déterminer la liste des variables qui vont effectivement être simulées, ainsi qu'élaborer l'ordre dans lequel elles seront calculées exigent de connaître les méthodologies de simulation utilisées et les algorithmes d'intégration numériques associés.

- **Le choix du pas de calcul**

Le pas de calcul est commun à tous les opérateurs d'un même système. Certains modèles imposent des contraintes sur le pas de calcul. Pour un signal périodique, il est préférable de choisir un pas de calcul qui soit un multiple de cette périodicité. Il en est de même pour les modèles dont certaines caractéristiques sont des unités de temps.

3.2.4 Les résultats de simulation

Une fois que le schéma est construit, COMSIS a la possibilité de réaliser plusieurs types d'analyses. Tout dépend du système dont on veut évaluer les performances. Cela peut être juste l'analyse d'un composant, d'un opérateur fonctionnel, pour voir ses propres performances, ses caractéristiques ou alors l'évaluation des performances d'une liaison entière ou partielle, l'évaluation de la qualité de l'information transmise. C'est donc d'abord par une description de ces différentes simulations que va débiter ce paragraphe. Les résultats de simulations peuvent ensuite être visualisés sous différentes représentations, ces dernières seront alors énumérées dans le paragraphe suivant.

a Les différentes analyses

Dès qu'un système est complètement décrit, il est possible d'effectuer différentes analyses temporelles et fréquentielles, accessibles à partir du menu Analyse de l'Editeur de schéma-bloc, comme le montre la Figure 3.2.

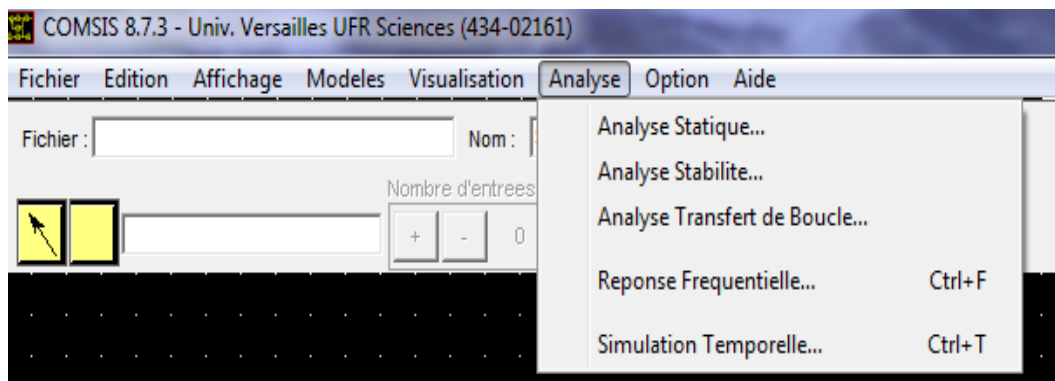


Figure 3.2 : Le menu d'analyse de COMSIS.

- L'analyse statique
- L'analyse de stabilité
- L'analyse de transfert de boucle
- La réponse fréquentielle
- La simulation temporelle

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

b La visualisation et le traitement des résultats

Suite à toute simulation, COMSIS offre des résultats, basés sur l'analyse des signaux simulés : Affichage, Caractéristiques, Bilan de puissance, Facteur Q, Rapport signal à bruit, mesure de taux d'erreur ... etc. L'affichage est effectué dans un écran de visualisation, encore appelé fenêtre graphique.

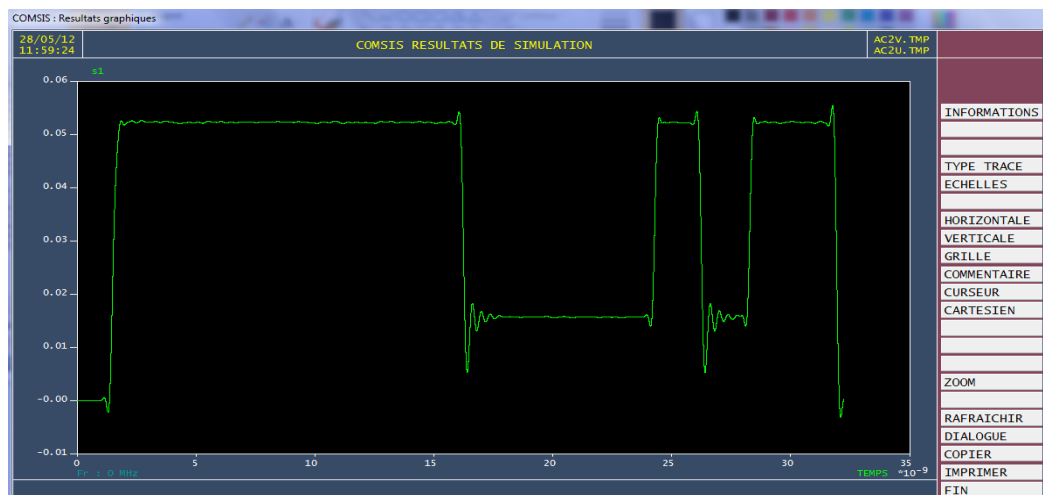


Figure 3.3 : L'écran de visualisation des résultats de COMSIS.

La simulation temporelle est l'analyse permettant le plus grand nombre de possibilités dans l'exploitation des résultats. Les autres analyses affichent directement le résultat demandé dans la fenêtre graphique. C'est pourquoi dans la suite de ce paragraphe, les

différentes possibilités d'interprétation et de traitement des résultats seront décrites pour une simulation temporelle, même si parfois, elles peuvent encore être valables dans les autres cas. Durant la simulation, un écran de contrôle permet de suivre l'état d'avancement des calculs. Quand ceux-ci sont terminés, la fenêtre d'Evaluation des Performances propose plusieurs possibilités (Figure 3.4). Ce sont toutes ces techniques d'évaluations qui vont être maintenant détaillées.

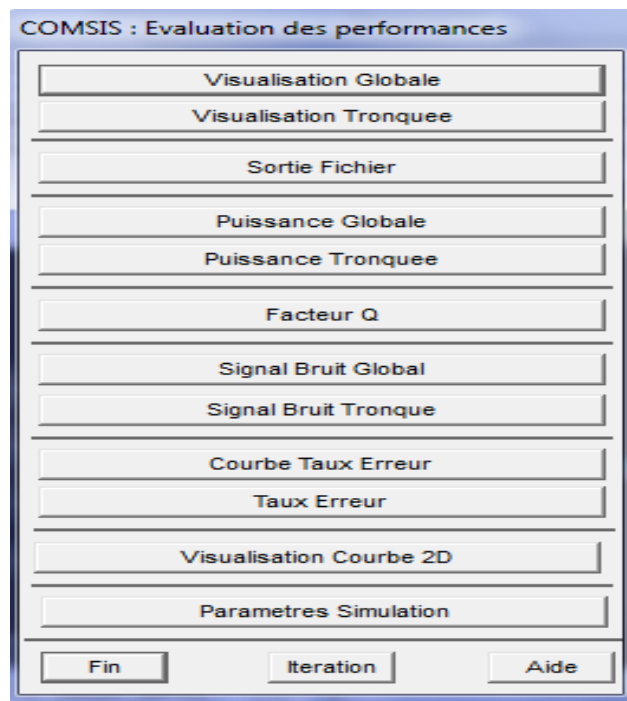


Figure 3.4 : Fenêtre d'évaluation des performances.

Les commandes suffixées Globale exploitent les signaux sur tous les points simulés.

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

- **Visualisation des résultats de simulation**

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

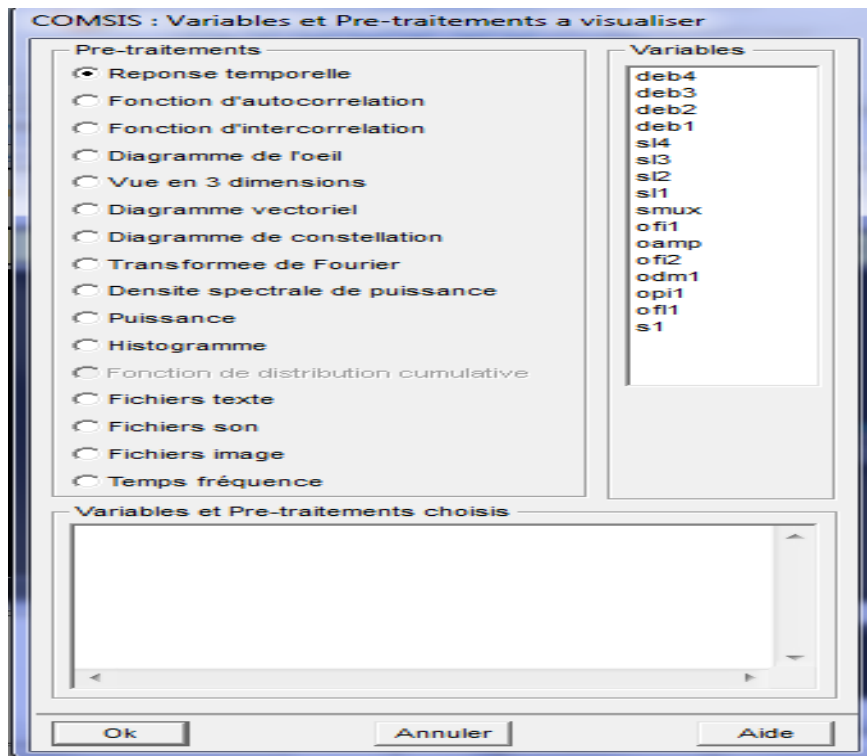


Figure 3. 5 : Fenêtre des variables et prétraitements à visualise

3.3 La simulation.

3.3.1 Multiplexage en longueur d'onde.

a Description de la liaison.

La figure 3.6 présente une liaison optique dont le but est de simuler 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.

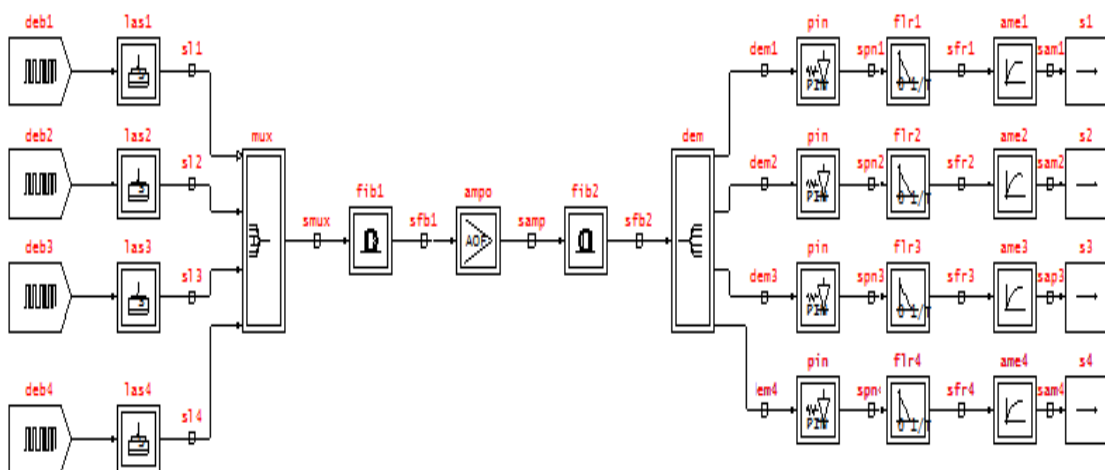


Figure 3.6 : Schéma bloc de la liaison WDM.

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

- Quatre courants lasers ayant différents débit.
- Quatre lasers systèmes avec des longueurs d'onde différentes.
- Un multiplexeur optique
- Deux fibres monomode de mêmes caractéristiques.
- Un amplificateur optique
- Un démultiplexeur optique
- Quatre photodétecteurs de type PIN
- Quatre filtres électriques.
- Quatre amplificateurs électriques
- Quatre sorties pour la visualisation des signaux.

***b* 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 screenshot shows a dialog box titled "COMSIS : Definition des paramètres". It has two main sections: "Generalites" and "Caracteristiques".

Generalites:

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

Caracteristiques:

DEBIT BINAIRE (Mbits/s) :	deb1
LONGUEUR DU REGISTRE :	8
COURANT MINIMUM (mA) :	25
COURANT MAXIMUM (mA) :	40

Buttons at the bottom: OK, Annuler, Aide.

Figure 3.7 : Paramètres du courant laser

La configuration des blocs deb1, deb2, deb3 et deb4 sont différents.

➤ Laser système :

The screenshot shows a dialog box titled "COMSIS : Definition des paramètres". It has two main sections: "Generalites" and "Caracteristiques".

Generalites:

- Nom : las1
- Nature : LASER-SYSTEME
- Groupe : Composants Optiques
- Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques:

Type de definition : Systeme Physiques

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 :

Parametres Facultatifs

<input checked="" type="checkbox"/> Espacement entre modes (nm) :	1		
<input checked="" type="checkbox"/> Chirp (MHz/mA) :	100		
<input checked="" type="checkbox"/> Bruit RIN (dB/Hz) :	-154	pour le courant (mA) :	70

Buttons at the bottom: OK, Annuler, Aide.

Figure 3.8: 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 paramètres	
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

Figure 3.9 : Paramètres du multiplexeur

➤ *fibre optique :*

COMSIS : Definition des parametres

Generalites

Nom : fib2
Nature : FIBRE-OPTIQUE-MONOMODE
Groupe : Composants Optiques
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Longueur de la fibre (km) : L

Coefficient d'attenuation (dB/km) : 0.2

Dispersion chromatique (ps/nm/km) : Constante 17

Effet Kerr : Oui Non

Effet Raman : Oui Non

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

Gain Raman (m²/V) : 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 3.10 : Paramètres de fibre optique

Les deux longueurs L1 et L2 ont la même configuration.

➤ **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) : 30

Puissance de saturation (dBm) : 13

Facteur de bruit (dB) : 6

Longueur d'onde de mesure des parametres (nm) : 1550

Fibre : Verre Silice Verre Fluore Autre Description...

Longueur d'onde de la pompe : 980 1480

Retard introduit par l'amplificateur (ns) : 0.1

Parametres physiques...

OK Annuler Aide

Figure 3.11: 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 3.12 : Paramètres du démultiplexeur

➤ **Photodiode PIN :**

COMSIS : Definition des paramètres

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 3.13 : Paramètres de la photodiode

Cette configuration est la même pour les autres photodiodes.

➤ **Filtre électrique :**

COMSIS : Definition des paramètres

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 3.14 : Paramètres du filtre

➤ **Amplificateur radio :**

COMSIS : Definition des paramètres

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 3.15 : paramètre de l'amplificateur radio

3.3.2 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 du taux d'erreur TEB. Les graphes obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous.

a Visualisation des signaux d'entrées.

Pour :deb1=500Mb/s, deb2=700Mb/s, deb3=800Mb/s, deb4=1Gb/s et la longueur de la fibre L=30Km.

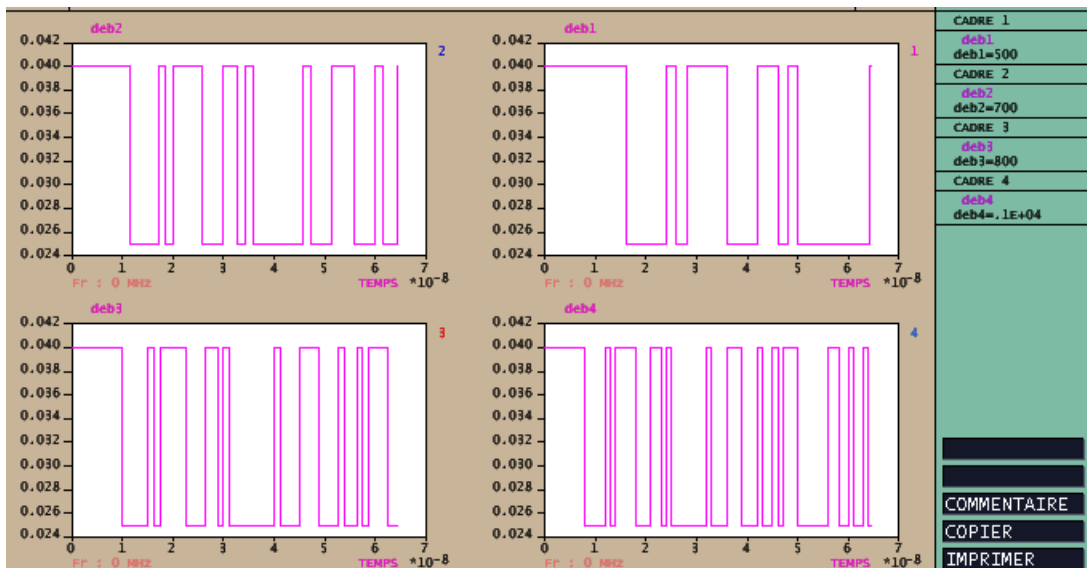


Figure 3.16 : Réponse temporelle des courants lasers.

b Densité spectrale des sorties de fibre1, amplificateur, multiplexeur et fibre2.

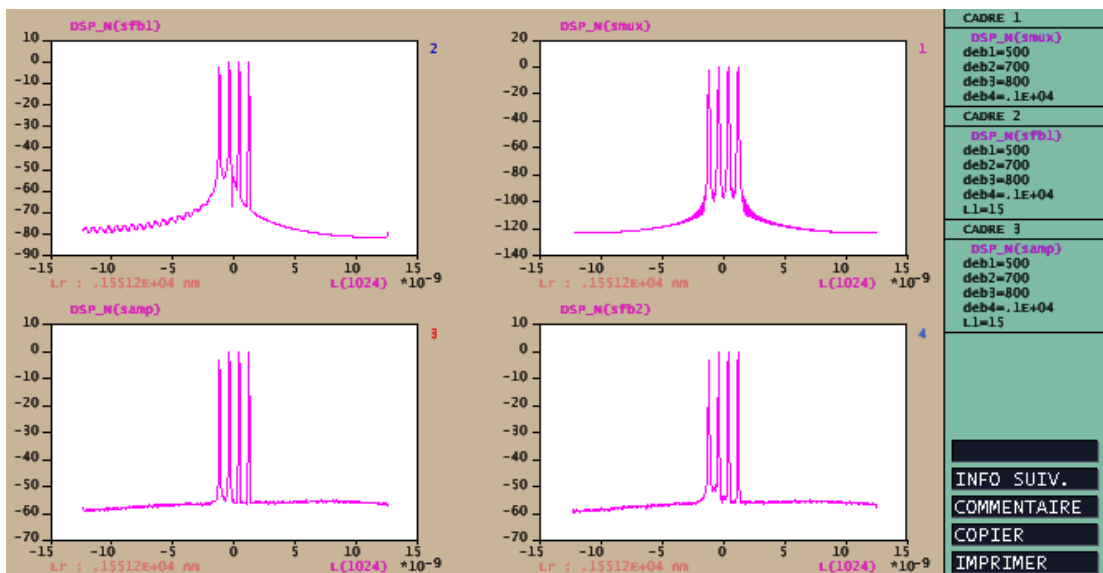


Figure 3.17 : Densité spectrale des sorties de fibre1, amplificateur, multiplexeur et fibre2

Le signal de la sortie de la fibre 1 présenté une déformation par apport le multiplexeur et on remarque que il y a une amplification de signal à la sortie de l'amplificateur.

c Réponse temporelle des sorties.

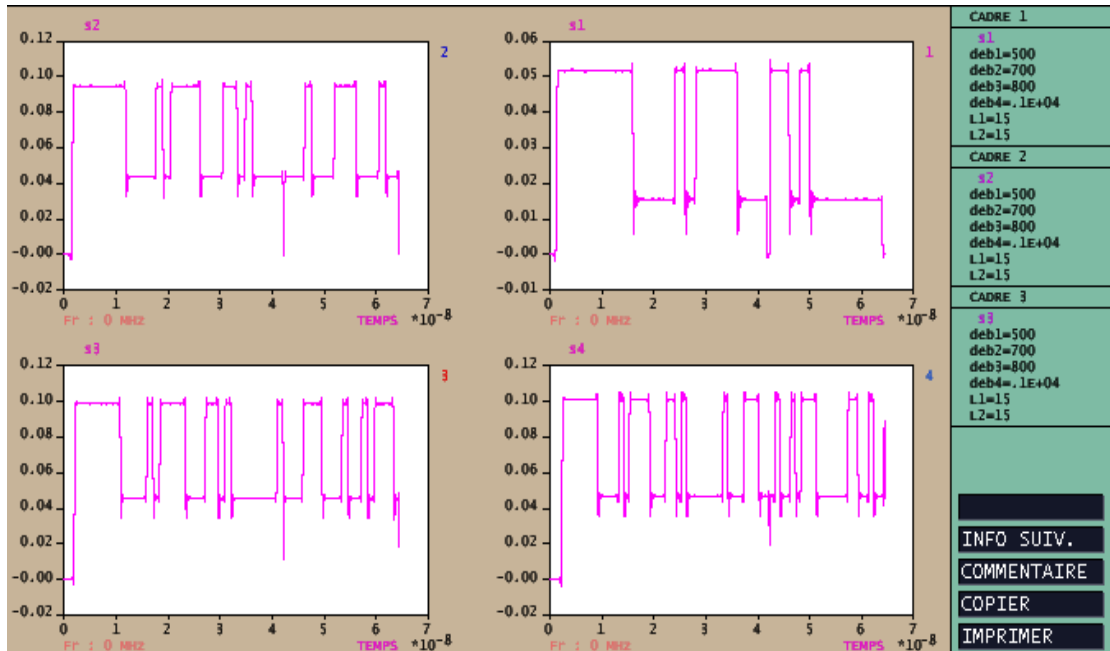


Figure 3.18 : Réponse temporelle des sorties.

Les signaux d'entrées sont bien récupéré bien sùre après le filtrage qui minimisé les bruits des canaux adjacent, et l'amplification qui compense ces pertes.

d Diagramme de l'œil des portées

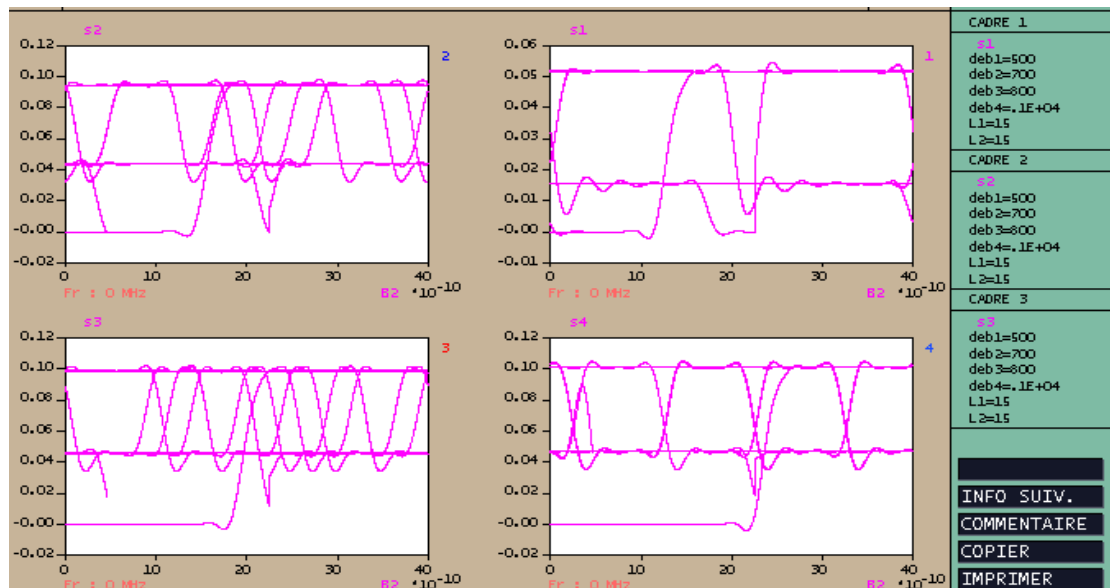


Figure 3.19: Diagramme de l'œil des sorties (s1, s2,s3,s4)

3.3.3 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 30 Km.

➤ Débit1= 500Mbits/s

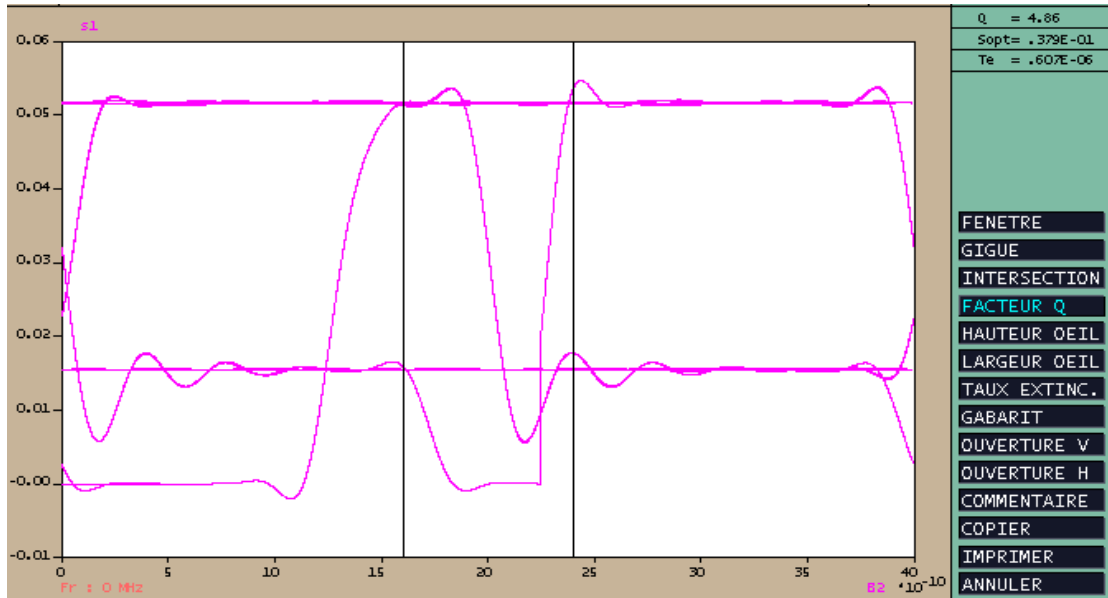


Figure 3.20 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=500Mbits/s.

➤ débit1=700Mbits/s

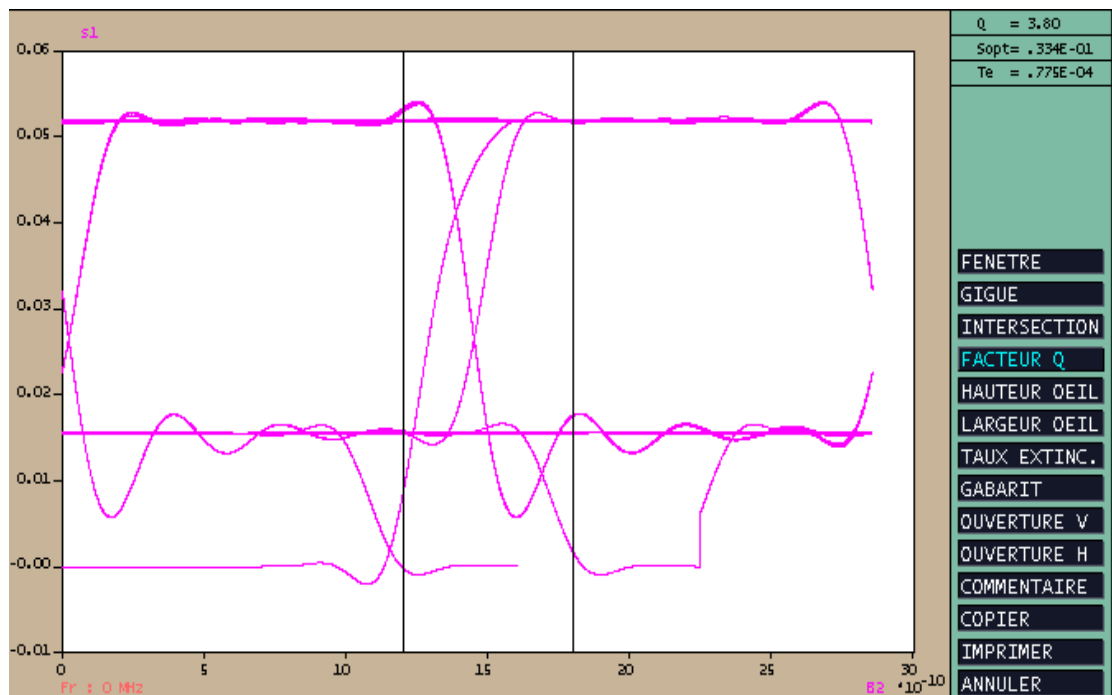


Figure 3.21 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=700Mbits/s.

➤ débit=800Mbits/s

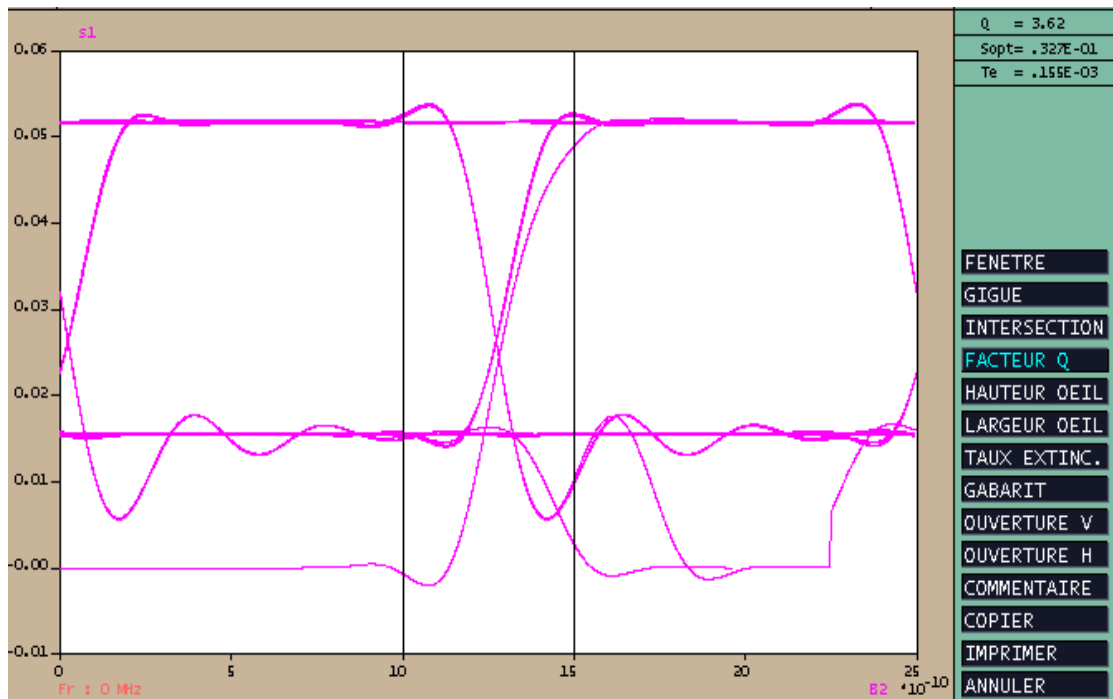


Figure 3.22 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=800Mbits/s.

➤ débit=1Gbits/s

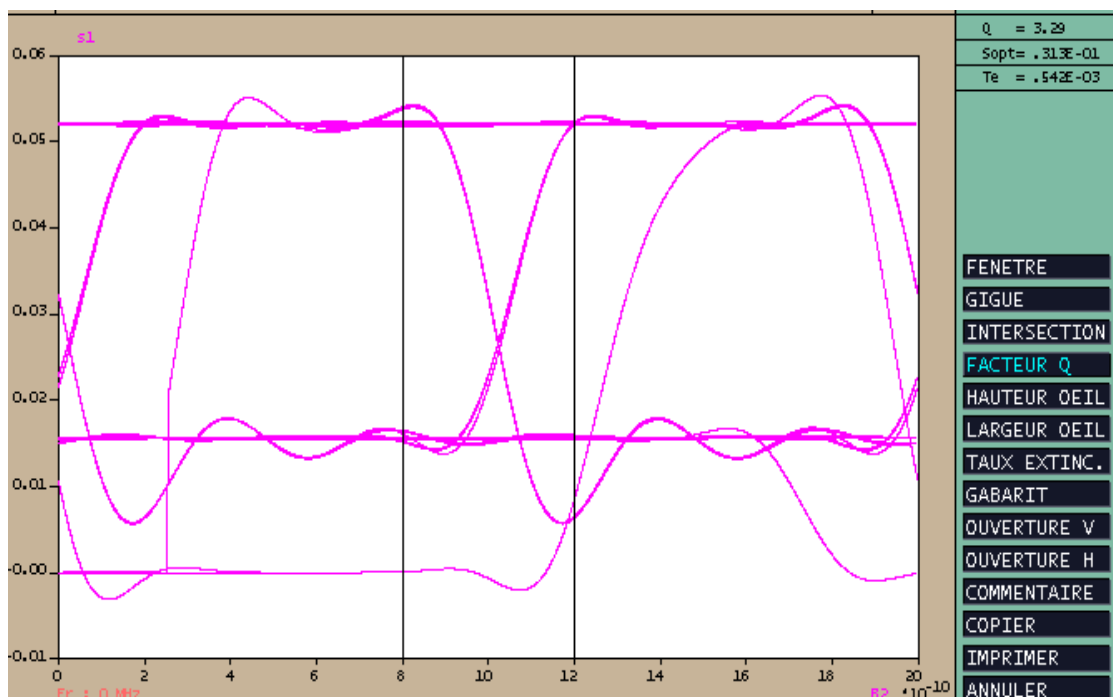


Figure 3.23 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour d=1Gbits/s.

Débit (Mb/s)	Facteur Q	TEB
500	4,86	$6,07 \cdot 10^{-7}$
700	3,80	$7,75 \cdot 10^{-5}$
800	3,62	$1,55 \cdot 10^{-4}$
1000	3,29	$5,42 \cdot 10^{-4}$

Tableau 3.1 : 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.

3.3.4 Influence de la longueur de la fibre sur la qualité de la liaison :

Dans cette liaison on va étudier le signal de sortie en fonction de la longueur de la fibre gardant le débit constant à 1Gbits/s.

➤ Une liaison de 10km

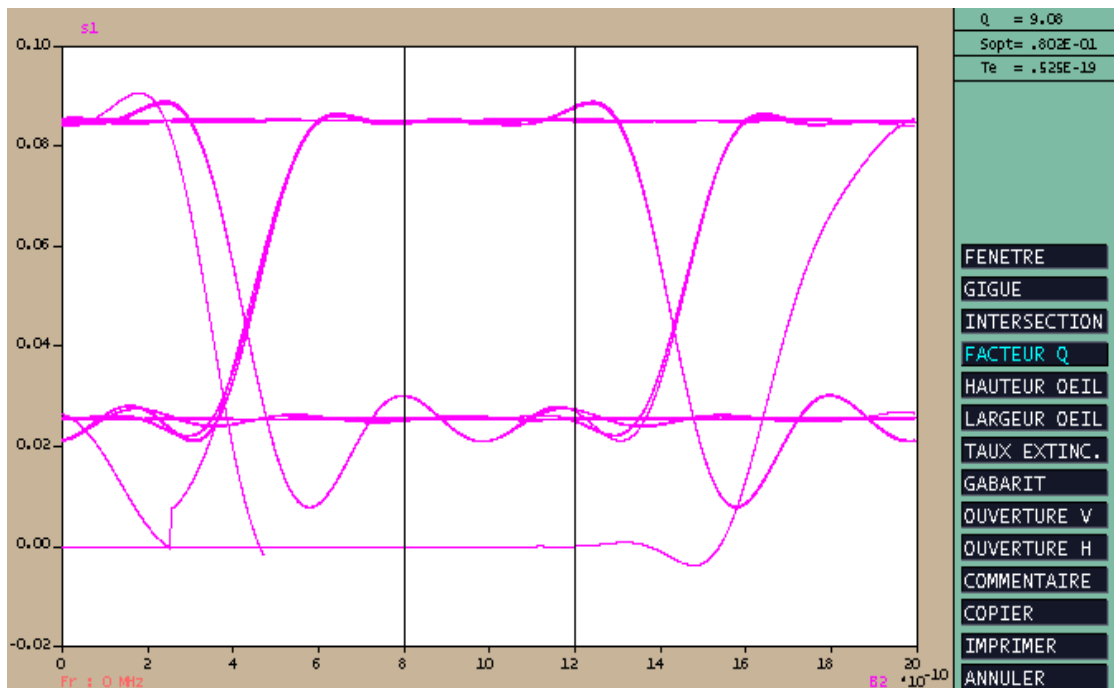


Figure 3.24 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=10km.

➤ Une liaison de 50km

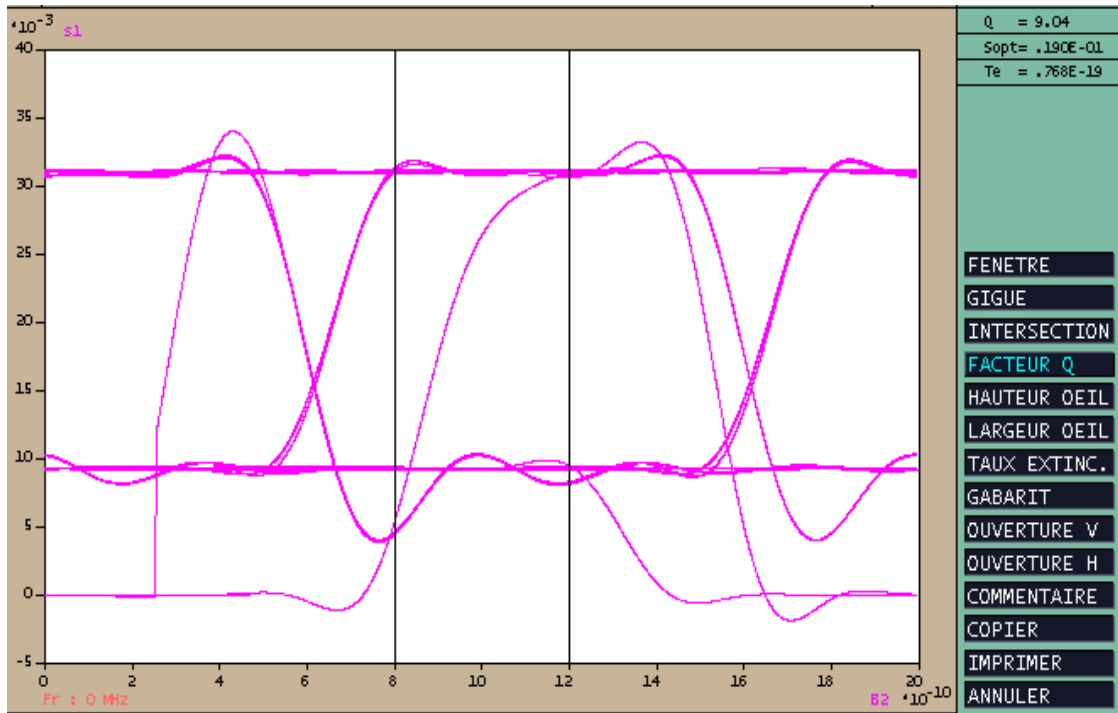


Figure 3.25 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=50km.

➤ Une liaison de 70km

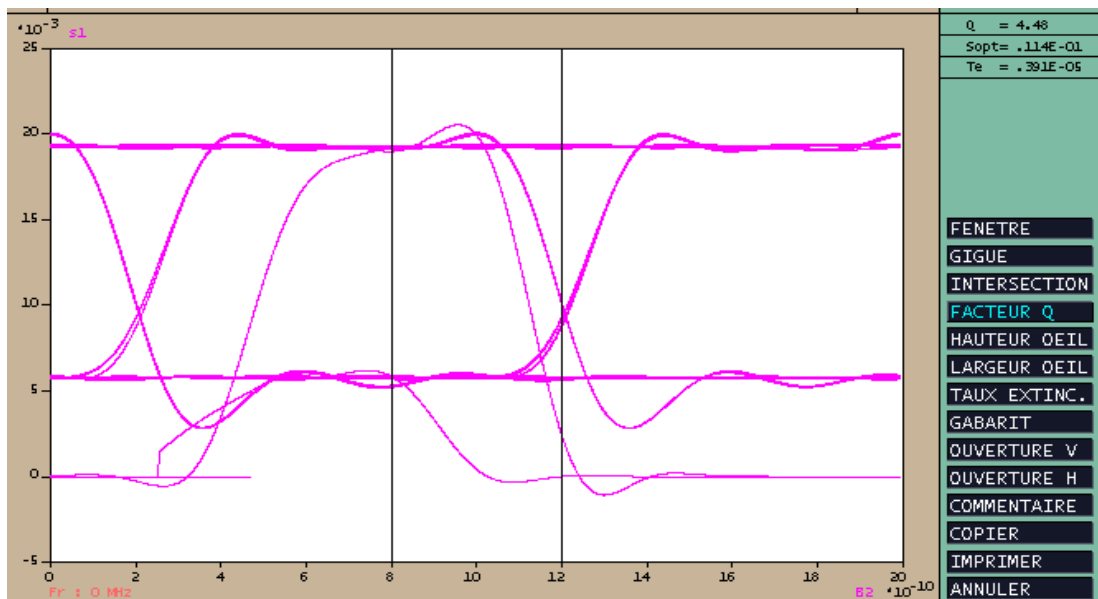


Figure 3.26 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=70km.

➤ Une liaison de 80km

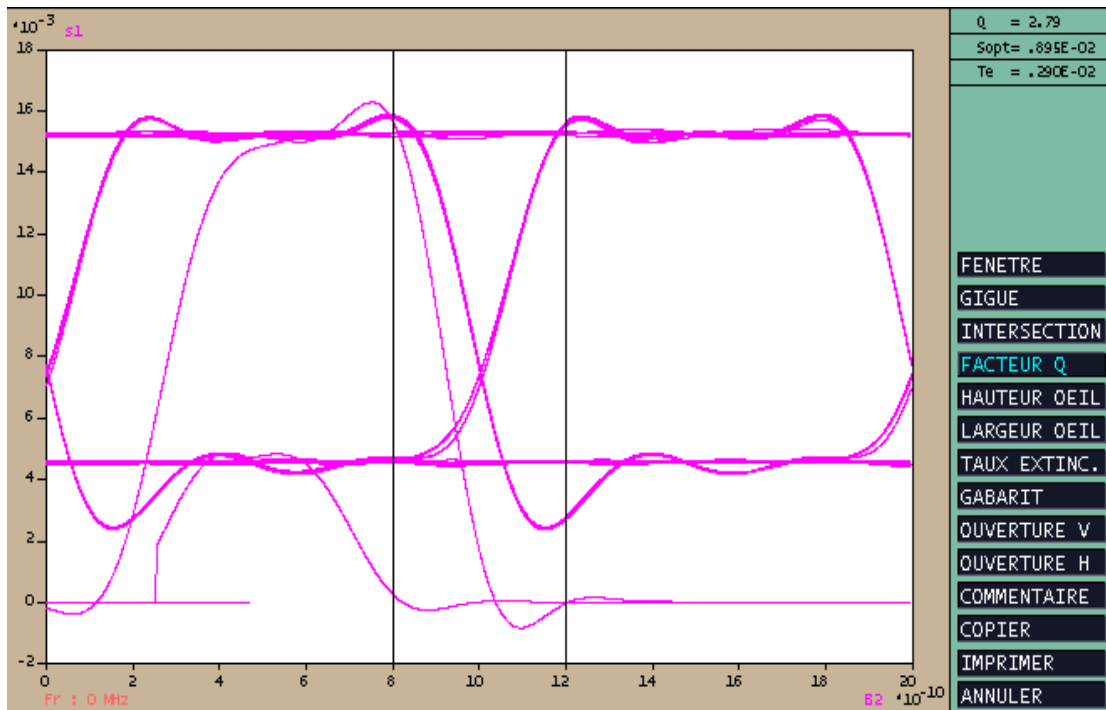


Figure 3.27 : Diagramme de l'œil de la sortie s1 pour l=80km.

Longueurs L(Km)	Facteur Q	TEB
10	9,08	$5,25 \cdot 10^{-20}$
50	9,04	$7,68 \cdot 10^{-20}$
70	4,48	$3,91 \cdot 10^{-6}$
80	2,79	$2,90 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3.2 : Facteur Q et TEB pour différentes longueurs de la fibre

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

3.3.5 Le multiplexage temporel électronique (ETDM) :

a description de la liaison.

La figure 3.28 présente une liaison optique dont le but est de simulé les différentes sorties de la chaine 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.

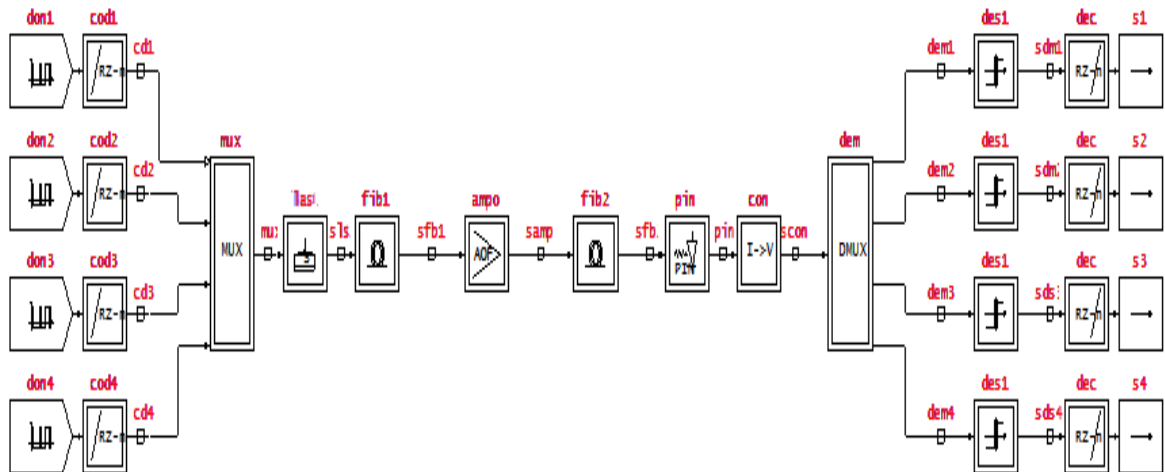


Figure 3.28 : Schéma bloc de la liaison ETDM.

La figure est une liaison ETDM avec quatre (04) entées, elle est composée de :

- Quatre séquences binaires aléatoires ont même débit.
- Quatre codeur-RZ-binaire avec un rapport cyclique différentes.
- Un multiplexeur électrique.
- Un laser système.
- Deux fibres optiques ont même caractéristique.
- Un amplificateur optique.
- Une photodétecteurs de type PIN.
- Un convertisseur courant tension.
- Un démultiplexeur électrique.
- Quatre détecteurs de seuils ont même caractéristique.
- Quatre décodeur-RZ-binaire avec un retarde.
- Quatre sorties pour la visualisation des signaux.

b les caractéristiques des éléments de la liaison.

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

➤ **Séquence-binaire-aléatoire.**

COMSIS : Definition des paramètres

Generalites

Nom : don1
Nature : SEQUENCE-BINAIRE-ALEATOIRE
Groupe : Entrees
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

DEBIT BINAIRE (Mbits/s) : deb1
POURCENTAGE DE 1 DE LA SEQUENCE : 40

OK Annuler Aide

Figure 3.29: Paramètres Séquence-binaire-aléatoire.

La configuration des blocs deb1, deb2, deb3 et deb4 sont les même

➤ **Codeur-RZ-binaire.**

COMSIS : Definition des paramètres

Generalites

Nom : cod1
Nature : CODEUR-RZ-BINAIRE
Groupe : Codeurs et Decodeurs
Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

RAPPORT CYCLIQUE : 0.2
AMPLITUDE DE SORTIE : 5

OK Annuler Aide

Figure 3.30 : Paramètres Codeur-RZ-binaire.

Les Codeurs-RZ-binaire cod2, cod3, cod4 ont la même configuration que cod1.

➤ **Convertisseur courant-tension :**

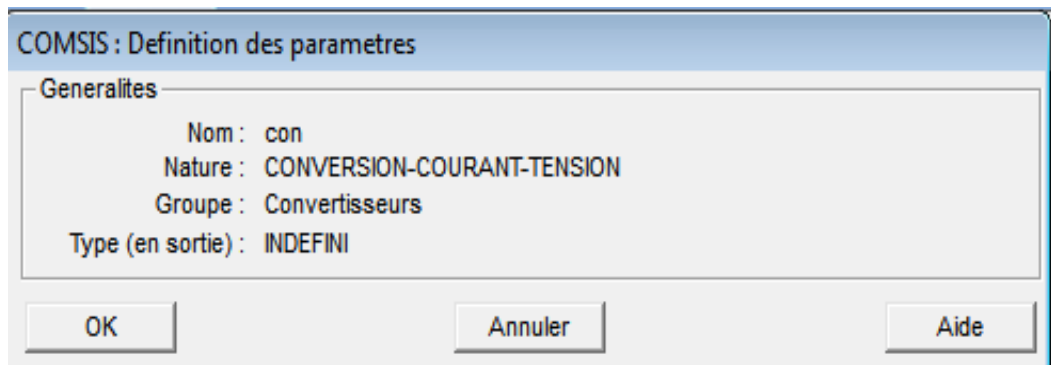


Figure 3.31: Paramètres Convertisseur courant-tension

➤ **Multiplexeur et Démultiplexeur (électrique)**

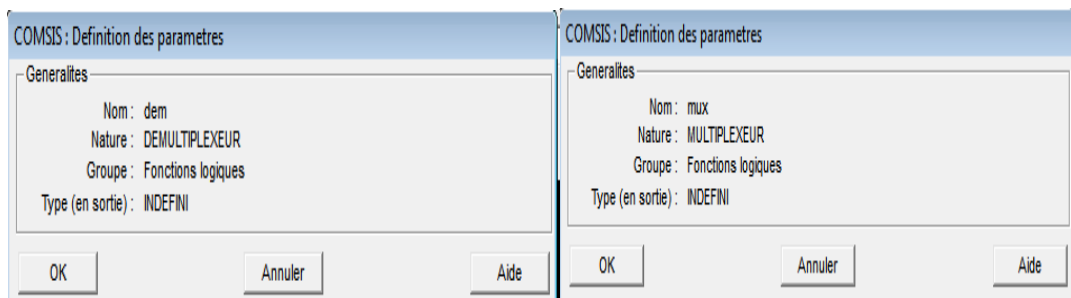


Figure 3.32 : paramètre multiplexeur et Démultiplexeur électrique

➤ **Détection-seuils**

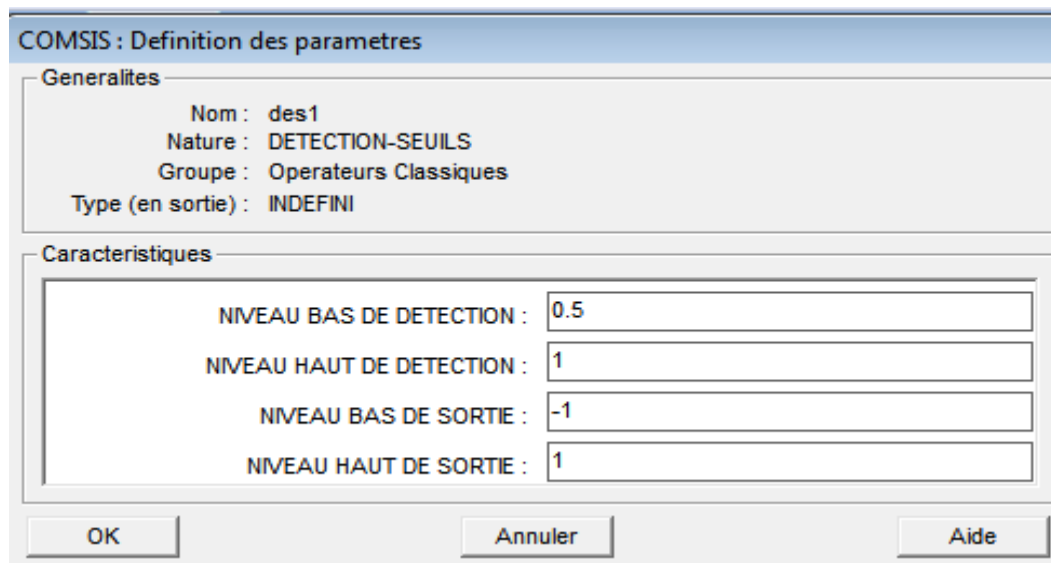


Figure 3.33 : paramètre Détection-seuils

➤ **Décodeur-RZ-binaire**

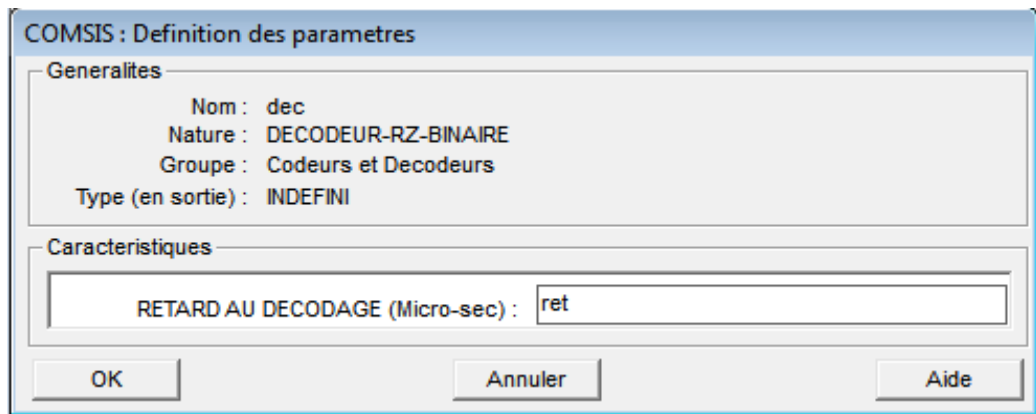


Figure 3.34 : paramètre Décodeur-RZ-binaire

NB: concernant les deux fibres, le laser, l'amplificateur optique et le Photodétecteur ils ont les mêmes configurations que premier partie WDM.

c Résultats de simulation

Après avoir configuré et nommée 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'erreur TEB. Les graphes obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous.

- **Visualisation des signaux d'entries**

Pour un débit totale = 400Mb/s et la longueur de la fibre L=60km.

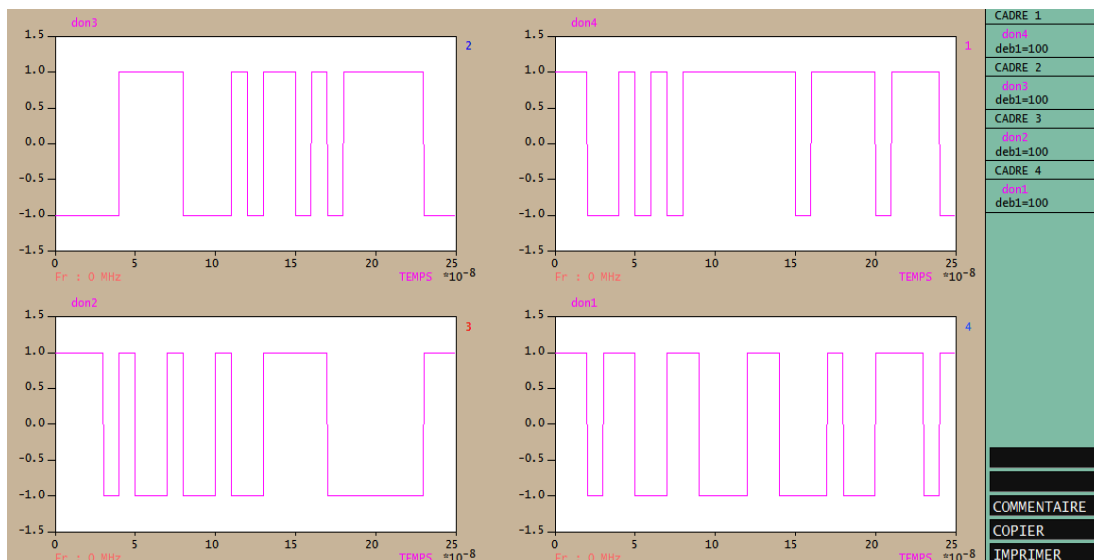


Figure 3.35 : Réponse temporelle de la séquence binaire aléatoire.

- **le signal issu du laser (puissance)**

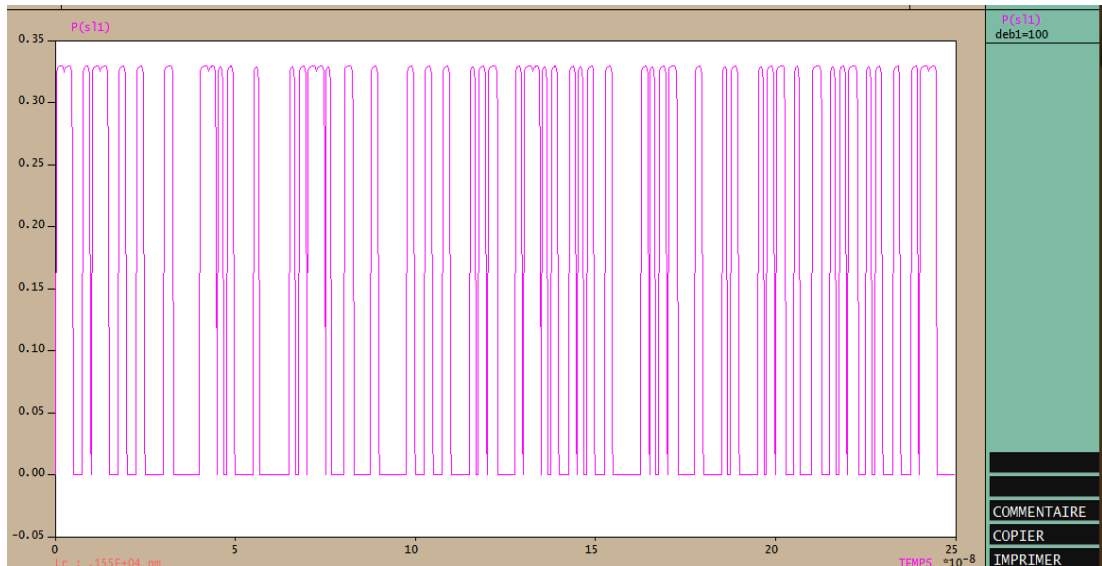


Figure 3.36 : La puissance du laser.

- **Réponse temporelle des sorties.**

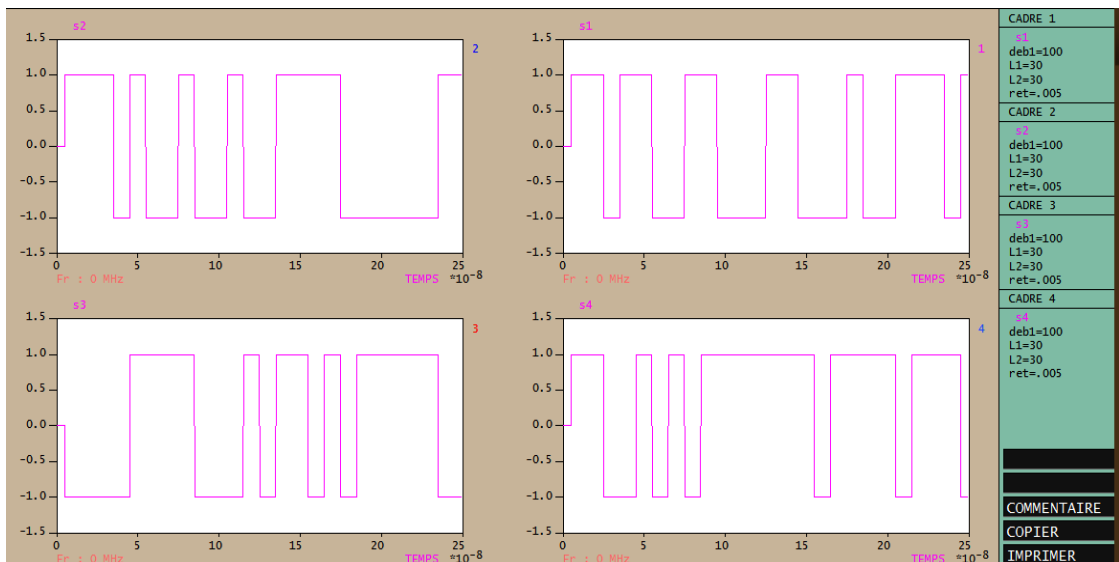


Figure 3.37: Réponse temporelle des sorties.

D'après la transmission des données on remarque que Les signaux d'entrées sont bien récupérés.

- **Diagramme de l'œil des sorties :**

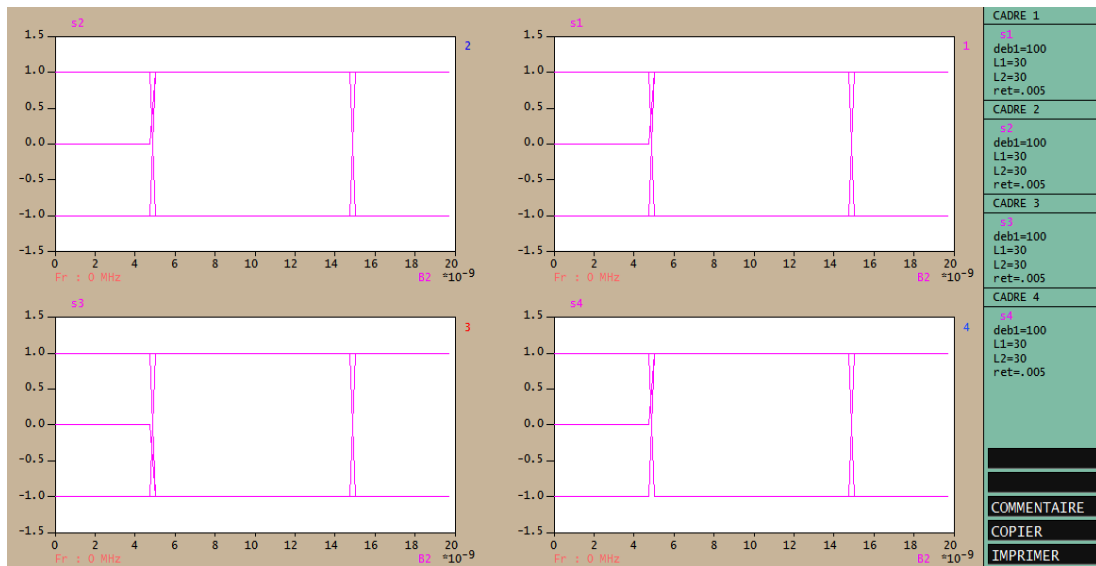


Figure 3.38: Diagramme de l'œil des sorties (s1, s2, s3, s4)

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le logiciel de simulation COMSIS.

Nous avons réalisé une première simulation d'une liaison WDM à quatre entrées. L'influence du débit et de la longueur de la liaison sur ses caractéristiques a été étudiée.

Une deuxième simulation de la liaison ETDM a été réalisée.

L'analyse des résultats de simulation montre que le débit et la longueur dégradent la qualité de la liaison.

Conclusion générale

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. L'utilisation des technologies de multiplexage dans le domaine optique, permet d'exploiter complètement la très large bande passante de la fibre optique, donc on peut atteindre des très hauts débits (quelques Tbit/s). Pour cela on retrouve les deux axes déjà mentionnés, l'augmentation du nombre de canaux et l'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. Il permet des gains de temps et d'argent en évitant les expérimentations itératives sur des démonstrateurs de systèmes.

Dans ce travail, nous avons tout d'abord décrit les différents composants d'une liaison par fibre optique, les différents multiplexages utilisés ont été présentés. Le logiciel COMSIS que nous avons utilisé a été décrit. Comme application, nous avons simulé deux types de multiplexages WDM et ETDM. L'influence du débit et de la longueur sur les caractéristiques de la liaison a été étudiée. Les résultats obtenus montrent que la qualité de la liaison dépend de ces deux paramètres.

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.

Faute de temps, notre travail a porté uniquement sur deux types de multiplexages, la suite de ce travail peut être envisagée par la simulation d'autres types de multiplexages plus complexes tels qu'OTDM et CDM.

Listes des acronymes et abréviations

AFDE	Amplificateur à fibre dopée à l'Erbium
AMRT	Accès Multiple à Répartition Dans Le Temps
AMRF	Accès Multiple à Répartition En Fréquence
ATM	Asynchrones Transfer Mode
COMSIS	Communication système interactive software
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
CDM	Code division Multiplexing
CDMA	Code division Multiplexing
C.C.I.T.T	Comite consultatif International Télégraphique et Téléphonique
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DEL	Diode électroluminescente
DL	Diode laser
DFB	Distributed Feedback laser
DBR	Distributed Bragg Reflector laser
ETDM	Electric time division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple accès
FDM	Frequency Division Multiplex
IRED	Ifra red emitting diode
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission Radiation
MRT	Multiplexage à répartition temporelle
NRZ	Non Return to zéro
OTDM	Optical Time Division Multiplexing
OCDM	Optical Code Division Multiplexing
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
PDA	Photodiode à avalanche
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
RZ	Return to Zéro

SCM	Multiplexage de sous porteuse
SDM	Multiplexage spatial
SNR	Signal to Noise Ratio
SDH	Synchronous Digitale Hierarchy
SONET	Synchronous Optical Network
STM	Synchronous Transfer Modul
TEB	Taux d'erreur binaire
TDM	Time Division Multiplexing
U-DWDM	Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing
UIT-T	Union International des Télécommunications – secteur Télécommunications
WDM	Wavelength Division Multiplexing

Bibliographie

[1]PFE : université de Blida option communication, n°50

C.A.O Des liaisons à fibre optique avec régénération optique et multiplexage en longueur d'onde.

[2]jean pierre NEROU, professeur centre spécialité de technologie Physique Cégep de la pocatière. Les fibres optiques (introduction aux télécommunications par fibre optique).

[3]PFE : Institut des télécommunications d'Oran, Promotion IGE26

Etude du budget optique d'une liaison à longue distance et à haut débit.

[4] PFE : Institut des télécommunications d'Oran

Transmission des données par voie optique

[5] PFE Institut des télécommunications d'Oran, Promotion : IGE26

Eude des différents formats de modulation dans une liaison optique à haut débit

[6] PFE : Institut des télécommunications d'Oran, Promotion IGE 26

Etude et simulation d'une transmission par WDM.

[7] JOINDOT Irène et Michel. Les télécommunications par fibre optique.

[8] Laude Jean-Pierre. Le multiplexage de longueur d'onde. MASSON 1992.

[9] GLAVIEUX A. et JOINDOT M, "Communications numériques : introduction", Collection Pédagogique de Télécommunication, Edition Masson, 1996.

[10]COLACHINO Jerry, "Optical Signal-to-Noise Ratio Measurement Techniques", Applications Enginner Dave Coppeta, Principal Systems Enginner Lightchip Inc.

<http://www.lightchip.com/technology/pdf/osnr.pdf>

[11]Maxim Integrated Products "Optical Signal-to-Noise Ratio and the Q-Factor in Fiber-Optic Communication Systems", MAXIM High-Frequency/Fiber Communications Group, Février 2002, Application Note : HFAN-9.0.2.

<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/4hfan902.pdf>

[12]Jean-Louis VERNEUIL, DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s.

21 novembre 2003

[13]<http://www.telcite.fr/naxosfr.htm>.

[14] TechOptique.pdf.

[15] l'aide de logiciel COMSIS.

[16]MERZOUK_ Khalil 2008, thèse de doctorale étude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage temporelle.

[17]http://deptinfo.cnam.fr/Enseignement/Memoires/LUSTEAU.Franck/Pages/Les_multiplexages.htm

[18]l'aide de COMSIS

[19]http://deptinfo.cnam.fr/Enseignement/Memoires/LUSTEAU.Franck/Pages/Les_multiplexages.htm.

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1 la liaison optique

1.1	Introduction	3
1.2	Emetteur optique.....	4
1.2.1	Sources	4
1.2.2	Les diodes laser	6
a	caractéristique des diodes laser.....	6
b	Différents types de Laser à semi-conducteur	8
1.2.3	Les diodes électroluminescentes	8
1.2.4	Comparaison entre DEL et DL	10
1.2.5	Modulateurs.....	10
a	Modulation directe	10
b	Modulation externe	11
1.2.6	codage de la source.....	11
a	Codage RZ (Return to Zero).....	11
b	Codage NRZ (Non Return to Zero).....	12
c	Codage Manchester	13
1.3	Ligne de transmission	14
1.3.1	la fibre optique	14
a	Présentation générale des fibres	14
b	Classification des fibres optiques	15
c	Comparaison entre fibre monomode et multimode	16
d	Caractéristiques des fibres optiques	16
1.3.2	Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (AFDE).....	20
1.3.3	Multiplexeur/Démultiplexeur Optique	21
1.4	Récepteur optique	22
1.4.1	principe de détection de base	22

1.4.2	Le photo-détecteur	22
a	Les photodiodes PIN.....	23
b	APD (Avalanche Photo Diode).....	24
1.4.3	Caractéristique d'un photo-détecteur	25
a	Le rendement quantique	25
b	La longueur d'onde de coupure	25
c	La sensibilité	25
1.5	Critères de Qualité	25
1.5.1	Probabilité d'erreur et le taux d'erreur binaire	26
1.5.2	Facteur Q.....	27
1.5.3	Diagramme de l'œil.....	28
1.5.4	Rapport signal à bruit.....	31
1.5.5	Comparaisons des critères	31
1.6	Conclusion	33

Chapitre 2 les techniques de multiplexages

2.1	Introduction	34
2.2	Multiplexage en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Multiplexing)	35
2.2.1	Principe de WDM	35
2.2.2	Les technologies de multiplexage	37
a	Multiplexage à Filtre Optique	37
b	Multiplexage à coupleurs sélectif	39
c	Multiplexage à réseau de diffraction	39
2.2.3	L'avenir du WDM.....	39
2.3	DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)	40
2.4	U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing)	40
2.5	CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)	41
2.6	Multiplexage à répartition temporelle MRT (TDM : Time Division Multiplexing)	41

2.6.1	Le multiplexage temporel optique (OTDM)	43
2.6.2	Le multiplexage temporel électronique (ETDM)	46
2.6.3	Les protocoles SONET et SDH	48
2.7	multiplexage à répartition par code (CDM)	50
2.8	Multiplexage fréquentiel (FDM, Frequency Division Multiplex)	52
2.9	multiplexage de sous porteuse (SCM)	53
2.10	multiplexage spatial (SDM)	53
2.11	Conclusion	54

Chapitre 3 simulations et résultats obtenues

3.1	Introduction	55
3.2	Présentation du logiciel	56
3.2.1	L'éditeur de schéma-bloc	56
3.2.2	La bibliothèque	56
3.2.3	La simulation	57
a	La modélisation du système	57
b	L'analyse du système	57
c	La simulation d'un système	57
3.2.4	Les résultats de simulation	58
a	Les différentes analyses	58
b	La visualisation et le traitement des résultats	59
3.3	La simulation	62
3.3.1	Multiplexage en longueur d'onde	62
a	Description de la liaison	62
b	Définition des caractéristiques des éléments de la liaison	63
3.3.2	Résultats de simulation	68
a	Visualisation des signaux d'entrées	68
b	Densité spectrale des sorties de fibre1, amplificateur, multiplexeur et fibre2..	68
c	Réponse temporelle des sorties	69

d	Diagramme de l'œil des portées	69
3.3.3	Influence du débit sur les caractéristiques de la liaison	70
3.3.4	Influence de la longueur de la fibre sur la qualité de la liaison	72
3.3.5	Le multiplexage temporel électronique (ETDM)	75
a	description de la liaison.....	75
b	les caractéristiques des éléments de la liaison	76
c	Résultats de simulation	78
3.4	Conclusion	80
	Conclusion générale	81
	Bibliographie	