الجمهوريةالجزائريةالديمقر اطيةالشعبية République Algérienne démocratique et populaire

وزارةالتعليمالـعاليوالبحـثالعـلمـي Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



جامعةسعددحلبالبليدة Université SAAD DAHLAB de BLIDA

> كليةالتكنولوجيا Faculté de Technologie

قسمالإلكترونيك Département d'Électronique

Mémoire de Master

Mention Électronique Spécialité Micro-Optoélectronique

présenté par

DerghalKoussaila

&

Ali Cherif Khadidja

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option Microoptoélectronique

Optimisation d'une transmission optique

Proposé par : Mr n.Khorissi

Année Universitaire 2015-2016

Au terme de ce mémoire on remercie en premier lieu Dieu tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

On adresse toute notre gratitude à notre encadreur : Mr N. khorissi professeur à l'université de SAAD DAHLAB 'BLIDA'', pour son suivi, sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Et on lui souhaite un bon rétablissement.

Nos remerciements vont également à Mme ZERROUK pour son aide et sa compréhension.

On tient à remercier les membres du jury pour leur honorable présence et pour leur contribution effective dans l'enrichissement de ce mémoire.

On désir aussi remercier les professeurs du département d'électronique, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Enfin, on exprime nos vives reconnaissances à nos parents pour leurs motivations, leur présence et leur soutien moral.

ملخص: الهدفمنهذهالمذكرة،يقومعلىتحسينخطنقلبصريذاتتدفقعاليباستخداممحاكاة

COMSIS،و هذاالأخير لتقييمأثر الانحر افاتمنالمعلماتالماديةللمكوناتعلىأداءر ابطالانتقالمنجهاز الإرسالإلىجهاز الاستقبالمنخلالالأليافالبصريةالمفردة. ومنأجلذلكفإنهسيتمتعيينالمعلماتالتيستختار حسبمحاكاتناوفيعدةمر اتللحصولعلىإشار ةذاتنو عيةجيدة

> عندالاستقبالدو نفقدانالمعلو ماتالمر سلة. كلماتالمفاتيح:الاتصالات, خطنقل,الأليافالبصرية.

Résumé :

L'objectif de ce mémoire, se base sur une optimisation d'une ligne de transmission optique à haut débits à l'aide du simulateur COMSIS, ce dernier nous permet d'évaluer l'impact des dérives des paramètres physique des composants sur les performances de notre liaison en allant de l'émetteur vers le récepteur à travers une fibre optique monomode. les paramètres seront choisis au fur et à mesure de notre simulation jusqu'à l'obtention de la bonne qualité de signal à la réception avec un minimum de perte de l'information.

Mots clés : télécommunications, ligne de transmission, fibre optique.

Abstract :

The purpose of this brief is based on an optimization of an optical transmission line high flow rates with the COMSIS simulator, it allows us to assess the impact of deviations of physical parameters of the components performance our link from the transmitter to the receiver through a monomode optical fiber. The parameters will be chosen at as our simulation until the good signal quality at the reception with minimal loss of information.

Keywords: Telecommunications, Transmission line, Optical fiber.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 Généralités sur les systèmes de transmission opti	que
1.1 Introduction	2
1.2Les systèmes de communication optique	2
1.2.1 Le réseaulongue distance (WAN)	4
1.2.2Le réseau métropolitain(MAN)	4
1.2.3 Le réseau local (LAN)	6
1.3 Techniques de multiplexage optique	7
1.3.1 Principe	7
1.3.2 Multiplexage temporel	8
1.3.2.1 FDM(Frequency Division Multiplexing)	8
1.3.2.2 TDM(Time Division Multiplexing)	10
1.3.2.3 OTDM (Optical Time Division Multiplexing)	11
1.3.3 Multiplexage en longueur d'onde	12
1.3.3.1WDM/DWDM	12
1.3.3.1.1 Source	15
1.3.3.2 Multiplexage FDM/TDM combinés	16
1.4 Techniques de modulation	16
1.4.1 La modulation directe	17
1.4.2 La modulation externe	17
1.5 Conclusion	
Chapitre 2 Description d'une liaison optique	

2.1 Introduction	19
2.2 Description	
2.3 Emission optique	20
2.3.1 Spectre électromagnétique	20

2.3.1.1 Les ondes radios	21
2.3.1.2 Les micros ondes	21
2.3.1.3 Le spectre infrarouge	21
2.3.1.4 Le spectre visible ou lumière	21
2.3.1.5 Les rayons ultra-violets	21
2.3.1.6 Les rayons X	22
2.3.1.7 Les rayons gamma	22
2.3.2 Diodes électroluminescentes (DEL)	22
2.3.3 La diode laser (DL)	23
2.3.3.1 Principe du laser	23
2.3.3.2 Laser Fabry-Pérot	24
2.4 Définition d'une fibre optique	25
2.4.1 Avantages et inconvénients de la fibre optique	26
2.4.2 Principe de fonctionnement de la fibre optique	26
2.4.3 Les types de fibre optique	27
2.4.3.1 Fibre optique multimode	27
2.4.3.1.1 Fibre optique multimode à saut d'indice	27
2.4.3.1.2 Fibre optique multimode à gradient d'indice	28
2.4.3.2 Fibre optique monomode	29
2.4.4 Comparaison entre les différents types de fibre optique	29
2.5 L'atténuation	30
2.6 Généralités sur l'amplification optique	31
2.6.1 Amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA)	32
2.6.2 Les amplificateurs Raman	33
2.7 La dispersion dans la fibre optique	34
2.7.1 Dispersion modale	34
2.7.2 Dispersion chromatique	35
2.7.2.1 Dispersion matérielle	36
2.7.2.2 Dispersion du guidage	36
2.7.3 Dispersion de polarisation	37
2.8 Réception optique	37

2.8.1 Les photodétecteurs	
2.8.1.1 Principe de la photodétection	
2.8.1.2 Les photodiodes PIN	
2.8.1.3 Les photodiodes à avalanche (PDA)	
2.9 Conclusion	40

Chapitre 3 Partie Simulation

3.1 Présentation du simulateur COMSIS	41
3.1.1 Introduction	41
3.1.1.1 Le simulateur système COMSIS	42
3.1.1.2 L'éditeur de schéma-bloc	43
3.1.1.3 La bibliothèque	43
3.1.2 Aperçu sur la simulation	44
3.1.2.1 La modélisation du système	44
3.1.2.1.1 Représentation des signaux	45
3.1.2.1.2 Représentation des opérateurs fonctionnels	45
3.1.2.1.3 Les opérateurs linéaires	45
3.1.2.1.4 Les opérateurs non-linéaires	45
3.1.2.2 L'analyse du système	46
3.1.2.2.1 Réduction formelle	46
3.1.2.2.2 Réduction numérique	
3.1.2.2.2 Réduction numérique 3.1.2.2.3 Détermination des fréquences de référence	
3.1.2.2.2 Réduction numérique 3.1.2.2.3 Détermination des fréquences de référence 3.1.3 Présentation des résultats dans le simulateur COMSIS	
 3.1.2.2.2 Réduction numérique 3.1.2.2.3 Détermination des fréquences de référence 3.1.3 Présentation des résultats dans le simulateur COMSIS 3.1.3.1 Les différentes analyses 	
 3.1.2.2.2 Réduction numérique 3.1.2.2.3 Détermination des fréquences de référence 3.1.3 Présentation des résultats dans le simulateur COMSIS 3.1.3.1 Les différentes analyses	
 3.1.2.2.2 Réduction numérique 3.1.2.2.3 Détermination des fréquences de référence 3.1.3 Présentation des résultats dans le simulateur COMSIS 3.1.3.1 Les différentes analyses	
 3.1.2.2.2 Réduction numérique	

3.1.3.2.3 Le diagramme de constellation	51
3.1.3.2.4 La densité spectrale de puissance	51
3.1.3.2.5 La puissance instantanée	51
3.1.3.3 Sauvegarde des résultats de simulation	51
3.1.3.4 Bilan de puissance	52
3.1.3.5 Rapport signal à bruit	52
3.1.3.6 Détermination du facteur Q	52
3.1.3.7 Taux d'erreur sur les bits	52
3.1.3.8 La visualisation de courbes de taux d'erreurs sur les bits	52
3.1.3.9 Modifications des paramètres de simulation	53
3.1.4 Simulation de la transmission optique	53
3.1.4.1 Forme des impulsions de la diode laser	53
3.1.4.2 Effet de la dispersion chromatique de la fibre	53
3.1.4.3 Conditions d'utilisation de l'EDFA	54
3.1.5 Caractéristiques des éléments de la liaison	54
3.2 Résultats de simulation et interprétation	57
3.2.1 Introduction	57
3.2.1.1 L'effet de la longueur d'onde sur le laser	57
3.2.1.2 L'effet du courant de seuil sur le laser	62
3.2.1.3 L'effet du débit binaire sur le laser	66
3.2.1.4 L'effet de la dispersion chromatique sur la fibre optique	69
3.2.1.5L'effet de la longueur de la fibre optique	75
3.2.1.6 l'effet de la longueur de la fibre sur la puissance de L'EDFA	78
3.2.2 Conclusion	80
Conclusion générale	81
Annexe A.Caractéristiques dynamiques des diodes laser	82
Annexe B.TEB et facteur Q	83
Annexe C. Représentation du diagramme de l'œil	84
Bibliographie	85

Liste des figures

Figure 1.1: Architecture typique du réseau de télécommunication
Figure 1.2 : Réseau métropolitain structurant et réseau métropolitain d'accès4
Figure 1.3: Installation client d'un opérateur5
Figure 1.4: Représentation du réseau local7
Figure 1.5 : Exemple de multiplexage fréquentiel de trois canaux téléphoniques8
Figure 1.6: Multiplexage des fréquences en ADSL9
Figure 1.7 : Séparation du téléphone et des données chez l'usager en ADSL
Figure 1.8 : Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps 10
Figure 1.9: Multiplexage temporel dans la hiérarchie PDH en Europe
Figure 1.10 : Réseau local a répartition temporelle11
Figure 1.11: Fenêtres de transmission optique12
Figure 1.12 : Peigne des fréquences en DWDM13
Figure 1.13:DWDM unidirectionnel et bidirectionnel13
Figure 1.14 : Principe d'une liaison WDM/DWDM13
Figure 1.15 : Indépendance des débits et formats de chaque canal en WDM14
Figure 1.16 : Combinaisons entre les différentes couches services et transports 14
Figure 1.17: Schéma de principe d'un multiplexeur à insertion/extraction optique (Optical Add Drop Multiplexing : OADM)15
Figure 1.18 : Schéma de principe d'un brasseur optique (Optical Cross-Connect:OXC) 16
Figure 1.19 : Synoptique de la modulation directe17
Figure 1.20 : Synoptique de la modulation externe

Figure2.1: Schéma d'une liaison optique	. 20
Figure 2.2: Spectre électromagnétique	. 21
Figure 2.3: Emission spontanée	. 22
Figure 2.4:Fonctionnement d'un laser	. 23
Figure 2.5 (a,b) : Processus d'absorption et de l'émission stimulée	. 24
Figure 2.6: Structure d'une fibre optique	. 25
Figure 2.7: Le guidage de la lumière dans une fibre optique	. 26
Figure 2.8: Fibre optique multimode à saut d'indice	. 28

Figure 2.9: Fibre optique multimode à gradient d'indice	28
Figure 2.10: Fibre optique monomode	29
Figure 2.11: L'atténuation dans une fibre optique	30
Figure 2.12: Les pertes de propagation de la fibre optique	30
Figure 2.13: Schéma synoptique d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium	32
Figure 2.14: Phénomène de la dispersion dans une fibre optique	34
Figure 2.15: Dispersion modale, propagation d'un mode rapide et d'un mode lent.	35
Figure 2.16: La dispersion chromatique	36
Figure 2.17: Représentation des modes dégénérés du mode LP01	37
Figure 2.18: Photodiode PIN	38
Figure 2.19: Photodiode à avalanche PDA	39

	Figure 3.1: schéma-bloc COMSIS	. 42
	Figure 3.2: La bibliothèque de modèles de COMSIS	. 43
	Figure 3.3: Le menu d'analyse de COMSIS	. 47
	Figure 3.4: L'écran de visualisation des résultats de COMSIS.	. 49
	Figure 3.5: Fenêtre d'évaluation des performances	. 50
	Figure 3.6: Synoptique de la liaison métropolitaine	. 53
	Figure 3.7: la diode laser	. 54
	Figure 3.8: Générateur de bits	. 55
	Figure 3.9: Fibre optique	. 55
	Figure 3.10: Photodiode	. 56
	Figure 3.11 : EDFA (amplificateur optique)	. 56
	Figure 3.12 : puissance de laser a λ =1330 nm	. 57
	Figure 3.13 : digramme de l'œilà la sortie pour λ =1330 nm	. 58
	Figure 3.14 : courbe de TEB pour λ =1330 nm	. 58
	Figure 3.15 : puissance de laser a λ =1550 nm	. 59
	Figure 3.16: digramme de l'œilà la sortie pour λ =1550 nm	. 59
	Figure 3.17 : courbe de TEB pour λ =1550 nm	. 60
Fi	gure 3.18 : puissance de laser a λ =2000 nm	. 60

Figure 3.19: digramme de l'œilà la sortie pour λ =2000 nm
Figure 3.20 : courbe de TEB pour λ =2000 nm61
Figure 3.21 : puissance de laser pour un courant de seuil de 15 ma
Figure 3.22 : digramme de l'œilà la sortie pour un courant de seuil de 15 ma
Figure 3.23 : courbe de TEB pour un courant de seuil de 15 ma
Figure 3.24 : puissance de laser pour un courant de seuil de 20 ma
Figure 3.25 : digramme de l'œilà la sortie pour un courant de seuil de 20 ma 64
Figure 3.26 : courbe de TEB pour un courant de seuil de 20 ma
Figure 3.27 : puissance de laser pour un débit de 1Gbits/s66
Figure 3.28 : digramme de l'œilà la sortie pour un débit de 1 Gbits/s
Figure 3.29 : courbe de TEB pour un débit de 1 Gbits/s67
Figure 3.30 : puissance de laser pour un débit de 10 Gbits/s67
Figure 3.31 : digramme de l'œilà la sortie pour un débit de 10 Gbits/s
Figure 3.32 : courbe de TEB pour un débit de 10 Gbits/s68
Figure 3.33 : puissance de laser pour une dispersion chromatique de 10ps /nm.km 69
Figure 3.34 : digramme de l'œilà la sortie pour une dispersion chromatique de 10ps/nm.km
Figure 3.35 : courbe de TEB pour une dispersion chromatique de 10ps/nm.km
Figure 3.36 : puissance de laser pour une dispersion chromatique de 100ps /nm.km. 71
Figure 3.37 : digramme de l'œilà la sortie pour une dispersion chromatique de 100ps/nm.km71
Figure 3.38 : courbe de TEB pour une dispersion chromatique de 100ps/nm.km 72
Figure 3.39 : puissance de laser pour une dispersion chromatique de 1000ps /nm.km.
Figure 3.40 : digramme de l'œilà la sortie pour une dispersion chromatique de 1000ps/nm.km
Figure 3.41 : courbe de TEB pour une dispersion chromatique de 1000ps/nm.km 74
Figure 3.42 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 50 Km
Figure 3.43 : digramme de l'œilà la sortie pour une longueur de fibre à 50 Km75
Figure 3.44 : courbe de TEB pour une longueur de fibre à 50 Km

Figure 3.45 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 200 Km	76
Figure 3.46 : digramme de l'œilà la sortie pour une longueur de fibre à 200 Km.)	77
Figure 3.47 : courbe de TEB pour une longueur de fibre à 200 Km	77
Figure 3.48 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 10 Km (EDFA)	78
Figure 3.49 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 150 Km (EDFA)	79
Figure 3.50 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 500 Km (EDFA)	79

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Comparaison entre les différents types de fibres optiques.	29
Tableau 3.1: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes valeurs de longueur d'onde λ	52
Tableau 3.2: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes valeurs de courant de seuil	65
Tableau 3.3: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes valeurs de débit binaire.	69
Tableau 3.4: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes valeurs de dispersion chromatique	74
Tableau 3.5: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes longueurs de la fibre	78

Il n'y a pas si longtemps, après avoir supplanté le câble coaxial, la fibre optique est devenue un des moyens les plus utilisés pour transporter tous types de données (audio, vidéo, Internet)[1]. Ce choix est dû en particulier aux efforts soutenus des chercheurs dans le domaine des télécommunications optiques. Jusqu'au début des années 1990, l'amplification dans les lignes longues distances était assurée par des dispositifs optoélectroniques qui nécessitaient une conversion électrique-optique en entrée et optique-électrique en sortie ce qui limitait le débit des réseaux à celui des répéteurs-régénérateurs (2Gbit/s au mieux)[1].

Les télécommunications optiques ont acquis une importance considérable dans les réseaux de communication longues distances. L'un des principaux critères de cette réussite tient à la grande bande passante de la fibre, mais surtout dans les très faibles pertes qu'elle présente. La conception de système de transmission à très grande capacité était désormais possible. Ceci fait de la fibre un élément indispensable des réseaux métropolitains, transnationaux et intercontinentaux [2].

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

Dans ce mémoire, nous proposons l'étude d'une transmission optique en se focalisant sur l'optimisation des performances de la transmission en agissant sur les différents paramètres physiques des composants.

Le premier chapitre décrira les structures des réseaux de télécommunications, ainsi que les diverses techniques d'utilisation de la capacité des fibres optiques. Cette description aidera le lecteur par la suite à comprendre la constitution d'une liaison sur fibre optique.

Le second chapitre détaillera l'ensemble des composants présents dans une liaison optique et expliquera leur fonctionnement.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation du logiciel de simulation, et aussi à l'ensemble des résultats de simulations obtenus pour optimiser le système de transmission.

Chapitre 1 Généralités sur les systèmes de

transmission optique

1.1 Introduction

La conception de systèmes de transmission à très grande capacité était désormais possible avecl'apparition de la fibre optique qui a totalement révolutionné le monde des Télécommunications. De plus, les échanges à travers ces systèmes allaient être de plus en plus nombreux et la demande de services à augmenter [3].

Dans ce chapitre on donne quelque généralité sur les systèmes de transmissions optique sachant que la première partie contienne les différentes couches de réseaux de télécommunications optiques actuels.

La seconde partie évoquera les différentes techniques de multiplexages qui permettent de partager une même ressource entre plusieurs utilisateurs, bien que le transports de très grand quantités d'informations par la large bande passant de la fibre optique, ce dernier son utilisation optimale se heurte à divers problèmes, dont le traitement électronique avant modulation et après détection pour les très hauts débits.

Ce chapitre ce terminera donc par les méthodes de modulations utiliser pour un signal optique émis et de même les techniques de détections au niveau de la réception.

1.2 Les systèmes de communication optique

Un système optique est un ensemble d'éléments optiquespermettant de modifier la trajectoire des rayons lumineux ou les propriétés de la lumière. La lumière y subit des réflexions, des réfractions, des diffusions, des diffractions, des filtrages, etc. suivant le niveau d'analyse des trajets.

L'aboutissement de nombreuses années de recherche de base pour obtenir d'une part des fibres présentant une atténuation compatible avec les exigences d'un réseau de télécommunications, d'autre part des composants et dispositifs suffisamment performants et fiables a permis l'apparition des premiers systèmes de transmission optique dès les années 90.

Ils sillonnent désormais le monde entier, aussi bien sur terre que dans le domaine sous-marin.

On distingue trois grandes catégories :

- Les réseaux étendus (ou les WAN, Wide Area Network). Ce sont les réseaux dont les nœuds sont de très grands centres urbains, et qui sont déployés à l'échelle d'un pays ou d'un continent.
- Les réseaux métropolitains (Métropolitain Area Network = MAN) qui correspondent aux réseaux mis en œuvre dans une grande ville ou une agglomération et qui permettent de relier entre eux par exemple différents arrondissements.
- Les réseaux locaux (Local Area Network = LAN) encore appelés réseaux de distribution ou réseaux d'accès. Ils représentent le dernier maillon et finissent d'acheminer les informations à l'abonné. Ils sont donc plus courts et moins gourmands en capacité.



Figure 1.1: Architecture typique du réseau de télécommunication [4].

1.2.1 Le réseau étendu (WAN)

Parfois également appelé réseau structurant, cette partie du réseaureprésente la couche supérieure du réseau de télécommunications. Elle est comprise entre deux autocommutateurs à autonomie d'acheminement, qui ont pour rôle d'aiguiller les informations d'une région à une autre, de la zone de l'expéditeur vers celle du destinataire. La transmission de ces informations se fait désormais sur fibre optique à une longueur d'onde de 1,55µm et à un débit élevé qui ne cesse de s'accroître (les débits 2,5 Gbits/s et 10 Gbits/s sont déjà installés et le 40 Gbits/s le sera très prochainement).

Cette capacité ne pourrait être atteinte sans l'introduction des fibres optiques dans la chaîne. Elles ont permis de gagner en débit et en espacement entre répéteurs par rapport aux systèmes existants, à savoir le câble coaxial (la distance passe typiquement de 2 à 100 km).

De plus, l'abandon des régénérateurs électro-optiques (photo détection, amplification électrique, reconversion optique) au profit des amplificateurs optiques, déployés environ tous les cent kilomètres, a permis de faire un bond en terme de capacité des liaisons. Dès le début des années 1990, l'amplification optique a permis de démontrer la possibilité de transmettre, sans répéteur, des signaux à 5 et 10 Gbits/s sur des distances transocéaniques. La liaison du réseau longue distance est désormais tout optique [4].

1.2.2 Le réseau métropolitain (MAN)

Encore appelé réseau intermédiaire, le réseau métropolitain connaît en ce moment un véritable essor. Déployé entre le dernier autocommutateur à autonomie d'acheminement du réseau longue distance et une zone plus précise (arrondissement, campus, petite ville, ...), il possède un environnement souvent très complexe et divers. Fondamentalement, on peut distinguer les réseaux métropolitains structurants et métropolitains d'accès.



Figure 1.2 : Réseau métropolitain structurant et réseau métropolitain d'accès [4].

Les réseaux métropolitains structurants sont généralement constitués d'anneaux de 80 à 150 km de circonférence avec six à huit nœuds. En revanche, les réseaux métropolitains d'accès sont des anneaux de 10 à 40 km de circonférence dotés de trois ou quatre nœuds avec des embranchements vers des sites distants. Suivant les réseaux ou les pays, ces chiffres peuvent varier considérablement. En particulier, il existe des différences notables entre les zones très peuplées d'Europe et d'Asie, où les distances seront inférieures, et les Etats-Unis où les applications métropolitaines s'apparentent à de véritables réseaux régionaux.



Figure 1.3: installation client d'un opérateure [4].

Les topologies logiques (profils de trafic) des réseaux métropolitains diffèrent radicalement de celles des réseaux longs distance. Ces derniers correspondent pour l'essentiel à des lignes interurbaines point à point avec tout au plus un ou deux multiplexeurs d'insertion-extraction optiques (OADM) pour insérer et extraire le trafic en des points intermédiaires. Les réseaux métropolitains introduisent une infrastructure optique à haut degré de connectivité. Les anneaux métropolitains se caractérisent généralement par un trafic maillé avec un certain degré de concentration lié à l'interconnexion avec le réseau longue distance.

Les anneaux d'accès, à la différence, collectent en général le trafic de plusieurs nœuds pour le concentrer vers un nœud partagé avec un réseau métropolitain structurant.

La complexité de ce réseau ne se traduit pas uniquement par le haut degré de connectivité. A la différence des réseaux longue distance, les réseaux métropolitains doivent prendre en charge des formats, des protocoles et des débits de transmission très divers, mêlant les trafics de la hiérarchie numérique synchrone (**SDH**) ou du réseau optique synchrone**(SONET**) ou autres encore. Pour supporter cette diversité, ces réseaux sont souvent équipés de cartes transpondeurs multi débits universelles, acceptant n'importe quel débit de 100 Mbits à2,5 Gbits/s, pouvant assurer ultérieurement le trafic à 10 Gbits/s sans modification (exemple du récent réseau Alcatel 1696 Metro Span), et dans une transparence totale vis-à-vis de tous les formats et protocoles.

Dans ces réseaux intrinsèquement ouverts à n'importe quel type de signal, le multiplexage en longueur d'onde (**WDM**), dont une description ultérieure sera faite, trouve une application importante en luttant contre l'encombrement que cela peut procurer tout en réduisant le coût par service apporté. De la même manière, les amplificateurs optiques sont essentiels pour les applications de réseaux métropolitains structurants. Les pertes élevées dans la fibre (dues à l'interconnexion de courts tronçons de fibre) et le cumul des pertes associées aux transits tout optiques dans des nœuds successifs peuvent imposer en effet d'amplifier le signal optique. L'amplificateur optique peut représenter dans bien des cas une solution à moindre coût comparée à la régénération optique-électrique-optique [4].

1.2.3 Le réseau local (LAN)

C'est la dernière partie du réseau de télécommunication, celle qui relie l'abonné et le dernier autocommutateur.Il est également nommé réseau de distribution ou d'accès, Sa longueur varie de 2 à 50 km et sa capacité est au plus du même ordre de grandeur que celle du réseau métropolitain. Il est toujours constitué par une partie en fibre optique entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. Cependant, il est de plus en plus envisagé dans l'avenir de réduire la contribution de l'électrique pour aller vers le tout optique dans le but d'augmenter le débit disponible chez l'abonné.

Selon la localisation de la terminaison optique, différentes configurations sont envisageables :

- FTTH/FTTO : est l'acronyme anglais de "Fiber To The Home / Fiber To The Office" la terminaison de réseau optique, qui est propre à un abonné donné, est implantée dans ses locaux. La fibre va donc jusqu'à son domicile ou son bureau, et la partie terminale en cuivre est très courte.
- FTTB:"Fiber To The Building" se traduit en français par "fibre jusqu'à l'immeuble" la terminaison de réseau optique va du central optique jusqu'au pied d'un immeuble, la fibre optique ne remonte pas l'immeuble, un boitier convertit le signal lumineux en signal électrique pour qu'il soit transporté du rez de chaussée vers les appartements en utilisant des liaisons en fil de cuivre.

FTTC/FTTCab: "Fiber To The Curb / Fiber To The Cabinet"signifie "fibre jusqu'au sous-répartiteur/ fibre jusqu'au cabinet" la terminaison de réseau optique est localisée soit dans une chambre souterraine, soit dans une armoire sur la voie publique, soit dans un centre de télécommunications, soit sur un poteau. Selon le cas, il est envisagé de réutiliser le réseau terminal en cuivre existant ou de mettre en œuvre une distribution terminale par voie radioélectrique[4].



Figure 1-.4: Représentation du réseau local [4].

1.3 Techniques de multiplexage optique

1.3.1 Principe

Les liaisons de transmission sont par définition coûteuses et offrent une capacité en B.P. (Hz) ou en débit (kbit/s) supérieure à celle requise par une seule communication, celle-ci peut donc être utilisée par plusieurs communications simultanément au moyen de techniques dites de multiplexage. Cette notion est souvent associée à celle de méthode d'accès, dite d'accès multiple, des différents usagers à une ressource commune, par exemple **TDM/OTDM** (Time Division Multiplexing) (Optical Time Division Multiplexing) bien qu'il s'agisse de notions différentes : le multiplexage concerne la technique de partage des ressources entre plusieurs usagers, l'accès multiple concerne les processus de partage des ressources entre ces usagers. L'accès multiple nécessite des règles (protocoles, algorithmes) et des systèmes de commande par lesquels un utilisateur peut accéder aux ressources (temps, fréquence) partagées[5].

1.3.2 Multiplexage temporel

1.3.2.1FDM(Frequency Division Multiplexing)

FDMest une technique de multiplexage par répartition de fréquence (MRF), elle consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous-bandes plus étroits et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur ou à un usage exclusif Elle est utilisée pour accroître les débits sur paires torsadées et plus particulièrement des lignes téléphoniques. [6].

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[6].



Figure 1.5: Exemple de multiplexage fréquentiel de trois canaux téléphoniques [6].

On trouve également un bon exemple de l'utilisation de FDM avec ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line). ADSL est né de l'observation qu'une ligne téléphonique possède une bande passante d'environ 1 Mhz dans laquelle seule, une largeur de bande de 4 Khz est utilisée pour les communications téléphoniques. Il reste donc une bande passante importante disponible pour un autre usage. C'est un multiplexage en fréquence qui va permettre son utilisation:

Frequency Division Multiplexing



Figure 1.6: Multiplexage des fréquences en ADSL [6].

Une bande de 4 kHz est réservée pour la téléphonie classique (POTS : Plain Old Telephone Service)Une bande est réservée pour le flux de données usager vers réseau. (Upstream Data : Voie montante).

Une bande est réservée pour le flux de données réseau vers usager. (DowstreamData : Voie descendante)L'ensemble de la bande passante s'étend sur 1,1 MHz.

Le canal dédié au téléphone est séparé des canaux dédiés aux données par un filtre passe-bas (Splitter) passif. Le filtre envoie également l'intégralité du signal au modem **ADSL** (ATU-R : ADSL transceiver unit-remote). Celui-ci est doté d'un filtre passe-haut qui élimine le canal dédié au téléphone. Le signal est ensuite traité par la technologie DMT pour être transmis à l'équipement informatique via une liaison de type Ethernet 10BaseT ou ATM25 [6].



Figure 1.7 : Séparation du téléphone et des données chez l'usager en ADSL [6].

1.3.2.2TDM (Time Division Multiplexing)

La technologie TDM ou "Multiplexage à répartition dans le temps" permet d'échantillonner les signaux de différentes voies à faibles débits et de les transmettre successivement sur une voie à haut débit en leur allouant la totalité de la bande passante.



Figure 1.8: Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps [6].

Cette technique de multiplexage permet à un ou plusieurs émetteurs de transmettre plusieurs canaux numériques élémentaires à bas ou moyen débit (voix, données, vidéo) sur un même support de communication à plus haut débit en entrelaçant dans le temps des échantillons de chacun de ces canaux.

On retrouve ce type d'utilisation sur les canaux T1 aux Etats-Unis qui regroupent par multiplexage temporel 24 voies à 64 kbit/s en une voie à 1,544 Mbit/s ou sur les canaux E1 en Europe qui regroupent 30 voies analogiques en une voie à 2,048 Mbit/s.Les canaux T1 ou E1 peuvent être multiplexés entre eux pour former des canaux à plus hauts débits. Cette hiérarchie des débits est appelée "PDH" (Plesiochronous Digital Hierarchy) ou hiérarchie numérique plésiochrone[6].



Figure 1.9: Multiplexage temporel dans la hiérarchie PDH en Europe [6].

Le multiplexage TDM présente toutefois un inconvénient dans le cas de PDH. L'accès ou l'insertion d'une information dans un canal E4 oblige à démultiplexer l'ensemble du train numérique.

De même les technologies SONET (Synchronous Optical NETwork) et SDH (Synchronous Digital Hierarchy) utilisées comme techniques de transport dans les réseaux téléphoniques des grands opérateurs pratiquent un multiplexage temporel pour assembler plusieurs lignes en une seule ligne de débit supérieur.Le multiplexage TDM peut être utilisé indifféremment sur paire torsadée ou fibre optique, il est indépendant du média de transmission [6].

1.3.2.30TDM (Optical Time Division Multiplexing)

Cette technique se réalise optiquement. L'émetteur est constitué de N sources optiques en parallèle modulées au débit D_bbits/s .Elle nécessite que les signaux optiques soient ensuite codés de type RZ pour que les impulsions codées aient désormais une durée inférieure à T_b/N et que le multiplexage optique puisse se faire sans recouvrement optique.

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

Le multiplexage optique temporel n'est pas utilisé uniquement pour accroître les débits transmis, il fournit aussi une technique d'accès utilisable dans les réseaux locaux. Le temps est partagé entre les différents utilisateurs : chacun d'eux dispos d'une tranche temporelle pour émettre. Les différents signaux sont assemblés pour être transmis sur une porteuse optique unique [7].



Figure 1.10 : Réseau local a répartition temporelle [7].

1.3.3 Multiplexage en longueur d'onde

Le multiplexage en longueurs d'ondes optiques est une technique de multiplexage qui peut se superposer a celle du multiplexage fréquentiel. Les fréquences se situent dans les plages de l'infrarouge, soit entre 190 THz (1,6 μ m) et 400 THz (0,75 μ m), dans sa forme la plus simple, le multiplexage de longueurs d'ondes optiques fait appel à une seule porteuse dans chacune des deux fenêtres de transmission optique situées à 1,3 et 1,5 μ m. Les opérations de filtrage peuvent ainsi être effectuées sans avoir recours à des techniques très onéreuses. Ce procédé est couramment utilisé pour séparer les deux sens de transmission d'un système bidirectionnel [8].



Figure 1.11: Fenêtres de transmission optique [8].

1.3.3.1 WDM/DWDM

La technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) met en œuvre un multiplexage de longueurs d'onde. L'idée est d'injecter simultanément dans une fibre optique plusieurs trains de signaux numériques sur des longueurs d'ondes distinctes, ce qui est l'inverse de la technologie TDM qui n'utilise qu'une seule longueur d'onde par fibre optique. Cette dernière se prête bien à ce type d'usage car sa bande passante est très élevée : de l'ordre de 25 000 GHz. Elle présente donc un fort potentiel au multiplexage de très nombreux canaux sur de longues distances.



Figure 1.12 : Peigne des fréquences en DWDM [6].

La technologie DWDM permet d'envoyer plus de longueurs d'onde différentes. En effet, l'espacement entre chacune d'entre elles peut être de 0,8 nm ou moins. Par exemple, on peut obtenir des fibres à 160 canaux optiques si on diminue l'espacement à 0,2 nm.L'utilisation d'une fibre peut-être unidirectionnelle ou bidirectionnelle[6].



Figure 1.13:DWDM unidirectionnel et bidirectionnel [6].

Les systèmes WDM et DWDM comportant 4, 8, 16, 32 et même 80 canaux optiques à 2,5 Gbit/s par canal sont les plus fréquemment commercialisés. Les débits atteints avec de tels systèmes sont de 10, 20, 40, 80 et même 200 Gbit/s. Un système à 16 canaux de 2,5 Gbit/s, soit 40 Gbit/s permet l'acheminement de 500 000 conversations téléphoniques simultanément sur une seule paire de fibre optique. Il faut également s'attendre à un accroissement du débit offert sur chaque canal qui pourrait rapidement atteindre 10 Gbit/s [6].



Figure 1.14 : principe d'une liaison WDM/DWDM [6].

Un des composants clés du WDM/DWDM est l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA, Erbium Dopedsilicabased Fibre Amplifier) qui permet de compenser les pertes d'insertion dues aux multiplexage/démultiplexage des longueurs d'onde. Il permet également une réduction du bruit. Ce type de technologie nécessite des amplificateurs tous les 50 à 100 km. Ceci est dû à des phénomènes non linéaires qui se développent lors de la propagation du signal dans la fibre et qui introduisent des risques de diaphonie et de mélange des canaux [6].

Les travaux récents du C.N.E.T (Centre National d'Etudes en Télécommunications) sur la transmission soliton montrent que l'on peut repousser cette limite à 1000 kilomètres. Un soliton est une onde qui se propage sans déformation remarquable de sa forme ni variation de sa vitesse. Ce phénomène a été remarqué pour la première fois sous la forme d'une vague dans un canal, mais il existe dans de nombreux domaines, dont la lumière.Chaque train de signaux numériques est véhiculé sur sa propre longueur d'onde comme sur une seule fibre. Ils peuvent dont être de débits et de formats différents.



Figure 1.15 : Indépendance des débits et formats de chaque canal en WDM [6].

On peut trouver par exemple sur une même fibre optique et véhiculés simultanément de la voix dans des trames SDH, de la vidéo dans des cellules ATM, des données dans des trames IP, etc. WDM est une technologie de transport indépendante des protocoles utilisés. Elle est donc capable de multiplexer sur une fibre optique ce que l'on sait faire transiter unitairement sur ce type média [6].



Figure 1.16 : combinaisons entre les différentes couches services et transports [6].

1.3.3.1.1 Source

Chaque canal peut être attribué à un usage particulier. Il est ainsi possible dans le cas d'un réseau métropolitain ayant une architecture physique en anneau de déployer à travers différents canaux des structures logiques maillées, en bus, point à point, en anneau ou en diffusion. L'attribution d'une longueur d'onde pour une utilisation donnée se fait par reconfiguration logicielle du système et ne nécessite aucune modification matérielle.

Les enjeux de cette technologie sont importants. Jusqu'à présent le développement des réseaux de télécommunications était basé sur l'utilisation des technologies de type SONET/SDH/TDM. Mais les besoins en bande passante ont dépassé les prévisions. Le câble transatlantique Gemini a ainsi saturé dès 1997, alors que cela n'aurait pas dû se passer avant 2001. Les opérateurs installent en moyenne des réseaux de 12, 24 voire 48 paires de fibres. La technologie DWDM va permettre de multiplier par au moins 16 la bande passante disponible sur ces réseaux[6].

Ilfaut noter que d'autres composants sont essentiels au développement des réseaux optiques pour qu'ils deviennent "tout optiques ", il s'agit des multiplexeurs à insertion/extraction optiques, des brasseurs optiques et des commutateurs optiques.



Figure 1.17: Schémas de principe d'un multiplexeur à insertion/extraction optiques (Optical Add Drop Multiplexing : OADM) [6].



Figure 1.18 : Schéma de principe d'un brasseur optique (Optical Cross-Connect : OXC) [6].

Ces fonctions sont aujourd'hui encore assurées par du matériel électrique; mais le temps de conversion des signaux électriques en signaux optiques et inversement est important. Une meilleure exploitation de la fibre et de DWDM passe donc par la mise en place de réseaux tout optiques [6].

1.3.3.2 Multiplexage FDM/TDM combinés

Dans ce cas, le signal de chaque source peut, pendant un TS(Time-slot), utiliser une partie du spectre disponible allouée à un groupe de sources. Une source est donc identifiée par une combinaison TS/bande de fréquences.

Si la combinaison TS/bande de fréquence assignée à une source peut varier dans le temps pendant la durée de la communication, on parle de techniques d'étalement du spectre [SS : "spread Spectrum"].

L'avantage de ces techniques est la diversité : résistance aux interférences et au fading, confidentialité.Diverses variantes de ces systèmes sont utilisées dans les radiocommunications et diffèrent par les méthodes d'accès. Citons notamment : CDMA [Code Division Multiple Access] qui peut être réalisé sous 2 manièresFH-CDMA [FH = frequencyhopping] ET DS-CDMA [DS = direct sequence] [9].

1.4 Techniques de modulation

La **modulation** peut être définie comme le processus par lequel le signal est transformé de sa forme originale en une forme adaptée au canal de transmission, par exemple en faisant varier les paramètres d'amplitude et d'argument (phase/fréquence) d'une onde sinusoïdale appelée porteuse.Le dispositif qui effectue cette modulation, en général électronique, est un modulateur (modem). L'opération inverse permettant d'extraire le signal de la porteuse est la démodulation [10].Il existe principalement 2 techniques : la modulation directe et la modulation externe.

1.4.1 La modulation directe

La modulation directe peut être assimilée à une technique de modulation de type "classique".

En effet, on va ici moduler directement le courant injecté en entrée de la diode. A la suite de cette modulation de courant, l'intensité de la lumière produise par la diode sera affectée. Plus le courant reçu par la diode est important, plus l'intensité lumineuse qu'elle délivrera sera puissante. Cependant, cette méthode de modulation comporte un inconvénient majeur. La modulation d'amplitude du courant affecte en effet la fréquence du signal émis. C'est pour cette raison qu'en général elle n'est plus très utilisée, au profit de la modulation externe [11].



Figure 1.19 : Synoptique de la modulation directe [11].

1.4.2 La modulation externe

La modulation externe consiste à graver les données électriques sur un signal optique continu en utilisant un modulateur.

Générateur de courant Driver Laser (Synoptique de la modulation directe), les défauts de la modulation directe qui sont liés au laser ne seront plus présents sur le signal optique.

Le modulateur est commandé par une tension externe **v(t)**, modulée et représentative de l'information à transmettre.

Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie.

Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est pur et peu dégradé, En traversant le modulateur il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon v(t). Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de v(t) et choisir les modifications du facteur de transmission [12].



Figure 1.20 : Synoptique de la modulation externe [12].

1.5 Conclusion

Ce chapitre de premier lieu a résumé les systèmes de communications par fibre optique dans différents réseaux, les techniques de multiplexage de données pour le partage des ressources entre plusieurs usagersont été présentées.

En clôture notre chapitre par les techniques de modulation de l'information pour l'adaptation de la transmission par le canal, nous proposons de détailler dans le second chapitre les éléments d'une liaison optique.

Chapitre 2 Description d'une liaison optique

2.1 Introduction

Il n'y a pas si longtemps, la fibre optique, est devenue un des média les plus utilisés pour transporter tous types de données (audio, vidéo, Internet). Ce choix est dû aux efforts soutenus des chercheurs dans le domaine des télécommunications optiques.

La croissance du trafic de l'information nécessite le développement des réseaux de télécommunications toujours plus performants. Pour y parvenir et grâce à des efforts de recherche, la capacité et la portée des liaisons optiques ont augmenté de manière considérable au cours de la dernière décennie.

C'est en 1970 que la compagnie Corning Glass Works de New York, produit la première fibre optique avec des pertes suffisamment faibles (20dB/km) pour être utilisée dans les réseaux de télécommunication.

Ce chapitre introduit les systèmes de transmissions optiques, nous décrivons les éléments constituants les extrémités d'une liaison optique à savoir l'émetteur et le récepteur du signal.

L'origine des principales dégradations subies par le signal au cours de sa transmission est ensuite passée en revue, à savoir l'atténuation dans la fibre, le bruit d'émission spontanée amplifiée des amplificateurs optiques, la dispersion chromatique, de polarisation et les effets non linéaires[2].

2.2 Description

La liaison optique se compose d'un émetteur (source laser), d'une fibre optique, un récepteur (photodétecteur) et éventuellement un ou plusieurs régénérateurs (amplificateur) comme illustré schématiquement sur la (figure 2.1). Son intérêt consiste à transporter l'information sous forme lumineuse entre deux points.



Figure2.1: Schéma d'une liaison optique [2].

La partie émission d'une liaison par fibre optique a pour rôle de délivrer au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données. En suite le canal de transmission (la fibre optique) transporte une porteuse optique modulée contenant l'information. Enfin le récepteur a pour rôle de convertir au mieux le signal optique en signal électrique [2].

2.3 Emission Optique

Le module d'émission permet de générer un signal électrique composé d'une séquence pseudo aléatoire de bits au débit désiré et de moduler l'intensité lumineuse à travers un modulateur du signal émis par une source laser. Selon le débit et le format, des différences apparaissent au niveau des modules d'émission [2].

2.3.1 Spectre électromagnétique

La lumière est une énergie rayonnante constituée d'ondes électromagnétiques qui peut se propager à une vitesse élevée dans le vide ou dans des matériaux diélectriques. Elle est caractérisée par sa longueur d'onde λ .

Les ondes électromagnétiques couvrent un large domaine de fréquences et peuvent être classées d'après leurs sources principales. Cette classification n'a pas de limites très précises puisque différentes sources peuvent produire des ondes dans des domaines de fréquences qui se recouvrent (figure 2.2).



Figure 2.2: Spectre électromagnétique [2].

Dans ce qui suit nous allons présenter les différentes classes du spectre électromagnétique[2].

En partant des ondes les plus énergétiques, on distingue successivement :

2.3.1.1 Les rayons gamma (γ)

Ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes. Leurs longueurs d'onde s'étendent d'un centième de 10-10M à 10-14M ce qui correspond à un domaine de fréquence de 3.1018Hz à 3.1022Hz. Les énergies des photons vont de 104eV à environ 107Ev [2].

2.3.1.2Les rayons X

Rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien), et dans la recherche pour l'étude de la matière (rayonnement synchrotron).

Cette partie du spectre électromagnétique s'étend de 10-9M à environ 6.10-12M en longueur d'onde et entre 3.1017Hz et 5.1019Hz en fréquence. L'énergie des photons varie de 1,2.103eV à 2,4.105eV [2].

2.3.1.3 Les ultraviolets

Ces ondes sont produites par des atomes et des molécules dans des décharges électriques, leur longueur d'onde s'étend de 3,8.10-7M à environ 6.10-10M et de 8.1014Hz à environ 3.1017Hz en fréquence. L'énergie des photons varie de 3eV à 2.103eV [2].

2.3.1.4Le domaine visible

Correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. Elle s'étend de 7,8.10-7M à 3,8.10-7M en longueur d'onde et en fréquence de 4.1014Hz à 8.1014Hz. L'énergie des photons va de 1,6eV à 3,2eV.

2.3.1.5Les ondes radios

Ce domaine de longueurs d'onde est le plus vaste du spectre électromagnétique, leurs longueurs d'onde vont de quelques mètres à quelques kilomètres, leur domaine de fréquence s'étend de quelques Hz jusqu'à 109HZ. L'énergie des photons va de pratiquement 0 à 10-5eV. Les ondes qui sont utilisées pour les transmissions radio et la télévision sont produites par des dispositifs électroniques essentiellement des circuits oscillants [2].

2.3.1.6Les micros ondes

Les longueurs d'ondes des micro-ondes vont de 0,3M à 10-3M. Leur domaine de fréquence s'étend de 109Hz à 3.1011Hz. L'énergie des photons va de 10-5eV à 10-3eV. Ces ondes sont utilisées dans les radars et d'autres systèmes de communication, les téléphones cellulaires, les fours à microonde [2].

2.3.1.7 Le spectre infrarouge

Celui-ci couvre les longueurs d'onde de 10-3M à 7,8.10-7M. Le domaine de fréquence s'étend de 3.1011Hz à 4.1014Hz et l'énergie des

photons va de 10-3eV à environ 1,6eV. Ces ondes sont produites par les molécules et les corps chauds. Ils sont utilisés notamment en médecine, dans l'industrie et l'astronomie [2].

2.3.2Diodes électroluminescentes (DEL)

Une DEL est une jonction PN polarisée en direct. Les électrons ou les trous qui constituent les porteurs majoritaires sont injectés dans le voisinage de la jonction. Leur recombinaison donne lieu à une émission de la lumière.



Figure 2.3: Emission spontanée [2].

Un atome dans un état excité peut se désexciter vers un état d'énergie plus basse même en l'absence de rayonnement en émettant un photon, par **émission spontanée**. Celle-ci est un phénomène aléatoire, car on ne peut pas prévoir quand et comment la transition se fera, et le photon est émis selon une direction aléatoire. (Figure 2.3) [2].

2.3.3 La diode laser (DL)

2.3.3.1 Principe du laser

On se base sur trois éléments essentiels pour obtenir l'effet laser qui sont le milieu amplificateur, une source externe (le pompage), et une cavité résonante (cavité Fabry-pérot).



Figure 2.4: Fonctionnement d'un laser [2].

Laser est l'acronyme de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation".

Les diodes lasers sont des composants primordiaux de l'optoélectronique d'aujourd'hui. Elles ont connu un développement important durant les deux dernières décennies. Elles ont bénéficié du développement des télécommunications par fibre optiques et de l'émergence de l'interconnexion optique. Elles se basent sur des processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière [2].

• L'absorption: L'atome peut passer d'un état a un état supérieur, les fréquences sont définit par: *hv* =*E*2-*E*1 où *E*2>*E*1.

Ce processus peut être interprété comme l'absorption d'un photon de rayonnement faisant passer l'atome du niveau d'énergie *E1* vers le niveau d'énergie *E2* (figure 2.5(a)) [2].

 L'émission stimulée : Un atome dans l'état supérieur peut se désexciter vers le niveau inférieur sous l'effet d'une onde électromagnétique, qui sera alors amplifié. L'émission d'un photon d'énergie *hv*va s'ajouter au rayonnement (figure 2.5(b))[2].


Figure 2.5: Processus d'absorption et de l'émission stimulé [2].

 L'émission spontanée apporte une contribution négligeable, car elle est omnidirectionnelle et seule une très petite fraction à la direction et le sens de l'onde incidente. De plus, ces ondes ne sont pas en phase. A l'équilibre thermique, l'absorption l'emporte sur l'émission induite. Par contre, en cas d'inversion de population, il est possible d'avoir une émission, le milieu est alors amplificateur. Dans les conditions d'équilibre thermique, le niveau d'énergie le plus bas E1 Contient plus d'électron que le niveau supérieur.

L'inversion de population est obtenue lorsqu'on crée un déséquilibre de la distribution des électrons de façon à ce que la population d'énergie le plus bas deviennent plus faible que celle du niveau d'énergie le plus élevé.

Pour réaliser cette inversion de population, il est nécessaire d'exciter l'atome à l'aide d'une source extérieure appelé « pompe ». La transition des électrons vers le niveau supérieur doit avoir une durée de vie suffisante de façon à pouvoir stocker suffisamment d'électrons et réaliser ainsi l'inversion de population désirée [2].

2.3.3.2 Laser Fabry-Pérot

Le laser Fabry-Pérot est constitué de deux miroirs plans, parallèles et réfléchissants entre lesquels les ondes lumineuses font de multiples allers-retours.

La réalisation pratique d'un résonateur de Fabry-Pérot est relativement simple dans le cas des diodes à semi-conducteurs. En effet, l'indice de réfraction des semi-conducteurs est très élevé par rapport à l'indice de l'air [2]. La différence d'indice entre un semi-conducteur et l'air implique une réflexion partielle d'environ 40% de tout faisceau perpendiculaire. Ainsi la surface du semi-conducteur constitue un miroir semitransparent naturel [2].

2.4Définition d'une fibre optique

La fibre optique utilisée pour les télécommunications est un mince filament cylindrique en verre qui permet de guider une onde électromagnétique, elle permet des transmissions sur de grandes distances et sur une large bande de fréquences.

La fibre optique consiste en une partie centrale, le cœur d'indice de réfraction 'n1' il transporte le signal optique. Entourée par une seconde partie qui est la gaine optique d'indice de réfraction 'n2', elle évite que le signal optique sorte du cœur. Un autre exemple de guide d'onde est le câble coaxial qui est utilisé pour transporter par exemple les signaux de télévision jusqu'à nos résidences.

La fibre optique est souvent recouverte d'un revêtement protecteur qui ne joue aucun rôle dans le guidage de la lumière (figure 2.6).



Figure 2.6: Structure d'une fibre optique [2].

La fibre optique est composée de trois parties principales :

- Le cœur: C'est la couche la plus importante en termes de transmission optique qui permet de guider les informations d'un bout à l'autre de la fibre sans trop de pertes.Il est Composé de silice, de quartz fondu ou de plastique.
- La gaine optique: Qui est composée des mêmes matériaux que le cœur. Son indice de réfraction est inférieur à celui du cœur (différence de quelques millièmes), ce qui permet de réfléchir la lumière entièrement de multiples fois à l'interface cœur-gaine (phénomène de réflexion totale interne). La gaine optique n'étant pas destinée à transmettre la lumière, il n'est pas nécessaire que ses propriétés optiques soient aussi

bonnes que celles du cœur. Le cœur et la gaine constituent la partie optique qui canalise et propage la lumière.

 La couche de protection: Généralement en plastique, le tube n'intervient pas dans la transmission de la lumière. Il assure la protection mécanique de la fibre, il sert à la flexibilité de la fibre et facilite sa manipulation, elle Permet le contact de la fibre avec des supports sans perturber le fonctionnement de la partie optique [2].

2.4.1 Principe de fonctionnement de la fibre optique

Lorsqu'un rayon lumineux est injecté dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre, en empruntant un parcours en zigzag (figure2.7).



Figure 2.7: Le guidage de la lumière dans une fibre optique [2].

L'ouverture numérique de la fibre **ON** représente le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre, α_{max} , pour que la lumière puisse être guidée sans pertes, cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre, l'ouverture numérique est définie par la relation suivante [2]:

ON=
$$sin\alpha_{max} = \sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2}$$

2.4.2 Avantages et inconvénients de la fibre optique

La fibre optique offre de nombreux avantages pour les télécommunications:[2]

• Bande passante très grande.

- Immunité au bruit.
- Absence de rayonnement vers l'extérieur.
- Absence de diaphonie.
- Isolation électrique.
- Résistance aux températures élevées et aux produits corrosifs.
- Poids et dimensions réduites.
- Très faibles pertes de transmission.

Mais Contrairement à d'autres supports de transmission la fibre optique présente un inconvénient qui est le cout d'exploitation élevé.

2.4.3 Les types de fibre optique

Il existe deux types de fibre optique:

- Fibre optique monomode.
- Fibre optique multimode.

2.4.3.1Fibre optique multimode

La fibre multimodea pour caractéristiques de transporter plusieurs modes (trajets lumineux) simultanément. Du fait de la dispersion modale, on constate un étalement temporel du signal. En conséquence, elles sont utilisées uniquement pour des bas débits et de courtes distances.

Il y a deux principaux types de fibre multimode: à saut d'indice et à gradient d'indice [2].

2.4.3.1.1 Fibre optique multimode à saut d'indice

L'indice de réfraction change brutalement à l'interface cœurgaine, c'est le « saut » qui provoque la réflexion totale des rayons. Le guidage de la lumière dans le cœur se fait en dent de scie. L'importante section du cœur provoque une grande dispersion des signaux la traversant, ce qui génère une déformation du signal reçu. La gaine joue un rôle actif dans le guidage de la lumière (figure 2.8) [2].



Figure 2.8: Fibre optique multimode à saut d'indice [2].

La fibre à saut d'indice possède un cœur très large. L'atténuation sur ce type de fibre est très importante comme on peut le voir sur la différence des impulsions d'entrée et de sortie. Les fibres optiques multimodes sont utilisées sur de courtes distances car le signal est modifié [2].

2.4.3.1.2 Fibre optique multimode à gradient d'indice

L'indice du cœur n'est pas constant mais possède une symétrie autour de l'axe, l'indice est modifié de sorte à créer un gradient d'indice. Les différences de temps de propagation sont réduites et les écarts entre chemins optiques sont diminués. Le guidage de la lumière est dû à l'effet du gradient d'indice. En subissant de légères réfractions à l'approche de la gaine, le signal optique forme un signal sinusoïdal et les rayons suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale.

La gaine ne joue pas un rôle actif mais élimine les rayons trop inclinés (figure 2.9) [2].



Figure 2.9: Fibre optique multimode à gradient d'indice [2].

L'atténuation sur ce type de fibre est moins importante que sur les fibres à saut d'indice, Les fibres à gradient d'indice sont les plus utilisées pour les moyennes distances.

2.4.3.2Fibre optique monomode

Le cœur d'une fibre monomode est très fin (de faible diamètre) et n'admet ainsi qu'un seul mode de propagation, le plus direct possible c'est-à-dire dans l'axe de la fibre, La dispersion modale devient quasiment nulle (figure 2.10).



Figure 2.10: Fibre optique monomode [2].

L'atténuation de ce type de fibre est moins importante que les fibres multimodes, c'est ce qui en fait sa force, Ce type de fibre est utilisé pour des transmissions à longue distance et pour des applications demandant une grande largeur de bande [2].

2.4.4 Comparaison entre les différents types de fibres optique

Structures	Avantages	Inconvénients	Application pratiques
Multimode à saut d'indice(SI)	Grande ouverture numérique, connexion facile, faible prix, facilité de mise en œuvre	Pertes, dispersion et distorsion élevées du signal	Communications courtes distances, réseaux locaux
Multimode à saut gradient d'indice (GI)	Bande passante raisonnable et bonne qualité de transmission	Difficile à mettre en œuvre	Communications courtes et moyennes distances
Monomode	Bande passante très grande, atténuation très faible, faible dispersion	Prix très élevé	Communications longues distances

Tableau 2.1: Comparaison entre les différents types de fibre optiques.

Le tableau (2.1) présente un comparatif des avantages, des inconvénients et de l'application pratique entre les différents types de fibres optiques.

2.5L'atténuation

L'atténuation caractérise l'affaiblissement du signal au cours de sa propagation à la suite de phénomènes d'absorptionde diffusion et de rayonnement elle constitue l'un des principaux problèmes que l'on rencontre dans un système de transmission. Chaque mécanisme de perte contribue de façon indépendante à l'atténuation totale dans la fibre. On définit un coefficient d'atténuation α pour une ligne de transmission de longueur L par:

 $\alpha = \frac{10}{L} Log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right) (dB/km)$

Où : **P**_{in} Puissance injectée à l'entrée et **P**_{out} à la sortie.



Figure 2.11: L'atténuation dans une fibre optique [2].

La fibre optique est le support du signal optique numérique. Le signal subit au cours de sa propagation dans la fibre des pertes liées à l'atténuation de la fibre de transport. L'atténuation dépend en particulier de la longueur d'onde des impulsions lumineuses la (figure 2.12) représente les pertes dans une fibre optique monomode[2].



Figure 2.12: Les pertes de propagation de la fibre optique [2].

L'atténuation provient de plusieurs phénomènes :

- > Diffusion de Rayleigh: Ce sont des pertes inévitables que l'on retrouve dans toutes les fibres. Dans les fibres dites de bonne qualité, la diffusion de Rayleigh est proportionnelle à $1/\lambda^4$.
- L'absorption par les ions OH: Principalement présents dans les fibres optiques, les ions hydroxyles peuvent, en fonction de leur concentration, créer une absorption supplémentaire significative autour de la longueur d'onde de 1,38 μm.

On remarque un pic d'absorption autour de 1,37 μ m lié à la présence d'ions OH- et le minimum d'atténuation autour de 1,55 μ m. C'est essentiellement pour bénéficier de ce minimum d'atténuation que la plage de longueurs d'onde des télécommunications optiques s'est imposée autour de 1,55 μ m.

Les fibres actuelles possèdent une atténuation de l'ordre de 0,2 dB/km autour de cette longueur d'onde, ce qui est loin devant les autres milieux de propagation.

Pour compenser les pertes de propagation, des amplificateurs optiques sont implantés régulièrement dans les liaisons optiques. L'espacement entre amplificateurs optiques est typiquement compris entre 40 et 100 km selon le type de liaison, L'introduction d'amplificateurs optiques dans la liaison ajoute du bruit au signal[2].

2.6 Généralités sur l'amplification optique

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

La recombinaison électron-trou peut ensuite être provoquée par un photon incident, ce qui donne naissance à un deuxième photon de même fréquence, de même phase et même direction. Cette émission est dite stimulée et conduit à une amplification du signal. En même temps, la recombinaison peut se faire sans la présence d'un photon incident. Ces photons, émis de façon spontanée, de manière non cohérente, constituent le bruit de l'amplification optique. L'ensemble des photons, originels ou pas, subissent une série d'amplifications. Les photons spontanés seront aussi amplifiés, ce qui définit la source de bruit appelée ESA (Emission Spontanée Amplifiée). Il existe plusieurs types d'amplificateur optiques, on peut citer les plus importants: Les amplificateurs à fibre dopée Erbium(EDFA) et les amplificateurs Raman. Dans ce qui

suit on va s'intéresser surtout à l'amplificateur le plus commun: Amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA) [13].

2.6.1 Amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA)

Considéré comme un dispositif clé de tous les réseaux actuels de télécommunication optiques, l'amplificateur à fibre dopée Erbium EDFA (Erbium Dope Fiber Amplifier) permet d'amplifier simultanément des longueurs d'ondes, et de compenser les pertes subies lors de la propagation. Il transforme l'énergie fournie par un système extérieur (pompe) et la restitue au signal pour l'amplifier.

Il se compose essentiellement d'une fibre active constituant le milieu amplificateur, d'une pompe laser, multiplexeur et isolateur (figure 2.13).



Figure 2.13: Schéma synoptique d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium [2].

- La pompe laser est un élément essentiel de l'amplificateur optique. C'est sur sa puissance qui est basée l'inversion de population favorisant l'amplification optique. La pompe est un laser à semiconducteur, capable de produire de forte puissance en sortie avec un faisceau monomodale pour garantir un bon couplage dans la fibre monomode. Les longueurs d'onde de pompe choisis sont 980 et 1480 nm, un pompage simultané à ces longueurs d'onde leur offre un avantage propre: un bruit réduit à 1480 nm et une puissance de saturation élevée avec un bon rendement à 980 nm.
- Le multiplexeur optique permet de coupler, d'injecter simultanément dans la fibre amplificatrice un signal avec celui de la pompe respectivement aux deux longueurs d'onde.
 Ce dispositif doit présenter une perte d'insertion faible aux deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système.

 L'isolateur est un dispositif passif permettant la propagation du signal qu'en un seul sens. Placé à l'entrée, il arrête l'ESA contrapropagative et protège le laser émetteur de signal. En général, les isolateurs empêchent les bruits et toutes perturbations pouvant rendre le milieu oscillant. Placé en sortie, les isolateurs limitent les pertes qui dégradent le facteur de bruit.

La principale cause d'accumulation de bruit dans une liaison est la présence de bruit d'émission spontanée générée par les amplificateurs optiques à fibre dopée Erbium.

Différents phénomènes physiques peuvent conduire à une amplification du signal, mais l'amplificateur qui s'est imposé dans le domaine des télécommunications est l'amplificateur à fibre dopée Erbium. Son principe est introduit dans un premier temps avant de considérer le bruit généré dans les amplificateurs[2].

2.6.2 Les amplificateurs Raman

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

De nouveaux amplificateurs optiques tels que les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de télécommunications. Ils sont basés sur le principe de la diffusion Raman, qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon. Ce phénomène peut être spontané, s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal. Ainsi, dans le cas de l'amplificateur Raman, l'onde incidente, dite onde de pompe, stimulée par l'onde signal, va créer une autre onde signal, et un phonon. L'amplification est alors réalisée.

Comme pour les autres amplificateurs optiques, celui-ci a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG sont les plus souvent utilisés dans ce cas, en émettant une longueur d'onde inférieure à celle du signal. L'avantage principal de ces lasers est qu'ils sont accordables sur une très grande plage de longueurs d'onde. Le gain obtenu peut atteindre quelques dizaines de décibels, mais une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître. La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman[2].

2.7 La dispersion dans la fibre optique

La dispersion se rapporte à tous les processus aboutissant à une différence de temps de propagation des différents modes, elle entraîne une réduction de l'amplitude de modulation des hautes fréquences et un étalement temporel de l'impulsion. Plus on peut injecter d'impulsions lumineuses par unité de temps, plus la capacité de transmission de la fibre est grande.

Pour que l'information soit bien transmise, deux impulsions successives distinctes à l'entrée de la fibre doivent être également distinctes à la sortie. Cependant, il se produit dans la fibre un élargissement des impulsions appelée dispersion temporelle, deux impulsions distinctes à l'entrée de la fibre peuvent être mélangées à la sortie. En effet, lorsque l'on envoie une impulsion lumineuse infiniment étroite (Dirac) dans la fibre optique, celle-ci excite tous les modes de propagation de la fibre. À la sortie de la fibre, on constate alors un élargissement de l'impulsion dans le domaine temporel (figure 2.14).



Figure 2.14: Phénomène de la dispersion dans une fibre optique [2].

Les phénomènes qui provoquent la déformation du signal durant sa propagation dansla fibre sont de trois types : Dispersion modale, Dispersion chromatique et la Dispersion de polarisation [2].

2.7.1 Dispersion modale

La dispersion modale n'apparaît qu'avec les fibres multi-modes elle limite la distance de propagation et le débit de transmission de l'information. Inhérente aux fibres multimodes, elle n'existe pas dans les fibres monomodes. La dispersion modale provient de la différence de temps de parcours de la lumière dans la fibre en fonction des chemins parcourus. Elle est due à la différence de temps des trajets du rayon axial (mode rapide) et du rayon réfléchi critique (mode lent) (figure 2.15).



Figure 2.15: Dispersion modale, propagation d'un mode rapide et d'un mode lent [2].

La dispersion intermodale Di est définie par l'élargissement temporel maximum τ d'une impulsion par unité de longueur de fibre.

$$D_i = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{\tau}{L}$$

Où t_{max} et t_{min} sont respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide[2].

2.7.2 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique exprimée en ps/(nm.km), caractérise l'étalement du signallié à sa largeur spectrale (deux longueurs d'ondes différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse), et cela dans les fibres optiques monomodes dont le profil est à symétrie de révolution. Cette dispersion dépend de la longueur d'onde considérée et résulte de la somme de deux effets : la dispersion propre au matérielle D_{mat} et la dispersion du guidage D_{guide} .

$$D_{chrom} = D_{mat} - D_{guide}$$

2.7.2.1 Dispersion matérielle

Dans ce cas l'élargissement est causé par le fait que l'indice de réfraction du verre n'est pas le même pour toutes les longueurs d'onde. Ce genre de dispersion existe dans les fibres monomodes ou multimodes.

2.7.2.2 Dispersion du guidage

Particulièrement importante dans les fibres monomodes, elle est due au fait qu'une partie de la lumière pénètre dans la gaine avec des angles et une profondeur différents. Elle est causée par la différence d'indice relative qui dépend aussi de la longueur d'onde.

La (figure 2.16) montre la courbe de la dispersion chromatique en (ps/nm.km), en fonction de la longueur d'onde en (nm). Calée sur les fenêtres de transmission actuelles, dans la silice et sur les régions proches de l'infrarouge.



Figure 1.16: La dispersion chromatique [2].

On constate que la dispersion est négative aux longueurs d'onde courtes, nulle à la longueur d'onde à peu près 1.3 μ m et positive aux longueurs d'onde plus larges[2].

2.7.3 Dispersion de polarisation

Le mode fondamental d'une fibre optique monomode LPO1 est composé de deux modes électromagnétiques dégénérés caractérisés par deux directions de polarisation perpendiculaires (figure 2.17).

Dans une fibre monomode «idéale», ces deux modes, notés $LP01^x$ et $LP01^y$ se propagent à des vitesses identiques. Lorsque la fibre présente une biréfringence, qui peut être due à des contraintes (élongation, courbures, micro courbures ...), on observe une levée de la dégénérescence des constantes de propagation entre les deux modes. Les deux composantes du mode se propagent alors à des vitesses différentes.



Figure 2.17: Représentation des modes dégénérés du mode LP01 [2].

La propagation simultanée dans la fibre de ces deux modes de polarisation introduit un phénomène de dispersion dite de polarisation qui est un facteur limitant de la capacité des lignes de transmission optique monomode[2].

2.8 Réception optique

Le récepteur a pour rôle de convertir au mieux le signal optique en signal électrique il est composé de photodiode (PIN), photodiode à avalanche (PDA), amplificateur, convertisseur courant-tension, ainsi que de filtre[2].

2.8.1 Les photodétecteurs

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur, qui 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 à ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles. Dans le paragraphe qui suit, nous rappellerons le principe de photodétection.

2.8.1.1Principe de la photodétection

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

On va étudier dans ce qui va suivre plus précisément deux exemples de photodétecteurs: la photodiode PINet la photodiode à avalanche (PDA).

2.8.1.2 Les photodiodes PIN

Pour effectuer la photodétection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN.

Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large d'où l'intérêt de la photodiode PIN (figure 2.18).



Figure 2.18: Photodiode PIN [2].

La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque (I), où règne le champ électrique pratiquement uniforme, qui sépare les porteurs. Une des zones traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau [2].

2.8.1.3 Les photodiodes à avalanche (PDA)

Afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, l'idée d'utiliser le phénomène de multiplication interne pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photo-électron, mais plusieurs a été soulevée, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à une puissance optique incidente donnée (figure 2.19).

En faisant croître le champ électrique dans la jonction PIN, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors et les porteurs se multiplient.



Figure 2.19: Photodiode à avalanche PDA [2].

L'absorption a lieu dans une zone large et peu dopée, dite zone d'absorption et la multiplication a lieu dans la jonction abrupte **pn+**. En outre, pour une tension inverse élevée, la zone de charge d'espace s'étend dans la zone π , dont la résistivité va augmenter avec la tension. Ce principe introduit un effet stabilisateur: le champ électrique et le gain augmentent lentement, ce dernier peut atteindre de fortes valeurs tout en le commandant avec précision[2].

2.9 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter l'évolution des systèmes de transmission, les besoins qui ont menés à l'apparition des systèmes de transmission optique.

On a commencé par le principe de fonctionnement d'une liaison optique suivi d'une description détaillée des différents composants de la partie émission notamment les diodes laser et les diodes DEL. Ensuite nous avons étudié la fibre optique avec ces différents composants et différents types. Pour finir, on a vu le récepteur optique avec le principe de photodétection et une description de deux exemples de photodétecteurs (PIN et a avalanche).

Dans le chapitre suivant nous allons présenter le logiciel dans lequel nous allons simuler notre ligne de transmission.

3.1 Présentation du simulateur COMSIS

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

Ce logiciel est un outil qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal allant du dispositif le plus élémentaire au système complet de communication. C'est un environnement interactif qui allie des outils numériques à des fonctionnalités graphiques et une interface utilisateur. Il permet d'analyser des systèmes analogiques ou numériques décrits sous la forme de schémas-blocs[13].

3.1.1 Introduction

Comme le résument les deux chapitres précédents, le développement des télécommunications par fibre optique a multiplié les architectures des réseaux, les techniques de codage et les composants disponibles. La conception des systèmes associés est de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance de plus en plus utilisée pour aider à trouver rapidement des solutions, aussi bien au niveau du composant que du système.

Ce chapitre a pour but de présenter le logiciel de simulation "COMSIS" retenu pour cette étude, destinée à faciliter la connaissance et la maîtrise du simulateur par les futurs utilisateurs [7].

Ce chapitre sera décliné en trois parties. La première sera consacrée à la présentation du logiciel COMSIS. La seconde partie décrira la simulation des différents systèmes.

Une description détaillée des paramètres mis en jeu dans la simulation seront présentés dans la dernière partie.

3.1.1.1 Le simulateur système COMSIS

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

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

Cependant, contrairement à l'électronique et aux micro-ondes, il n'existe pas d'outils standards et bien admis dans le domaine des transmissions optiques. Il est apparu, récemment, sur le marché, un certain nombre de logiciels permettant la simulation des systèmes de communications optiques. Le laboratoire GESTE a testé quelques-uns de ces simulateurs et a retenu le logiciel COMSIS. Une présentation de ce dernier est effectuée ci-après[7].

3.1.1.2 L'éditeur de schéma-bloc

COMSIS offre un environnement intégré où toutes les fonctions d'éditions et de traitements s'articulent autour de l'éditeur de



Figure 3.1 :schéma-bloc COMSIS.

Avec ce logiciel assez convivial, la construction d'un schéma-bloc est assez facile. Il suffit de sélectionner, à l'aide de la souris, des objets disponibles dans la bibliothèque et de les déposer sur la feuille de dessin. Ces objets représentent des modélisations d'opérateurs, d'entrées et de sorties et doivent être interconnectés et nommés. Une fois ces modèles positionnés, reliés et nommés, leurs paramètres caractéristiques doivent être définis, sous forme numérique ou à l'aide d'un paramètre formel, avant de lancer l'analyse du système. Il faut encore insérer des variables intermédiaires (correspondant aux grandeurs d'entrée et de sorties des opérateurs) et les nommer. Ainsi, le simulateur a accès aux signaux en chaque point du schéma.

COMSIS dispose d'une aide en ligne contextuelle et hypertexte, constituée du manuel d'utilisation accessible dans son intégralité[13].

3.1.1.3 La bibliothèque

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

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



Figure 3.2 : La bibliothèque de modèles de COMSIS [13].

Ces différents modèles, encore appelés opérateurs fonctionnels, sont des unités de transformation caractérisées par une (ou plusieurs) grandeur(s) de sortie dépendant d'une grandeur d'entrée ou d'une combinaison de grandeurs d'entrée. Ils sont classés en deux catégories :

- Les opérateurs linéairesqui jouissent des propriétés d'additivité, d'homogénéité et de stationnarité au cours du temps.
- Les opérateurs non linéairesqui forment une vaste classe sans mode de représentation universelle[13].

3.1.2 Aperçu sur 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[13].

3.1.2.1 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.

L'interdépendance de ces éléments, qui exprime les interactions dynamiques existant entre eux, est de préférence décrite, dans COMSIS, sous forme décomposée dans laquelle chaque opération de base apparaît de manière explicite.

Les différents modules mis en évidence par ce type de représentation sont des unités de transformation, encore appelés opérateurs fonctionnels, caractérisées par une grandeur de sortie dépendant de grandeurs d'entrée.

Les signaux sur lesquels opèrent ces dispositifs sont *des signaux utiles*, qui contiennent l'information à transmettre, *des signaux perturbateurs*, introduits par le milieu de transmission ou inhérents aux dispositifs de traitement, *des signaux de contrôle ou decommande*, qui doivent assurer la qualité de la transmission.

Les signaux que l'on rencontre dans l'analyse des systèmes de télécommunications constituent des grandeurs physiques qui sont, par nature, toujours analogiques. La simulation s'effectuant sur un calculateur numérique est, par conséquent, une opération où l'on ne manipule que des suites de nombres. La représentation des signaux et des opérateurs d'un système de télécommunications doit donc naturellement tenir compte du théorème d'échantillonnage de Shannon. Suivant les bandes de fréquences et les débits d'un système, la représentation des signaux haute fréquence (signaux modulés et perturbations introduites par le canal de propagation) peut imposer un sur-échantillonnage des données utiles basse fréquence (message à transmettre). La technique de représentation par enveloppe complexe permet de s'affranchir des fréquences porteuses du système, tout en conservant ce qu'il y a de significatif dans l'expression mathématique du signal. Cette technique nécessite une transposition des modèles de signaux et d'opérateurs haute fréquence en leurs équivalents en bande de base[13].

3.1.2.1.1 Représentation des signaux

Fondée sur le concept de signal analytique, la représentation par enveloppe complexe n'a de sens que pour les signaux dont la caractéristique fréquentielle, spectre ou transformée de Fourier, présente la propriété d'être concentrée dans une certaine bande de fréquence. Ces signaux sont dits à bande étroite ou quasimonochromatiques [14-15].

3.1.2.1.2 Représentation des opérateurs fonctionnels

Une chaîne de transmission de données est un système de traitement qui effectue, sur des signaux, un ensemble d'opérations de base afin d'en extraire de l'information ou de les rendre porteurs d'information. La gamme des opérations usuelles est assez vaste. Elle peut être décomposée en différentes classes à partir des contraintes que l'on peut poser sur chaque opérateur[14-15].

3.1.2.1.3Les opérateurs linéaires

Les opérateurs linéaires ont une importance considérable parce qu'ils sont les plus simples à analyser et à caractériser. La classe des opérateurs linéaires est caractérisée par le principe

de superposition qui signifie que la réponse à une somme d'excitations est égale à la somme des réponses à chaque excitation[14-15].

3.1.2.1.4 Les opérateurs non-linéaires

A l'inverse, la modélisation des systèmes non-linéaires se heurte à d'importantes difficultés. Aucune théorie n'existe, qui permette, comme dans le cas linéaire, de déterminer simplement les relations d'entrées/sorties.

La modélisation des opérateurs non-linéaires est un domaine ardu qui, bien qu'étudié depuis fort longtemps, nécessite encore un important effort de recherche. La représentation la plus satisfaisante des relations d'entrée/sortie se fait par le moyen des fonctionnelles deVolterra et de leurs transformées de Fourier[14-15].

3.1.2.2 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.

Il y a trois étapes nécessaires dans l'analyse d'un système de télécommunication :

3.1.2.2.1Réduction formelle: Les modules d'analyse sont basés sur une phase de simplification formelle des équations du système qui permet d'aboutir à des modèles entrée/sortie réduits. L'intérêt des réductions formelles réside dans le fait, d'une part, qu'elles diminuent le nombre de variables intermédiaires à calculer, et, d'autre part, qu'elles permettent d'obtenir des transmittances équivalentes de degré minimal.

3.1.2.2.2 Réduction numérique: COMSIS évalue tous les coefficients des transferts issus des réductions formelles. C'est à l'issue des réductions numériques, que COMSIS peut juger de la stabilité du système.

3.1.2.2.3Détermination des fréquences de référence: Le problème posé est de connaître le type de représentation des signaux tout au long de la chaîne de transmission.

 Les fréquences de référence associées aux signaux simulés d'un système sont déterminées à partir des caractéristiques de ses entrées et de ses opérateurs fonctionnels. Les entrées sont séparées en modèles de signaux en bande de base représentés par signal réel et modèles de signaux à bande étroite représentés par enveloppe complexe. Il y a également deux catégories d'opérateurs : ceux dont les entrées et la sortie ont la même fréquence de référence et les opérateurs où cette uniformité n'existe pas. Dans chacune de ces classes, on distingue les modèles qui sont référencés par rapport à une fréquence bien précise et ceux dont la validité est indépendante des fréquences de référence choisies.

- Cette classification d'opérateurs, suivant l'uniformité des fréquences de référence des entrées et de la sortie, permet d'établir des groupements de variables ayant les mêmes fréquences de référence.
- La sous-classification en modèles référencés et en modèles non référencés permet ensuite de déterminer pour chaque groupement, la fréquence de référence optimale à utiliser (fréquence de référence qui minimise le nombre de points utilisés pour décrire correctement les phénomènes à simuler).
- 4. La modélisation de certains éléments impose des contraintes sur la représentation de leurs signaux d'entrée et de sortie. A partir des fréquences de référence de simulation, déterminées suivant la méthodologie décrite précédemment, COMSIS vérifie l'adéquation avec les hypothèses inhérentes à chaque modèle[7].

3.1.3 Présentation des résultats dans le simulateurCOMSIS

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 débuter ce paragraphe. Les résultats de simulations peuvent ensuite être visualisés sous différentes représentations, ces dernières seront alors énumérées dans le paragraphe suivant[13].

3.1.3.1 Les différentes analyses

Dès qu'un système est complètement décrit, il est possible d'effectuer différentes Temporelles et fréquentielles, accessibles à partir du menu Analyse de l'Editeur deschéma-bloc.

Ar	alyse Option Aide	
	Analyse Statique	
	Analyse Stabilite	
	Analyse Transfert de Boucle	
	Reponse Frequentielle	Ctrl+F
	Simulation Temporelle	Ctrl+T

Figure 3.3 : Le menu d'analyse de COMSIS [13].

3.1.3.1.1 L'analyse statique

COMSIS permet de connaître certaines courbes ou valeurs caractéristiques d'opérateurs non rationnels grâce à la commande Analyse Statique du menu Analyse.

Lorsque cette commande est activée, la cohérence du schéma est d'abord vérifiée. Une fois les calculs terminés, les résultats sont affichés dans la fenêtre graphique[13].

3.1.3.1.2L'analyse de stabilité

Lors de l'activation de la commande Analyse Stabilité du menu Analyse, COMSIS calcule la réponse en fréquence et les marges de stabilité d'un sous-système linéaire. COMSIS édite les marges de stabilité (phase, retard, module et module complémentaire) dans le journal de la fenêtre alphanumérique. La visualisation des résultats dans la fenêtre graphique peut être présentée sous trois formes différentes : diagrammes de Bode (amplitude et phase), de Black et de Nyquist[13].

3.1.3.1.3L'analyse de transfert de boucle

L'activation de la commande Analyse Transfert de Boucle du menu Analyse provoque le calcul de la réponse en fréquence et des marges de stabilité des boucles. COMSISédite les résultats sous la même forme que pour l'analyse de stabilité[13].

3.1.3.1.4La réponse fréquentielle

COMSIS permet de calculer la réponse fréquentielle d'un opérateur de filtrage non rationnel ou d'un sous-système rationnel grâce à la commande Réponse Fréquentielle du menu Analyse. Le logiciel vérifie toujours la cohérence du schéma. Lorsque le calcul est terminé, COMSIS affiche la réponse fréquentielle en amplitude, en phase et en temps de propagation de groupe[13].

3.1.3.1.5 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[13].

3.1.3.2 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... L'affichage est effectué dans un écran de visualisation, encore appelé fenêtre graphique :



Figure 3.4 : L'écran de visualisation des résultats de COMSIS [13].

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, Ce sont toutes ces techniques d'évaluations qui vont être maintenant détaillées[13].

COMSIS : Evaluation des performances 🛛 🖾
Visualisation Globale
Visualisation Tronquee
Sortie Fichier
Puissance Globale
Puissance Tronquee
Facteur Q
Signal Brut Global
Signal Bruit Tronque
Courbe Taux Erreur
Toux Errour
Parametres Simulation
Fin Iteration Aide

Figure 3.5 : Fenêtre d'évaluation des performances [13].

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[13].

3.1.3.2.1La réponse temporelle

Cette commande permet d'observer directement les variables simulées, sans prétraitement. L'abscisse des courbes est constituée d'une base de temps[13].

3.1.3.2.2Le diagramme de l'œil

Expérimentalement, on obtient le diagramme de l'œil en observant, sur un oscilloscope, le signal reçu, en fonction d'une base de temps synchronisée sur l'horloge des données. En simulation, on utilise une technique identique qui repose sur la connaissance d'une variable d'horloge de synchronisation, utilisée pour générer la base de temps appropriée. COMSIS offre la possibilité de faire des mesures quantitatives sur les diagrammes de l'œil : ouverture horizontale, ouverture verticale, taux d'extinction, hauteur de l'œil, facteur Q, position des intersections, largeur de l'œil, gigue... Une aide en ligne est à disposition avec le logiciel pour effectuer ces différentes mesures[13].

3.1.3.2.3Le diagramme de constellation

L'échantillonnage, par l'horloge, des données du diagramme vectoriel d'un signal, aboutit au diagramme de constellation. Ce diagramme représente, par conséquent, les états d'amplitude et de phase du signal modulé aux instants de décision. La géométrie de ces états et leur dispersion sont des indications qualitatives pour le diagnostic des défauts et des marges d'erreur des systèmes. COMSIS offre la possibilité de faire des mesures qui sont identiques àCelles réalisées par l'analyseur de constellation développé par la société Hewlett-Packard[6].

3.1.3.2.4 La densité spectrale de puissance

La densité spectrale de puissance d'un signal donne une idée de la largeur de bande nécessaire pour la transmettre. Elle permet également d'apprécier l'efficacité de certaines fonctions et d'évaluer différents types de brouillage. La densité spectrale de puissance d'un processus stationnaire au second ordre, est définie comme la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation. Il est possible de traiter aisément le cas des signaux réels périodiques, mais le traitement des signaux aléatoires ou représentés par enveloppe complexe fait appel à la méthode des périodogrammes modifiés[11-12].

3.1.3.2.5 La puissance instantanée

Ce prétraitement permet de visualiser la variation de la puissance instantanée d'un signal en fonction du temps[13].

3.1.3.3Sauvegarde des résultats de simulation

Chaque variable simulée dans COMSIS peut être stockée indépendamment dans un fichier binaire contenant les caractéristiques du signal sauvegardé. Pour cela, il faut activer la commande Sortie Fichier. Les résultats de simulation ainsi sauvegardés peuvent être ré exploités dans COMSIS ou réinjectés dans une autre application [13].

3.1.3.4Bilan de puissance

La puissance est une grandeur essentielle pour caractériser le niveau des signaux émis et reçus.

Avec la commande Puissance, pour chaque variable, COMSIS récupère le fichier relatif à la simulation des composantes en phase et en quadrature et calcule la puissance moyenne en chaque point de simulation. Cette puissance est donnée en dBm (décibels relatif à 1 mW)[13].

3.1.3.5Rapport signal à bruit

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

La méthode de calcul est basée sur une deuxième simulation du système qui a pour objectif d'isoler, soit la contribution du bruit, soit celle du signal utile. En retranchant aux signaux issus de la première simulation les signaux issus de la deuxième simulation, on obtient la contribution soit du signal utile, soit du bruit. La validité de cette méthode impose qu'il n'y ait aucune corrélation entre les signaux utiles et les signaux brouilleurs[13].

3.1.3.6Détermination du facteur Q

La simulation a permis de calculer le signal bruité dont on veut évaluer le facteur **Q**.

COMSIS calcule alors les niveaux moyens du signal bruité et les écarts-types sur la transmission des niveaux hauts et des niveaux bas. Le facteur **Q** en découle[13].

3.1.3.7Taux d'erreur sur les bits

COMSIS propose trois méthodes de mesure du taux d'erreurs binaire (**TEB**) et le tracé des courbes de taux d'erreur[13].

3.3.2.8La visualisation de courbes de taux d'erreurs sur les bits

Les courbes de TEB permettent de visualiser les résultats de simulation sous la forme de couples de mesures (**x**k,**pe**k), avec

xkparamètre variant et **pe**k probabilité d'erreur correspondante. Ces résultats peuvent être accompagnés de courbes de **TEB** théoriques[13].

3.1.3.9 Modifications des paramètres de simulation

Enfin, la dernière commande Paramètres Simulation offre la possibilité de modifier certains paramètres utilisés en simulation et en évaluation des performances[13].

e lase fibe optique comande en courant) Diode laser fibre optique (longeur L)

3.1.4 Simulation de la transmission optique

Figure 3.6 : Synoptique de la liaison métropolitaine.

3.1.4.1 Forme des impulsions de la diode laser

Pour des caractéristiques données du générateur de bits (excepté le débit binaire) et de la diode laser les paramètres du générateur et de la diode laser, on étudie l'effet du débit des données sur la forme des impulsions optiques délivrées par la diode laser. Aucune information ne pourra en effet être interprétée en bout de liaison si la diode laser fonctionne d'ores et déjà hors de son domaine « normal » de fonctionnement. La diode laser considérée peut être modulée en courant à un débit binaire de l'ordre de 1 Gbits/s, au maximum 5 Gbits/s[16].

3.1.4.2Effet de la dispersion chromatique de la fibre

Pour les deux débits binaires de 1 Gbits/s et 5 Gbits/s, on étudiera l'effet de la dispersion chromatique seule de la fibre monomode sur les signaux de la liaison. Pour cela, il suffit de spécifier un coefficient de pertes nul. La valeur retenue du coefficient de dispersion est quant à elle de 17 Ps/ (nm.km) (valeur typique pour une fibre monomode standard à la longueur d'onde de 1,55 μ m). La longueur *L* de la fibre est ici un paramètre que l'on fait varier, et l'on observe simultanément la puissance des impulsions laser et la puissance optique en sortie de la première section de fibre, L'analyse comparative

de ces résultats confirme que la dispersion chromatique est d'autant plus forte que le débit binaire est élevé et que la longueur de la liaison est importante. L'apport de la simulation est de permettre une visualisation des déformations introduites par la dispersion chromatique, et d'évaluer quantitativement les limites en débit binaire et en longueur de liaison. Dans le cas présent, la dispersion chromatique est peu gênante à 1 Gbits/s. En revanche, son effet devient particulièrement pénalisant à 5 Gbits/s, même pour une liaison relativement courte (200 km)[16].

3.1.4.3 Conditions d'utilisation de l'EDFA

Ensuit on étudiera les conditions d'utilisation de l'amplificateur optique EDFA. Pour cela, on se fixe un débit binaire de 1 Gbits/s, et tenant compte des pertes ($\alpha = 0,2$ dB/km) et de la dispersion chromatique ($D\lambda = 17$ ps/nm/km) de la fibre optique monomode, on évalue l'effet de la longueur *L* de la fibre en observant les signaux **io** et **i3**, respectivement en entrée et en sortie de 'amplificateur EDFA.

L'analyse comparative des résultats obtenus montre qu'il faut utiliser l'EDFA avec un niveau de signal suffisamment faible pour que le gain de l'amplificateur ne sature pas (si le niveau du signal n'est pas faible, il n'y a d'ailleurs pas intérêt à amplifier)[16].

3.1.5 Paramètres des éléments de la liaison :

Generalites				
Nom: lase				
Nature : LASER-SYSTEME				
Type (en sortie) : INDEFINI				
Caracteristiques				
Type de definition :	Systeme	C 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			
Bande a -3 dB (MHz) :	8000	pour le courant (mA) : 50		
Donnees physiques modifiables :	Do	onnees		
Parametres Facultatifs				
Espacement entre modes (nm) :	1			
Chirp (MHz/mA) :	100			
Fuit RIN (dB/Hz) :	-154	pour le courant (mA) : 70		
Para	metres physic	ues		
ок	Annuler	Aide		

Figure 3.7 : la diode laser.

Nom :	e		
Nature :	COURANT-LASER		
Groupe :	Composants Optiques		
Type (en sortie) :	INDEFINI		
aracteristiques			
	DEBIT BINAIRE (Mbits/s) :	D	
		8	
L	UNGUEUR DU REGISTRE .		
	COURANT MINIMUM (mA) :	25	
	COURANT MINIMUM (mA) :	25	
c	COURANT MINIMUM (mA) : OURANT MAXIMUM (mA) :	40	
c	COURANT MINIMUM (mA) : OURANT MAXIMUM (mA) :	40	

Figure 3.8:générateur de bits.

Nature : FIBRE-OPTIQUE-MONOMODE Groupe : Composants Optiques Type (en sortie) : INDEFINI			
aracteristiques			
ongueur de la fibre (km) :	long 0.2 17		
Coefficient d'attenuation (dB/km) :			
Dispersion chromatique (ps/nm/km) : Constante			
ffet Kerr :	C Oui	Non	
ffet Raman :	C Oui	Non	
Coefficient de non linearite de la fibre (m2/W) :	3.2e-20		
Gain Raman (m2/W) :	7.48e-21		
Frequence de resonance (THz) :	12		
Demi-largeur de raie Raman (THz) :	6.432		
Aire effective de la section de la fibre (micro m2) :	80		
Type de discretisation de la longueur :	🕢 Fixe	old C Variable	
Valeur du pas (km) :			
Valeur initiale du pas (km) :			
vispersion Modale de Polarisation :	C Oui	🖲 Non	
Birefringence lineique (ps/km) :			
Longueur de couplage (km) :			
Etat de la fibre			
Retard introduit par la fibre (ns) :	0		

Figure 3.9: fibre optique.

Generalites		
Nom : PIN		
Nature : PHOT	ODIODE-PIN	
Groupe : Comp	osants Optiques	
Type (en sortie) : INDEF	INI	
aracteristiques	SENSIBILITE (A/W) : 0.9	
COURANT D	D'OBSCURITE (nA): 0	
or I	Annuler	Aide

Figure 3.10:Photodiode.

Generalites			
Nom : ampl			
Nature : AMPLI-OPTIC	QUE-FIBRE		
Groupe : Composants	Optiques		
Type (en sortie) : INDEFINI			
aracteristiques			
Type des parametres de definitio	n :	Systeme	C 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 : G Verre Silice	C Verre Fluore	C Autre	Description
Longueur d'onde de la pompe :	@ 980	C 1480	
Retard introduit par l'amplificateu	r (ns) :	0.1	
Pa	arametres physique	s	
or l	Annutra		A14-

Figure 3.11: EDFA (amplificateur optique).

3.2 Représentation de simulation et interprétation

3.2.1 Introduction

Pour notre simulation on va travailler avec une ligne de transmission simple qui se compose d'un émetteur de donné et un laser relié avec une fibre optique de type monomode (haut débit), et à la réception un amplificateur « EDFA » et une photodiode.

En premier lieu on va faire varié les paramètres des composants suivants : Laser, fibre optique, l'amplificateur « EDFA » et voir leurs effets sur le signal, chaque partie individuellement.

Puis on va se concentré sur les critères de performance du signal transmis et pour cela on va visualiser la courbe de Taux d'erreur et la comparer avec la norme standard, ensuite, on mesure le facteur de qualité 'Q' qui donne la bonne qualité du signal à la réception et on calcule le rapport signal/bruit pour éviter la perte de notre information.

3.2.1.1 L'effet de la longueur d'onde sur le laser



a) Débit : 100 Mbits/s, courant de seuil : 10 ma, λ =1330 nm Avec : entré(e), sortie (i0).

Figure 3.12 :puissance de laser a λ =1330 nm.

• Le Diagramme de l'œil



Figure 3.13 :digramme de l'œilà la sortie pour λ =1330 nm.

> On a un facteur Q = 8.22 et un TEB = $0.105.10^{-15}$



• La courbe de TEB

Figure 3.14 :courbe de TEB pour λ =1330 nm.

• Le rapport signal /bruit

10 100 CALCUL DIRECT DE "i1" EN FONCTION DE "i0" NOMBRE DE PAS DE DISCRETISATION EN LONGUEUR REALISES : 1 CALCUL DIRECT DE "i3" EN FONCTION DE "i1" CALCUL DIRECT DE "sort" EN FONCTION DE "i3" VARIABLE "sort" : 60.7765033642238 dB

b) Débit : 100 Mbits/s, courant de seuil : 10 ma, λ =1550 nm



Figure 3.15 :puissance de laser a λ =1550 nm.



• Le Diagramme de l'œil

Figure 3.16:digramme de l'œilà la sortie pour λ =1550 nm.

> On a un facteur Q = 7.45 et un TEB = $0.489.10^{-13}$
• La courbe de TEB



Figure 3.17 :courbe de TEB pour λ =1550 nm.

• Le rapport signal /bruit

c) Débit : 100 Mbits/s, courant de seuil : 10 ma, λ =2000 nm



Figure 3.18 : puissance de laser a λ =2000 nm.

• Le Diagramme de l'œil



Figure 3.19:digramme de l'œilà la sortie pour λ =2000 nm.

> On a un facteur Q = 3.59 et un TEB = $0.180.10^{-3}$



• La courbe de TEB

Figure 3.20 :courbe de TEB pour λ =2000 nm.

Longueur d'onde λ	Facteur Q	ТЕВ	Rapport S/B
1330 nm	8,22	0.105.10 ⁻¹⁵	60,77 dB
1550 nm	7,45	0.489.10 ⁻¹³	59.79 dB
2000 nm	3,59	0.180. 10 ⁻³	64.78 dB

Tableau 3.1: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes valeurs de longueur d'onde λ .

- D'après les résultats obtenus, on remarque que plus la longueur d'onde augmente, le rapport S/B et le TEB augmentent.
- La meilleure valeur du TEB est obtenue pour une longueur d'onde de 1330nm, avec une valeur moyenne acceptable du rapport signal/bruit.

3.2.1.2 L'effet du courant de seuil sur le laser

a) Débit : 100 Mbits/s, courant de seuil : 15 ma, λ =1550 nm



Figure 3.21 : puissance de laser pour un courant de seuil de 15 ma.





Figure 3.22 : digramme de l'œilà la sortie pour un courant de seuil de 15 ma.

> On a un facteur Q = 5.36 et un TEB = $0.418 \cdot 10^{-7}$



• La courbe de TEB

Figure 3.23 :courbe de TEB pour un courant de seuil de 15 ma.



b) Débit : 100 Mbits/s, courant de seuil : 20ma, λ =1550 nm



Figure 3.24 : puissance de laser pour un courant de seuil de 20 ma.



• Le Diagramme de l'œil

Figure 3.25 : digramme de l'œilà la sortie pour un courant de seuil de 20 ma.

> On a un facteur Q = 8.14 et un TEB = $0.204.10^{-15}$

• La courbe de TEB



Figure 3.26 :courbe de TEB pour un courant de seuil de 20 ma.

• Le rapport signal /bruit

Courant de seuil	Facteur Q	TEB	Rapport S/B
15 ma	5.36	0.418.10 ⁻⁷	59.26 dB
		-,	
20 ma	8,14	0,204.10 ⁻¹⁵	58,91 dB
30 ma	3,66	0,132.10 ⁻³	56,27 dB

Tableau 3.2: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes valeurs de courant de seuil.

- D'après le tableau on constate que les meilleurs résultats sont obtenus pour un courant de 20mA vue que le TEB est très faible, dans ce cas lavaleur du rapport S/B est acceptable.
- Si on dépasse la valeur de 20 mA le TEB devient très important ce qui influe sur la qualité de signal.

3.2.1.2 L'effet du débit binaire sur le laser



a) Débit : 1 Gbits/s, courant de seuil : 10ma, λ =1550 nm

Figure 3.27 : puissance de laser pour un débit de 1Gbits/s.

• Le Diagramme de l'œil





> On a un facteur Q = 4.11 et un TEB = $0.210.10^{-4}$

• La courbe de TEB



Figure 3.29 :courbe de TEB pour un débit de 1 Gbits/s.

• Le rapport signal /bruit

>>	CALCUL long 10	DE LA CONTRIBUTION DU SIGNAL UTILE POUR : D .1E+04	
	CALCUL NOMBRE CALCUL CALCUL	DIRECT DE "i1" EN FONCTION DE "i0" DE PAS DE DISCRETISATION EN LONGUEUR REALISES : 1 DIRECT DE "i3" EN FONCTION DE "i1" DIRECT DE "sort" EN FONCTION DE "i3"	
	VARIAB	LE "sort" : 49.4865270370098 dB	



b) Débit : 10 Gbits/s, courant de seuil : 10 ma, λ =1550 nm

Figure 3.30 : puissance de laser pour un débit de 10 Gbits/s.

• Le Diagramme de l'œil



Figure 3.31 : digramme de l'œilà la sortie pour un débit de 10 Gbits/s.

> On a un facteur Q = 1.78 et un TEB = $0.463.10^{-1}$



• La courbe de TEB

Figure 3.32 : courbe de TEB pour un débit de 10 Gbits/s.

Débit	Facteur Q	TEB	Rapport S/B
100 Mbits/s	7,45	0.489.10 ⁻¹³	59,79 dB
1 Gbits/S	4.11	$0.210.10^{-4}$	49,48 dB
10 Gbits/S	1.78	$0.463.10^{-1}$	39,60 dB

Tableau 3.3: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes valeurs de débit binaire.

si on dépasse la valeur de 1Gbits/s, le diagramme de l'œil montre que le signal est détérioré, car le TEB devient très grand donc la qualité du signal sera défavorable.

3.2.1.3 L'effet de la dispersion chromatique sur la fibre optique

 a) Débit : 100 Mbits/s, Longueur : 150 Km, Dispersion chromatique : 10 ps /nm.km avec : entrée (i0), sortie (i1)



Figure 3.33 : puissance de laser pour une dispersion chromatique de 10ps /nm.km.





Figure 3.34 :digramme de l'œilà la sortie pour une dispersion chromatique de 10ps/nm.km.

> On a un facteur Q = 5.21 et un TEB = $0.996.10^{-7}$



• La courbe de TEB

Figure 3.35 :courbe de TEB pour unedispersion chromatique de 10ps/nm.km.

>> CALCUL DE LA CONTRIBUTION DU SIGNAL UTILE POUR : long D 150 100 CALCUL DIRECT DE "i3" EN FONCTION DE "i1" CALCUL DIRECT DE "sort" EN FONCTION DE "i3" VARIABLE "sort" : 33.1308287374073 dB

 b) Débit : 100 Mbits/s, Longueur : 150 Km, Dispersion chromatique : 100ps/nm.km



Figure 3.36 : puissance de laser pour une dispersion chromatique de 100ps /nm.km.



• Le Diagramme de l'œil

Figure 3.37 : digramme de l'œilà la sortie pour une dispersion chromatique de 100ps/nm.km.

> On a un facteur Q = 5.42 et un TEB = $0.306.10^{-7}$



• La courbe de TEB

Figure 3.38 :courbe de TEB pour unedispersion chromatique de 100 ps/nm.km.

• Le rapport signal /bruit

ps/nm.km *10⁻⁴ 45 *10⁻⁶ 40-10--1-| 0 2 4 6 8 0 2 4 6 8 10 ***10**⁻⁷ *10⁻⁷

c) Débit : 100 Mbits/s, Longueur : 150 Km, Dispersion chromatique : 1000

Figure 3.39 : puissance de laser pour une dispersion chromatique de 1000ps /nm.km.



• Le Diagramme de l'œil



> On a un facteur Q = 3.16 et un TEB = $0.844.10^{-3}$





Figure 3.41 :courbe de TEB pour unedispersion chromatique de 1000ps/nm.km.

Dispersion chromatique	Facteur Q	TEB	Rapport S/B
10 ps/nm.km	5,21	0.996.10 ⁻⁷	33,13 dB
100 ps/nm.km	5,42	0.306.10 ⁻⁷	33,11 dB
1000 ps/nm.km	3,16	0.844.10 ⁻³	33,15 dB

Tableau 3.4: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes valeurs de dispersionchromatique.

- Selon les résultats présentés, on constate que plus la dispersion chromatique augmente, le TEB augmente aussi, contrairement au facteur Q qui diminue, donc la qualité du signal est mauvaise.
- > Quant au rapport S/B il a eu une faible variation.

3.1.2.5 L'effet de la longueur de la fibre optique

a) Débit : 100 Mbits/s, Longueur : 50 km, dispersion chromatique : 17 ps /nm.km



Figure 3.42 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 50 Km.

• Le Diagramme de l'œil



Figure 3.43 : digramme de l'œilà la sortie pour une longueur de fibre à 50 Km.

> On a un facteur Q = 5.38 et un TEB = $0.386.10^{-7}$





Figure 3.44 :courbe de TEB pour unelongueur de fibre à 50 Km.

• Le rapport signal /bruit >> CALCUL DE LA CONTRIBUTION DU SIGNAL UTILE POUR :

 long
 D

 50
 100

 CALCUL DIRECT DE "i3" EN FONCTION DE "i1"

 CALCUL DIRECT DE "sort" EN FONCTION DE "i3"

 VARIABLE "sort":
 52.3143198212542

 b) Débit : 100 Mbits/s, Longueur : 200 km, dispersion chromatique : 17 ps /nm.km



Figure 3.45 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 200 Km.

• Le Diagramme de l'œil



Figure 3.46 : digramme de l'œilà la sortie pour une longueur de fibre à 200 Km.

> On a un facteur Q = 4.23 et un TEB = $0.125 \cdot 10^{-4}$



• La courbe de TEB

Figure 3.47 :courbe de TEB pour unelongueur de fibre à 200 Km.

Longueur de fibre (L)	Facteur Q	ТЕВ	Rapport S/B
10 Km	7,45	0.489.10 ⁻¹³	59,79 dB
50 Km	5,38	0.386.10 ⁻⁷	52,31 dB
200 Km	4,23	0.125.10 ⁻⁴	23,14 dB

Tableau 3.5: facteur Q, TEB et rapport S/B pour différentes longueurs dela fibre.

- D'après les résultats obtenus, on observe que plus la longueur de la fibre est supérieur, le rapport S/B diminue, en revanche le TEB augmente.
- > La meilleure qualité du signal est obtenue pour la longueur L=10 Km.

3.2.1.6 l'effet de la longueur de la fibre sur la puissance de L'EDFA



a) Longueur : 10 km, Débit : 1 Gbits/s avec : entrée (i1), sortie (i3)

Figure 3.48 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 10 Km.

Dans ce cas-là on voit bien que la puissance optique en entrée de l'EDFA est de 1.5 mW (le niveau haut) c'est à dire de l'ordre de la puissance de saturation de l'amplificateur (13 mW). L'EDFA sature, donc L'amplificateur ne fonctionne pas dans des conditions optimales.



b) Longueur : 150 km, Débit : 1 Gbits/s

Figure 3.49 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 150 Km.

- Dans ce cas-là on remarque que la puissance optique en entrée de l'EDFA est de 2.5 μW (le niveau haut) et la puissance de sortie est d'environ 6 mW, donc l'EFDA sature très peu.
 - c) Longueur : 500 km, Débit : 1 Gbits/s



Figure 3.50 : puissance de laser pour une longueur de fibre à 500 Km.

Dans ce cas, la puissance optique en entrée de l'EDFA est de l'ordre de 25 nW (pour le niveau haut), et le niveau de puissance en sortie est effectivement élevé, donc cette situation peut sembler favorable car l'EDFA ne sature pasle signal.

3.2.2 Conclusion

- Cette simulation nous a permis de connaitre l'effet de différents paramètres physiques et optiques sur les fonctionnements des composants au long de la ligne de transmission choisie.
- On a pu arriver à distinguer le débit binaire et la longueur de la fibre pour avoir une bonne qualité du signal à la réception.
- On s'est concentré sur les performances de la transmission, et pour cela on a évalué le meilleur facteur de qualité 'Q' et le faible taux d'erreur (TEB) possible
- L'ouverture verticale du diagramme de l'œil présente une déformation lors des augmentations successives de la longueur de la fibre, le rapport signal/bruit a été interprétée de manière pour éviter les bruits et les interférences.

Les structures des systèmes de transmission connaissent de véritables bouleversements, étant donné que l'accroissement réalisé dans le domaine des télécommunications est tellement important et rapide, C'est pourquoi il nous a paru fructueux et avantageux de commencer ce mémoire par une description des différentes couches constituant les réseaux de télécommunications, ainsi que les différentes techniques employées. Une description de la plupart des composants présents dans ces liaisons sur fibre optique complète les bases à posséder pour aborder ce mémoire et aide à la compréhension de la conception d'un système de transmission optique.

Néanmoins, la conception de nouveaux systèmes, toujours plus performants, est un problème de plus en plus complexe. Les outils de simulation sont utilisés à cause du nombre important de paramètres influant sur les performances d'une liaison. Ces outils permettent des gains de temps et d'argent, touten évitant les expérimentations itératives sur des démonstrateurs de systèmes.

L'objectif principal de ce mémoire était d'affirmer l'utilité du logiciel de simulation COMSIS et son aide considérable à la conception des systèmes de transmission haut débit, les résultats obtenus nous ont permis de valider les choix des composants et leur paramètres assurant une bonne qualité du signal transmis. La méthodologie employée qui consiste à modifier un à un les modèles nécessaires à la simulation a également mis en relief l'influence des différents composants au travers de leurs paramètres fonctionnels, sur les performances globales d'une liaison telles que le taux d'erreur binaire et le facteur de qualité 'Q'.

Annexe A. Caractéristiques dynamiques des diodes laser

Utilisation des diodes laser pour les communications numériques

Les diodes laser (DL) sont utilisées pour coder de l'information sous forme optique que l'on injecte ensuite dans la fibre optique.

Dans le cadre des communications numériques par fibre, on module courant de la diode laser entre deux niveaux *IP* et *IM*, dont le plus faible est choisi au-dessus du courant de seuil *IS* de la DL.

Temps de retard et oscillations de relaxation

Idéalement, la forme temporelle des impulsions optiques délivrées devraient être parfaitement fidèle à la succession des bits d'information pilotant le circuit de commande en courant. Cela n'est bien sûr pas le cas, et l'est d'autant moins que le débit binaire est élevé (et donc que la durée des impulsions successives est courte)(Fig. A).

On note un temps de retard à la commutation, qui dépend des conditions de polarisation et peut être minimisé par une polarisation en continu (IP > IS). On note également la présence d'oscillations de « relaxation », dont l'origine physique tient à la mise à l'équilibre des populations d'électrons et de photons (populations couplées) sous l'effet d'un changement du niveau de courant.

Ces oscillations sont amorties pour des courants de polarisation plus élevés. L'ordre de grandeur d'est inférieur à la nanoseconde et la fréquence des oscillations de relaxation est de quelques GHz. Les DL peuvent ainsi être modulés en courant jusqu'à quelques Gbits.s-1 (cela dépend beaucoup de la structure de la DL).



Fig. A :Oscillations de relaxation de la puissance optique délivrée sous l'effet d'une modulation d'amplitude du courant de la diode laser entre deux valeurs *IP* et *IM*.

Annexe B. TEB et facteur Q

Les notions de taux d'erreur par bit (TEB) et de facteur Q ne sont pas particulières aux liaisons par fibre optique, mais sont générales aux communications numériques.

Le TEB correspond à la probabilité d'erreur lors de la transmission d'un bit d'information. Compte tenu des débits binaires utilisés usuellement dans les communications par fibre (environ 10 Gbits.s-1), un TEB de 10-7 par exemple correspond à environ 1000 erreurs par seconde, ce qui est catastrophique ! Dès lors, on comprend que les TEB requis par les applications des télécommunications soient extrêmement faibles : il faut typiquementTEB < 10-15.

En présence de sources de bruit (bruit thermique, bruit de grenaille, bruit optique dans les amplificateurs optiques, ...), les signaux reçus ne correspondent pas idéalement aux niveaux logiques « 0 » ou « 1 ».

C'est cequ'indique la figure ci-contre, où /0 et /1 correspondent aux niveaux des signaux associés aux deux états logiques.

Les signaux reçus en détection sont plutôt caractérisés par des densités de probabilité, centrées sur /0 et I1. Dans la mesure où ces lois de probabilité sont gaussiennes, $\sigma 0^2$ et $\sigma 1^2$ représentant les variances de bruit en courant des deux états, on voit que la probabilité d'erreur inter-symboles, liée au recouvrement des densités de probabilité, n'est pas nulle. Il s'agit donc de choisir la meilleure valeur du seuil de décision *ITh*pour la prise de décision. On montre que pour la meilleure valeur d'*ITh*, TEB est donné par l'expression suivante :

$$\text{TEB} = \frac{1}{2} \operatorname{Erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{\sqrt{2}}\right)}{Q\sqrt{2}\pi} \text{ (si } Q > 3\text{), avec} : Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$$

En pratique, l'évaluation du facteur *Q*, à partir des différentes sources de bruit du circuit de détection, est effectuée dans un premier temps. Le TEB s'en déduit alors très simplement.



Fig. B: Photo courants correspondant aux niveaux logiques « 0 » et « 1 » et densitéde probabilités associées.

Annexe C. Représentation du diagramme de l'œil

L'ouverture verticale renseigne sur la différence qui existe entre les niveaux logiques « 0 » et « 1 ». Plus l'œil est ouvert et plus la situation est favorable pour la discrimination des bits hauts et bas.

- L'ouverture horizontale renseigne sur le degré de « gigue » présent dans la liaison (toutes les communications synchrones sont très sensibles à ce défaut). Là il est souhaitable que l'ouverture de l'œil soit la plus grande possible.
- L'épaisseur des lignes au niveau de l'axe horizontal donne également une indication sur la présence de « gigue ».
- En dernier lieu, c'est tout simplement l'ouverture de l'œil ellemême qui renseigne sur la qualité de la liaison numérique, et donc sur la facilité qu'il y aura à interpréter le flux de bits reçu.

[1] Ghoumazi Mehdi, « Optimisation des Performances d'une Fibre Optique Dopee A
l'Erbium », Memoire de Magister, UniversiteMentouride Constantine, Septembre
2009/page (1).

[2]Hamedi Yasmine-Djazia, « Étude d'une Liaison Radio sur Fibre », Mémoire de Master, Université Abou BekrBelkaid Tlemcen/Juin 2014/ <u>http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6063/1/Mast.Tel.Hamedi.pdf/</u>page(2), pages (6-30).

[3] Dubois Anne, Verneuil Jean-Louis, Aupetit-Berthelemot Christelle, Dumas Jean-Michel, "Simulation-système", Livrable n°3 du projet RNRT ERMIONE/Mars 2001.

[4] DUBOIS Anne/ VERNEUIL Jean-Louis/ AUPETIT-BERTHELEMOT Christelle/
 PILLET Didier/LEFEVRE René et DUMAS Jean-Michel/"Optimisation par la simulation
 Système des performances de dispositifs optoélectroniques fonctionnant à 40 Gbitss",
 3^{ème} Colloque OPTIX'2001, Marseille, 26 - 28 Novembre 2001.

[5]<u>http://www.ulb.ac.be/students/bep/files/intro3.4.pdf</u>/Réseaux publics de télécommunication (Ed. 3.4. Révision : 9/01)/page (10).

[6]<u>http://deptinfo.cnam.fr/Enseignement/Memoires/LUSTEAU.Franck/Pages/Les_mult</u> iplexages.htm#TDM.

[7] Jean-Louis VERNEUIL «Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s»**THESE(DOCTORAT)**/Discipline : Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques/UNIVERSITE DE LIMOGES/France/Discipline, 21 novembre 2003. [8]<u>https://cyberlearn.hesso.ch/pluginfile.php/835798/mod_resource/content/1/TIF_F</u> <u>R/3.1.html</u>.

[9] <u>http://www.ulb.ac.be/students/bep/files/intro3.4.pdf</u> Réseaux publics de télécommunication (Ed. 3.4. Révision : 9/01)/page (11).

[10] <u>https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_du_signal.</u>

[11]<u>http://igm.univmlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/modulatio</u> <u>n.html</u>.

[12] POOLE C.D. and WAGNER R. E. / "Phenomenological Approach to Polarisation
 Dispersion in Long Single Mode Fibers"/ Electronics Letters/ September 1986/Vol. 22,
 N° 19/pp. 1029-1030.

[13] IPSIS, Manuel d'utilisation du logiciel COMSIS.

[14] RICE S.O., "Envelops of narrow-band signals", Proc. of the IEEE, July 1982, Vol. 70, n° 7.

[15] PICINBONO B. et MARTIN W., "Représentation des signaux par amplitude et phase Instantanées", Annales des Télécommunications, Mai-Juin 1983, Vol. 38, n° 5 et 6.

[16] Article :<u>http://dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2003007</u> /IEF, Université Paris-Sud Orsay, France/4 juin 2003/page (8).