

Table des matières

Remerciements

Table des matières

Liste des figures

Introduction générale.....2

Chapitre 1 : Etude d'une liaison par fibre optique

1.1 Introduction.....	6
1.2. Historique de la fibre optique	6
1.3. Système de transmission par fibre optique.....	8
1.4 Emetteurs optique.....	10
1.4.1 Spectre électromagnétiques	11
1.4.2 Diodes électroluminescente (DEL)	12
1.4.2.1 Principe de fonctionnement.....	12
1.4.2.2 Jonction P.N	14
1.4.3 Diode Laser (DL).....	15
1.5 Définition d'une fibre optique	16
1.5.1 Durée de vie d'un câble à fibre optique.....	17
1.5.2 Avantages et inconvénients de la fibre optique	18
1.5.3 Principe de fonctionnement de la fibre optique.....	18
1.5.4 L'ouverture numérique	19
1.5.5 Différents types de fibres optiques	19
1.5.5.1 Fibre optique multimode	19
1.5.5.1.1 Fibre optique multimode a saut d'indice	20
1.5.5.1.2 Fibre optique multimode a gradient d'indice	20
1.5.5.2 Fibre optique monomode	21
1.5.5.3 Comparaison entre les différents types de fibres optiques	22
1.6 L'atténuation	22
1.7 Généralités sur l'amplification optique.....	23
1.7.1 Amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA).....	24
1.7.2 Les amplificateurs Raman.....	25
1.8 La dispersion dans la fibre optique.....	26
1.8.1 Dispersion modale.....	27
1.8.2 Dispersion chromatique.....	27
1.8.3 Dispersion de polarisation.....	28
1.9 Techniques de modulation.....	29
1.9.1 La modulation directe.....	29
1.9.2 La modulation externe.....	29
1.9.3 Modulateur de Mach-Zehnder.....	30
1.9.4 Modulation de phase.....	31
1.9.5 Modulation d'amplitude.....	31
1.10 Réception optique.....	32

1.10.1 Le photodétecteur.....	32
1.10.2 Les photodiodes PIN.....	32
1.10.3 Les photodiodes à avalanche (PDA).....	33
1.11 Conclusion.....	34

Chapitre 2 : Etude d'une liaison Radio sur Fibre

2.1 Introduction.....	36
2.2 Principe de la technologie Radio sur fibre	36
2.3.1 Avantages des systèmes RoF	38
2.3.2 Limitations des systèmes RoF	39
2.3.3 Applications des systèmes RoF	39
2.3.4. Modulation d'intensité optique-détection directe IM-DD.....	42
2.3.5. Génération photonique des signaux millimétriques.....	43
2.4 Présentation du logiciel OptiSystem.....	49
2.4.1 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem.....	50
2.4.2 Applications du logiciel OptiSystem	50
2.4.3 Avantage du logiciel OptiSystem	51
2.4.4 Présentation de la liaison.....	51
2.5.1 Partie émission optique	53
2.5.2 Partie réception optique	53
2.5.3 Partie émission RF	54
2.5.4 Partie réception RF.....	55
2.6 Critères de qualité d'une transmission.....	57
2.6.1 Le taux d'erreur binaire.....	57
2.6.2 Le facteur de qualité.....	57
2.6.3 Le diagramme de l'œil.....	58
2.7 Résultats de simulation.....	59
2.7.1 Les signaux émis par émetteur RF.....	59
2.7.2 Les signaux reçus par récepteur RF.....	60
2.7.3 Les signaux émis par émetteur optique.....	61
2.7.4 Les signaux reçus par récepteur optique.....	62
2.7.5 Diagramme de l'œil des récepteur RF et optique.....	63
2.8 Conclusion.....	64

Chapitre 3 : Liaison WDM Radio sur Fibre

3.1 Introduction.....	66
3.2 La technologie WDM.....	66
3.3.1 Principe de multiplexage en longueur d'onde	67
3.3.2 Les composants d'un réseau WDM.....	68
3.3.3 Notion de circuit optique.....	69
3.3.4 Les systèmes WDM.....	70
3.3.5 Les apports du WDM	71
3.4 Présentation de la liaison	71
3.4.1 Partie émission optique	72
3.4.2 Partie réception optique.....	73

3.4.3 Partie émission RF.....	74
3.4.4 Partie réception RF.....	75
3.5 Résultats de simulation.....	76
3.5.1 Les signaux émis par émetteur RF.....	76
3.5.2 Les signaux reçus par récepteur RF.....	77
3.5.3 Les signaux émis par émetteur optique.....	78
3.5.4 Les signaux reçus par récepteur optique.....	79
3.5.5 Diagramme de l'œil.....	81
3.6 Conclusion.....	81
 Conclusion générale.....	 84
Liste des abréviations	
Référence bibliographique	

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma d'une liaison optique.....	9
Figure 1.2 : Spectre électromagnétique.....	11
Figure 1.3 : Emission spontanée.....	13
Figure 1.4 : Représentation des bandes d'énergie.....	13
Figure 1.5 : Représentation d'une jonction PN.....	14
Figure 1.6 : Types de polarisation.....	14
Figure 1.7 : Processus d'absorption et de l'émission stimulée.....	15
Figure 1.8 : Processus d'absorption émission spontanée émission stimulée.....	16
Figure 1.9 : Structure d'une fibre optique.....	17
Figure 1.10 : Guidage de la lumière dans une fibre optique.	19
Figure 1.11 : Fibre optique multimode a saut d'indice.	20
Figure 1.12 : Fibre optique multimode a gradient d'indice.	21
Figure 1.13 : Fibre optique monomode.....	21
Figure 1.14 : Effet de l'atténuation.....	22
Figure 1.15 : Les pertes de propagation de la fibre optique.....	23
Figure 1.16 : Schéma d'un amplificateur dopé a l'erbium.....	24
Figure 1.17 : Phénomène de la dispersion dans une fibre optique.....	26
Figure 1.18 : Dispersion modale, propagation d'un mode rapide et d'un mode lent.....	27
Figure 1.19 : Représentation des modes dégénérés du mode LP01.....	28
Figure 1.20 : Modulation directe.....	29
Figure 1.21 : Modulation externe.....	30
Figure 1.22 : Interféromètre de Mach-Zehnder.	31
Figure 1.23 : Photodiode PIN.....	33
Figure 1.24 : Photodiode a avalanche.....	34

Tableau1.1 : Comparaison entre les différents types de fibre optiques.....	22
Figure 2.1 : Schéma synoptique d'une liaison RoF.....	37
Figure 2.2 : Les trois types de transmission de signaux à travers une liaison RoF.....	38
Figure 2.3 : Exemples d'applications de la technologie RoF.....	41
Figure 2.4 : Liaison à modulation directe.....	42
Figure 2.5 : Liaison à modulation externe.....	43
Figure 2.6 : Système RoF hétérodyne dédié à la génération d'un signal RF millimétrique.....	45
Figure 2.7 : Illustration schématique de l'OPLL.....	46
Figure 2.8 : Système à deux longueurs d'onde avec la technique de verrouillage par injection.....	46
Figure 2.9 : Réduction du bruit de phase du signal généré par battement.....	48
Figure 2.10 : Schéma de l'interface OptiSystem.....	49
Figure 2.11 : Schéma général de la liaison Radio sur Fibre.....	52
Figure 2.12 : Partie émission RF de la liaison.....	55
Figure 2.13 : Partie réception RF de la liaison.....	56
Figure 2.14 : Diagramme de l'œil de la partie réception RF.....	58
Figure 2.15 : Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF (représentation spectrale).....	59
Figure 2.16 : Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF(représentation temporelle).....	60
Figure 2.17 : Signal reçu par le récepteur RF(représentation spectrale).....	60
Figure 2.18 : Signal reçu par le récepteur RF (représentation temporelle).....	61
Figure 2.19 : Spectre de l'émetteur optique.....	61
Figure 2.20 : Signal émis par l'émetteur optique.....	62
Figure 2.21 : Signal reçu par le récepteur optique.....	62
Figure 2.22 : Diagramme de l'œil du récepteur RF.....	63
Figure 2.23 : Diagramme de l'œil du récepteur optique.....	63
Figure 3.1 : Principe d'une liaison WDM.....	67
Figure 3.2 : Exemple de circuits optiques dans un réseau WDM.....	69
Figure 3.3 : Les systèmes WDM.....	70

Figure 3.4 : Schéma de la partie émission de la liaison.	73
Figure 3.5 : Schéma de la partie réception optique.....	74
Figure 3.6 : Schéma de la partie émission RF de la liaison.....	75
Figure 3.7 : Schéma de la partie réception RF de la liaison.....	76
Figure 3.8 : Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF (représentation spectrale).....	77
Figure 3.9 : Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF (représentation temporel).....	77
Figure 3.10 : Signal reçu par le récepteur RF(représentation temporelle).....	78
Figure 3.11 : Signal reçu par le récepteur RF(représentation fréquentielle).....	78
Figure 3.12 : Spectre optique du signal.....	79
Figure 3.13 : Signal optique émis (représentation temporelle).....	79
Figure 3.14 : Evolution du facteur de qualité (Q) en fonction du temps.....	80
Figure 3.15 : Evolution du BER en fonction du temps.....	80
Figure 3.16 : Diagramme de l'œil du récepteur optique.....	81

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis l'invention du téléphone en 1876, l'essentiel des télécommunications longues distances se font par l'intermédiaire d'un support en cuivre. Mais cette première génération de médiums atteint depuis quelques années ses limites. En effet, malgré des progrès énormes au niveau des protocoles, des compressions de données, du multiplexage et des codages, nous arrivons à saturation. On arrive au mieux à 2 ou 3 Gbit/s sur des câbles de 8 ou 12 paires.

Trois décennies après sa première fabrication, la fibre optique est enfin utilisée pour connecter les particuliers via la technologie F^TTH (Fiber To The Home). Ce support de transmission va transformer l'environnement des télécommunications à travers le monde. Cette évolution a un impact profond sur les fournisseurs contenus et les opérateurs de réseau. En effet, les réseaux d'accès en cuivre à travers le monde sont en grande partie remplacés par un réseau d'accès fibre. Le catalyseur le plus important de ce changement est la perception croissante que le réseau d'accès en cuivre n'est plus en mesure de répondre à la demande croissante en bande passante et à l'instantanéité requise pour une fluidité d'usage. Cet environnement a conduit à l'amorce d'une migration massive vers la fibre dans plusieurs pays où les consommateurs attendent des meilleures performances et des services plus riches.

Aujourd'hui, les technologies de l'Internet sont utilisées pour diffuser des programmes de télévision, contrôler des usines, interconnecter des banques, gérer des transmissions militaires, suivre des opérations médicales, ou transporter des conversations téléphoniques. Des services de plus en plus gourmands en bande passante comme le partage des contenus, le service de stockage en ligne, la télé haute définition (TV3D, TvHD), les jeux en ligne, le Peer To Peer, le téléenseignement et la télémedecine viennent s'ajouter à la liste de nos services usuels.

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.

Plusieurs points d'accès sont nécessaires pour connecter un utilisateur au réseau afin de garantir une couverture radio. Une solution prometteuse pour le déploiement des ondes millimétriques entre les multiples points d'accès est offerte par la technologie radio sur fibre (RoF, Radio over Fiber). Cette technologie exploite les avantages de l'optique pour la transmission de

signaux radio par le biais d'une liaison optique. Dans une liaison RoF, le signal radio est transposé sur l'amplitude ou la phase d'une porteuse optique par des transducteurs électro-optique (E/O) et ensuite récupéré à l'extrémité de la liaison par des transducteurs opto-électrique (O/E) correspondants. Cette combinaison entre ces deux domaines permet l'extension de la couverture radio et offre des débits de plus en plus élevés par l'association des performances de la fibre optique (faibles pertes, très grande largeur de bande passante et immunité aux interférences électromagnétiques) avec le principal avantage d'un système sans fil qui est la mobilité.

Bien qu'un système RoF offre de multiples avantages, des distorsions sur le signal RF transmis sur cette liaison optique peuvent exister et affecter la qualité de la transmission. Ces distorsions sont liées à plusieurs facteurs : le bruit d'intensité relatif et bruit de phase du laser, le bruit de grenaille de la photodiode, le bruit thermique des étages électroniques, la dispersion de la fibre optique, les non-linéarités des différents composants optoélectroniques et le gain négatif de la liaison RoF. Ces facteurs limitant doivent être considérés dans l'étude et l'analyse de la transmission des signaux radio sur des liaisons RoF.

Le dimensionnement d'un système RoF est réalisé pour respecter un cahier des charges spécifique. Dans le cas d'une transmission d'un signal complexe, un rapport signal sur bruit minimum doit être garanti afin de ne pas dégrader la qualité des données transmises. Le bilan de liaison, le point de compression et la linéarité au travers du SFDR (Spurious Free-Dynamic Range) peuvent être déterminés par des calculs théoriques afin de quantifier la transmission dans le cas d'une modulation d'intensité ou de phase. Il existe aussi une variété de logiciels commerciaux, dédiés initialement aux applications de télécommunication numérique, qui offrent des outils optoélectroniques pour analyser une liaison RoF.

Apparu pour répondre au problème économique soulevé par le nombre croissant d'installations de fibres optiques dû à la demande en hausse du débit d'informations, le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing) est une technique de transmission optique se recourant principalement aux besoins de l'internet (avec son flot d'images, de sons et de vidéos), répondant ainsi au nombre croissant sans cesse de ses utilisateurs.

Avant la WDM, toute nouvelle demande d'augmentation du débit se traduisait par l'ajout de fibres optiques dont chacune propageait un signal. Le coût élevé de telle opération ne permet ni d'être compétitif ni d'étendre le marché vers le public. Cette technique permet de multiplexer (mélanger) plusieurs signaux de différentes longueurs d'onde, dans une même fibre. Le gain est par conséquent proportionnel au nombre de canaux que la fibre permet de véhiculer. Nous présentons le long de ce chapitre les techniques de multiplexage dans les systèmes de transmissions

optiques, leurs performances, avantages, limitations, puis nous abordons ainsi l'étude des différents composants nécessaires pour un tel multiplexage

Notre mémoire est divisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous allons décrire différents composants qui entrent dans le cadre de la réalisation des liaisons de transmission par fibre optique et un rappel sur les différents types de sources optiques, le principe de quelques formats de modulation ainsi que les principaux éléments constituant le module de réception, l'origine des principales dégradations subies par le signal au cours de sa transmission.

Dans le second chapitre, nous allons d'abord faire une étude sur la technologie Radio sur Fibre et ces applications ensuite nous allons présenter le logiciel optisystem qu'on va utiliser pour les mesures de notre liaison Radio sur Fibre et une étude détaillée des composants qui nous ont permis d'avoir une connaissance sur la transmission du signal dans chaque partie de notre liaison qui va nous permettre de connaître la qualité de notre transmission après simulation.

Le troisième chapitre, a pour objectif d'étudier la technologie WDM le principe du multiplexage en longueur d'onde ensuite nous allons introduire la technologie WDM sur la Radio sur Fibre et nous ferons une nouvelle simulation sur le logiciel optisystem. On analysera les liens pour déterminer la qualité de notre transmission et on fera une comparaison par rapport à notre première liaison.

Chapitre 1

Etude d'une liaison par fibre optique

1.1 Introduction

De nos jours, les autoroutes de l'information offrent la possibilité de transmettre des données, de la voix, des images ...etc. d'un bout à l'autre de la planète. Aujourd'hui, 80 % du trafic mondial longue distance se fait par fibres optiques. Ces dernières ont en effet de multiples avantages par rapport aux câbles électriques classiques : elles sont plus robustes et sont très peu sensibles aux interférences électromagnétiques. Mais surtout, les technologies de télécommunications par fibres optiques, en constante amélioration depuis une trentaine d'années, permettent de transmettre des informations sur de très longues distances et à de très hauts débits.

En 1970, trois scientifiques de la compagnie Corning Glass Works de New York, Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck, produisirent la première fibre optique avec des pertes de phase suffisamment faibles pour être utilisée dans les réseaux de télécommunications (20 décibels par kilomètre ; aujourd'hui la fibre conventionnelle affiche des pertes de moins de 0,25 décibel par kilomètre pour la longueur d'onde 1550 nm utilisée dans les télécommunications). Leur fibre optique était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'informations qu'un simple câble de cuivre, ce qui correspondait au rapport des longueurs d'onde utilisées [1].

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord aborder l'évolution de la transmission et des différents éléments d'une liaison par fibre optique. Dans un premier lieu nous allons décrire un système de transmission optique, la composition de la fibre optique, le principe de fonctionnement, les différents types et caractéristiques ainsi que ses avantages et inconvénients.

1.2. Historique de la fibre optique

Dans les années 70 Les réseaux de télécommunication reposent sur deux types de systèmes : le câble coaxial et les faisceaux hertziens :

Le câble coaxial possède, quant à lui, une longueur du pas de régénération beaucoup plus faible du fait de la très forte atténuation du milieu.

Le système de base de ces réseaux a une capacité de 140 Mbit/s avec un espacement entre chaque répéteur de l'ordre de 2 km. Les derniers développements sur ces lignes de transmission ont permis d'obtenir une capacité de 560 Mbit/s avec le même espacement entre répéteurs. Comme à l'époque les câbles interurbains disposaient typiquement de 8 à 12 paires, la capacité d'une ligne atteignait 2 ou 3 Gbit/s.

Le réseau hertzien est basé sur une infrastructure de relais (distant d'environ 50 km les uns des autres) et utilise diverses bandes de fréquences essentiellement autour de 6/7 GHz et 11 GHz. De 1975 à 1985, la recherche se concentre sur les problèmes que pose l'augmentation de la bande passante liée au passage de l'analogique au numérique, et des développements importants voient le jour. Ainsi, des faisceaux hertziens permettant la transmission de 8 canaux (7 plus un canal de secours) à 140 Mbit/s, soit environ 1 Gbit/s sur un lien sont disponibles dès la fin des années 80. Le rendement spectral, qui représente l'efficacité dans l'utilisation du spectre, atteint alors environ 4 bit/s/Hz, grâce à des schémas de modulation performants.

En 1980, les premiers systèmes de transmission optique apparaissent. Ce développement commercial est l'aboutissement de plus de deux décennies de recherche de base pour obtenir des composants et dispositifs (en particulier des sources), mais aussi des fibres dont l'atténuation est compatible avec les exigences d'un réseau de télécommunication : en 1970, 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 télécommunications (actuellement les pertes sont de l'ordre de 0,15 dB/km).

Les premières années de la fibre optique sont marquées par des évolutions importantes :

Le passage consécutif de la première fenêtre de transmission autour de 850 nm (fibre multimode) à la deuxième autour de 1310 nm (minimum d'atténuation d'environ 0,3 à 0,4 dB/km), puis à celle autour de 1550 nm (minimum d'atténuation de 0,15 dB/km), qui est la norme aujourd'hui en matière de réseau. Ces changements de fenêtre de transmission ont été rendus possibles par l'amélioration des techniques de fabrication des préformes et au développement des sources optiques.

Le passage de la fibre multimode, utilisée dans les premières expérimentations, à la fibre monomode dont la connexion est plus problématique mais, qui propose des débits sans rapport avec la première. La fibre multimode conserve cependant sa pertinence dans d'autres domaines tels que l'aéronautique par exemple.

Même si, dans les premières années, le réseau optique a un débit qui ne surpasse pas encore celui des lignes de transmission utilisant le câble coaxial, il présente quand même un avantage indéniable face à ce dernier : l'espacement entre chaque répéteur est plus important, de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres (par exemple environ 70 km pour un système à 560 Mbit/s à 1550 nm).

L'avantage de la fibre optique par rapport au câble coaxial (augmentation du pas de régénération et donc diminution des répéteurs et des coûts de fabrication des lignes de transmission) va trouver un champ d'application dans le domaine des télécommunications très longues distances (en particulier dans les lignes de transmission sous-marines) : des câbles optiques furent envisagés dès lors que la fiabilité des composants optiques permet de les immerger. Le premier câble sous-marin transatlantique TAT 8 utilisant des fibres optiques fut posé en 1988 et offre une capacité de 280 Mbit/s par paire de fibres à 1300 nm. TAT 9 qui suivit en 1991, travaille quant à lui à 1550 nm, avec une capacité de 560 Mbit/s par paire de fibres. La notion de ligne de transmission «tout-optique» faisant appel exclusivement à la fibre optique apparaît au début des années 1990.

De 1992 à 1996, vont se bâtir les réseaux « tout-optique » de grande capacité utilisant la fibre monomode standard appelée G-652 dans la norme ITU-T, chaque fibre étant capable de transporter un débit de 2,5 Gbit/s avec un pas moyen de régénération de 90 km.

Cette évolution technologique des réseaux « tout-optique » a été rendue possible par la mise au point d'amplificateurs optiques dès la fin des années 80. En général, l'amplificateur utilise une fibre dopée à l'erbium dans laquelle se produit un mécanisme de transfert de puissance entre une pompe optique et le signal à transporter ; ainsi cela permet de contrôler sans conversion électrooptique la puissance des signaux transmis et compense les pertes subies lors de la propagation.

En 1995 le premier réseau sous-marin utilisant la technologie de l'amplification optique à fibre dopée à l'erbium (EDFA) est mis en service. Cette liaison longue de 6300 km (TAT 12, TAT 13) comporte 133 répéteurs en ligne et propose un débit total de 10 Gbit/s transmis sur deux fibres, équipées chacune d'une longueur d'onde modulée à 5 Gbit/s.

Enfin la véritable révolution technologique va se produire avec l'apparition du multiplexage en longueur d'onde ou WDM qui amène donc une multiplication par un facteur considérable de la capacité du réseau. L'intérêt principal de cette technique, qui a fait sa popularité, est de pouvoir réutiliser la fibre déjà installée, ce qui n'entraîne pas de surcoût pour de nouvelles infrastructures précédent sommaire suivant.

1.3. Système de transmission par fibre optique

Tout système de transmission d'information possède un émetteur et un récepteur. Pour un lien optique, deux fibres sont nécessaires. L'une gère l'émission, l'autre la réception. Il est aussi

possible de gérer émission et réception sur un seul brin mais cette technologie est plus rarement utilisée car l'équipement de transmission est plus onéreux [2].

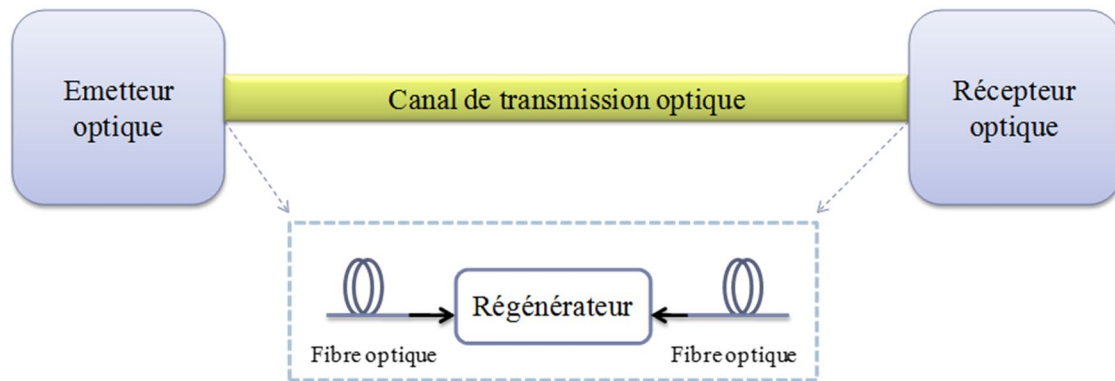


Figure1.1 : Schéma d'une liaison optique.

Le transpondeur optique a pour fonction de convertir des impulsions électriques en signaux optiques véhiculés au cœur de la fibre. À l'intérieur des deux transpondeurs partenaires, les signaux électriques sont traduits en impulsions optiques par une LED et lus par un phototransistor ou une photodiode.

Les émetteurs utilisés sont de trois types :

- les diodes électroluminescentes (DEL), ou LED, qui fonctionnent dans le proche infrarouge (850 nm),
- les lasers, utilisés pour la fibre monomode, dont la longueur d'onde est 1 310 ou 1 550 nm.
- les diodes à infrarouge qui émettent dans l'infrarouge à 1 300 nm.

Les récepteurs sont les photodiodes PIN (les plus utilisées car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante) et les photodiodes à avalanche. Pour tous les types de détecteurs optiques, le principe de fonctionnement est le même : l'effet photoélectrique. Entre les deux transpondeurs, l'information est portée par un support physique (la fibre) appelé le canal de transmission. Au cours de son parcours, le signal est atténué et déformé : des répéteurs et des amplificateurs placés à intervalles réguliers permettent de conserver l'authenticité du message. En général, la modulation du signal optique est une

modulation d'intensité lumineuse obtenue par la modulation du signal électrique dans la diode ou le laser.

L'atténuation et la déformation du signal sont des conséquences directes de la longueur du canal de transmission. Afin de conserver le signal optique de la source, les systèmes de transmission optique utilisent trois types d'amplificateurs :

- régénération (amplification seule),
- regeneration-reshaping (amplification et remise en forme),
- regeneration-reshaping-retiming (amplification, remise en forme et synchronisation).

Il existe des répéteurs à amplification optique (utilisant des verres dopés aux terres rares) ou des répéteurs-régénérateurs électroniques. Les liaisons actuelles utilisent principalement des amplificateurs optiques à fibres dopées erbium et sont entièrement optiques sur des distances pouvant aller jusqu'à 10 000 km.

Comme dans tous les systèmes de transmission, on cherche à transmettre dans la même fibre optique un maximum de communications d'origines différentes. Afin de ne pas brouiller les messages, on les achemine sur des longueurs d'onde différentes : c'est le multiplexage en longueur d'onde ou WDM. Il existe plusieurs techniques de multiplexage chacune adaptée au type de transmission sur fibre optique (transmission longue distance ou boucle locale par exemple) : Dense WDM (beaucoup de signaux à des fréquences très rapprochées), Ultra WDM (encore plus), Coarse WDM (moins de canaux mais moins coûteux)...

Désormais, on sait réaliser des réseaux tout-optique, c'est-à-dire qui ne sont pas des assemblages de fibres optiques reliées les unes aux autres par des nœuds électriques. Les commutateurs, les multiplexeurs, les amplificateurs existent en version tout-optique. C'est actuellement un enjeu primordial car la rapidité des transmissions sur fibre optique est telle que les goulots d'étranglement se trouvent désormais dans l'électronique des nœuds des réseaux.

1.4 Emetteurs optique

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

La partie émission d'une liaison optique est composée de divers éléments (laser, modulateur, driver). Son rôle est de délivrer au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données.

1.4.1 Spectre électromagnétiques

Le spectre électromagnétique est la description de l'ensemble des rayonnements électromagnétiques classés par fréquence, longueur d'onde ou énergie. Le spectre électromagnétique s'étend théoriquement de zéro à l'infini en fréquence (ou en longueur d'onde), de façon continue. Pour des raisons tant historiques que physiques, on le divise en plusieurs grandes classes de rayonnement, qui s'étudient par des moyens particuliers à chacune d'entre elles.

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (figure ci-dessous).

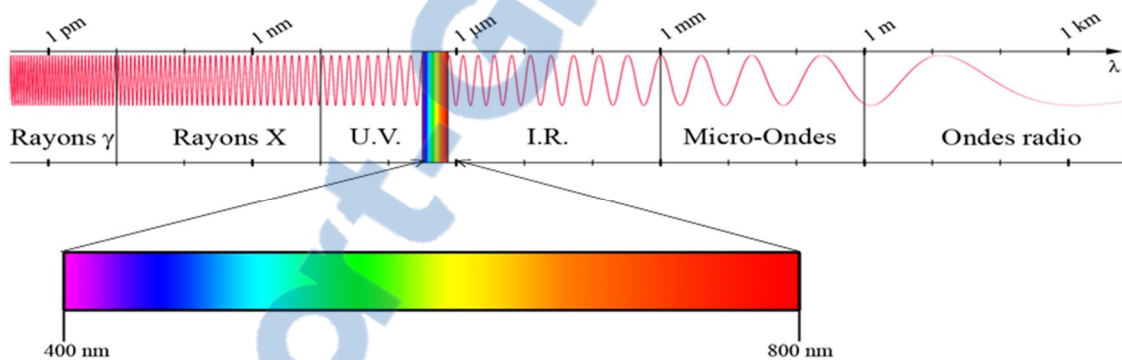


Figure 1.2 : Spectre électromagnétique.

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

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 milliardième (10-14 m) à un milliardième (10-12 m) de millimètre.

Les 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).

Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre un milliardième (10⁻¹² m) et un cent millième (10⁻⁸ m) de millimètre.

Contrairement à l'œil humain qui n'est capable de capter le rayonnement que dans une fenêtre très étroite du spectre électromagnétique, celle correspondant au domaine du visible (longueurs d'onde comprises entre 0,4μm et 0,7μm), les capteurs satellitaires utilisent une fraction beaucoup plus étendue du spectre.

Trois fenêtres spectrales sont principalement utilisées en télédétection spatiale :

- Le domaine du visible
- Le domaine des infrarouges (proche IR, IR moyen et IR thermique)
- Le domaine des micro-ondes ou hyperfréquences (pas abordé ici, même si elles ont une importance considérable en télédétection RADAR notamment)

Certains capteurs, peu nombreux, permettent de mesurer l'énergie du rayonnement ultraviolet. Ils sont utilisés principalement en astronomie pour l'étude des atmosphères planétaires ou pour mesurer la quantité d'UV atteignant la surface terrestre. En télédétection aérienne, le rayonnement proche UV 250 - 350 nm est utilisé pour des applications en océanographie, notamment pour l'identification et la cartographie des nappes d'hydrocarbures.

1.4.2 Diodes électroluminescente (DEL)

Cette diode émet de la lumière quand elle est polarisée en direct. Elle est maintenant très utilisée pour l'éclairage des habitations et depuis 1975 comme voyants lumineux dans les appareils électroniques.

1.4.2.1 Principe de fonctionnement

Le mot LED est l'acronyme de Light Emitting Diode (Diode Electroluminescente en français). Le symbole de la LED ressemble à celui de la diode mais on y a ajouté deux flèches sortantes pour représenter le rayonnement lumineux émis.

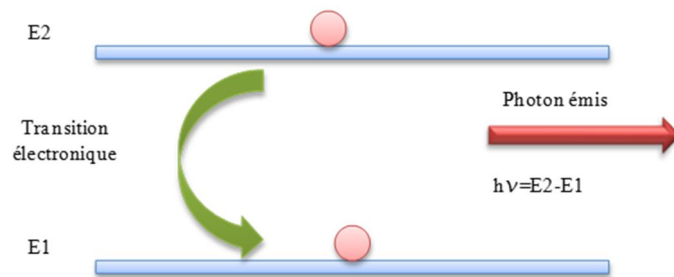


Figure 1.3 : Emission spontanée.

La physique des semi-conducteurs nous enseigne que les électrons dans les solides cristallins se situent à des niveaux d'énergie spécifiques. Ces niveaux très proches les uns des autres, sont regroupés en "bandes d'énergie".

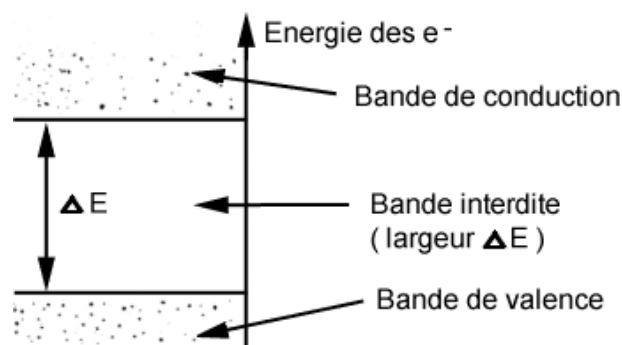


Figure 1.4 : Représentation des bandes d'énergie.

Un électron de la bande de valence peut passer dans la bande de conduction à condition d'acquérir une énergie supplémentaire au moins égale à ΔE c'est l'effet photoélectrique.

Un électron de la bande de conduction peut passer dans une bande de valence. Dans ce cas il libère une énergie au moins égale à ΔE .

Cette énergie peut être :

- Dissipée sous forme de chaleur (phonons), émise sous forme de lumière (photons). C'est l'effet électroluminescence (visible ou non).

1.4.2.2 Jonction P.N

Ce phénomène d'électroluminescence sera obtenu à la condition de créer une forte quantité d'électrons dans la bande de conduction. On l'obtient par injection de porteurs en polarisant dans le sens direct, une jonction PN à semi-conducteur.

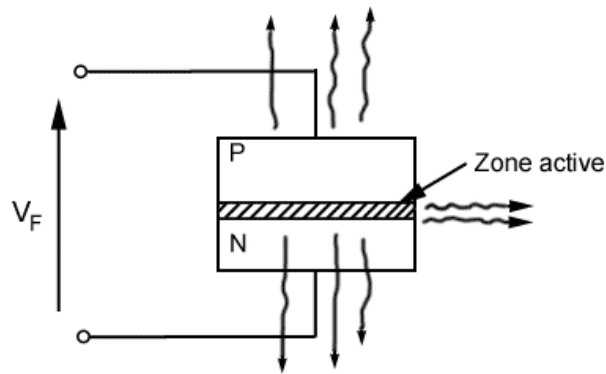
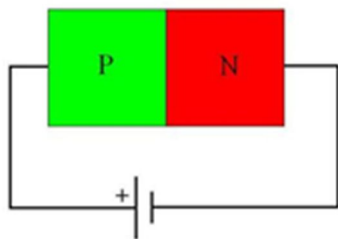


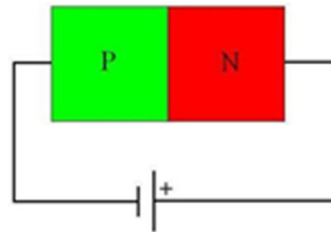
Figure1.5 : Représentation d'une jonction PN.

Selon la fabrication, la lumière peut être émise soit latéralement, soit perpendiculairement à travers la mince couche N ou P.

Une jonction P-N désigne une zone où le dopage varie brusquement, en passant d'un dopage de type P à un dopage de type N. Lorsque la région dopée P est mise en contact avec la région N, les électrons et les trous diffusent spontanément de la jonction, elle ne laisse pas passer le courant. La jonction P-N est obtenue en juxtaposant un semi-conducteur dopé P et un semi-conducteur dopé N. L'utilisation d'une jonction P-N se fait en lui appliquant une polarisation. Il existe deux possibilités comme le montre la figure 1.6:



(a) Polarisation directe



(b) polarisation inverse

Figure1.6 : Types de polarisation.

1.4.3 Diode Laser (DL)

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

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

- L'émission stimulée : Un laser est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée. En effet, dans un semi-conducteur, un électron peut passer d'un état à un autre de trois façons (Figure 1.7(b)).
- L'absorption : En absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé (électron dans la bande de conduction et trou dans la bande de valence).

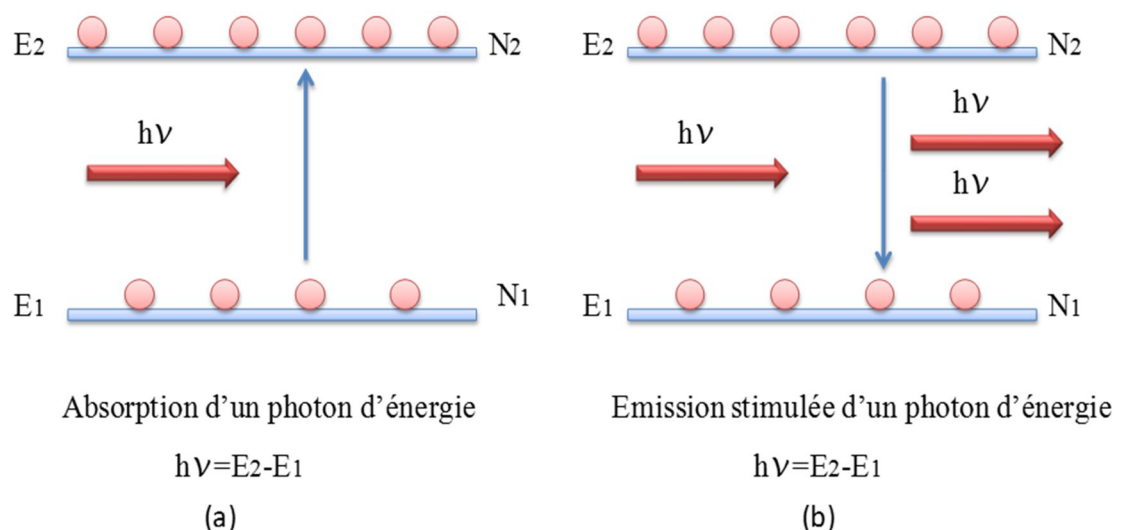


Figure 1.7 : Processus d'absorption et de l'émission stimulée.

- L'émission stimulée : Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement

correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident. On parle alors de lumière cohérente. Avec l'émission stimulée s'introduit la notion de gain ou d'amplification du rayonnement incident puisque, à partir d'un photon, on en obtient deux.

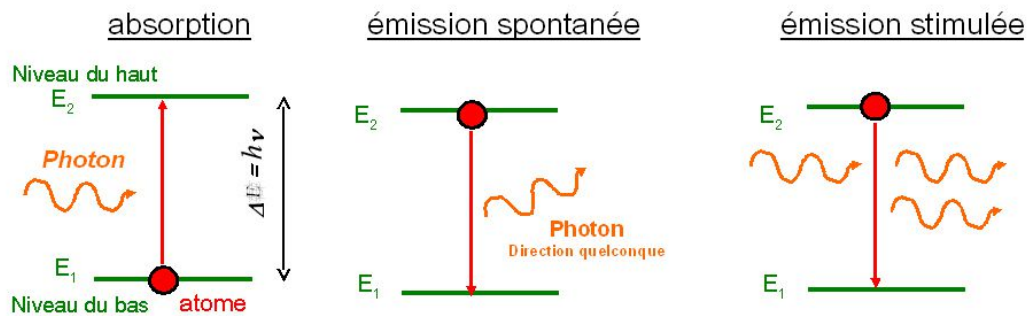


Figure 1.8 : Processus d'absorption émission spontanée émission stimulée.

Le phénomène d'inversion de population est une étape nécessaire dans le fonctionnement d'un laser.

Il faut donc créer une situation hors équilibre en apportant de l'énergie au système des atomes via un pompage dont l'objectif est d'amener suffisamment d'atomes sur le niveau du haut.

Comme tout laser, une diode laser fonctionne à l'aide d'un milieu amplificateur (amplification dans les semi-conducteurs par émission stimulée), d'une structure résonante (cavité de Fabry-Pérot ou autre types) et d'un processus de pompage (courant électrique).

1.5 Définition d'une fibre optique

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de lumière et sert dans la transmission de données par la lumière. Elle offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et peut servir de support à un réseau « large bande » par lequel transitent aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. Le principe de la fibre optique a été développé au cours des années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works (actuelle Corning Incorporated).

Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal

lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'information. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clés de la révolution des télécommunications. Ses propriétés sont également exploitées dans le domaine des capteurs (température, pression, etc.), dans l'imagerie et dans l'éclairage.

D'une manière générale, le câble à fibre optique a trois éléments principaux, entre autres :

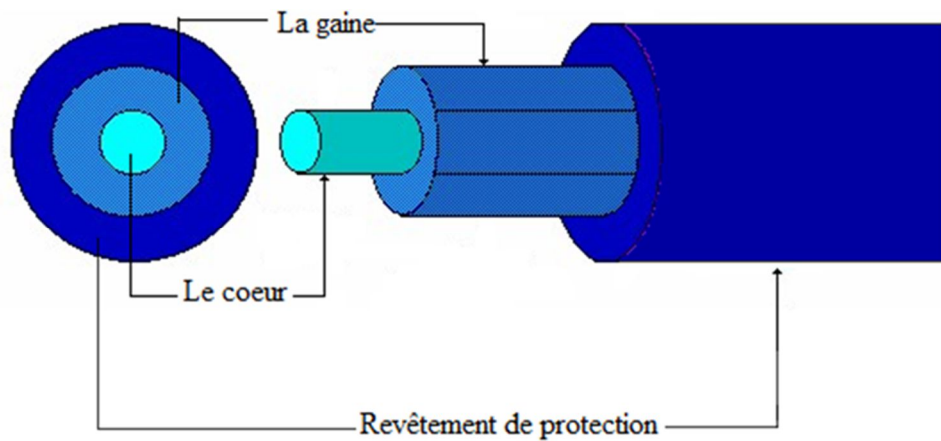


Figure 1.9 : Structure d'une fibre optique.

Le cœur : Est un milieu dans lequel une quantité d'énergie lumineuse véhiculée au sein de la fibre sera confiné au voisinage du centre dont l'indice de réfraction est dans laquelle se propage la lumière.

La gaine : Elle est la partie qui enveloppe le cœur dont la réfraction est plus faible.

Le fourreau (revêtements) : Aussi appelé la gaine protectrice, assure à son tour la protection mécanique et chimique adéquate à la fibre optique.

1.5.1 Durée de vie d'un câble à fibre optique

La durée de vie d'un tel conducteur est estimée à au moins 20 ans. Le signal électrique à transmettre, est transformé en signal lumineux à l'aide d'un émetteur. L'émetteur utilise une LED (Light Emitting diode) diode électro lumineuse ou un laser pour produire la lumière.

1.5.2 Avantages et inconvénients de la fibre optique

La fibre ne connaît pas beaucoup de points négatifs. Son principal inconvénient demeure son prix. La connectique et les travaux représentent un investissement conséquent dans le cadre du déploiement de la fibre optique mais offre de nombreux avantages pour les télécommunications :

- La perte de signal sur une longue distance est très faible.
- Les débits sont très élevés et symétriques
- La fibre optique est insensible aux perturbations radioélectriques. Vous ne risquez donc pas, par exemple, de voir votre image TV brouillée par temps de pluie.
- L'entretien de la fibre est moins coûteux que certains autres types de câblages.
- La rentabilité de la fibre est un autre avantage : le réseau fibre optique a un cycle de vie de 20 ans. Le seuil de rentabilité moyen est de 2 à 5 ans.

1.5.3 Principe de fonctionnement de la fibre optique

La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur de la fibre a un indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la gaine et peut donc confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi de multiples fois à l'interface entre les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne). L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine plastique de protection.

Lorsqu'un rayon lumineux entre 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 optique sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée.

Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

La différence d'indice normalisé, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine : est l'indice de réfraction du cœur, et celui de la gaine.

1.5.4 L'ouverture numérique

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 [3]:

$$ON = \sin \alpha_{max} = \sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2} \quad (1.1)$$

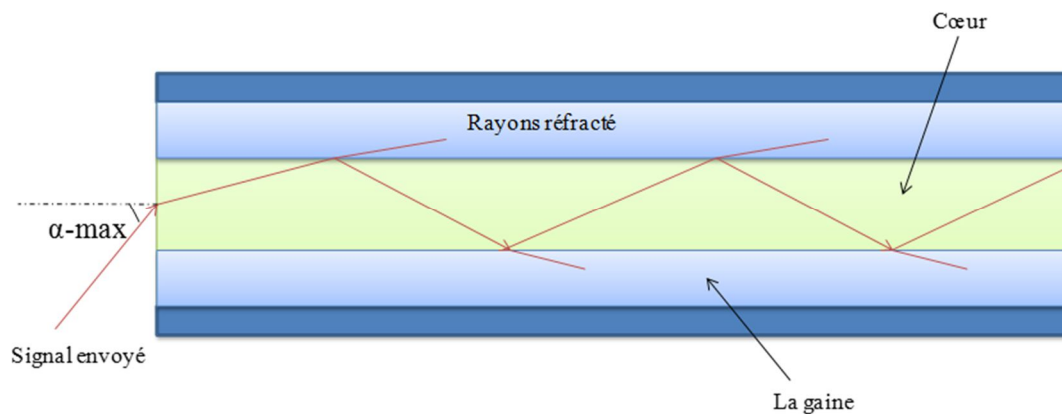


Figure1.10 : Guidage de la lumière dans une fibre optique.

1.5.5 Différents types de fibres optiques

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur et la longueur d'onde utilisée :

- Fibres optique monomode.
- Fibre optique multimode.

1.5.5.1 Fibre optique multimode

Les fibres multimodes ont été les premières sur le marché permet la propagation de plusieurs modes (plusieurs trajets ou plusieurs faisceaux). Elle autorise jusqu'à 680 modes pour $\lambda = 850 \text{ nm}$. En conséquence, elles sont utilisées uniquement pour des bas débits ou de courtes distances.

Il existe deux familles pour la fibre optique multimode :

1.5.5.1.1 Fibre optique multimode a saut d'indice

La fibre multimode à saut d'indice est la fibre la plus ordinaire. C'est ce type de fibre qui est utilisé dans les réseaux locaux de type LAN.

Etant donné que la fibre à saut d'indice est multimode, il existe plusieurs modes de propagation de la lumière au sein de son cœur de silice.

Il existe dans cette fibre une très grande variation entre l'indice de réfraction du cœur et de la gaine optique.

C'est pour cela que les rayons lumineux se propagent par réflexion totale interne en "dent de scie".

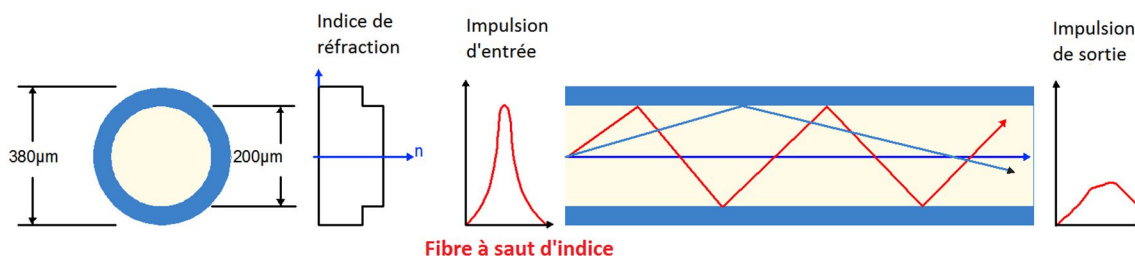


Figure1.11 : Fibre optique multimode a saut d'indice.

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. Le débit est d'environ 100Mb/s avec une portée maximale de 2km et un affaiblissement de 10dB/km.

1.5.5.1.2 Fibre optique multimode a gradient d'indice

La fibre multimode à gradient d'indice est elle aussi utilisée dans les réseaux locaux. C'est une fibre multimode, donc plusieurs modes de propagation coexistent. A la différence de la fibre à saut d'indice, il n'y a pas de grande différence d'indice de réfraction entre cœur et gaine.

Cependant, le cœur des fibres à gradient d'indice est constitué de plusieurs couches de matière ayant un indice de réfraction de plus en plus élevé.

Ces différentes couches de silice de densités multiples influent sur la direction des rayons lumineux, qui ont une forme elliptique.

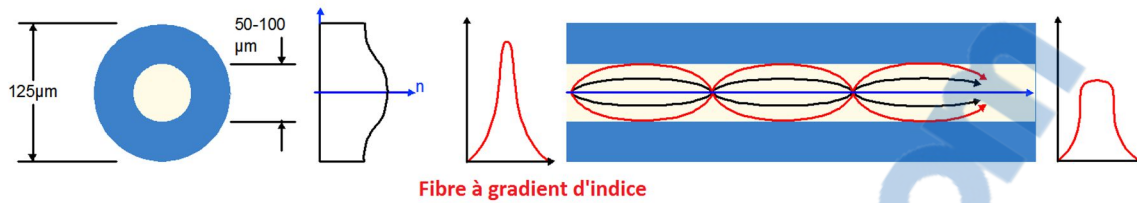


Figure 1.12 : Fibre optique multimode a gradient d'indice.

La fibre à gradient d'indice possède un cœur de taille intermédiaire.

L'atténuation sur ce type de fibre est moins importante que sur les fibres à saut d'indice.

Débit : environ 1 Gbit/s.

Portée maximale : environ 2 Km.

Affaiblissement : 10 dB/Km.

1.5.5.2 Fibre optique monomode

La fibre monomode est la meilleure fibre existante à l'heure actuelle. C'est ce type de fibre qui est utilisé dans les cœurs de réseaux mondiaux.

Un seul mode de propagation de la lumière existe : c'est le mode en ligne droite.

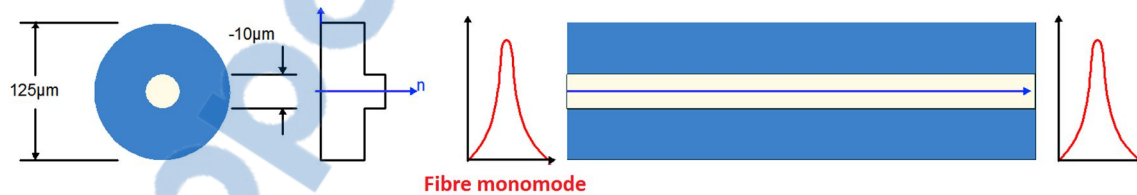


Figure 1.13 : Fibre optique monomode.

La fibre monomode possède un cœur très fin, de la taille d'un cheveu !

L'atténuation sur ce type de fibre est quasi nulle, c'est ce qui en fait sa force.

Débit : environ 100 Gbit/s.

Portée maximale : environ 100 Km.

Affaiblissement : 0,5 dB/Km.

1.5.5.3 Comparaison entre les différents types de fibres optiques

Etant donné qu'il y a différentes structures de fibres, elles ont par conséquent des capacités et des caractéristiques différentes.

Le tableau suivant donne un bref récapitulatif des avantages et des inconvénients de chaque structure :

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

Tableau1.1 : Comparaison entre les différents types de fibre optiques.

1.6 L'atténuation

En électronique, l'atténuation ou affaiblissement est la diminution relative de la puissance d'un signal au cours de sa transmission. C'est le rapport entre la valeur efficace du signal à la sortie par celle à l'entrée de la section considérée.



Figure1.14 : Effet de l'atténuation.

L'atténuation, que ce soit dans les lignes de transmission ou dans la transmission hertzienne, est une grandeur importante dans les télécommunications, dont elle est un facteur limitatif. Ce concept sert aussi en acoustique, notamment en acoustique environnementale pour le calcul de l'isolation phonique. Dans les circuits électroniques, les montages atténuateurs servent pour l'adaptation du niveau du signal entre des parties d'un appareil, sans en modifier d'autre part les caractéristiques.

Ce rapport, toujours inférieur à 1 par définition, s'exprime souvent en décibels. La définition de l'atténuation est identique à celle du gain. L'atténuation est un gain inférieur à 1, s'il est exprimé en rapport, ou négatif, s'il est exprimé en décibels.

On définit un coefficient d'atténuation :

$$\alpha = \frac{10}{L} * \log\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right) (\text{dB/km}) \quad (1.2)$$

P_{in} : Puissance injectée à l'entrée.

P_{out} : Puissance à la sortie.

L'atténuation dépend en particulier de la longueur d'onde des impulsions lumineuses.

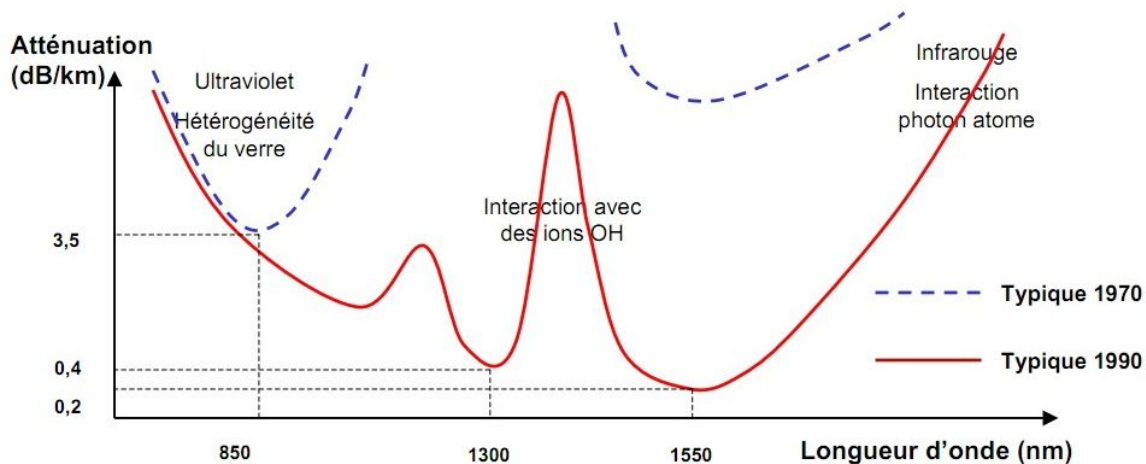


Figure1.15 : Les pertes de propagation de la fibre optique.

1.7 Généralités sur l'amplification optique

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

La recombinaison électron-trou peut ensuite être provoquée par un photon incident, ce qui donne naissance à un deuxième photon de même fréquence, de même phase et même

direction. Cette émission est dite stimulée et conduit à une amplification du signal. En même temps, la recombinaison peut se faire sans la présence d'un photon incident [4].

Ces photons, émis de façon spontanée, de manière non cohérente, constituent le bruit de l'amplification optique. L'ensemble des photons, originales 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).

1.7.1 Amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA)

En optique un amplificateur est un dispositif qui amplifie un signal lumineux sans avoir à le convertir en signal électrique, il est nécessaire de placer un amplificateur tous les 100Km, un EDFA permet de le faire.

Un EDFA fonctionne à la manière d'un laser, une fibre optique est dopée et est pompée optiquement afin de placer les ions dans l'état excité. Lorsqu'un signal lumineux passe par ce morceau de fibre optique il excite les ions par effet laser en produisant un autre photon en tout point identique au photon incident, le signal lumineux est donc doublé. La figure 1.16 montre un amplificateur optique dopé à l'erbium.

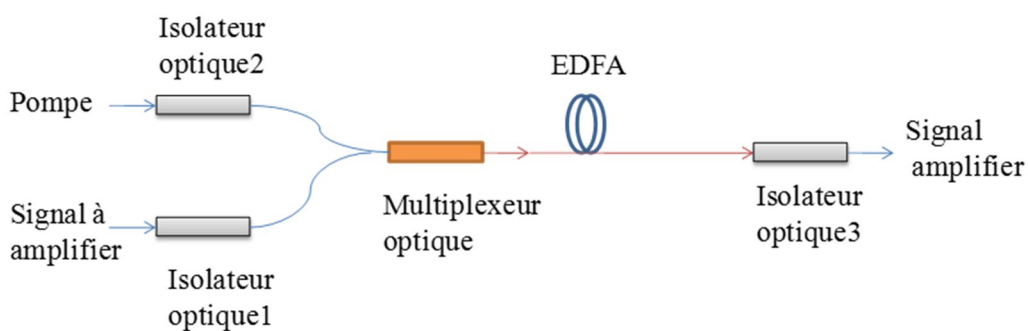


Figure1.16 : Schéma d'un amplificateur dopé à l'erbium.

Le signal et la pompe sont multiplexés en longueur d'onde afin de minimiser les pertes. Il est préférable d'ajouter deux isolateurs un à l'entrée et l'autre à la sortie d'un amplificateur

dopée à l'erbium, pour que la lumière passe dans un sens afin d'éviter toutes les réflexions qui créent une cavité, osciller le dispositif et le transformer en laser.

Pour réduire encore les pertes aux raccordements avec les fibres de ligne, une section de fibres adaptatrices est utilisée, ceci permet d'augmenter la densité de puissance de l'onde pompe, donc le gain et le rendement.

On trouve à la sortie un filtre optique, destiné à éliminer les résidus de l'onde pompe et réduire l'émission spontanée amplifiée, ainsi qu'une photodiode permettant de contrôler automatiquement le gain. Un amplificateur EDFA permet d'obtenir des gains supérieurs à 28 dB avec des fortes puissances (> 20 dBm).

1.7.2 Les amplificateurs Raman

Avec l'accroissement des canaux dans la fibre, la bande spectrale offerte par les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium, limitée au maximum à 40nm, 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 de 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 photon.

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 photon. 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.

1.8 La dispersion dans la fibre optique

La dispersion se réfère 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. A la sortie de la fibre, on constate alors un élargissement de l'impulsion dans le domaine temporel (figure 1.17) :



Figure1.17 : Phénomène de la dispersion dans une fibre optique.

Plusieurs types de dispersion existent, contribuant tous à l'étalement de l'impulsion au cours de sa propagation dans le guide : Dispersion modale, dispersion de polarisation, et la dispersion chromatique dont la dispersion matérielle et la dispersion du guidage [5].

1.8.1 Dispersion modale

La dispersion modale est la principale cause de dispersion dans les fibres multimodes, 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).

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

$$D_i = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{\tau}{L} \quad (1.3)$$

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

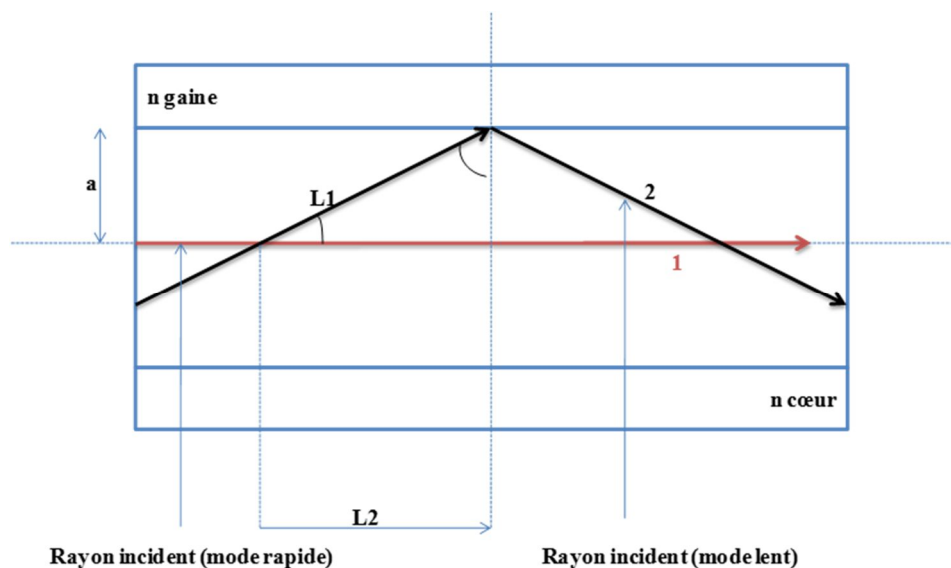


Figure 1.18 : Dispersion modale, propagation d'un mode rapide et d'un mode lent.

1.8.2 Dispersion chromatique

Une dispersion chromatique non nulle peut se compenser optiquement, par l'intermédiaire d'une courte section de fibre de forte dispersion négative (en général l'atténuation est élevée) dite DCF. On peut utiliser un dispositif compensateur de dispersion chromatique qui joue le rôle de retarder les longueurs d'onde arrivées en premier.

La réalisation de ces dispositifs est délicate mais leurs principe est simple, la compensation est possible tant que l'on reste en régime linéaire, les différents longueurs d'onde d'un même signal ne se couplent pas.

Dans un système à multiplexage en longueur d'onde WDM, la compensation de dispersion s'applique en 2 temps :

- Une compensation grossière pour tout le spectre, au niveau de chaque section, cette méthode n'est pas précise car il est difficile d'avoir une fibre dont la dispersion est symétrique de celle de la fibre en ligne sur tout le spectre.
- Une compensation fine longueur d'onde par longueur d'onde après le démultiplexeur.

Si L_{SMF} et D_{SMF} sont respectivement la longueur (en km) et la dispersion (en ps/nm/km) de la fibre standard utilisée, L_{DCF} et D_{DCF} respectivement celles de la fibre de compensation on doit avoir [6] :

$$(L_{SMF} \times D_{SMF}) + (L_{DCF} \times D_{DCF}) = 0 \quad (1.4)$$

1.8.3 Dispersion de polarisation

Le mode fondamental d'une fibre optique monomode LP_{01} est composé de deux modes électromagnétiques dégénérés caractérisés par deux directions de polarisation perpendiculaires.

Dans une fibre monomode <idéale>, ces deux modes, notés LP_{01}^x et LP_{01}^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 1.19 : Représentation des modes dégénérés du mode LP_{01} .

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.

1.9 Techniques de modulation

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques.

Il existe principalement 2 techniques : la modulation directe et la modulation externe.

1.9.1 La modulation directe

Dans les systèmes de télécommunication par fibre optique les lasers à semi-conducteur sont très utilisés car il est possible de les moduler facilement. La modulation du courant qui traverse ces systèmes entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise.

Cette technique est appelée la modulation directe (la figure 1.20) :

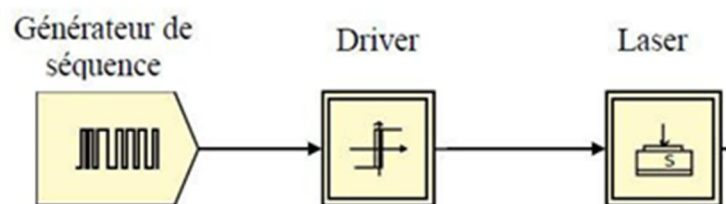


Figure1.20 : Modulation directe.

La modulation directe possède peu de composant, le générateur émet un débit de données ou une séquence de données, le driver permet de commander la source optique au niveau des puissances émises en fixant les valeurs du courant d'alimentation, et le laser qui est une source optique.

1.9.2 La modulation externe

La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non pas le courant d'alimentation à l'entrée du laser.

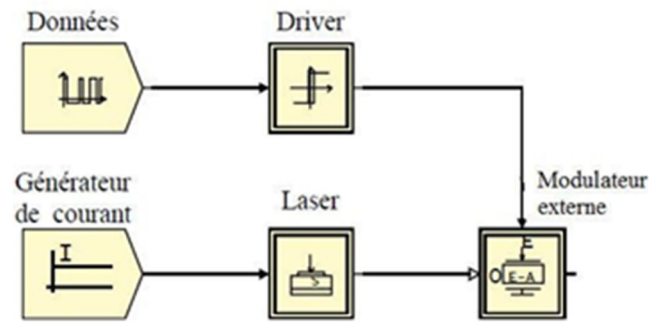


Figure1.21 : Modulation externe.

La modulation est effectuée par un composant indispensable qui est le modulateur externe (figure 1.21). Celui-ci est commandé par une tension externe, elle permet de représenter l'information à transmettre. Cette tension est appliquée au modulateur et consiste à modifier le facteur de transmission.

Le signal optique continu émis par le laser est alimenté par un courant constant. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé. Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de puissances et choisir les modifications du facteur de transmission.

1.9.3 Modulateur de Mach-Zehnder

Les modulateurs de Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques que l'on place directement en sortie du laser. Ils sont fréquemment utilisés pour les applications de télécommunication large bande.

En réalité, les effets électro-optiques sont à la base de ce type de modulateurs, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique [7].

Ce phénomène est appelé effet Pockels si les effets électro-optiques sont linéaires, c'est à dire que la variation d'indice est proportionnelle au champ appliqué, et effet Kerr quand elle est proportionnelle au carré du champ. L'effet Pockels est prépondérant dans certains matériaux et permet des modulations de phase et d'amplitude de la lumière.

Un des principaux impératifs est d'utiliser des matériaux transparents à la longueur d'onde de fonctionnement et présentant des coefficients électro-optiques aussi élevés que possible.

De tels modulateurs fonctionnant à $1,5\ \mu\text{m}$ ont été réalisés sur substrat d'iodate de lithium (LiNbO_3) ainsi que dans des matériaux semi-conducteurs (GaAs , ...). Grâce à ce modulateur on peut obtenir une modulation d'amplitude à travers une modulation de phase à l'intérieur du composant.

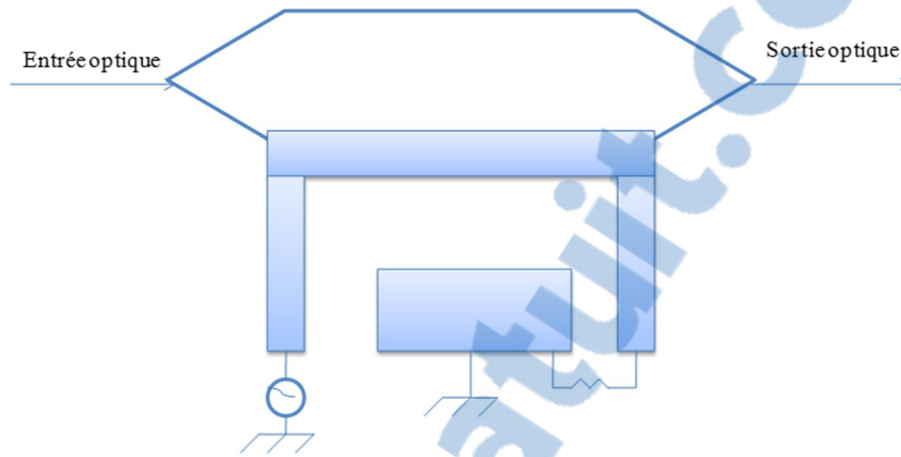


Figure 1.22 : Interféromètre de Mach-Zehnder.

1.9.4 Modulation de phase

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

1.9.5 Modulation d'amplitude

Cela consiste à réaliser un interféromètre dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras par l'application d'une tension contrôlée sur le matériau électro-optique [8].

En conclusion, la modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc de transmettre des débits plus élevés. Le bruit, le chirp ... ne sont pas inexistants dans les modulateurs de Mach-Zehnder mais leurs valeurs sont nettement plus faibles que dans les lasers. Les limites de capacité de transmission sont donc repoussées vers des fréquences plus importantes.

1.10 Réception optique

De même que pour les modules d'émission, de nombreux efforts ont été fournis pour rendre les modules de réception de plus en plus performants. Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique il est composé de photodiode PIN, photodiode à avalanche (PDA), amplificateur, convertisseur courant-tension, ainsi que du filtre.

1.10.1 Le photodétecteur

Un photodétecteur converti les photons incidents en courant d'électron. Il transforme donc le signal optique en signal électrique. Un bon photodétecteur doit être très sensible à la longueur d'onde utilisée, générer un minimum de bruit et doit être suffisamment rapide. Les photodétecteurs à semi-conducteurs sont les plus utilisés car ils sont très rapides, peu coûteux et de dimensions compatibles avec les fibres optiques.

Sous l'effet d'un photon d'énergie suffisante, un électron de la bande de valence est arraché et passe dans la bande de conduction produisant une paire de porteurs électrons - trous.

Ces porteurs sont dissociés, sous l'action d'un champ électrique et participent au photocourant de déplacement.

- a. Etat stable (absence de photon incident).
- b. Création de paire électrons-trous par absorption d'un photon.
- c. Création de courant de déplacement sous l'action d'un champ électrique externe.

Le photon incident ne peut être absorbé que si son énergie $h\nu$ est au minimum égale au GAP ΔE du matériau.

$$h\nu \geq \Delta E \quad (1.5)$$

1.10.2 Les photodiodes PIN

La principale qualité d'une photodiode PIN est que la composante d'entraînement du photocourant domine sur la composante diffusive, parce que la plupart de la puissance optique incidente est absorbée à l'intérieur de la zone I [9].

En effet, la zone I est placée entre la zone P et la zone N d'un semi-conducteur différent dont la bande interdite est choisie afin que les photons incidents soient absorbés seulement dans la zone I de la photodiode (figure 1.23).

Une photodiode PIN utilise généralement du matériau InGaAs pour la région I et du matériau InP pour les couches P et N.

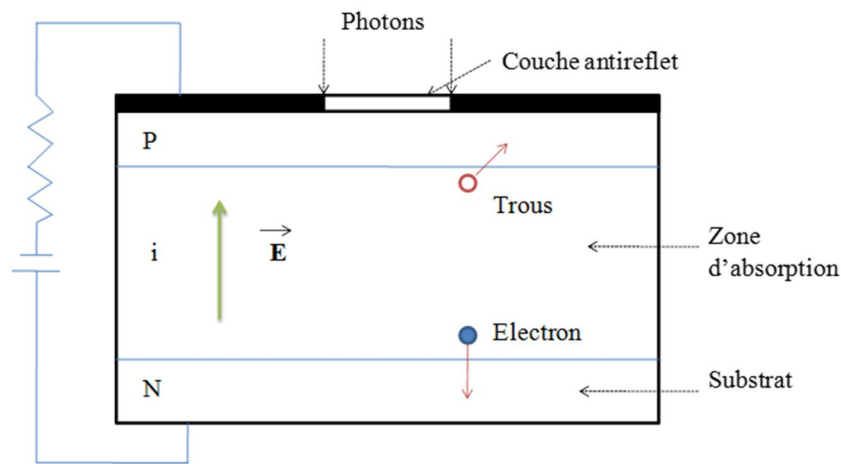


Figure 1.23 : Photodiode PIN.

Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode PIN sont la sensibilité, le courant d'obscurité et le temps de réponse. Le photocourant I_{ph} est directement proportionnel à la puissance optique incidente P_{opt} selon la relation :

$$I_{ph} = S \cdot P_{opt} + I_{obs} \quad (1.6)$$

1.10.3 Les photodiodes à avalanche (PDA)

Si on reprend la diode PIN mais qu'on lui applique une tension inverse élevée, on obtient un champ électrique intense dans la région intrinsèque, aussi appelée région semi isolante.

Si le champ est suffisamment intense, les charges générées dans la zone semi isolante peuvent acquérir suffisamment d'énergie pour ioniser un atome neutre. De cette manière, une nouvelle paire électron-trou est créée.

Pour chaque paire créée par l'absorption d'un photon, on obtient ainsi M paires au total : on dit qu'il y a multiplication des paires électron-trou par avalanche [10]. La figure 1.24 montre le principe d'une photodiode à avalanche.

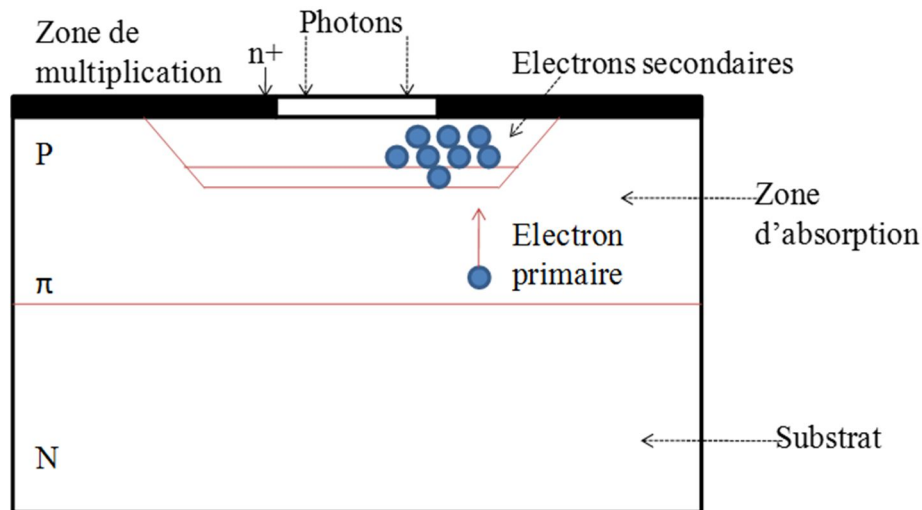


Figure 1.24 : Photodiode a avalanche.

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.

1.11 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 optiques.

On a commencé par le principe de fonctionnement d'une liaison optique suivi d'une description détaillée des différents composants de la partie émission avec 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 avalanche.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier la technologie de la Radio sur Fibre optique ainsi que le logiciel Optisystem et on fera une simulation sur ce logiciel de notre liaison Radio sur Fibre.

Chapitre 2

Etude d'une liaison Radio sur Fibre

2.1 Introduction

La croissance accélérée de la demande de services sans fil à haut débit par les utilisateurs et la limitation de la bande centimétrique en termes de bande passante et de bandes non-licenciées, a conduit naturellement au passage à la bande millimétrique centrée autour de 60 GHz, offrant une très large bande passante à très haut débit. En outre, la miniaturisation des antennes aux fréquences millimétriques ouvre la porte aux développements des circuits permettant l'intégration des antennes dans les récepteurs radio. Cependant, la couverture radio pour de telles fréquences est très limitée d'où le besoin d'intégrer des liaisons optiques analogiques permettant d'étendre le réseau sans fil avec fiabilité et efficacité.

La fréquence des ondes lumineuses électromagnétiques procure d'énormes bandes passantes et une capacité potentielle d'informations, quelque chose qui a commencé à être pratiquement réalisée autour des années 2000 avec l'avènement du multiplexage en longueur d'onde (WDM division multiplex) et des systèmes optiques (dont le développement d'amplificateurs à fibre dopée erbium (EDFA) était un facteur important). Aujourd'hui, les communications par fibre optique sont omniprésentes, et pas seulement dans les longues distances elles sont aussi utilisées dans les réseaux mondiaux, nationaux et régionaux.

Afin de gérer les différentes cellules d'un réseau multi-cellulaires à très haut débit, une solution prometteuse consiste à utiliser une infrastructure optique pour relier les différents points d'accès radio. Cette solution se base sur des technologies hybrides dites « Radio-sur Fibre » qui utilise de manière avantageuse un support de transmission optique capable de distribuer des signaux radiofréquence à des débits au-delà de 1 Gbit/s par utilisateur tout en satisfaisant le besoin de mobilité

Dans ce chapitre nous allons commencer par l'étude d'un système Radio sur Fibre ensuite on va d'écrire le logiciel Optisystem et on présentera un schéma générale de la liaison Radio sur Fibre, puis nous allons définir tous les éléments qui serviront de critères de qualité de transmission de notre liaison et nous finiront par une analyse des liens.

2.2 Principe de la technologie Radio sur Fibre

Pour étendre la couverture géographique des signaux radio fréquences et afin de répondre à l'augmentation en permanence de la demande de fort débit et de bande passante élevée, la solution proposée a été de réaliser des systèmes hybrides combinant les technologies de fibres optiques et radio communément "système Radio sur Fibre" (RoF).

Par définition, la RoF est consacrée à la transmission optique de signaux analogiques micro-ondes. Par conséquent, la liaison RoF exploite l'efficacité des fibres optiques pour la distribution des signaux radio vers plusieurs points d'accès sans fil qui offrent l'avantage de la mobilité. En effet, au lieu de distribuer des signaux numériques tels que l'Ethernet (IEEE 802.11ad) ou HDMI (WirelessHD) pour communiquer entre chaque point d'accès, ce qui nécessite des processus de traitement du signal tel que des conversions de signaux analogique/numérique et numérique/analogique, les systèmes RoF distribuent les signaux radio dans leur format analogique initial. Les signaux radio sont transposés sur une porteuse optique par modulation de l'intensité ou phase de la lumière d'une source laser sans changer le format de modulation. Ceci est possible par l'utilisation de fibres optiques en silice qui offrent une large bande passante et une faible atténuation. La figure (2.1) représente le cas le plus simple d'une liaison RoF où deux cellules radio sont placées à chaque extrémité d'une fibre optique nécessitant l'existence d'un transducteur E/O à l'émission qui transpose le signal radio en optique et un transducteur O/E à la réception qui transpose le signal optique en signal radio. Les composants utilisés pour ces transpositions sont, respectivement, un laser ou modulateur et un photo-détecteur [11].

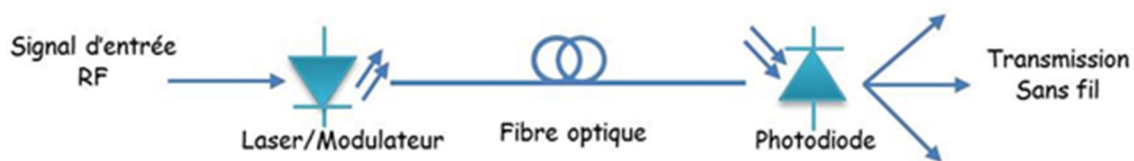


Figure 2.1 : Schéma synoptique d'une liaison RoF.

Nous pouvons distinguer trois types de transmission de signaux à travers la liaison optique pour les applications sans fil comme illustré sur la figure 2.2 :

- a) transmission du signal en bande de base (BBoF, BaseBand over Fiber) et une transposition en fréquence après photodétection.
- b) transmission du signal à une fréquence intermédiaire (IFoF, Intermediate Frequency over Fiber) et une transposition en fréquence après photodétection.
- c) transposition directe du signal micro-onde à une fréquence radio (RFoF, Radio Frequency over Fiber) et émission directe après photodétection.

La liaison RoF permet de transporter sur la fibre optique le signal RF dédié aux applications en bande millimétriques mais cela nécessite une bande passante élevée des

transducteurs E/O et O/E. En outre, la dispersion chromatique de la fibre optique a des effets plus prononcés pour la transmission RFoF à fréquence RF élevée. Le terme RoF est utilisé pour ces trois types de liaisons.

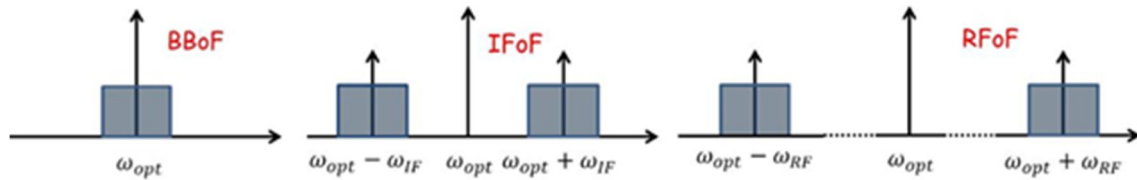


Figure 2.2 : Les trois types de transmission de signaux à travers une liaison RoF : **a)** en bande de base – **b)** en fréquence intermédiaire IF et **c)** en fréquence RF.

La transmission sur fibre consiste, dans notre cas, à transposer le signal radio à une fréquence intermédiaire (IF) avant la transmission optique. Ainsi, les exigences sur les composants optoélectroniques en termes de largeurs de bande passante sont réduites et la transposition en fréquence vers la fréquence RF est effectuée, avec un oscillateur local, à l'étage de réception électronique.

2.3.1 Avantages des systèmes RoF

La solution RoF représente une technique hybride, car elle peut reposer sur la communication par voies optique et sans fil. L'avantage d'un système RoF est sa capacité à regrouper les hautes performances de ces deux domaines de communication. On peut citer :

- Faible atténuation de la fibre optique : 0.2-0.3 dB/km pour les longueurs d'ondes télécom dans le cas de la fibre en silice ce qui permettant ainsi d'améliorer la zone de couverture de transmission sans fil.
- Le poids des fibres est considérablement inférieur à celui des câbles coaxiaux classiques.
- Bande passante très élevée de la fibre optique et la possibilité d'atteindre des débits de transmission supérieurs au Gbit/s.
- La liaison RoF est transparente vis-à-vis des protocoles de transmission, ce qui permet d'envisager la transmission des signaux RF configurés selon les standards dédiés à la bande millimétrique à 60 GHz avec des formats de modulation complexes.
- Des systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output) efficaces peuvent être réalisés à l'aide d'un réseau RoF [12].

- Immunité aux interférences électromagnétiques.
- Efficacité d'énergie : le réseau RoF permet le déploiement de cellules radio plus petites fournissant des liens sans fil en liaison directe (LOS, Line Of Sight) plus performants diminuant le niveau de puissance de transmission nécessaire dans la station de base. A ceci s'ajoute, la faible consommation d'énergie des transducteurs E/O et O/E.
- Faible coût d'installation : l'utilisation des systèmes RoF a l'avantage de centraliser les différentes fonctions de traitement du signal dans la station centrale (CS, Central Station) ce qui simplifie la structure des stations de bases (BS, Base Station), et donc le coût du système.

2.3.2 Limitations des systèmes RoF

En dépit des nombreux avantages que présentent les systèmes RoF, ceux-ci font face à certaines limitations. Ces limitations sont liées à la nature analogique du signal micro-onde transmis par la liaison RoF. Ainsi, le rapport signal sur bruit (SNR, Signal to Noise Ratio) peut être limité entraînant une dynamique de la liaison plus faible. Ceci peut être relié :

- au bruit additif de la liaison RoF qui affecte le SNR pour de faibles puissances d'entrée RF du système RoF, c'est principalement le bruit d'intensité relatif du laser qui a le plus d'impact sur la qualité de transmission. Le bruit de grenaille de la photodiode peut également être dominant sous certaines conditions de polarisation et certains niveaux de puissances optiques émises.
- à la non-linéarité due aux différents composants de la liaison RoF pour les fortes puissances d'entrée RF, notamment, la non-linéarité provenant du transducteur E/O. Ces non-linéarités provoquent des distorsions du signal transmis et limitent ainsi la dynamique de la liaison.
- à l'impact de la dispersion chromatique de la fibre optique qui représente un coefficient de distorsion limitant le produit distance-bande passante qui varie avec la fréquence de modulation du signal RF et la longueur de la fibre. Il s'ajoute à ceci la dispersion modale dans les systèmes RoF basés sur des fibres optiques multimodes (MMF, Multi-Mode Fiber).

2.3.3. Applications des systèmes RoF

La technologie RoF peut être exploitée dans différents systèmes de télécommunication pour des applications à courte ou longue distance, combinant ainsi les avantages des systèmes optiques et sans fil. La Figure 2.3 donne quelques exemples d'applications les plus communes des systèmes RoF. Des liaisons optiques analogiques sont utilisées pour transmettre des signaux

analogiques dans les systèmes radar (Figure 2.3 (a)) pour des applications militaires (radar de sol, systèmes navals et radar aéroporté). L'utilité de la RoF dans ces systèmes provient de la possibilité de l'intégration des composants optiques, la large bande passante, l'immunité aux perturbations électromagnétiques et le faible poids, néanmoins, il faut assurer de très faibles niveaux de bruit pour de telles applications.

Le réseau central (Figure 2.3 (b)) formé par un système RoF permet d'interconnecter plusieurs stations de base avec la station centrale. Cela représente une solution idéale pour transporter efficacement les signaux radio de la station centrale vers les sites d'antennes éloignés. Ici, la complexité associée à des fonctions de traitement du signal et des étages électroniques est ramenée à la CS, ce qui conduit à la simplification des BSs.

Les auteurs dans [18] proposent un système pico-cellulaire (Figure 2.3 (c)) pour la communication sans fil à l'intérieur des bâtiments (universités, hôpitaux, aéroports, etc.) où une forte densité de terminaux a besoin d'être prise en charge. La taille réduite de cellules limite le nombre d'utilisateurs par cellule et, par conséquent, augmentera le débit par utilisateur.

Les applications de réseaux domestiques (HAN, Home Area Network) en bande millimétrique centrée autour de 60 GHz (Figure 2.3 (d)) fournissent une très large bande passante avec un très haut débit. Cependant, la transmission radio à ces fréquences est particulièrement limitée en distance à cause du pic d'absorption par les molécules d'oxygène.

De plus les murs, les obstacles fixes ou mobiles comme les humains dégradent également la propagation des ondes millimétriques. La couverture radio pour ces applications est alors limitée à la taille d'une pièce d'où l'intérêt d'utiliser des liaisons RoF afin d'étendre la couverture radio aux autres pièces. La transparence des systèmes RoF aux standards de transmission sans fil fait de cette technologie une solution prometteuse et efficace. Les fibres multimodes sont souvent utilisées pour ces applications qui nécessitent de courtes distances pour lesquelles la dispersion modale est négligeable [13].

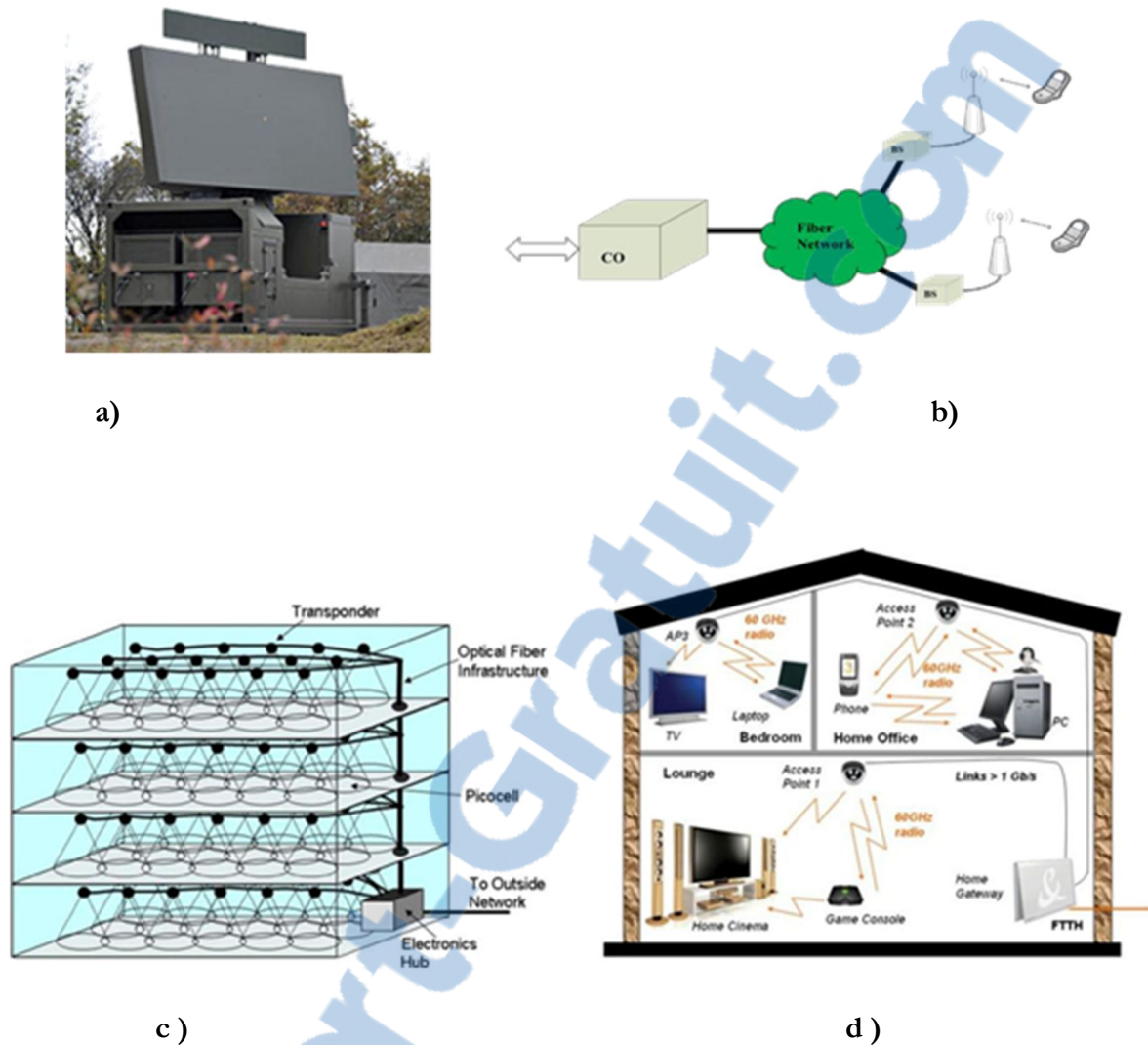


Figure 2.3 : Exemples d'applications de la technologie RoF : **a)** radar – **b)** réseau RoF central - **c)** système RoF pico cellulaire et **d)** réseau domestique à 60 GHz.

Les liaisons RoF envisagées dans cette étude sont basées sur la technique appelée modulation d'intensité-détection directe (IM-DD, Intensity Modulation – Direct Detection) consistant en une modulation d'amplitude d'une porteuse optique délivrée par le laser et une détection directe par la photodiode. La modulation d'amplitude peut être obtenue soit par une modulation directe de la source laser ou soit par une modulation externe par le biais d'un modulateur. En revanche, la transmission du signal RF à travers la liaison RoF peut être aussi réalisée par la modulation de la fréquence/phase du signal optique généré par le laser et une détection directe ou cohérente à la réception.

2.3.4. Modulation d'intensité optique-détection directe IM-DD

La liaison IM-DD repose sur la modulation de l'enveloppe du signal optique transmis dans la fibre. Le signal optique est modulé en intensité par le signal de modulation RF, la détection directe de cette intensité optique est réalisée à l'aide d'une photodiode placée en sortie de la liaison avec une détection quadratique du champ électrique optique. Le courant généré est proportionnel à la puissance du signal optique ou à l'amplitude du champ optique (équation (1-3)). Par conséquent, l'influence de la modulation de fréquence/phase (chirp) accompagnant une modulation d'intensité peut être négligée pour l'étude d'une liaison IM-DD.

Nous pouvons distinguer deux principaux types de modulation d'intensité optique. La Figure 2.4 décrit la première liaison appelée "liaison à modulation directe" où l'enveloppe du signal optique généré par une diode laser est modulée par le signal RF portant les données à transmettre, ce signal RF est appliqué sur le courant de polarisation du laser.

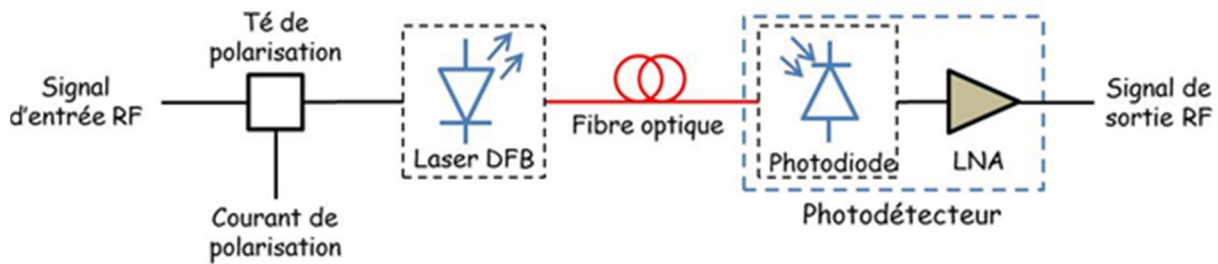


Figure 2.4 : Liaison à modulation directe.

Pour une liaison à modulation directe, la caractéristique statique du laser permet de choisir le point de polarisation pour des conditions de fonctionnement optimales. En plus, le laser doit avoir une bande passante large et une grande dynamique. La source optique utilisée dans cette liaison peut être un laser DFB ou un VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitted Laser). Dans cette étude, c'est le laser DFB qui sera particulièrement utilisé pour la bande centimétrique et le VCSEL pour la bande millimétrique.

La seconde manière de moduler l'intensité optique est "la liaison à modulation externe" comme cela est décrit sur la Figure 2.5. Le laser délivre un signal continu (CW, Continuous Wave) et son enveloppe est modulée par le signal RF en faisant varier la tension de polarisation d'un modulateur externe disposé en sortie de la source laser.

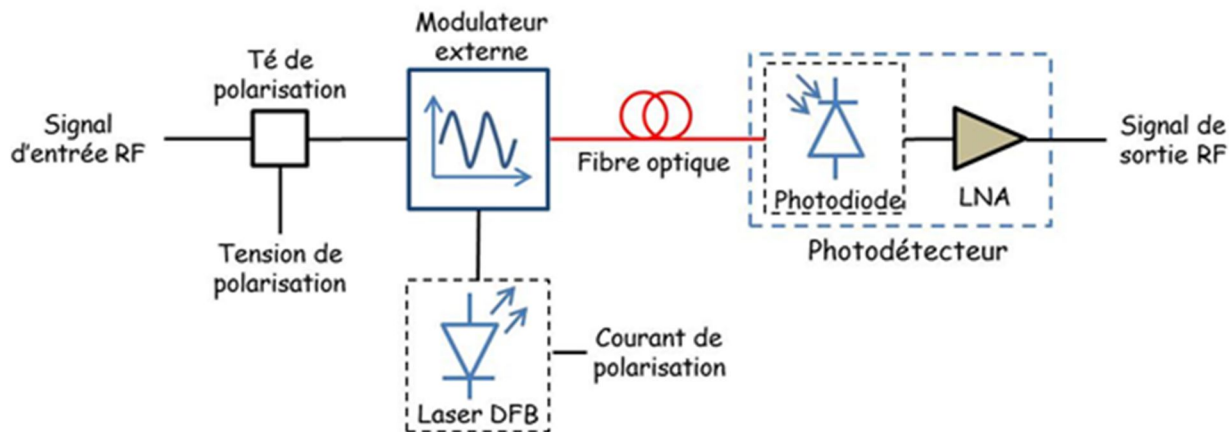


Figure 2.5 : Liaison à modulation externe.

En modulation externe, nous choisissons le point de fonctionnement à partir de la réponse électro-optique du modulateur externe. Les exigences en terme de bande passante et linéarité, dans ce cas de modulation, sont imposées par le modulateur. Les caractéristiques recherchées pour le laser sont ainsi réduites à un faible bruit et une forte puissance optique émise. Deux types de modulateurs peuvent être exploités pour la liaison RoF à modulation externe : le modulateur à électro-absorption (MEA) et le modulateur Mach-Zehnder (MZM).

Dans ces deux liaisons, le signal transmis est détecté en sortie de la fibre optique par une photodiode suivie par un amplificateur LNA (Low Noise Amplifier) permettant d'augmenter le niveau du courant photo-détecté en sortie de la photodiode.

2.3.5. Génération photonique des signaux millimétriques

La bande de fréquences millimétriques avec des largeurs de bande de canal de plusieurs GHz est devenue le centre d'intérêt de beaucoup de travaux de recherche. Différentes approches sont proposées et réalisées pour la génération et l'exploitation des signaux millimétriques dans les systèmes RoF.

Avec une liaison IM-DD, présentée dans le paragraphe précédent, la conversion vers les fréquences millimétriques se fait par transposition de fréquence avec des circuits électroniques par le biais d'oscillateurs locaux et de mélangeurs disposés en aval du système avant la transmission sans fil vers les terminaux utilisateurs. Il est possible de transmettre un signal RF à 60 GHz, modulant la porteuse optique, à travers une liaison RoF IM-DD mais cela fait appel à des transducteurs E/O ayant une bande passante élevée. Cela nécessite souvent un amplificateur

optique pour combler les performances des transducteurs E/O commerciaux disposant d'une bande passante en dessous de celle désirée [14].

Plusieurs méthodes dédiées à la transposition de fréquence à travers des systèmes RoF ont été menées dans la littérature. La conversion de fréquence peut être réalisée en effectuant des fonctions tout-optiques simplifiant ainsi la complexité des systèmes de transmission RF. Cela permet de réaliser la conversion de fréquences RF vers IF comme a été effectué par la modulation croisée du gain du SOA (Semiconductor Optical Amplifier) dans ou la conversion de fréquences IF à 2.5 GHz transportant des données DPSK avec un débit de transmission de 155 Mbps vers une fréquence RF de 26.5 GHz par une opération tout-optique basée sur le mélange à quatre-ondes FWM (Four-Wave Mixing) dans un SOA. Une méthode d'échantillonnage tout-optique exploitant un SOA-MZI (Mach-Zehnder Interferometer) avec un débit de transmission de 1 Mbps a été démontrée expérimentalement où une source optique impulsionnelle avec une fréquence de répétition de 7.8 GHz a été utilisée afin d'effectuer l'échantillonnage. Une transposition d'un signal IF à 1 GHz vers une fréquence maximale de 40 GHz est atteinte. La conversion de fréquence IF vers RF est alors réalisable par ces fonctions tout-optiques, toutefois, la fréquence RF à 60 GHz n'a pas été atteinte par ces approches.

Des techniques attractives de générations photoniques de signaux millimétriques sont basées sur des configurations RoF hétérodynes telle que la technique de battement de lasers présentée sur la figure 2.6. Lorsque deux signaux optiques à des fréquences différentes sont injectés à l'entrée d'une photodiode fonctionnant ainsi comme un mélangeur par détection quadratique, un signal RF est généré à une fréquence correspondant à la différence spectrale de ces deux signaux optiques. A la station centrale, l'un de ces deux lasers (Master laser ou laser maître) est modulé par le signal radio à transmettre par modulation directe ou externe tandis qu'une puissance optique continue est émise par l'autre laser (Slave laser ou laser esclave). Ces deux signaux sont combinés par un coupleur optique dans une fibre optique. A la station de base, la conversion O/E est effectuée par une photodiode et le signal millimétrique est envoyé directement après amplification par une antenne de transmission, l'opération est alors simplifiée en station de base vue qu'un oscillateur local électrique n'est plus nécessaire. Etant donné qu'une modulation d'intensité est appliquée, des bandes latérales (DSB, Double SideBand) sont générées et le signal transmis peut être exposé à des dégradations provoquées par l'effet de la dispersion chromatique de la fibre optique pour une fréquence de modulation donnée à des longueurs de fibre précises. Afin de s'affranchir de la dispersion chromatique de la fibre, la génération d'une seule bande latérale (SSB, Single SideBand) est proposée.

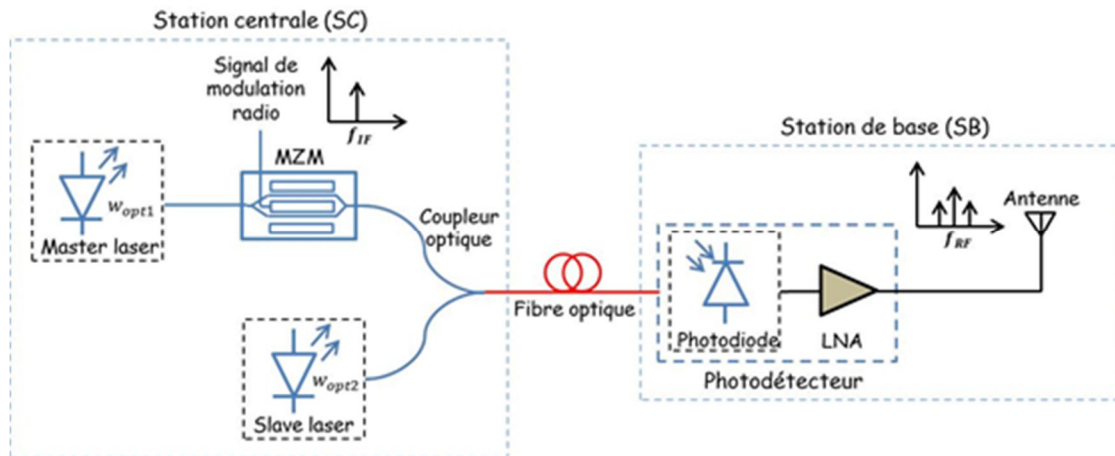


Figure 2.6 : Système RoF hétérodyne dédié à la génération d'un signal RF millimétrique.

Si deux signaux optiques sont couplés à l'entrée de la photodiode, le signal résultant après photo-détection est proportionnel au carré de leur champ. La photodiode filtre les fréquences de la somme des fréquences et la composante alternative du photocourant détecté.

Cette méthode, ne nécessite pas de transducteurs E/O avec une bande passante élevée hormis celle de la photodiode. Cependant le bruit de phase du signal optique introduit par les deux lasers est transposé sur le signal RF généré en sortie de la photodiode, ce bruit de phase peut effectivement dégrader la qualité du signal transmis. Si les deux sources lasers sont non-corrélées, le spectre du bruit de phase du signal RF généré par battement de lasers vaut la somme des spectres de bruit de phase des deux lasers et un élargissement de la largeur de la raie du signal RF est introduit puisqu'elle correspond également à la somme des largeurs de raie des deux lasers non corrélés [15]. Afin de réduire ou annuler l'impact du bruit de phase optique, une corrélation entre les phases des deux lasers peut être une solution.

Plusieurs solutions sont proposées pour diminuer l'effet du bruit de phase du signal millimétrique généré par hétérodynage des deux lasers. La méthode exploitant la boucle à verrouillage de phase optique (OPLL, Optical Phase-Locked Loop), qui est composée d'un détecteur de phase (mélangeur), d'un oscillateur local de référence et d'un filtre (Figure 2.7). Le signal RF généré en sortie de liaison RoF est comparé au signal de l'oscillateur de référence par le détecteur de phase, le signal d'erreur de phase résultant est envoyé au laser esclave qui est forcé de suivre le laser maître avec un décalage de fréquence correspondant à la fréquence de l'oscillateur local. Ceci entraîne une réduction significative du bruit de phase sur le signal RF généré en sortie du système hétérodyne.

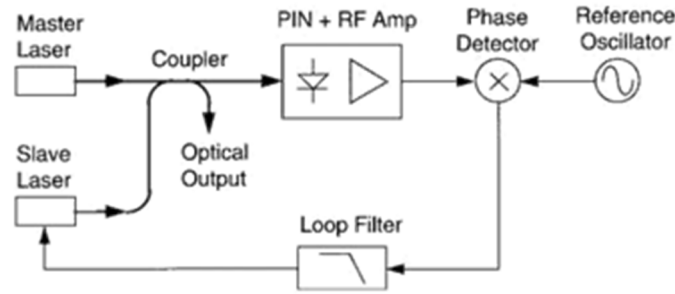


Figure 2.7 : Illustration schématique de l'OPLL.

Les systèmes basés sur deux lasers verrouillés par injection optique (injection locking lasers) [16] dont le signal optique issu d'un laser maître est injecté à un modulateur afin de créer deux bandes latérales et qui est ensuite injecté aux deux lasers esclaves par l'intermédiaire d'un coupleur (Figure 2.8). Les deux bandes latérales correspondent aux longueurs d'onde de chaque laser qui deviennent ainsi corrélés pour la détection hétérodyne. Par conséquent, le bruit de phase du signal généré est largement réduit.

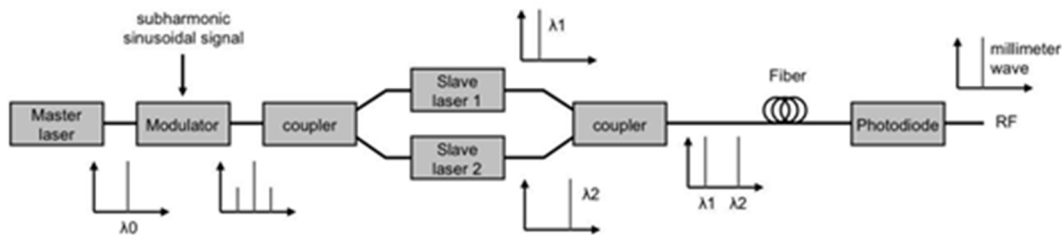


Figure 2.8 : Système à deux longueurs d'onde avec la technique de verrouillage par injection.

Une autre solution utilisant un laser bi-mode (dual mode laser) [30] obtenu par un réseau de Bragg particulier au niveau de la cavité laser, le battement entre ces deux harmoniques permet d'avoir un bruit de phase corrélé puisqu'ils sont issus de la même cavité. Cette méthode est attractive pour certains domaines tels que les applications radar vue la compacité et l'accordabilité du laser bi-mode.

Système auto-hétérodyne par mise en cascade de deux modulateurs MZM. Le premier MZM est utilisé pour effectuer la modulation d'intensité du signal en fréquence intermédiaire IF et le deuxième MZM est exploité pour la transposition vers les fréquences millimétriques par création des bandes latérales dont la largeur spectrale est égale à la fréquence désirée. Par

conséquent, le signal RF est obtenu après photo-détection par battement entre ces bandes latérales. Vu que le battement est induit par des harmoniques corrélées, le signal RF résultant possède un faible bruit de phase.

Dans le but de simplifier le schéma du système de génération par mélange, des lasers non corrélés sont utilisés et le bruit de phase est atténué après la photoréception. La complexité est donc décalée vers l'unité de l'utilisateur. Deux techniques sont proposées : la première est le récepteur auto-homodyne dans lequel le signal RF généré après photo-détection est séparé en deux signaux par un diviseur à -3dB pour être injectés ensuite dans un mélangeur après une adaptation de phase effectuée par un contrôleur de phase, le signal est transposé ensuite en bande de base (Figure 2.9 (a)). La seconde technique est basée sur l'utilisation d'un détecteur d'enveloppe large bande couvrant la bande autour de 60 GHz. L'enveloppe du signal RF est détectée et le signal utile est transposé en bande de base (Figure 2.9 (b)), cette technique est prometteuse vu sa simplicité et la possibilité d'intégrer le détecteur d'enveloppe dans l'unité terminale de l'utilisateur. Une étude comparative entre ces deux approches montre que la technique du détecteur d'enveloppe présente de meilleures performances en termes de sensibilité et de coût.

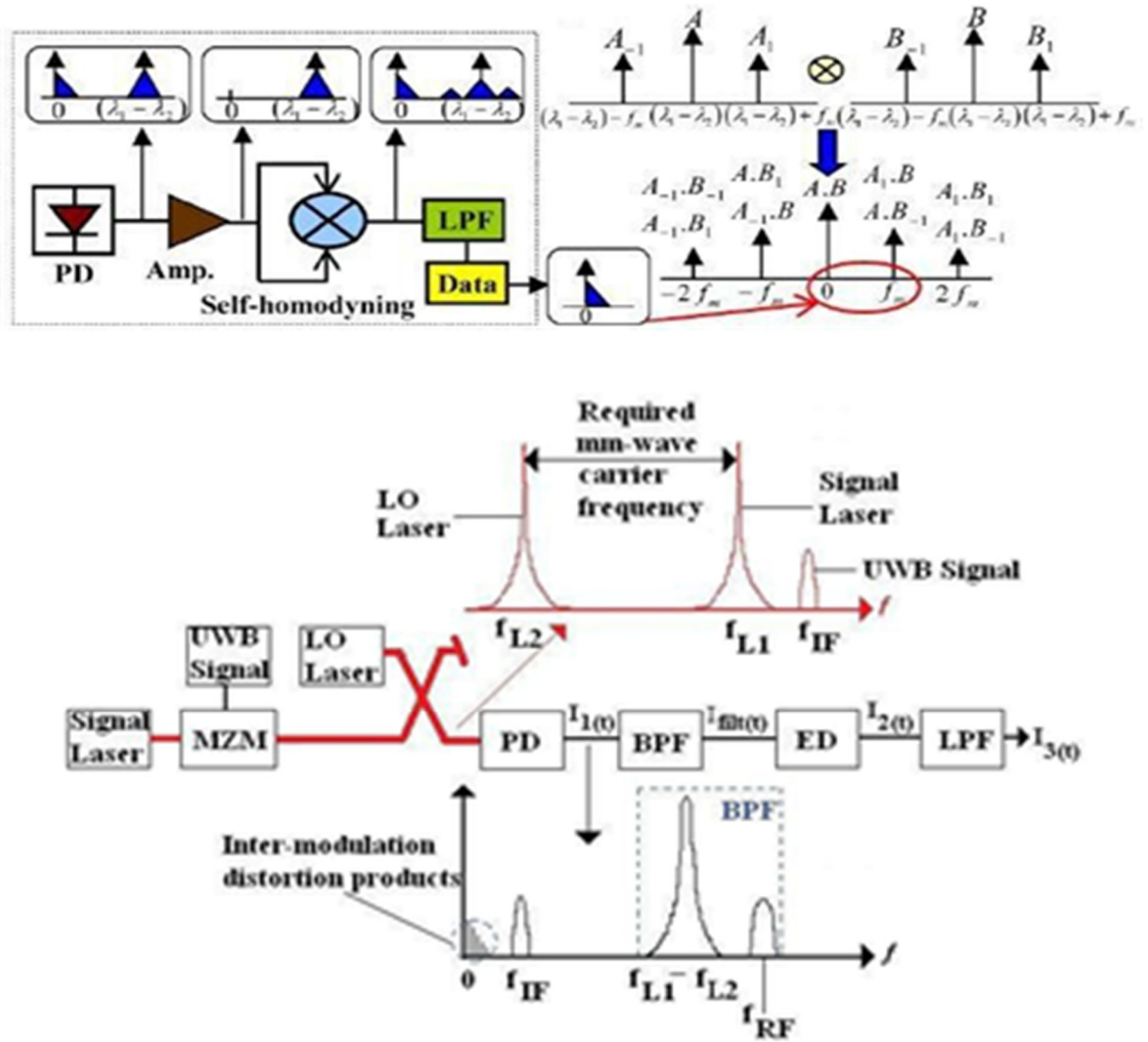


Figure 2.9 : Réduction du bruit de phase du signal généré par battement avec la technique a) auto-homodyne et b) détecteur d'enveloppe.

A l'issue de la présentation de ces différents systèmes RoF, le compromis reste entre les performances et le coût du système. L'application principale visée dans cette étude est le déploiement d'un système RoF dans les réseaux domestiques à 60 GHz. Pour de telles applications, la simplicité du système de distribution RoF est une exigence à cause de la multitude des points d'accès. Cependant, il a été démontré que la distribution du signal utile sur une fréquence intermédiaire IF suivi d'un étage de transposition de fréquence donne des résultats comparables à une distribution directe sur la fréquence RF. Il est à noter que la dispersion chromatique de la fibre est souvent négligeable vue les courtes longueurs des fibres optiques déployées entre les différentes pièces ($>100\text{m}$). Par conséquent, dans ce contexte la transmission de données centrées à une fréquence intermédiaire IF est réalisée à travers des liaisons IM-DD

simples permettant ainsi d'une part de faire une analyse comparative de ces systèmes et d'autre part de valider nos modèles et méthode de simulation. En outre, les mélangeurs et oscillateurs nécessaires pour la transposition de l'IF vers RF et réciproquement deviennent plus accessible commercialement avec la technologie CMOS et ils seraient potentiellement intégrés dans les produits destinés aux applications à 60 GHz.

2.4 Présentation du logiciel OptiSystem

Le logiciel OptiSystem permet de simuler et d'analyser des systèmes de transmission optique. La diversité des systèmes simulés peut être étendue par la possibilité d'insérer des fonctions réalisées par l'utilisateur et qui peuvent être ajoutées aux systèmes simulés.

L'OptiSystem teste et optimise pratiquement n'importe quel type de liaison optique il est basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications par fibre optiques.

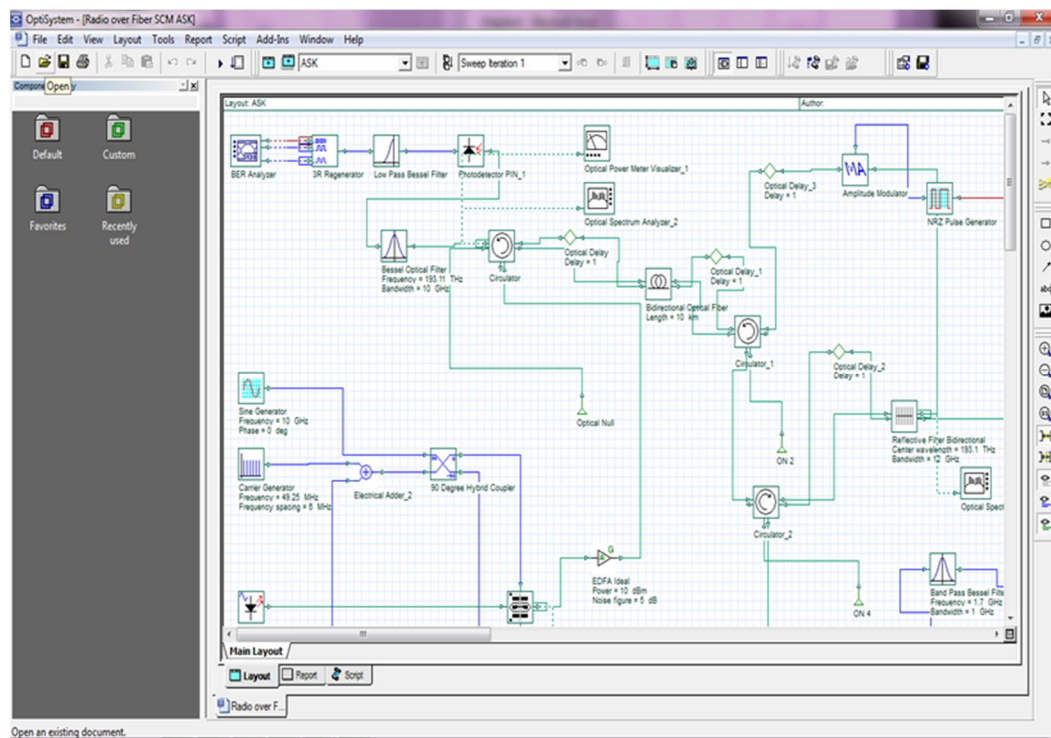


Figure 2.10 : Schéma de l'interface OptiSystem.

L'interface utilisateur graphique complète et contrôle la disposition de composants optiques, elle contient une fenêtre principale répartit en plusieurs parties (figure 2.10):

- Bibliothèque : une base de données de divers composants.
- Editeur du layout : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.

- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.

Sa vaste bibliothèque de composants actifs et passifs comprend des paramètres réalistes, ces capacités peuvent être étendus facilement avec l'ajout de composants et peuvent être éliées à un large éventail d'outils. Une interface complète d'utilisateur graphique contrôle la disposition optique des composants, des modèles et des présentations graphiques.

2.4.1 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque de composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurées à partir de périphériques réels, ces composants s'intègrent aux équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée produisent le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation des schémas et beaucoup plus.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiseurs sur le moniteur au même port.
- Plusieurs mises en page.

2.4.2 Applications du logiciel OptiSystem

Parmi les diverses applications d'OptiSystem nous allons citer les plus utilisées :

- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER) et le calcul du bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et de réseaux optiques passifs (PON).
- L'espace libre pour les systèmes optiques (OSA).
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

2.4.3 Avantage du logiciel OptiSystem

Les avantages du logiciel OptiSystem sont :

- Obtenir un aperçu de performances du système de fibre optique.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation du système.
- Présentation virtuelle des options de conceptions.

2.4.4 Présentation de la liaison

La liaison radio sur fibre peut être présentée en quatre parties comme le montre le schéma (Figure 2.11) : partie émission optique, partie réception optique, partie émission RF, partie réception RF.

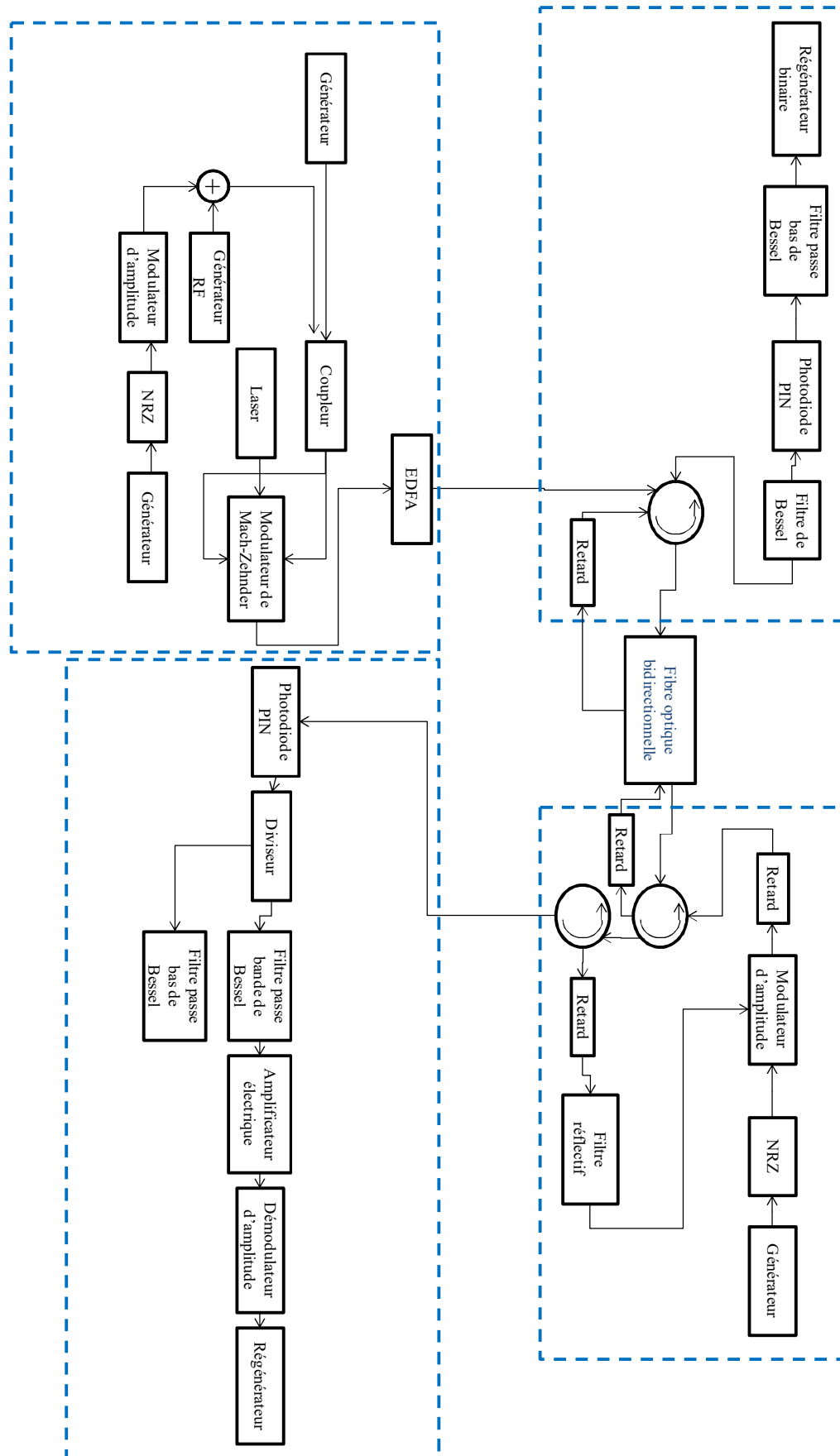


Figure 2.11 : Schéma général de la liaison Radio sur Fibre.

Notre objectif est de concevoir une liaison radio sur fibre qui implique une transmission de signaux radiofréquence par l'intermédiaire d'une fibre optique bidirectionnelle avec :

- Longueur d'onde $\lambda=1500\text{nm}$
- Longueur $L=10\text{km}$
- Atténuation $\alpha=0.22\text{ dbm}$
- Dispersion 16.75 PS/nm/km
- Fréquence centrale de bruit $f=193.4\text{ THz}$
- Largeur de bande de bruit 13 THz

2.5.1 Partie émission optique

La partie émission de notre liaison est composée de plusieurs composants :

- **Générateur binaire** : avec un débit de 1Gbit/s .
- **Modulateur d'amplitude** : indice de modulation égale à 1.
- **Circulateur 1 et 2** :

Pertes d'insertion : 1dB et 0.5dB .

Pertes de retour : 60dB .

Isolement : 60dB .

- **Filtre réflectif gaussien** : de l'ordre de 4.

Bande passante : 12GHz .

Réflexion : 99%

Bruit dynamique : 3dB

Le signal transmis est un signal numérique binaire. La durée d'un symbole binaire est nommée «temps bit». Le signal émis est une séquence binaire pseudo aléatoire (PRBS pour Pseudo Random Bit Sequence) au sens où les séquences émises sont parfaitement déterministes et de longueurs connues mais elles sont représentatives de l'ensemble des combinaisons possibles de successions de bits.

La longueur du signal est typiquement de 2^n-1 bits, «n» étant la longueur du mot de base et peut prendre typiquement les valeurs 7, 15, 31 (dans les normes internationales des télécommunications). Le signal PRBS de longueur 2^n-1 est constitué de toutes les séquences possibles de n bits pour notre liaison on a utilisé 4096 échantillons.

2.5.2 Partie réception optique

La partie réception de notre liaison est composée de plusieurs composants :

- **Circulateur** :

Pertes d'insertion : 1dB

Pertes de retour : 60Db



Isolement : 60dB

- **Filtre de Bessel** : de l'ordre de 2
Bande passante : 10Ghz
Fréquence : 193.11Thz
Bruit dynamique : 3dB
- **Photodiode PIN** :
Réceptivité : 0.9A/W
Courant d'obscurité : 10nA
Fréquence centrale : 193.1THZ.
- **Filtre passe bas de Bessel** : de l'ordre de 4
Fréquence de coupure : 0.75Ghz
- **Régénérateur** : avec un débit de 1Gbits/s

2.5.3 Partie émission RF

- **Générateur** : avec un débit de 1Gbits/s
- **Modulateur d'amplitude** : avec une fréquence de 1.7Ghz
- **Générateur RF** :
Nombre de chaîne : 78
Fréquence : 49.25Mhz
Espacement de fréquence : 6Mhz
- **Laser** :
Fréquence 193.1Thz
Puissance : 6dBm
Bruit dynamique : 3Db
- **Modulateur de Mach-Zehnder** :
Rapport d'extinction : 30dB
Tension de commutation de polarisation : 4V
Tension de commutation RF : 4V
Pertes d'insertion : 5dB
- **Fibre EDFA** :
Gain : 20dB
Puissance : 10dBm
Fréquence centrale de bruit : 193.4THz
Largeur de bande de bruit : 13THz

Le schéma du module d'émission NRZ est présenté sur la Figure 2.12.

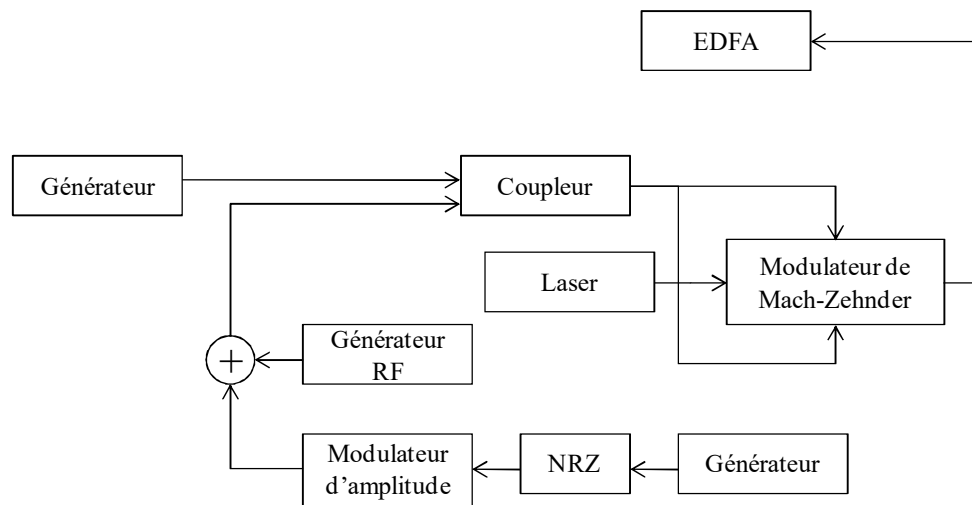


Figure 2.12 : Partie émission RF de la liaison.

Le signal NRZ électrique code le signal optique grâce à un modulateur d'intensité à base de Niobate de Lithium (LiNbO₃) de type interféromètre de Mach-Zehnder (MZI).

Le signal est transporté au modulateur d'amplitude qui permet de coder les signaux numériques en signaux analogiques avec une amplitude variable, l'additionneur est un circuit admettant en entrée deux mots de N bit, et fournissant en sortie le résultat de l'addition binaire des deux mots d'entrée. Ensuite, on a un générateur fournit l'énergie électrique dans la liaison, et un coupleur reliant une entrées à plusieurs sorties. Le signal de sortie est un signal NRZ optique modulé en intensité au débit de données.

2.5.4 Partie réception RF

- **Photodiode PIN :**

Réceptivité : 0.9A/W

Courant d'obscurité : 10nA

- **Filtre passe bande de Bessel :** de l'ordre de 8

Fréquence de coupure : 1.7GHz

Bande passante : 1GHz

Pertes d'insertion : 2dB

- **Amplificateur électrique :** avec un gain de 15Db

- **Démodulateur d'amplitude :**

Fréquence : 1.7GHz

Gain : 1dB

Fréquence de coupure : 0.6GHz

- **Filtre passe bas de Bessel** : d'ordre 6

Fréquence de coupure : 0.7GHz

Pertes d'insertion : 2dB

- **Régénérateur** : avec un débit de 1Gbit/s

En réception, le signal est détecté puis analysé. La chaîne de détection est représentée sur la Figure 2.13. Elle est constituée d'une photodiode rapide qui convertit le signal optique en photocourant, un filtre passe-bas qui permet de limiter le bruit électrique reçu par un circuit de décision, un filtre passe bande qui permet de sélectionner la fréquence radio et d'éliminer le bruit du signal.

Le signal est ensuite amplifié dans un amplificateur permettant de maintenir une puissance électrique moyenne constante, un démodulateur qui récupère le signal d'information contenu dans la partie supérieure de l'enveloppe du signal modulé en amplitude, et enfin un régénérateur qui diminue les dégradations subies par le signal au cours de sa propagation à savoir principalement son atténuation, l'augmentation du bruit d'amplitude.

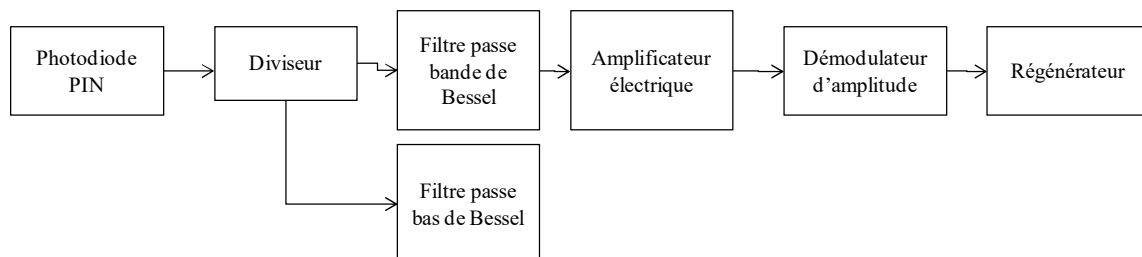


Figure 2.13 : Partie réception RF de la liaison.

Le récepteur reçoit le signal électrique déformé par les différents bruits accumulés, et le convertit en une séquence binaire. Un circuit de décision permet la remise en forme du signal reçu, il compare la tension du signal reçu dans un temps de bit avec une tension seuil.

Lorsque la tension du signal reçue sur un bit est supérieure (respectivement inférieure) à la tension seuil, le circuit de décision émet un symbole '1' (respectivement '0'). La tension reçue est établie après comparaison avec la tension seuil. La séquence binaire est ensuite comparée à la séquence émise.

2.6 Critères de qualité d'une transmission

Pour définir la qualité d'une transmission optique, différents critères existent. Les trois principaux critères de qualité d'un signal transmis le taux d'erreur binaire, le facteur de qualité et le diagramme de l'œil.

2.6.1 Le taux d'erreur binaire

Le moyen quantitatif d'évaluer la qualité d'une transmission consiste à évaluer la probabilité d'erreur par élément binaire, qui correspond à la probabilité de prendre une décision erronée sur un élément binaire.

Le taux d'erreur binaire (TEB) ou BER (pour Bit Error Rate) est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits émis. Comme nous l'avons décrit dans la première partie de ce chapitre, le récepteur prend une décision sur la présence d'un symbole «1» ou «0» selon le niveau de signal reçu. Cette décision est prise à l'instant d'échantillonnage et à l'aide d'une bascule de décision pour laquelle la tension reçue au-dessus d'un seuil est considérée comme un symbole «1», et au-dessous de ce seuil comme un symbole «0». Si les fluctuations d'amplitude et temporelles sont importantes, la tension d'un symbole «1» peut passer au-dessous du seuil et la tension d'un symbole «0» au-dessus du seuil, des erreurs sont alors commises.

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

Le taux d'erreur binaire communément accepté dans le milieu des télécommunications optiques est de 10^{-9} , correspondant à une erreur commise sur un milliard de bits lus. On tolère alors un signal de taux d'erreur binaire de 10^{-4} puisqu'il permet après traitement par le code correcteur d'erreurs de retrouver un taux d'erreur binaire de 10^{-12} . Cette tolérance est cependant une marge que les opérateurs assurent, le taux d'erreur binaire en ligne ne dépasse en général pas 10^{-9} .

2.6.2 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité est le rapport signal sur bruit électrique en entrée du circuit de décision du récepteur, il est défini par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.2)$$

Où μ_1 et μ_0 sont respectivement les tensions moyennes des symboles «1» et «0» à l'instant de décision, et σ_1 et σ_0 les variances des probabilités de puissance des symboles «1» et «0».

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

$$\text{TEB} = \frac{1}{2} [\text{erfc}(\frac{Q}{\sqrt{2}})] \quad (2.3)$$

Où erfc est la fonction erreur complémentaire défini par :

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-y^2).dy \quad (2.4)$$

Il est souvent utilisé plutôt que le taux d'erreur binaire dès lors que le taux d'erreur binaire est trop faible pour être mesuré. En effet, plus le taux d'erreur binaire est faible, plus le temps de mesure est long pour une même précision sur la mesure. Expérimentalement, le taux d'erreur binaire n'est par conséquent pas toujours mesurable directement.

Le facteur de qualité est fréquemment utilisé pour quantifier la qualité d'une liaison ; un facteur de qualité de 6 correspond à un taux d'erreur binaire de 10^{-9}

2.6.3 Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est la superposition de tous les symboles binaires du signal émis. La Figure 2.14 représente une séquence de notre liaison radio sur fibre sous OptiSystem de la partie réception RF.

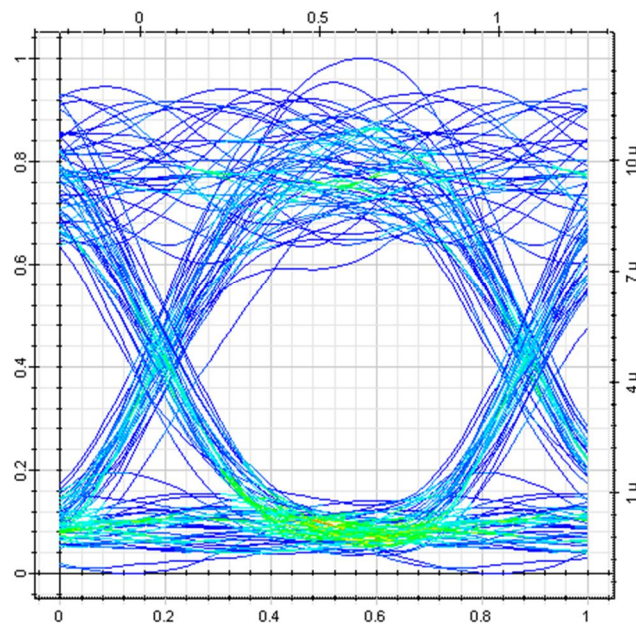


Figure 2.14 : Diagramme de l'œil de la partie réception RF.

Le diagramme de l'œil est obtenu dans le domaine électrique après détection par une photodiode, un filtre et un amplificateur. Il permet d'avoir une idée de la qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférences entre symboles, de gigue temporelle.

Le diagramme de l'œil n'a toutefois qu'une valeur qualitative, le critère qui permet réellement d'évaluer de manière quantitative la qualité du signal est le taux d'erreur binaire.

2.7 Résultats de simulation

Dans ce qui suit nous allons présenter les différents résultats de simulation. Le signal de sortie du modulateur de Mach-Zhender de l'émetteur RF (représentation temporel et représentation spectrale) ensuite nous allons voir le signal reçu par le récepteur RF et enfin les signaux émis et reçu par l'émetteur et le récepteur optiques.

Le but de cette simulation est de définir la qualité de notre transmission optique.

2.7.1 Les signaux émis par émetteur RF

Le spectre du signal RF émis est représenté sur la figure 2.15, tandis que la représentation temporelle est donnée sur la figure 2.16.

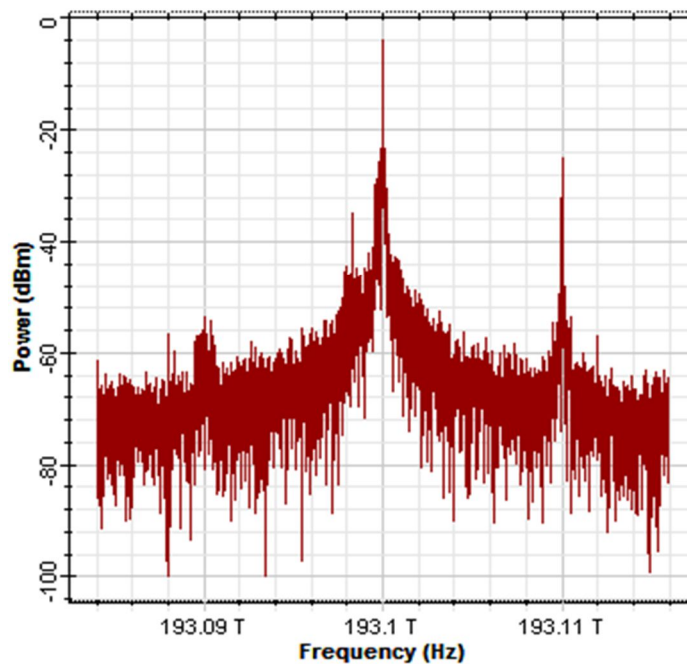


Figure 2.15 : Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF (représentation spectrale).

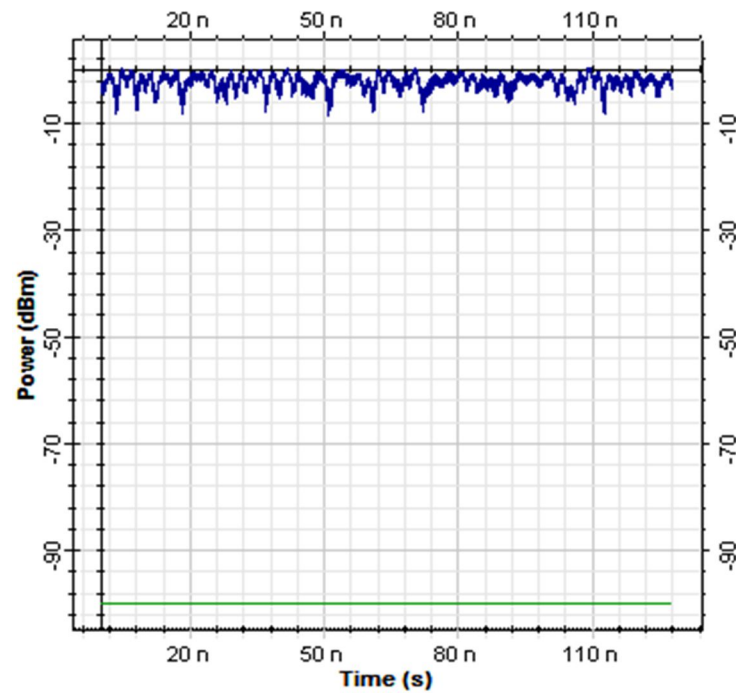


Figure 2.16 : Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF(représentation temporelle).

2.7.2 Les signaux reçus par récepteur RF

Les signaux reçus par le récepteur RF sont donnés sur les figure 2.17 et 2.18.

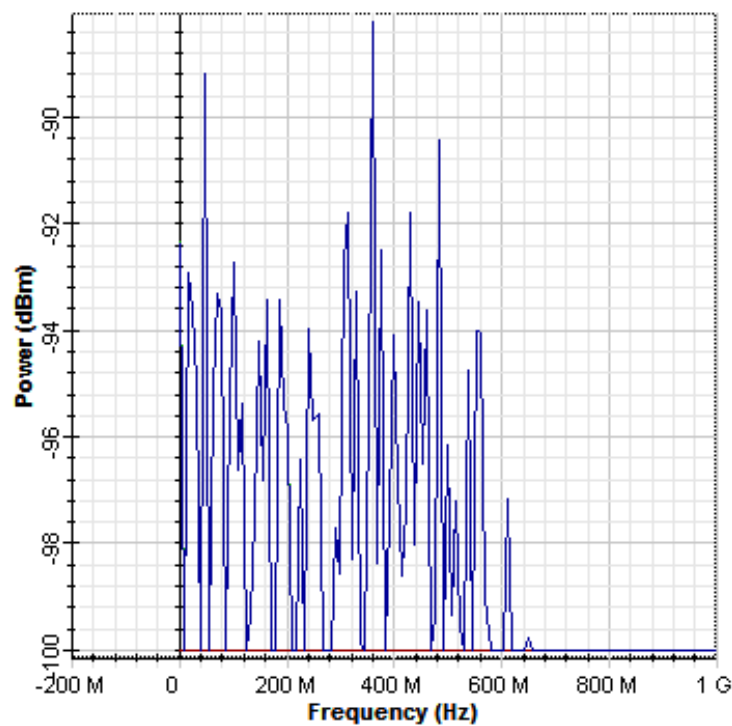


Figure 2.17 : Signal reçu par le récepteur RF(représentation spectrale).

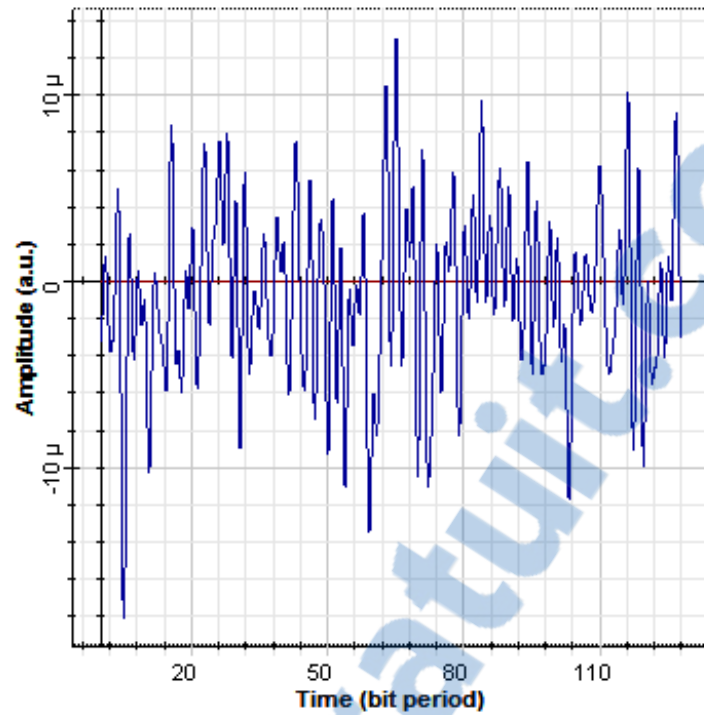


Figure 2.18 : Signal reçu par le récepteur RF (représentation temporel).

2.7.3 Les signaux émis par émetteur optique

Le spectre et le signal de l'émetteur optique sont représenté sur la figure 2.19 et la figure 2.20.

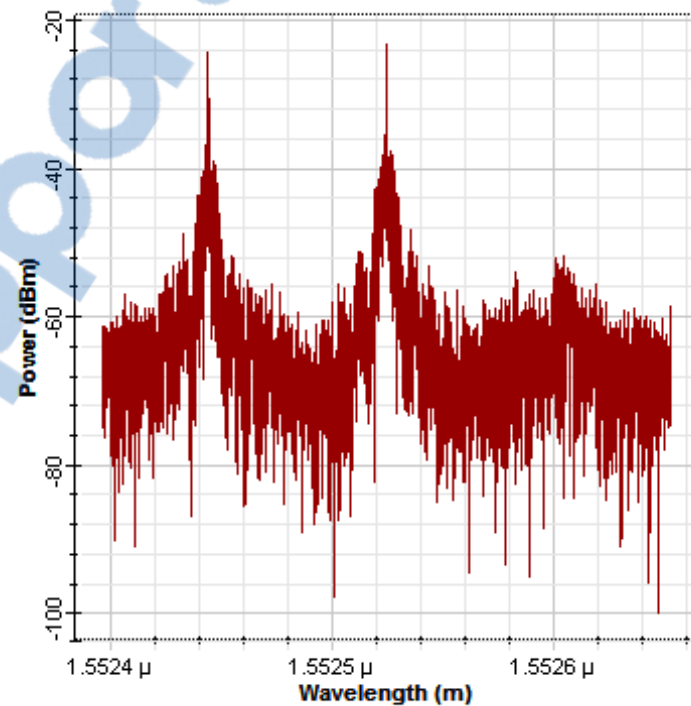


Figure 2.19 : Spectre de l'émetteur optique.

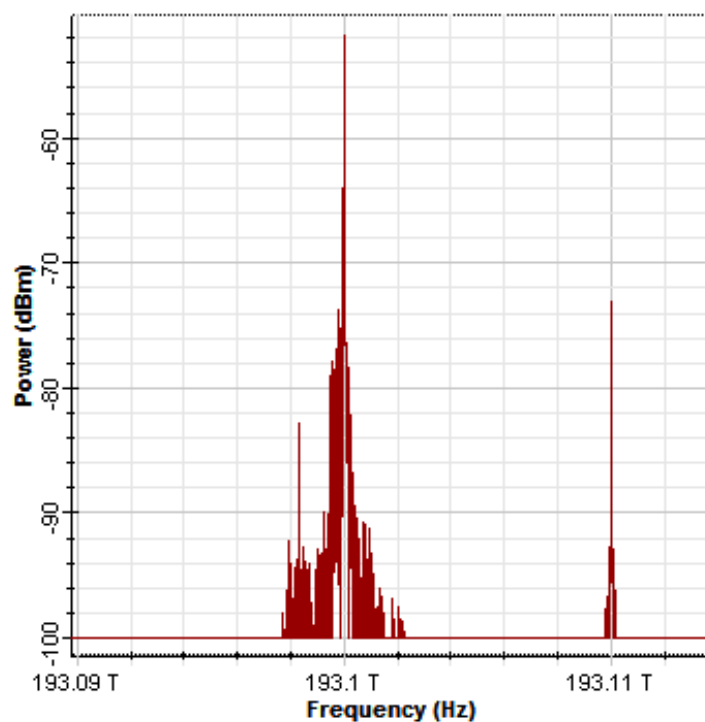


Figure 2.20 : Signal émis par l'émetteur optique.

2.7.4 Les signaux reçus par récepteur optique

Le signal reçu par le récepteur optique est représenté sur la figure 2.21.

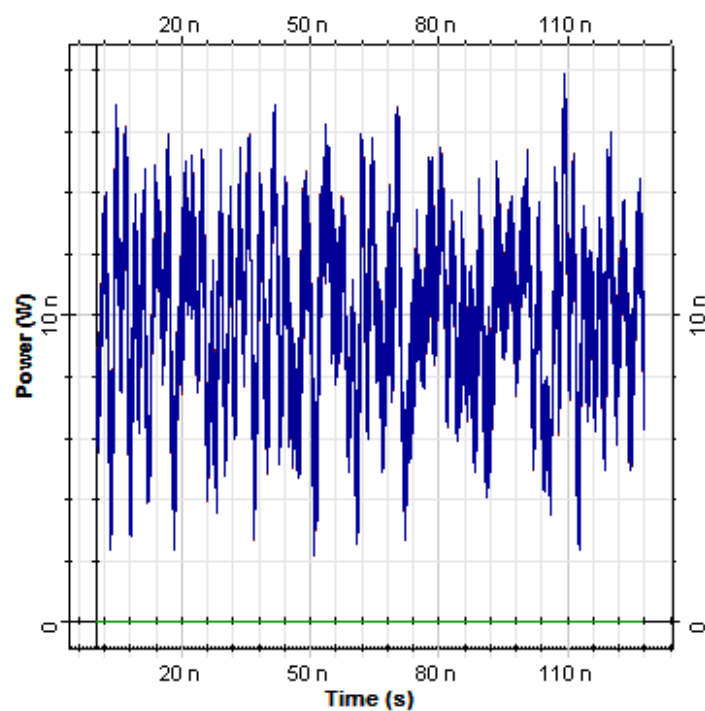


Figure 2.21 : Signal reçu par le récepteur optique.

2.7.5 Diagramme de l'œil des récepteur RF et optique

Les deux schémas suivants représentent les diagrammes de l'œil de la transmission RF et de la transmission optique.

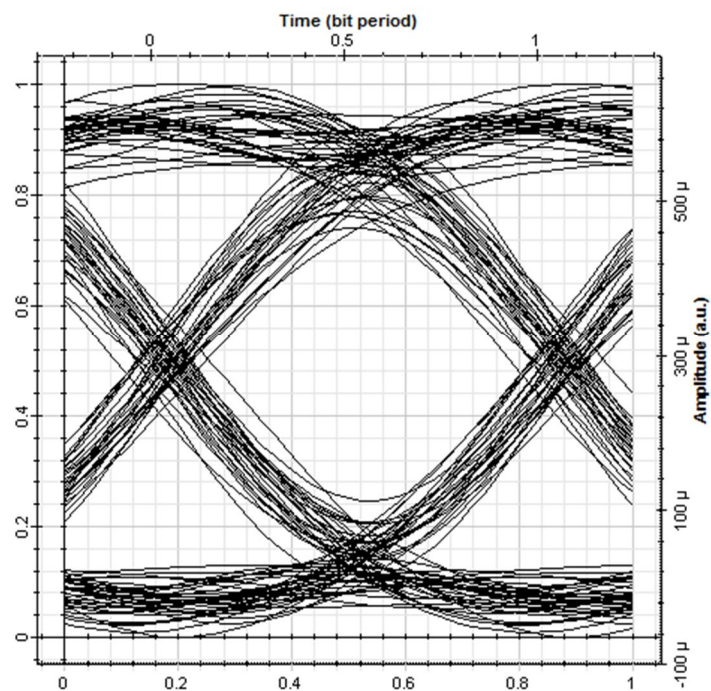


Figure 2.22 : Diagramme de l'œil du récepteur RF.

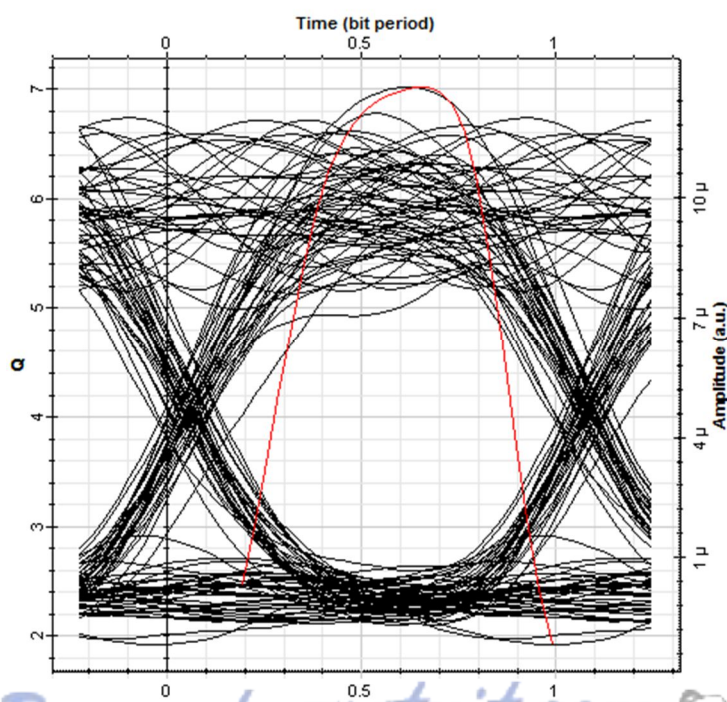


Figure 2.23 : Diagramme de l'œil du récepteur optique.



On note que le premier diagramme est plus clair que le second avec une meilleure ouverture, témoignant ainsi d'une meilleure qualité de transmission. On rappelle que plus l'œil du diagramme est ouvert, plus la qualité est meilleure.

En générale en télécommunications optiques on considère qu'on a une bonne qualité de transmission pour un TEB inférieur à 10^{-10} , correspondant à un facteur de qualité supérieur à 6,4. Dans notre cas on a obtenu un TEB de $1,47 \times 10^{-16}$ et un facteur de qualité de 8,17 pour la transmission RF et pour la transmission optique ont un TEB = $9,65 \times 10^{-13}$ et un facteur de qualité $Q = 7$. Tous ces résultats respectent les normes cités avant pour les télécoms optiques et indiquent une bonne qualité de transmission de notre système Radio sur Fibre.

Grace à ces résultats obtenus après notre simulation sur le logiciel Optisystem on a pu définir la qualité de notre transmission optique.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord fais une étude sur le système Radio sur Fibre cette étude a été primordiale afin de réaliser notre liaison Radio sur Fibre dans la deuxième partie de ce chapitre, car elle nous a permis de bien connaitre tous les paramètres de la liaison Radio sur Fibre qu'on a répartie en quatre sections (partie émission RF, partie réception RF, partie émission optique, partie réception optique). Ensuite on à étudier le logiciel optisystem qui est très pratique et simple et enfin on a réalisé une liaison Radio sur Fibre sur ce logiciel pour juger la qualité de transmission.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier la technologie WDM combinée avec la radio sur fibre, permettant d'augmenter les capacités de la liaison.

Chapitre 3

Liaison WDM Radio sur Fibre

3.1 Introduction

Avant l'apparition du multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing), l'accroissement de la capacité de transmission d'une liaison passait par la multiplication des lignes de transmission et l'empilement des répéteurs-régénérateurs. Le WDM a changé radicalement la donne. Avec lui, une seule fibre optique suffit pour transmettre plusieurs signaux de "couleurs" différentes (ou canaux) en même temps. L'ensemble des répéteurs-régénérateurs d'un site géographique a été remplacé par un seul équipement : l'amplificateur optique. Le WDM évite ainsi tous les coûts de génie civil de repose de fibre optique.

WDM (Wavelength Division Multiplexing) ou multiplexage en longueur d'onde est une technique de multiplexage révolutionnaire qui, en succédant à deux autres modes de modulation, a marqué l'univers des réseaux hauts débits aussi bien au niveau des débits qu'au niveau des équipements.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord faire une étude de la technologie WDM ensuite nous allons l'introduire à la technologie Radio sur Fibre pour augmenter le débit et le nombre d'utilisateurs.

3.2 La technologie WDM

Les réseaux de transport optiques sont composés de nœuds interconnectés par des fibres optiques. Les nœuds assurent les fonctionnalités de multiplexage/démultiplexage, émission, réception et brassage des flux de trafic. Les fibres optiques permettent le transport des flux entre les nœuds d'interconnexion sous forme d'un signal optique. Les réseaux SDH n'envoient qu'un seul canal optique, transportant la trame STM-N, sur chaque fibre. Cela oblige parfois à multiplier les fibres entre deux nœuds pour obtenir la capacité nécessaire au transport de nouvelles demandes.

Le progrès technologique a permis l'émergence de la technique de multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing ou WDM), qui permet de combiner plusieurs canaux sur le même signal optique, chaque canal utilisant une longueur d'onde différente. La bande passante disponible dans une fibre peut être alors considérablement étendue: chaque longueur d'onde permet un débit de plusieurs Gb/s et des dizaines de longueurs d'onde sont utilisables. Cette évolution permet d'exploiter une plus large bande passante de la fibre optique que celle qu'utilise un seul émetteur optique dans le cas de SDH.

3.3.1 Principe de multiplexage en longueur d'onde

Le multiplexage en longueur d'onde consiste à juxtaposer plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes sur la même fibre optique. Afin de mettre en œuvre cette technique, un système WDM utilise deux terminaux interconnectés par une liaison optique. Le premier terminal est un multiplexeur et le second terminal est un démultiplexeur. La figure 3.1 illustre le modèle d'une liaison WDM entre deux terminaux.

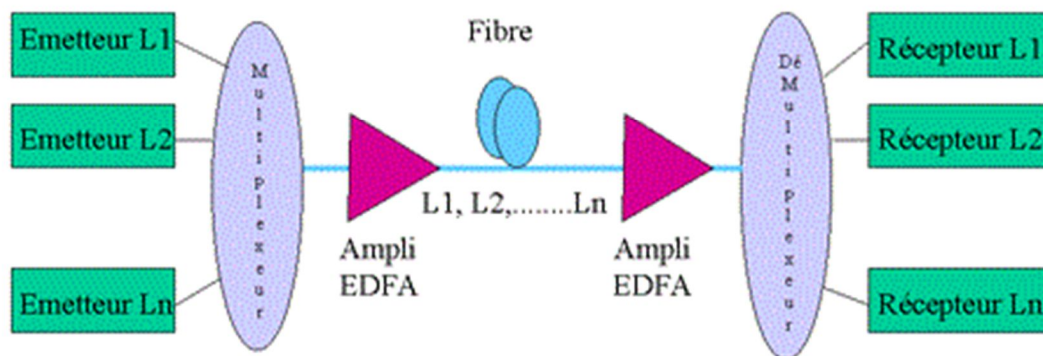


Figure 3.1 : Principe d'une liaison WDM.

Le multiplexeur a un double rôle. Il s'agit d'abord de changer les longueurs d'onde des signaux entrants en utilisant des transpondeurs, et ensuite les multiplexer sur un seul support physique. Lorsque des signaux clients arrivent au niveau du multiplexeur, il est possible qu'ils aient la même longueur d'onde, même s'ils proviennent d'émetteurs différents (c'est le cas de SDH ou tous les signaux sont envoyés sur une seule longueur d'onde de 1300 nm ou 1550 nm). Etant donné qu'il est inacceptable de transmettre deux fois la même longueur d'onde sur un même lien optique au risque d'interférence, c'est le transpondeur qui se charge du changement des longueurs d'onde. Les transpondeurs constituent les interfaces d'émission et de réception des signaux optiques dans un système WDM. Leur fonction consiste à transformer un signal client (SDH, PDH, Ethernet,...) en un signal optique associé à une longueur d'onde WDM. Une fois les signaux optiques définis, ils seront multiplexés sur un signal WDM qui est transmis sur le support physique. Ce signal peut subir des amplifications et régénérations pour faire face aux atténuations possibles tout au long de la liaison optique.

A la réception, le démultiplexeur agit comme plusieurs filtres dans des zones de longueurs d'onde données. En connaissant les longueurs d'onde circulant dans le support

optique, le démultiplexeur peut donc retrouver l'intégralité des signaux qui ont été multiplexés au départ. Des transformations de longueurs d'onde sont ainsi réalisées, grâce aux transpondeurs, pour récupérer les signaux clients originaux (signaux SDH par exemple).

L'avantage du multiplexage en longueur d'onde est qu'il n'est pas dépendant de la vitesse limitée des équipements électroniques. Par contre, le nombre de longueurs d'onde qu'une fibre peut transporter est borné même s'il a augmenté avec l'apparition des systèmes DWDM (jusqu'à 80 longueurs d'onde) et UDWDM (jusqu'à 160 longueurs d'onde).

Nous signalons aussi qu'en théorie, une fibre peut être parcourue par un signal dans les deux sens. Cependant, les fibres déployées en pratique sont généralement unidirectionnelles pour des raisons technologiques au niveau des nœuds WDM [17].

3.3.2 Les composants d'un réseau WDM

La technologie WDM définit trois types de nœuds optiques qui peuvent être déployés dans un réseau de transport optique:

- **Les multiplexeurs terminaux optiques (Optical Terminal Multiplexer ou OTM):**

Ce sont les équipements de base pour la conception d'un système WDM. Installés aux extrémités des fibres optiques, ils permettent de rassembler/dissocier les différentes longueurs d'onde. Les OTMs sont utilisés à l'entrée du réseau WDM où ils assurent l'accès pour les signaux provenant des autres réseaux clients tel que SDH, Ethernet, IP/MPLS, DSL, etc.

- **Les multiplexeurs à insertion/extraction optique (Optical Add Drop Multiplexer ou OADM):**

Ces équipements sont utilisés pour insérer (à l'origine) et extraire (à la destination) une ou plusieurs longueurs d'onde sur une liaison WDM acheminant une pluralité de canaux optiques ayant des longueurs d'onde différentes. Les OADMs sont principalement conçus pour la construction d'anneaux et sont utilisés dans les réseaux d'accès et métropolitains.

- **Les brasseurs optiques (Optical Cross Connect ou OXC) :**

Ces équipements assurent la fonction de brassage dans les réseaux optiques WDM. Lorsque dans un nœud les longueurs d'onde provenant d'une fibre sont multiplexées, l'OXC permet de remplacer une ou plusieurs de ces longueurs d'onde par d'autres, issues d'une autre fibre, avant de les multiplexer vers une fibre sortante du nœud. Nous parlons alors de brassage de longueurs d'onde puisqu'à partir de plusieurs canaux optiques (longueurs d'onde) entrants dans le

nœud, nous pouvons échanger ces canaux pour une nouvelle répartition de sortie. Les OXC sont utilisés principalement dans les réseaux cœur WDM.

Les nœuds WDM peuvent être déployés dans les réseaux de transport optiques selon plusieurs topologies. En pratique, la topologie maillée est surtout utilisée pour les réseaux de cœur étant donné qu'elle garantit une meilleure stabilité du réseau en cas de panne des nœuds. La topologie en anneaux est principalement utilisée dans les réseaux métropolitains et d'accès. Similairement à SDH, la technologie WDM définit des mécanismes d'auto cicatrisation d'anneaux tels qu'OCh-DPRING (Optical Channel Dedicated Protection Ring) et OMS-SPRING (Optical Multiplex Section-Shared Protection Ring) [18], qui assurent un rétablissement rapide des longueurs d'onde défaillantes en cas de pannes.

3.3.3 Notion de circuit optique

Les réseaux WDM sont en mode connecté. Lorsqu'une connexion doit s'établir entre une source et une destination, un chemin à travers le réseau doit être assigné à cette connexion. Ce chemin est appelé circuit optique et est connu sous l'appellation anglaise "lightpath". Le circuit optique est identifié par une suite de fibres allant de la source à la destination. Ce circuit est parfaitement déterminé si la longueur d'onde utilisée sur chacune des fibres traversées est connue. Cet ensemble de données constitue le routage du circuit optique. Cependant, l'affectation de longueurs d'onde doit satisfaire une contrainte forte : deux circuits utilisant la même fibre ne doivent pas utiliser la même longueur d'onde. Chaque circuit optique doit avoir une longueur d'onde différente de celle de l'autre circuit. La Figure 3.2 montre un exemple de plan de routage de circuits optiques dans un réseau WDM.

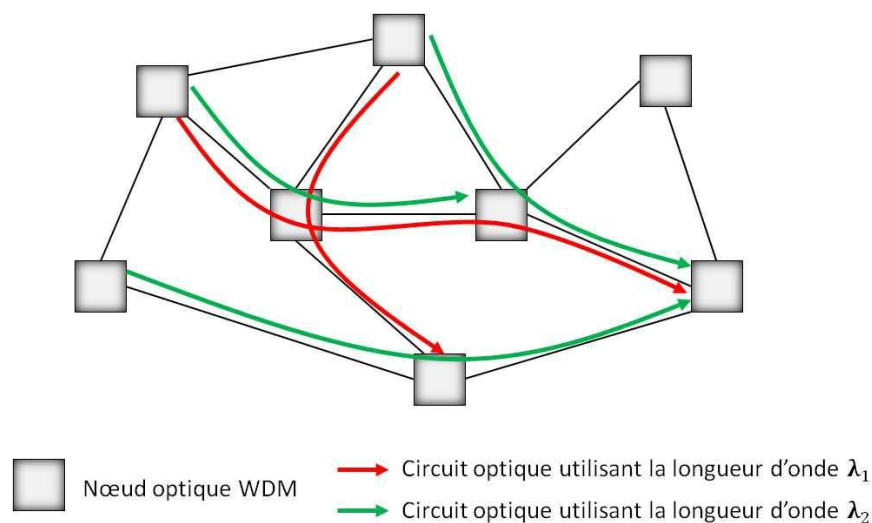


Figure 3.2 : Exemple de circuits optiques dans un réseau WDM.

Certains nœuds WDM permettent la conversion en longueur d'onde et donc permettent à un circuit optique qui rentre dans le nœud avec une certaine longueur d'onde d'en sortir avec une autre. Deux catégories de conversion en longueur d'onde peuvent être distinguées:

- la conversion optoélectronique qui consiste à traduire le signal optique en signal électrique puis le réémettre optiquement sur une deuxième longueur d'onde. Bien que le coût des convertisseurs optoélectroniques soit important [19], ils engendrent souvent des déformations de l'information transmise, qui peuvent être corrigées par une régénération électronique du signal (coût supplémentaire),

- la conversion tout-optique qui fait appel au mécanisme de conversion par commutation dans le domaine optique sans aucun traitement électronique du signal. Les convertisseurs tout-optique sont généralement moins coûteux que les convertisseurs optoélectroniques mais aussi moins performants et peu utilisés dans la pratique.

3.3.4 Les systèmes WDM

Il existe plusieurs systèmes WDM. Ils adoptent tous le même principe mais se différencient uniquement par le nombre de canaux (longueurs d'onde) utilisables dans une fibre. Le multiplexage WDM est caractérisé par l'intervalle minimum entre deux longueurs d'onde accessibles. Cet intervalle est exprimé en nanomètres (nm) ou en Gigahertz (GHz). Si cet intervalle est inférieur ou égal à 0,8 nm (soit 100 GHz), nous parlons alors de multiplexage DWDM (Dense WDM). Des expérimentations ont même été effectuées avec des intervalles de 0,4 et 0,2 nm ou 160 canaux peuvent être utilisables dans une fibre. Dans ce cas, nous parlons de multiplexage UDWDM (Ultra Dense WDM). La Figure 3.3 illustre les différents systèmes WDM en fonction de l'espacement.

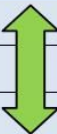
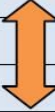

Espacement	Nombre de canaux	
1000 GHz ($\Delta\lambda = 8$ nm)	4	 WDM (Wavelength Division Multiplexing)
400 GHz ($\Delta\lambda = 3,2$ nm)	8	
200 GHz ($\Delta\lambda = 1,6$ nm)	16	
100 GHz ($\Delta\lambda = 0,8$ nm)	32	 DWDM (Dense WDM)
50 GHz ($\Delta\lambda = 0,4$ nm)	80	
25 GHz ($\Delta\lambda = 0,2$ nm)	160	 UDWDM (Ultra Dense WDM)

Figure 3.3 : Les systèmes WDM.

Il existe une autre forme de multiplexage WDM, moins performante, connue sous l'appellation CWDM (Coarse WDM qui signifie WDM grossier) [20]. Dix-huit canaux au maximum sont utilisables, mais en pratique les équipements émettent sur quatre, huit ou seize canaux.

3.3.5 Les apports du WDM

Le WDM répond aux besoins d'augmentation de débits et de taux de partage dans le réseau d'accès.

La limite en débit imposée par le TDM peut être dépassée en introduisant le WDM et en affectant une longueur d'onde par utilisateur, ce qui revient à faire du point à point en longueur d'onde. Nous cumulon ainsi les avantages du point à point (c'est-à-dire un débit pouvant être amélioré de 100 Mbit/s à 2.5 Gbit/s, une couche MAC simplifiée, l'absence de problème de synchronisation et le bénéfice de la mutualisation de la fibre. La souplesse de multiplexage permet de superposer des adressages différents en fonction du type de clients (FFTx), des services (voix, données, vidéo ...), des technologies finales (xDSL, Wireless, Ethernet...). Le WDM permet une indépendance vis-à-vis protocoles et une indépendance entre canaux. De plus, cette technique permet une plus grande concentration des clients sur un même lien principal (augmentation de la portée et du nombre de clients) et la localisation de panne est plus aisée que lorsqu'il y a partage de la longueur d'onde.

3.4 Présentation de la liaison

Notre nouvelle liaison est une liaison Radio sur Fibre WDM qui implique une transmission de signaux radiofréquence par l'intermédiaire d'une fibre optique bidirectionnelle et un multiplexeur WDM 2x1 :

➤ **Fibre optique bidirectionnelle :**

- Longueur d'onde $\lambda=1500\text{nm}$
- Longueur $L=10\text{km}$
- Atténuation $\alpha=0.22\text{ dbm}$
- Dispersion 16.75 PS/nm/km
- Fréquence centrale de bruit $f=193.4\text{ THz}$
- Largeur de bande de bruit 13 THz

➤ **WDM 2x1 :**

- Bande passante 10 GHz

- Perte d'insertion 0 dB
- Profondeur 100 dB
- Type de filtre : filtre de Bessel d'ordre 2.

3.4.1 Partie émission optique

La partie émission optique de notre liaison qui est représenté sur la figure 3.4 est composée de plusieurs composants :

- **Générateur binaire** : avec un débit de 1Gbit/s.
- **Modulateur d'amplitude** : indice de modulation égale à 1.
- **Circulateur 1 et 2** :

Pertes d'insertion : 1dB et 0.5dB.

Pertes de retour : 60dB.

Isolement : 60dB.

- **Filtre réflectif gaussien** : de l'ordre de 4.

Bande passante : 12Ghz.

Réflexion : 99%

Bruit dynamique : 3dB

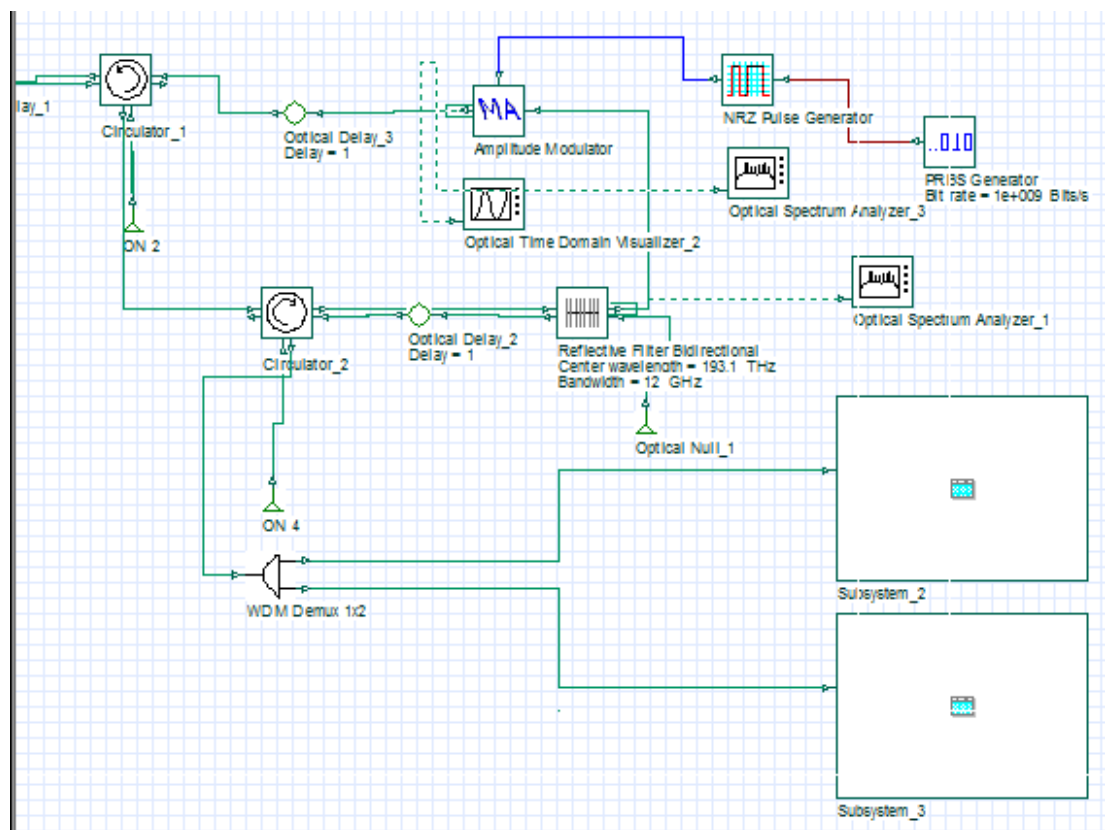


Figure 3.4 : Schéma de la partie émission de la liaison.

3.4.2 Partie réception optique

La partie réception optique de notre liaison qui est représenté dans la figure 3.5 est composée de plusieurs composants :

- **Circulateur :**
 Pertes d'insertion : 1dB
 Pertes de retour : 60Db
 Isolement : 60dB
- **Filtre de Bessel :** de l'ordre de 2
 Bande passante : 10Ghz
 Fréquence : 193.11Thz
 Bruit dynamique : 3dB
- **Photodiode PIN :**
 Receptivité : 0.9A/W
 Courant d'obscurité : 10nA
 Fréquence centrale : 193.1THZ.
- **Filtre passe bas de Bessel :** de l'ordre de 4
 Fréquence de coupure : 0.75Ghz
- **Régénérateur :** avec un débit de 1Gbits/s

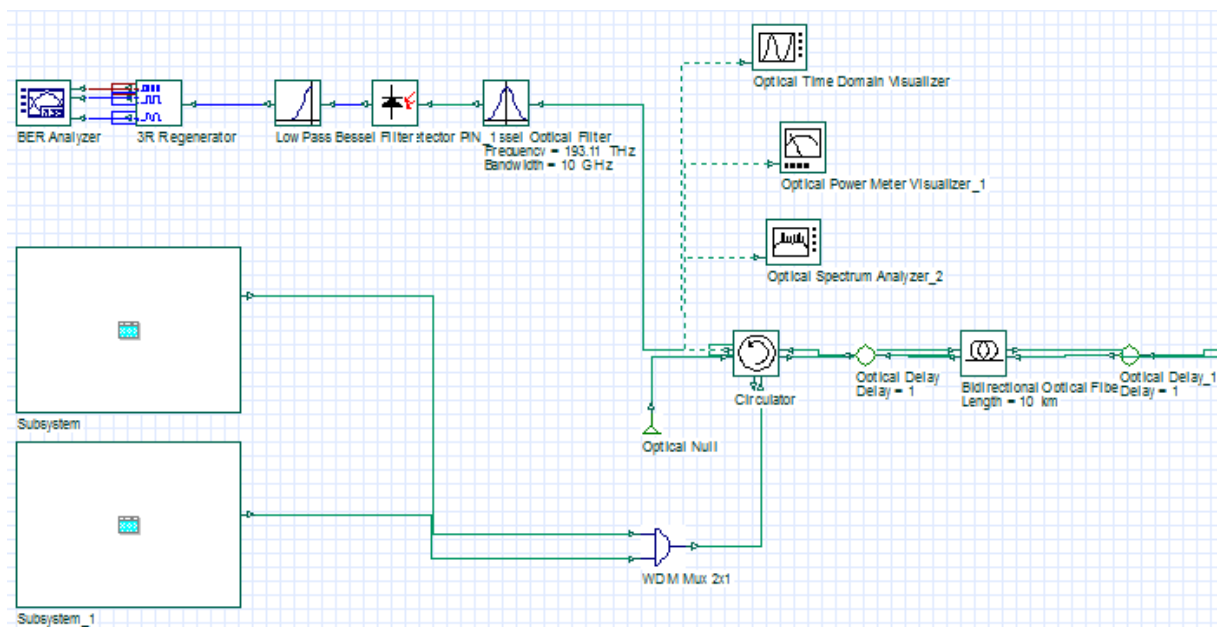


Figure 3.5 : Schéma de la partie réception optique.

3.4.3 Partie émission RF

La partie émission RF de notre liaison qui est représenté dans la figure 3.6 est composée de plusieurs composants :

- **Générateur** : avec un débit de 1Gbits/s
- **Modulateur d'amplitude** : avec une fréquence de 1.7Ghz
- **Générateur RF** :
Nombre de chaîne : 78
Fréquence : 49.25Mhz
Espacement de fréquence : 6Mhz
- **Laser** :
Fréquence 193.1Thz
Puissance : 6dBm
Bruit dynamique : 3Db
- **Modulateur de Mach-Zehnder** :
Rapport d'extinction : 30dB
Tension de commutation de polarisation : 4V
Tension de commutation RF : 4V
Pertes d'insertion : 5dB
- **Fibre EDFA** :
Gain : 20dB
Puissance : 10dBm
Fréquence centrale de bruit : 193.4THz
Largeur de bande de bruit : 13THz

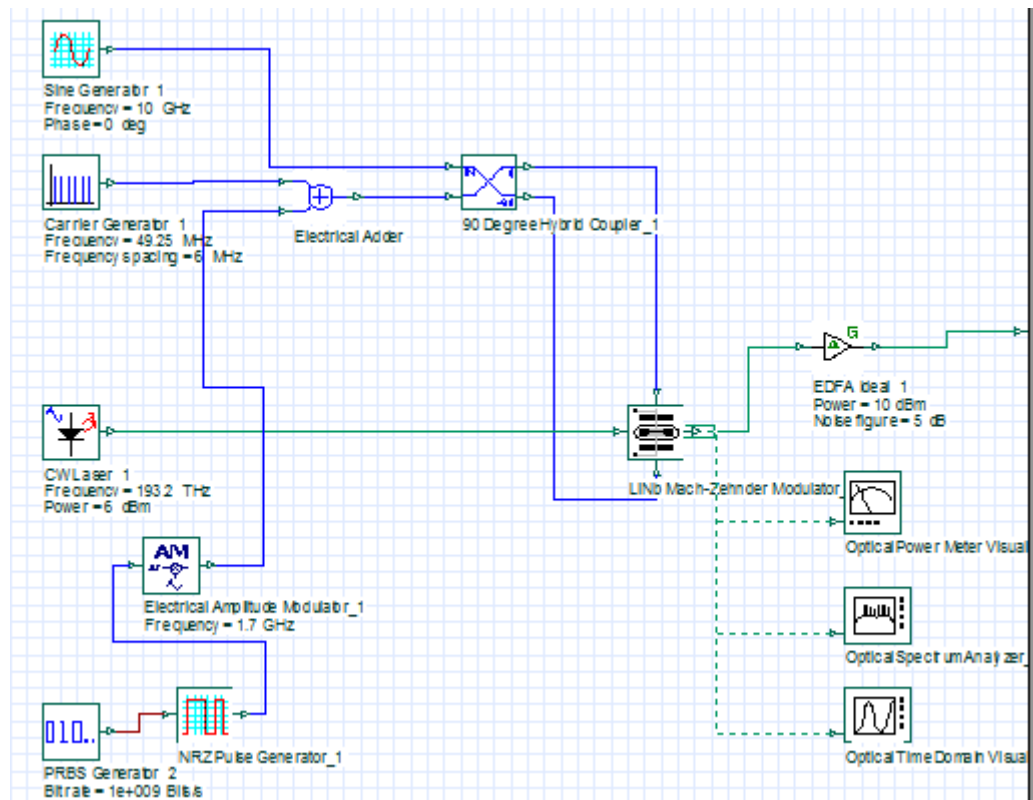


Figure 3.6 : Schéma de la partie émission RF de la liaison.

3.4.4 Partie réception RF

La partie réception RF de notre liaison qui est représenté dans la figure 3.7 est composée de plusieurs composants :

- **Photodiode PIN :**
Réceptivité : 0.9A/W
Courant d'obscurité : 10nA
- **Filtre passe bande de Bessel :** de l'ordre de 8
Fréquence de coupure : 1.7GHz
Bande passante : 1GHz
Pertes d'insertion : 2dB
- **Amplificateur électrique :** avec un gain de 15Db
- **Démodulateur d'amplitude :**
Fréquence : 1.7GHz
Gain : 1dB
Fréquence de coupure : 0.6GHz
- **Filtre passe bas de Bessel :** d'ordre 6

Fréquence de coupure : 0.7GHz

Pertes d'insertion : 2dB

- **Régénérateur** : avec un débit de 1Gbit/s

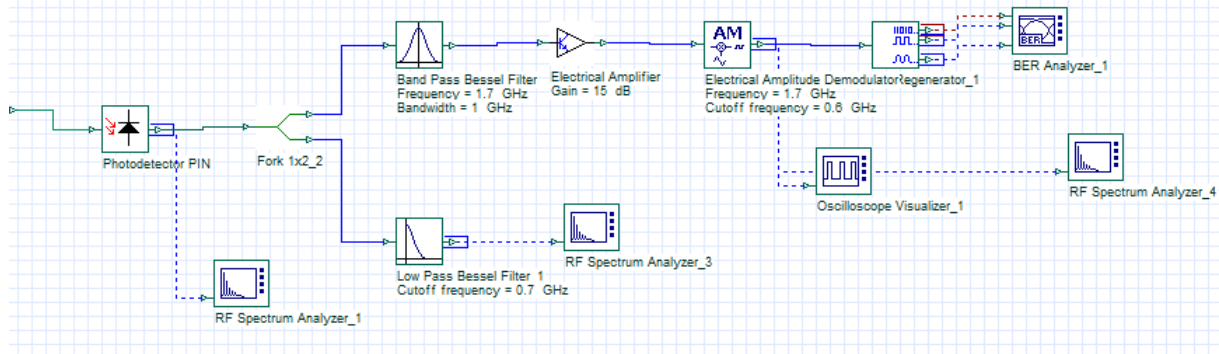


Figure 3.7 : Schéma de la partie réception RF de la liaison.

3.5 Résultats de simulation

Dans ce qui suit nous allons présenter les différents résultats de simulation. Le but de cette simulation est de définir la qualité de notre transmission optique.

3.5.1 Les signaux émis par émetteur RF

Le spectre du signal RF émis est représenté sur la figure 3.8, tandis que la représentation temporelle est donnée sur la figure 3.9.

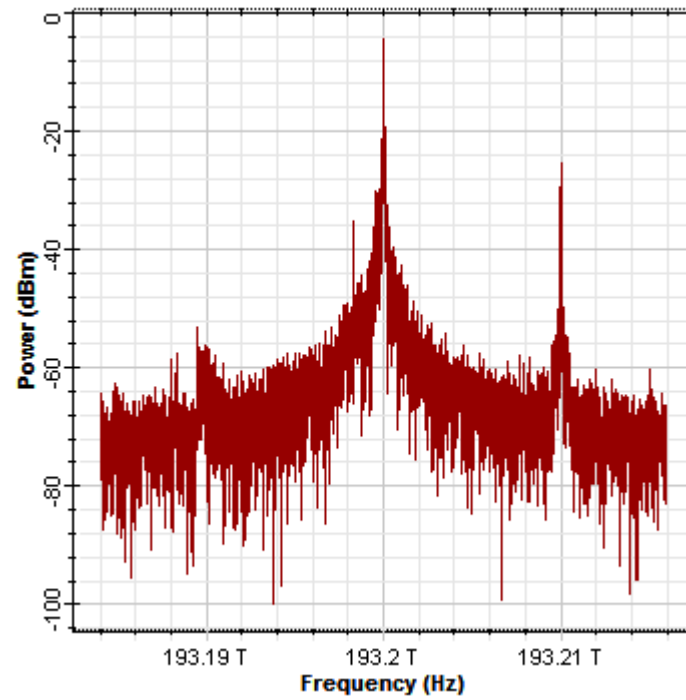


Figure 3.8 : Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF (représentation spectrale).

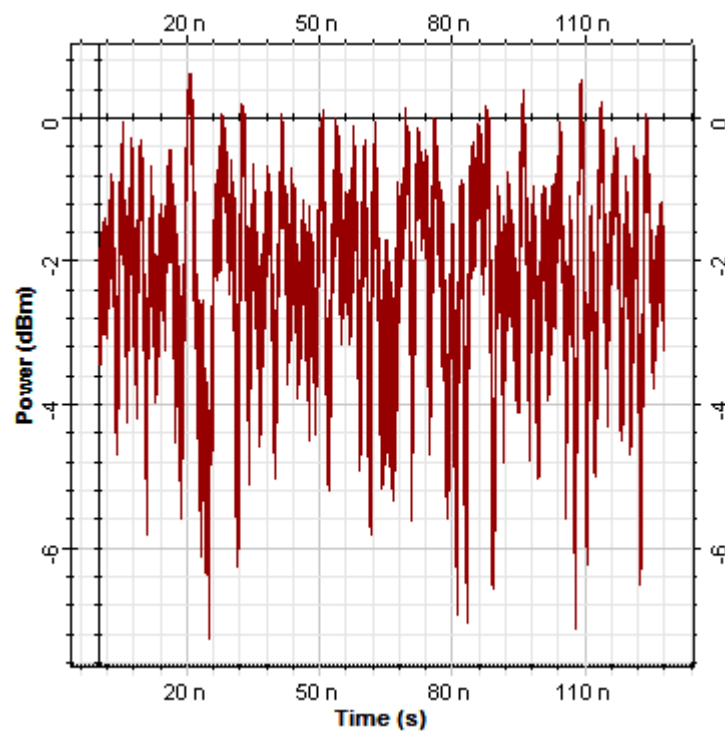


Figure 3.9 : Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF (représentation temporel).

3.5.2 Les signaux reçus par récepteur RF

Le spectre du signal RF reçu est représenté sur la figure 3.10, tandis que la représentation temporelle est donnée sur la figure 3.11.

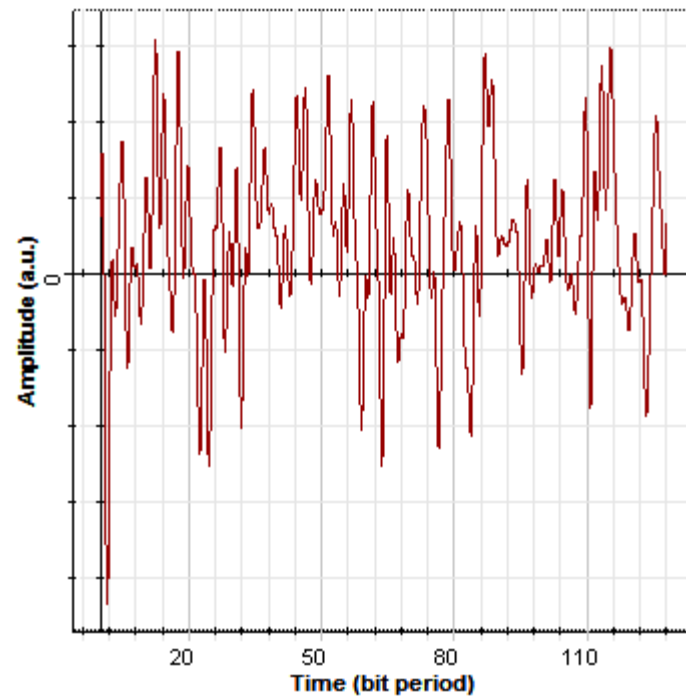


Figure 3.10 : Signal reçu par le récepteur RF(représentation temporelle).

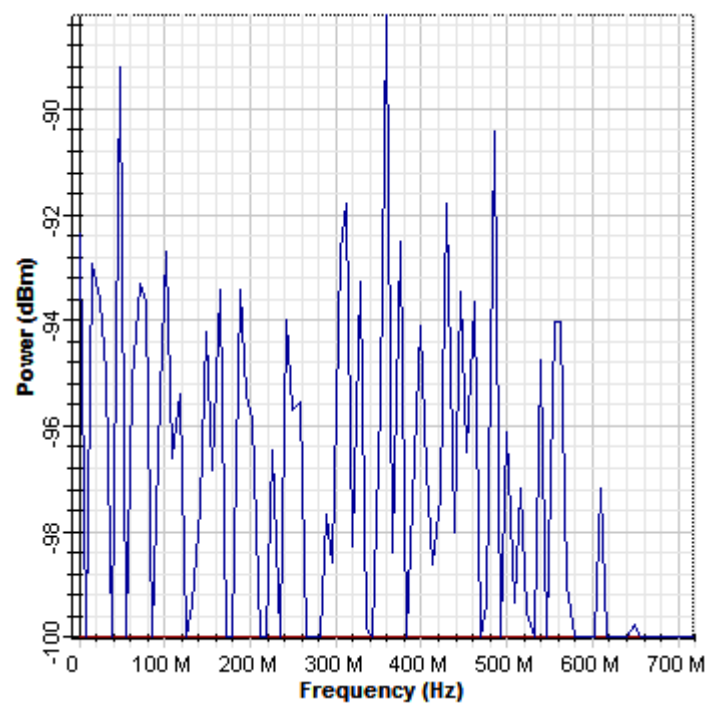


Figure 3.11 : Signal reçu par le récepteur RF(représentation fréquentielle).

3.5.3 Les signaux émis par émetteur optique

Le spectre optique du signal injecté dans la fibre optique est dans la figure 3.12 :

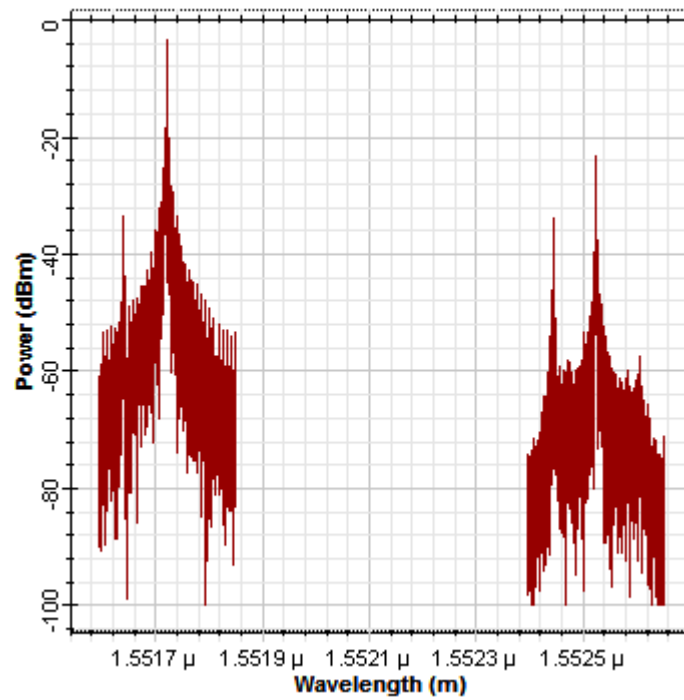


Figure 3.12 : Spectre optique du signal.

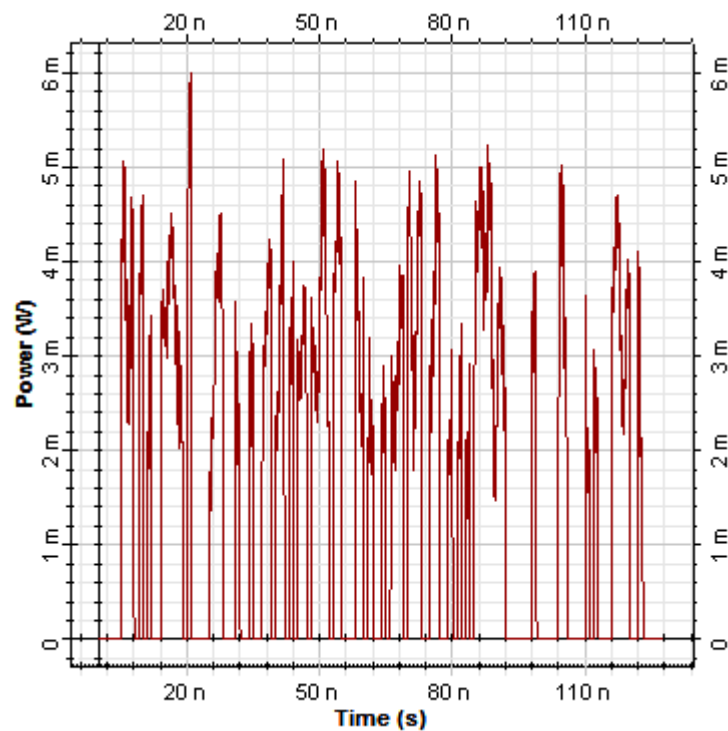


Figure 3.13 : Signal optique émis (représentation temporelle).

3.5.4 Les signaux reçus par récepteur optique

La figure 3.14 représente l'évolution du facteur de qualité en fonction du temps on note que le maximum du facteur de qualité $Q=2.72$ ce qui est une mauvaise qualité de transmission.

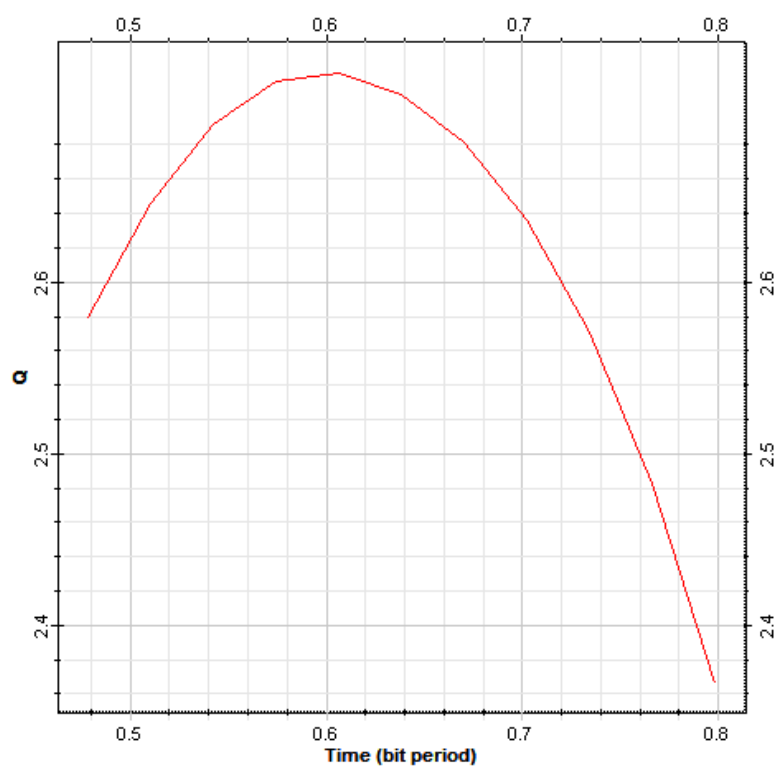


Figure 3.14 : Evolution du facteur de qualité (Q) en fonction du temps.

La figure 3.15 représente l'évolution du taux d'erreur binaire en fonction du temps.

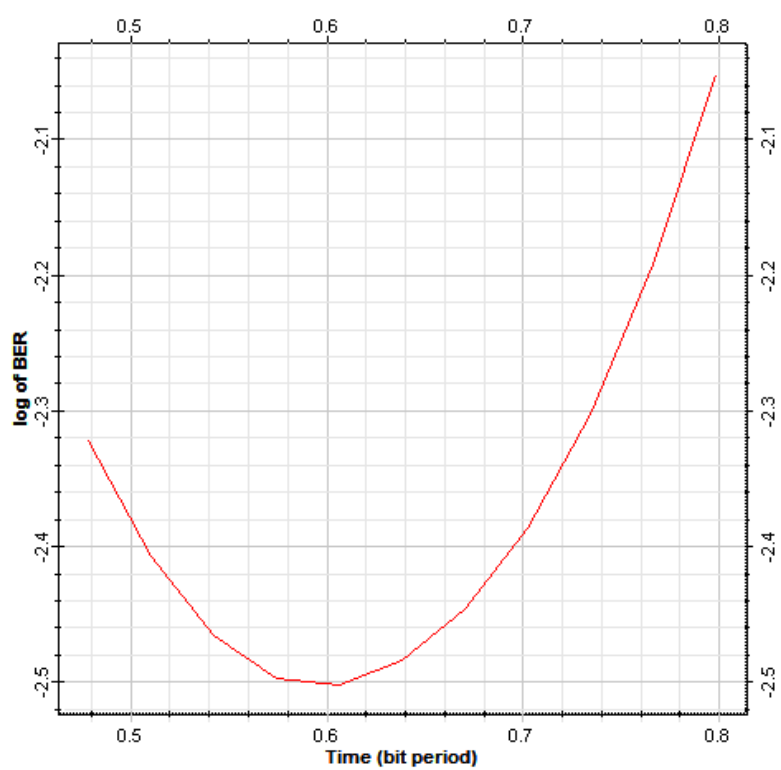


Figure 3.15 : Evolution du BER en fonction du temps.

3.5.5 Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil du récepteur optique est représenté dans la figure 3.16 :

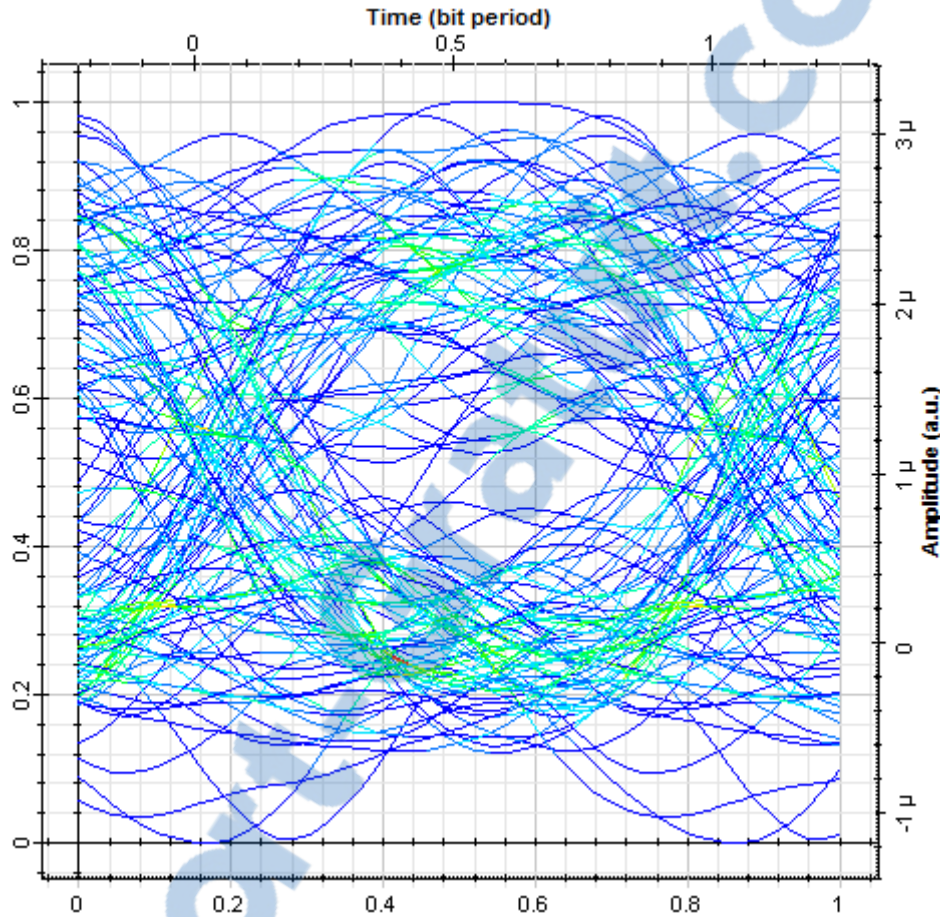


Figure 3.16 : Diagramme de l'œil du récepteur optique.

Nous remarquons une mauvaise qualité de transmission, que ça soit sur le diagramme de l'œil qui est fermé et un BER minimale de l'ordre de 10^{-3} et un facteur de qualité maximale de 2,72. Ce qui est loin des résultats voulus qui sont, un BER inférieur à 10^{-9} et un facteur de qualité supérieur à 6,4. On note aussi une dégradation des résultats par rapport à ceux obtenus au chapitre 2. On peut constater alors que plus le débit augmente, plus la qualité de transmission décroît.

3.6 Conclusion

Nous avons fait l'étude au cours de ce chapitre d'un système Radio sur Fibre en intégrant le multiplexage en longueur d'onde WDM. Nous nous sommes basés sur le système RoF étudié au

cours du chapitre 2 pour concevoir un autre système plus performant en termes de débit et de nombre d'utilisateur. Nous avons réussi à réaliser cette liaison, à améliorer le débit, mais la performance s'est dégradé par rapport au précédent système.

Il sera intéressant par la suite de développer mieux ce système pour avoir de meilleurs critères de qualité, et cela demande de se pencher sur chaque composant de la liaison.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'évolution phénoménale des besoins en bande passante, due principalement à l'apparition de nouveaux services internet a entraîné une utilisation de plus en plus massive des réseaux de transport. Exploitant une infrastructure optique, ces réseaux ont connu plusieurs évolutions technologiques majeures pour leur permettre de transporter des volumes de trafic en perpétuelle croissance.

L'état de l'art sur la Radio sur Fibre montre qu'on assiste actuellement à un renouvellement de l'intérêt porté à ce domaine prometteur des télécommunications radio et optiques. Les recherches en cours portent sur les performances des composants, du système complet et sur de nouvelles applications (intégration de nouveaux réseaux radio).

La technologie WDM est issue du réseau de transport où les débits atteignent plusieurs dizaines de Gbit/s. L'intérêt de son introduction dans le réseau d'accès réside d'une part dans la possibilité d'utiliser un accès multiple en longueurs d'onde en lieu et place d'un accès multiple en temps, pour partager les ressources entre les utilisateurs, et d'autre part dans la possibilité de mutualiser de façon plus importante des utilisateurs sur une architecture en utilisant simultanément le multiplexage temporel et en longueurs d'onde.

Cependant, la conception de nouveaux systèmes, toujours plus performants, est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances d'une liaison est important. Aussi, les outils de simulation sont de plus en plus utilisés. Ils permettent des gains de temps et d'argent en évitant les expérimentations itératives sur des démonstrateurs de systèmes.

L'objectif majeur de nos travaux était de mettre en place de nouvelles approches performantes permettant une planification et une gestion efficace des ressources tout en minimisant les coûts résultants.

C'est pourquoi il nous a paru intéressant de commencer ce mémoire par une étude d'une liaison par fibre optique et une description approfondi des composants présents dans les liaisons sur fibre optique ainsi que les différentes limitations connues lors de la propagation du signal.

Dans la deuxième partie de ce mémoire nous avons abordés une nouvelle technologie qui permet d'avoir accès au haut débit et nous avons effectué une simulation sur le logiciel Optisystem et nous avons pu connaître l'utilité de cette nouvelle technologie Radio sur Fibre.

Dans le troisième chapitre l'étude était portée sur la technologie WDM qu'on a introduit dans notre précédente liaison Radio sur Fibre dans le but d'augmenter le débit et le nombre d'utilisateurs.

Liste des abréviations

BBoF	BaseBand over Fiber
BER	Bit Error Rate
CD	Chromatic Dispersion
CNR	Carrier to Noise Ratio
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DEL	Diode Electro Luminisante
DWDM	Dense Wave Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
E/O	Electro-Optique
FTTH	Fiber To The Home
IFoF	Intermediate Frequency over Fiber
I-TUT	International Télécommunication Union
IM-DD	Intensity Modulation – Direct Detection
LAN	Local Area Network
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LNA	Low Noise Amplifier
MZM	Mach Zehnder Modulator
NRZ	No Return to Zero
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
O/E	Opto-Electrique
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OPLL	Optical Phase-Locked Loop

OTM	Optical Terminal Multiplexer
OXC	Optical Cross Connect
PIN	Positive Intrinsic Negative
RFoF	Radio Frequency over Fiber
RoF	Radio-over-Fiber
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SMF	Single Mode Fiber
SNR	Signal to Noise Ratio
TA	Trans-Atlantic
WDM	Wave Division Multiplexing
YAG	Yttrium Aluminium Garnet

Références bibliographiques

- [1] Mathilde. G, « *Etude théorique et expérimentale de l'impact de la régénération 2R dans un système de transmission optique haut débit* ». Thèse de doctorat à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2006.
- [2] Togniclo. C, « *Etude d'un système de transmission sur fibre optique plastique à saut d'indice* », 2011.
- [3] Maiman. T.H, « *Stimulated optical radiation in ruby masers* » Nature vol 187, Août 1960.
- [4] Boudrioua. N, « *Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : Vers une compensation électrique de la PMD* ». Thèse de doctorat à l'Université Paul Verlaine-Metz, 2007.
- [5] Laurent. J, « *Communication optique à très haut débit* », 2004.
- [6] Maury. J, « *Etude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique* ». Docteur de l'Université de LIMOGES 2003.
- [7] Merzouk. K, « *Etude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage temporelle* », 2008.
- [8] MEUNIER. J, « *Télécoms Optique* » : Composants à fibres systèmes de transmission. Paris, 2003.
- [9] Joindot. M, Joindot. I, « *Fibres optiques pour télécommunications*», E7 110, 2000.
- [10] Toffano. Z, « *Optoélectronique : Composants photoniques et fibres optiques* », Ellipses : Paris, 2000.
- [11] Elaji. M-A, « *Etude et modélisation d'un système de transmission radio sur fibre*», 2008.
- [12] Ng'oma. A, « *Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems* », Thèse de Doctorat, Technische Universiteit Eindhoven, 2005
- [13] Bougrenet.J-L, « *Eléments clé pour une convergence des technologies optique et radio-fréquence pour les réseaux fixes et mobiles* », Institut Télécom, Mars 2009.
- [14] 16ème journées nationales Microondes, « *Architecture pour les systèmes de transmission ULB en bande millimétrique avec un lien optique* », Grenoble, Mai 2009.
- [15] Nathan. J.G, Paolo, Monteiro. P, Gameiro. A, « *Next generation wireless communications using radio over fiber* ».
- [16] Nathan. J.G, Paolo, Monteiro. P, Gameiro. A, « *Radio over Fibre for the Support of 4th Generation Mobile/Wireless Communications* », European Workshop on Photonic Solutions for Wireless Access and in-house Network, Duisburg, Allemagne, May 2009.
- [17] Han. K.H, « *Bi-directional WDM Passive optical network using spectrum-sliced light emitting diodes* », 2006.

- [18] Park. S-J, « *Fiber-to-the-Home Services Based on Wavelength-Division-Multiplexing Passive Optical Network* », Journal of Lightwave Technology, Vol 22, Nov. 2009.
- [19] FuTai. An, « *A next generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture* », Journal of Lightwave Technology, Vol 22, N°11, Nov. 2004.
- [20] Davey.R.P, « *DWDM reach extension of a GPON to 135 km* », 2005.

Résumé

Pour étendre la couverture géographique des signaux radio fréquences et afin de répondre à l'augmentation en permanence de la demande en fort débit et de bande passante élevée, la solution proposée a été de réaliser des systèmes hybrides combinant les technologies de fibres optiques et radio communément "système Radio sur Fibre" (RoF). D'un autre côté, le multiplexage en longueur d'onde répond aux besoins d'augmentation de débits et de taux de partage dans le réseau d'accès.

Le but de ce mémoire est de faire d'abord une étude de la qualité de transmission dans un système Radio sur Fibre. Puis d'introduire la technique WDM, dans le but d'augmenter le débit et le nombre d'utilisateurs.

Mots clés : Radio sur Fibre, WDM, facteur de qualité, taux d'erreur binaire.

Abstract

To extend the geographical coverage of radio frequency signals and in order to respond to the constantly increasing demand for high bandwidth and high bandwidth, the proposed solution is to realize hybrid systems combining fiber optic and radio technologies commonly "Radio over Fiber" (RoF). On the other hand, wavelength division multiplexing is the best way for increasing bit rates and sharing rates in the access network.

The aim of this memory is first, to study the transmission quality in a Radio-over-Fiber system. Then to introduce the WDM technique, in order to increase the bit rate and the number of users.

Keywords : Radio over Fiber, WDM, quality factor, bit error rate.