

Introduction Générale

Introduction générale

Il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à un débit de 270Mbits/s, le câble coaxial était parfait pour remplir son rôle de support de transmission. Mais avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, et une alternative au câble coaxial était à trouver : pertes trop élevées, courtes distances de propagation, performances limitées. La fibre optique remplit très bien ce rôle de support de transmission. Son utilisation est désormais courante dans les réseaux de télécommunications.

Mais aujourd'hui, l'essor de l'Internet est tel que l'évolution des systèmes de télécommunications tend toujours vers une augmentation des capacités de transmission. La difficulté majeure ne réside plus vraiment sur le support, possédant une large bande passante et de faibles atténuations, mais sur les modules d'émission et de réception, regroupant l'électronique rapide et les fonctions optoélectroniques.

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.

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

Compte tenu des évolutions rapides des services de télécommunications accessibles aux usagers, notamment les services multimédias enrichis comme l'Internet à très haut débit, l'IPTV, la visiophonie, la TV Haute définition, les futurs réseaux d'accès et réseaux domestiques devront bientôt être capables de transporter des flux de données pouvant atteindre le gigabit par seconde. Cette demande en très hauts débits va largement au-delà des possibilités offertes par les solutions à base de câble coaxial (ADSL, VDSL, etc.).

Par ailleurs, les réseaux d'accès et réseaux domestiques ont répondu à des exigences d'usage telles que la mobilité, c'est-à-dire la possibilité de se connecter au réseau à partir d'un

terminal mobile, sans avoir recours à un câble, ce qui assure une flexibilité et une facilité d'utilisation. L'utilisation de porteuses radiofréquences dans le domaine millimétrique (30-300 GHz) permettent de transporter des flux de données suffisamment rapides ($>1\text{Gb/s}$). Mais la limite principale des ondes millimétriques est une portée utile relativement courte par rapport aux micro-ondes. Par conséquent, l'utilisation des ondes millimétriques nécessite de déployer un plus grand nombre de points d'accès radio pour assurer la couverture à très haut débit d'une même surface de référence que dans le cas des micro-ondes. Le réseau radio devient donc un réseau multicellulaire (pico-cellulaire ou femto-cellulaire).

Afin de gérer les différentes cellules d'un réseau multicellulaires 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 radio-fréquence à des débits au-delà de 1Gbits/s par utilisateur tout en satisfaisant le besoin de mobilité.

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.

Le second chapitre, nous ferons tout d'abord une introduction sur la technologie Radio sur Fibre et ses applications, ensuite l'étude théorique de la liaison Radio sur Fibre, une recherche de la technologie Radio sur Fibre et des développements commerciaux couvrant la définition de la notion des différentes catégories, les types de systèmes Radio sur Fibre et leur caractérisation de la performance, nous verrons les avantages et inconvénients de cette technologie et pour finir, ces applications pour les nouvelles générations.

Le troisième chapitre, à pour objectif de présenter le logiciel de simulation OptiSystem qu'on a utilisé pour les mesures de notre liaison Radio sur Fibre et l'étude détaillée des composants qui nous ont permis d'avoir une connaissance sur la transmission du signal dans chaque partie de notre liaison. Cela nous a été d'un grand aide pour connaître le système en

termes de, longueur de la fibre, la puissance émise par le laser et le débit nécessaire pour une telle transmission.

Chapitre 1

Etude d'une liaison par fibre optique

1.1 Introduction

La croissance du trafic de l'information nécessite le développement des réseaux de télécommunications toujours plus performants. Pour y parvenir et grâce à des efforts de recherche, la capacité et la portée des liaisons optiques ont augmenté de manière considérable au cours de la dernière décennie [1].

Depuis quelques années, la fibre optique, est devenue un des média les plus utilisés pour transporter tous types de données (audio, vidéo, Internet). Ce choix est dû aux efforts soutenus des chercheurs dans le domaine des télécommunications optiques.

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

Ce chapitre introduit les systèmes de transmissions optiques, nous décrivons les éléments constituant les extrémités d'une liaison optique à savoir l'émetteur et le récepteur du signal. 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 est ensuite passée en revue, à savoir l'atténuation dans la fibre, le bruit d'émission spontanée amplifiée des amplificateurs optiques, la dispersion chromatique, de polarisation et les effets non linéaires.

1.2 Description d'une liaison optique

L'intérêt dans les communications optiques consiste à transporter l'information sous forme lumineuse entre deux points.

La liaison optique comprend une fibre optique, un émetteur (source laser), un récepteur (photodétecteur) et éventuellement un ou plusieurs régénérateurs (amplificateur) comme illustré schématiquement sur la (figure 1.1).

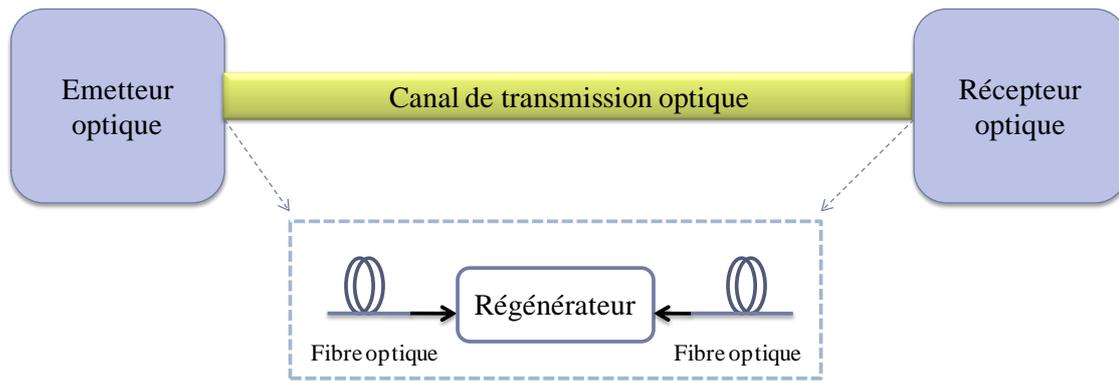


Figure1.1: Schéma d'une liaison optique.

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

1.3 Emission Optique

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

1.3.1 Spectre électromagnétique

La lumière est une énergie rayonnante constituée d'ondes électromagnétiques qui peut se propager à une vitesse élevée dans le vide ou dans des matériaux diélectriques. Elle est caractérisée par sa longueur d'onde λ [3].

Les ondes électromagnétiques couvrent un large domaine de fréquences et peuvent être classées d'après leurs sources principales. Cette classification n'a pas de limites très précises puisque différentes sources peuvent produire des ondes dans des domaines de fréquences qui se recouvrent (figure 1.2).

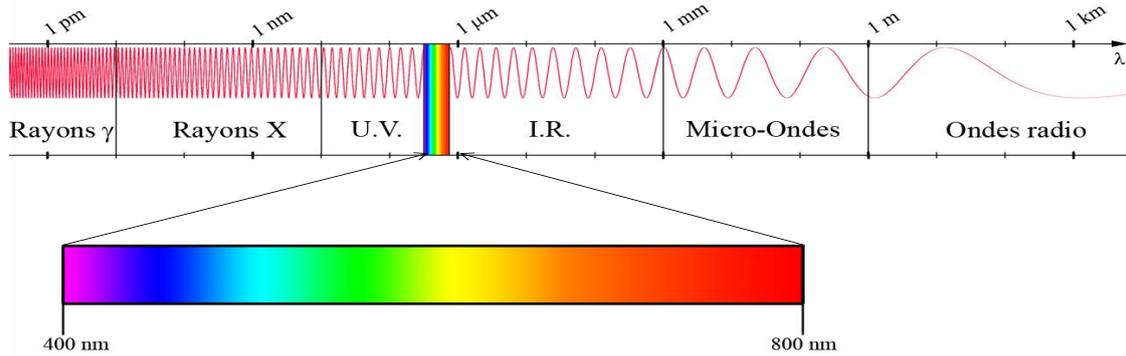


Figure 1.2: Spectre électromagnétique.

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

1.3.1.1 Les ondes radios

Leurs longueurs d'onde vont de quelques mètres à quelques kilomètres, leur domaine de fréquence s'étend de quelques Hz jusqu'à 10^9 Hz. L'énergie des photons va de pratiquement 0 à 10^{-5} eV. Les ondes qui sont utilisées pour les transmissions radio et la télévision sont produites par des dispositifs électroniques essentiellement des circuits oscillants.

1.3.1.2 Les micros ondes

Les longueurs d'ondes des micro-ondes vont de 0,3 m à 10^{-3} m. Leur domaine de fréquence s'étend de 10^9 Hz à $3 \cdot 10^{11}$ Hz. L'énergie des photons va de 10^{-5} eV à 10^{-3} eV. Ces ondes sont utilisées dans les radars et d'autres systèmes de communication, les téléphones cellulaires, les fours à micro-onde,...

1.3.1.3 Le spectre infrarouge

Celui-ci couvre les longueurs d'onde de 10^{-3} m à $7,8 \cdot 10^{-7}$ m. Le domaine de fréquence s'étend de $3 \cdot 10^{11}$ Hz à $4 \cdot 10^{14}$ Hz et l'énergie des photons va de 10^{-3} eV à environ 1,6 eV. Ces ondes sont produites par les molécules et les corps chauds. Elles ont de nombreuses applications dans l'industrie, la médecine et l'astronomie.

1.3.1.4 Le spectre visible ou lumière

C'est une bande étroite formée par des longueurs d'onde auxquelles notre rétine est sensible. Elle s'étend de $7,8 \cdot 10^{-7} \text{M}$ à $3,8 \cdot 10^{-7} \text{M}$ en longueur d'onde et en fréquence de $4 \cdot 10^{14} \text{Hz}$ à $8 \cdot 10^{14} \text{Hz}$. L'énergie des photons va de $1,6 \text{eV}$ à $3,2 \text{eV}$.

1.3.1.5 Les rayons ultra-violets

Ces ondes vont de $3,8 \cdot 10^{-7} \text{M}$ à environ $6 \cdot 10^{-10} \text{M}$ en longueur d'onde et de $8 \cdot 10^{14} \text{Hz}$ à environ $3 \cdot 10^{17} \text{Hz}$ en fréquence.

L'énergie des photons varie de 3eV à $2 \cdot 10^3 \text{eV}$. Ces ondes sont produites par des atomes et des molécules dans des décharges électriques.

1.3.1.6 Les rayons X

Cette partie du spectre électromagnétique s'étend de 10^{-9}M à environ $6 \cdot 10^{-12} \text{M}$ en longueur d'onde et entre $3 \cdot 10^{17} \text{Hz}$ et $5 \cdot 10^{19} \text{Hz}$ en fréquence. L'énergie des photons varie de $1,2 \cdot 10^3 \text{eV}$ à $2,4 \cdot 10^5 \text{eV}$.

1.3.1.7 Les rayons gamma

Ces ondes électromagnétiques sont d'origine nucléaire. Elles recouvrent la limite supérieure du spectre des rayons X. Leurs longueurs d'ondes s'étendent de 10^{-10}M à 10^{-14}M ce qui correspond à un domaine de fréquence de $3 \cdot 10^{18} \text{Hz}$ à $3 \cdot 10^{22} \text{Hz}$. Les énergies des photons vont de 10^4eV à environ 10^7eV .

1.3.2 Diodes électroluminescentes (DEL)

Une DEL est une jonction PN polarisée en direct. Les électrons ou les trous qui constituent les porteurs majoritaires sont injectés dans le voisinage de la jonction. Leur recombinaison donne lieu à une émission de la lumière (figure 1.3)

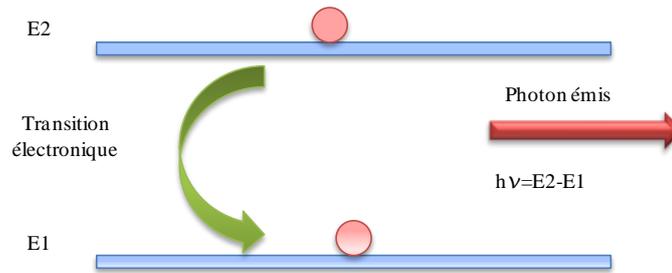


Figure 1.3: Emission spontanée.

Un atome dans un état excité peut se désexciter vers un état intérieur, même en l'absence de rayonnement. Le rayonnement est émis dans une direction aléatoire. Ce processus est l'émission d'un photon d'énergie $h\nu$ dans une direction aléatoire (figure 1.3).

1.3.3 La diode laser (DL)

1.3.3.1 Principe du laser

Pour obtenir l'effet laser on se base sur trois éléments essentiels:

- Un milieu amplificateur.
- Une source externe d'énergie: le pompage.
- Une cavité résonante (cavité Fabry-Pérot).

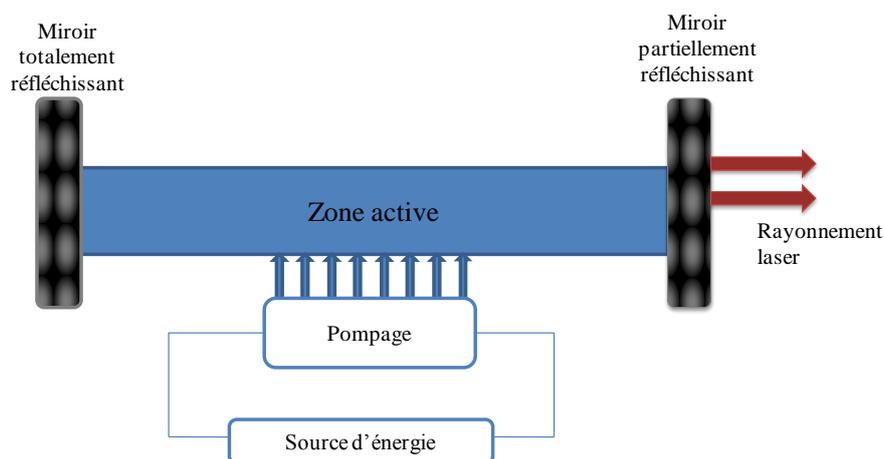


Figure 1.4: Fonctionnement d'un laser.

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

Les diodes lasers sont des composants primordiaux de l'optoélectronique d'aujourd'hui. Elles ont connu un développement important durant les deux dernières décennies. Elles ont

bénéficié du développement des télécommunications par fibre optiques et de l'émergence de l'interconnexion optique.

Les diodes laser se basent sur des processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière.

L'absorption: L'atome peut passer d'un état à un état supérieur, les fréquences sont définies par: $h\nu = E_2 - E_1$ où $E_2 > E_1$.

Ce processus peut être interprété comme l'absorption d'un photon de rayonnement faisant passer l'atome du niveau d'énergie E_1 vers le niveau d'énergie E_2 (figure 1.4(a)).

L'émission stimulée : Un atome dans l'état supérieur peut se désexciter vers le niveau inférieur sous l'effet d'une onde électromagnétique, qui sera alors amplifiée. L'émission d'un photon d'énergie $h\nu$ va s'ajouter au rayonnement (figure 1.4(b)).

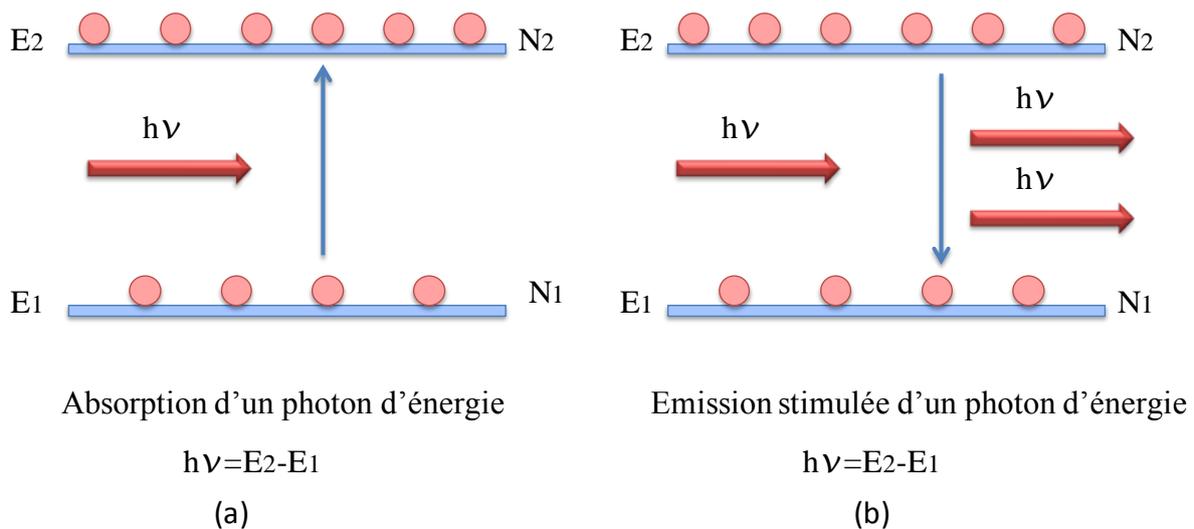


Figure 1.5: Processus d'absorption et de l'émission stimulée.

L'émission spontanée apporte une contribution négligeable, car elle est omnidirectionnelle et seule une très petite fraction à la direction et le sens de l'onde incidente. De plus, ces ondes ne sont pas en phase. A l'équilibre thermique, l'absorption l'emporte sur l'émission induite. Par contre, en cas d'inversion de population, il est possible d'avoir une émission, le milieu est alors amplificateur. Dans les conditions d'équilibre thermique, le niveau d'énergie le plus bas E_1 Contient plus d'électron que le niveau supérieur.

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

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

1.3.3.2 Laser Fabry-Pérot

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

La réalisation pratique d'un résonateur de Fabry-Pérot est relativement simple dans le cas des diodes à semi-conducteurs. En effet, l'indice de réfraction des semi-conducteurs est très élevé par rapport à l'indice de l'air.

La différence d'indice entre un semi-conducteur et l'air implique une réflexion partielle d'environ 40% de tout faisceau perpendiculaire. Ainsi la surface du semi-conducteur constitue un miroir semi-transparent naturel.

1.4 Définition d'une fibre optique

Une fibre optique est un mince filament cylindrique en verre qui permet de guider une onde électromagnétique.

Elle est très utilisée en télécommunications car elle permet des transmissions sur de grandes distances et sur une large bande de fréquences.

La fibre optique consiste en une partie centrale, le cœur d'indice de réfraction n_1 il transporte le signal optique. Entourée par une seconde partie qui est la gaine optique d'indice de réfraction n_2 , elle évite que le signal optique sorte du cœur. Un autre exemple de guide d'onde est le câble coaxial qui est utilisé pour transporter par exemple les signaux de télévision jusqu'à nos résidences [3].

La fibre optique est souvent recouverte d'un revêtement protecteur qui ne joue aucun rôle dans le guidage de la lumière (figure 1.6).

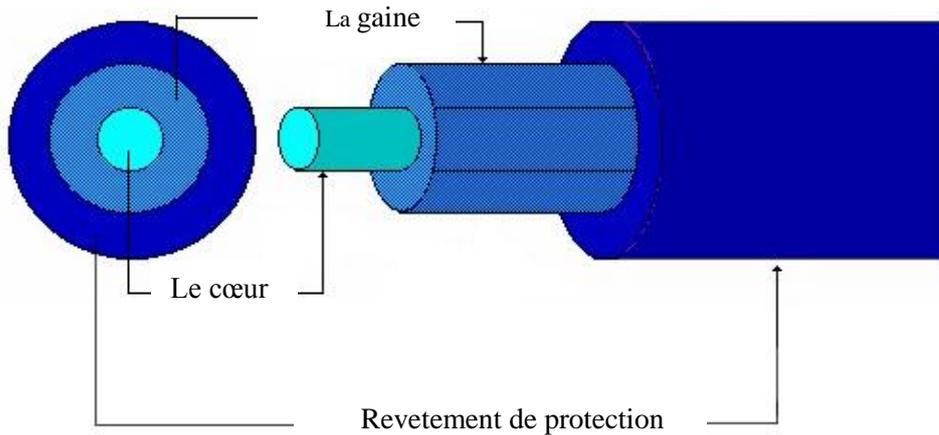


Figure 1.6: Structure d'une fibre optique.

La fibre optique est composée de trois parties principales [3]:

- **Le cœur:** Composé de silice, de quartz fondu ou de plastique. C'est la couche la plus importante en termes de transmission optique qui permet de guider les informations d'un bout à l'autre de la fibre sans trop de pertes.

- **La gaine optique:** Qui est composée des mêmes matériaux que le cœur. Son indice de réfraction est inférieur à celui du cœur (différence de quelques millièmes), ce qui permet de réfléchir la lumière entièrement de multiples fois à l'interface cœur-gaine (phénomène de réflexion totale interne). La gaine optique n'étant pas destinée à transmettre la lumière, il n'est pas nécessaire que ses propriétés optiques soient aussi bonnes que celles du cœur. Le cœur et la gaine constituent la partie optique qui canalise et propage la lumière.

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

1.4.1 Avantages et inconvénients de la fibre optique

Contrairement à d'autres supports de transmission la fibre optique présente un inconvénient qui est le coût d'exploitation élevé mais offre de nombreux avantages pour les télécommunications:

- Très faibles pertes de transmission.
- Bande passante très grande.

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

1.4.2 Principe de fonctionnement de la fibre optique

Lorsqu'un rayon lumineux est injecté dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre, en empruntant un parcours en zigzag (figure 1.7).

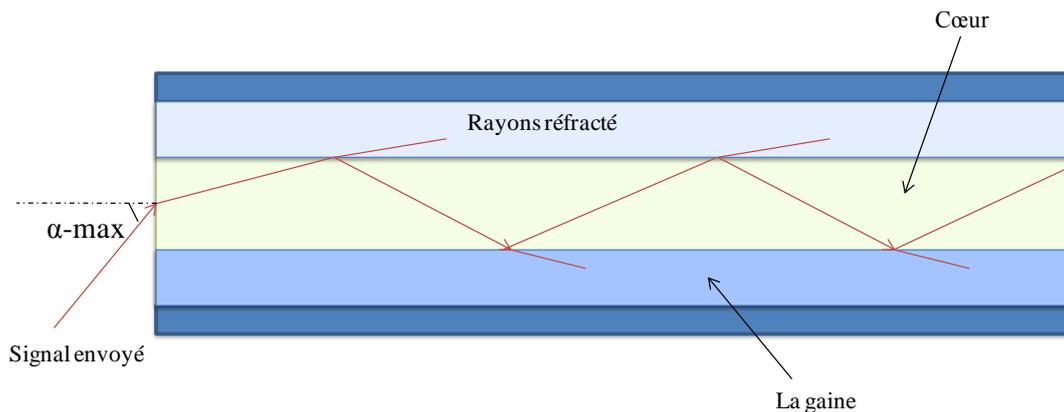


Figure 1.7: Le guidage de la lumière dans une fibre optique.

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 [4]:

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

1.4.3 Différents types de fibres optiques

Il existe deux types de fibre optique:

- Fibre optique monomode.
- Fibre optique multimode.

1.4.3.1 Fibre optique multimode

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

Il y a deux types de fibre multimode: Saut d'indice et gradient d'indice.

1.4.3.1.1 Fibre optique multimode à saut d'indice

L'indice de réfraction change brutalement à l'interface cœur-gaine, c'est le « saut » qui provoque la réflexion totale des rayons. Le guidage de la lumière dans le cœur se fait en dent de scie. L'importante section du cœur provoque une grande dispersion des signaux la traversant, ce qui génère une déformation du signal reçu. La gaine joue un rôle actif dans le guidage de la lumière (figure 1.8).

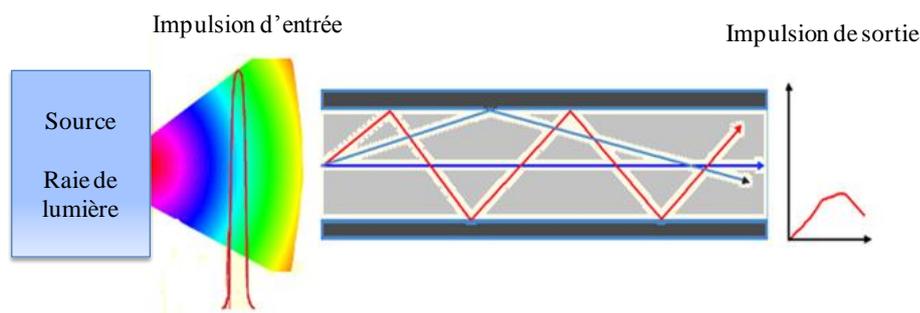


Figure 1.8: Fibre optique multimode à saut d'indice.

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.

Les fibres optiques multimode sont utilisées sur de courtes distances car le signal est modifié.

1.4.3.1.2 Fibre optique multimode à gradient d'indice

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

La gaine ne joue pas un rôle actif mais élimine les rayons trop inclinés (figure 1.9).

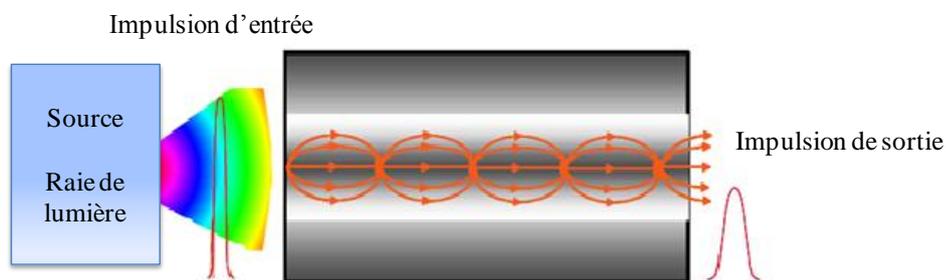


Figure 1.9: Fibre optique multimode à gradient d'indice.

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

Les fibres à gradient d'indice sont les plus utilisées pour les moyennes distances.

1.4.3.2 Fibre optique monomode

La fibre monomode a pour particularité de posséder un cœur très fin, le fait que le cœur soit si petit oblige le signal lumineux à se propager en ligne directe. La dispersion modale devient quasiment nulle, il y'a qu'un seule mode de propagation (figure 1.10)

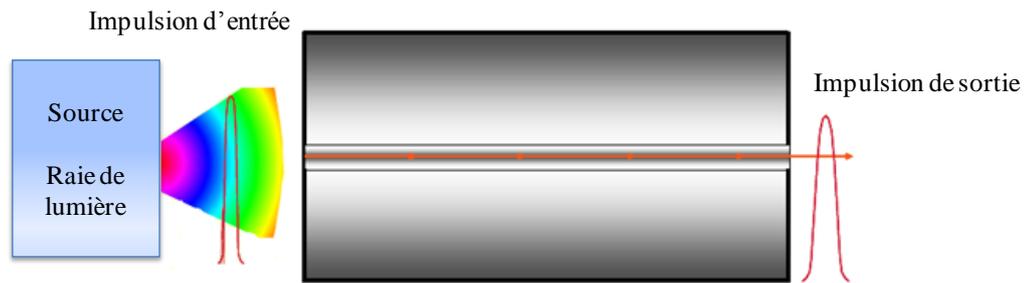


Figure 1.10: Fibre optique monomode.

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

Ce type de fibre est utilisé pour des transmissions à longue distance.

1.4.4 Comparaison entre les différents types de fibres optiques

Le tableau 1.1 présente un récapitulatif comparatif des avantages, des inconvénients et de l'application pratique entre les différents types de fibres optiques [3].

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, élevées du signal	Communications courtes distances, 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	Bande passante très grande, atténuation très faible, faible dispersion	Prix très élevé	Communications longues distances

Tableau 1.1: Comparaison entre les différents types de fibre optiques.

1.5 L'atténuation

L'atténuation ou perte de puissance transmise constitue l'un des principaux problèmes que l'on rencontre dans un système de transmission. Elle traduit l'affaiblissement du signal au cours de sa propagation à la suite de phénomènes d'absorption, de diffusion et de rayonnement. Chaque mécanisme de perte contribue de façon indépendante à l'atténuation totale dans la fibre.

On définit un coefficient d'atténuation α pour une ligne de transmission de longueur L par:

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

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



Figure 1.11: L'atténuation dans une fibre optique.

Le support du signal optique numérique est la fibre optique. Le signal subit au cours de sa propagation dans la fibre des pertes liées à l'atténuation de la fibre de transport.

L'atténuation dépend en particulier de la longueur d'onde des impulsions lumineuses la figure 1.12 représente les pertes dans une fibre optique monomode [5].

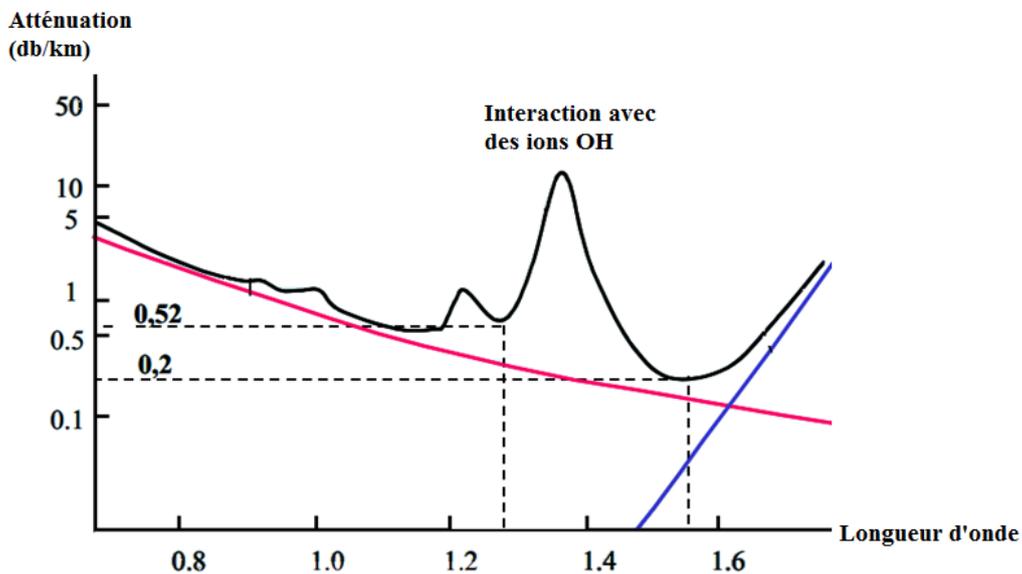


Figure 1.12: Les pertes de propagation de la fibre optique.

L'atténuation provient de plusieurs phénomènes :

- Diffusion de Rayleigh: Ce sont des pertes inévitables que l'on retrouve dans toutes les fibres. Dans les fibres dites de bonne qualité, la diffusion de Rayleigh est proportionnelle à $1/\lambda^4$.

- L'absorption par les ions OH: Principalement présents dans les fibres optiques, les ions hydroxyles peuvent, en fonction de leur concentration, créer une absorption supplémentaire significative autour de la longueur d'onde de $1,38\mu\text{m}$.

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

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

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

1.6 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 [5].

Ces photons, émis de façon spontanée, de manière non cohérente, constituent le bruit de l'amplification optique. L'ensemble des photons, originels ou pas, subissent une série d'amplifications. Les photons spontanés seront aussi amplifiés, ce qui définit la source de bruit appelée ESA (Emission Spontanée Amplifiée). Il existe plusieurs type 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).

1.6.1 Amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA)

L'amplificateur à fibre dopée EDFA (Erbium Dope Fiber Amplifier) est considéré comme un dispositif clé de tous les réseaux actuels de télécommunication optiques, il permet d'amplifier simultanément des longueurs d'ondes, et de compenser les pertes subies lors de la propagation.

Un amplificateur EDFA transforme l'énergie fournie par un système extérieur (pompe) et la restitue au signal pour l'amplifier.

Il se compose essentiellement d'une fibre active constituant le milieu amplificateur, d'une pompe laser, multiplexeur et isolateur (figure 1.13).

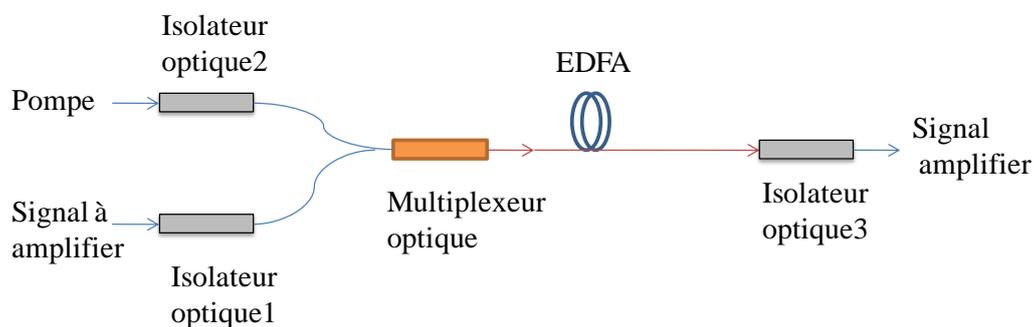


Figure 1.13: Schéma synoptique d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium.

- La pompe laser est un élément essentiel de l'amplificateur optique. C'est sur sa puissance qui est basée l'inversion de population favorisant l'amplification optique. La pompe est un laser à semi-conducteur, capable de produire de forte puissance en sortie avec un faisceau monomodale pour garantir un bon couplage dans la fibre monomode. Les longueurs d'onde de pompe choisis sont 980 et 1480 nm, un pompage simultané à ces longueurs d'onde leur offre un avantage propre: un bruit réduit à 1480 nm et une puissance de saturation élevée avec un bon rendement à 980 nm.

- Le multiplexeur optique permet de coupler, d'injecter simultanément dans la fibre amplificatrice un signal avec celui de la pompe respectivement aux deux longueurs d'onde.

Ce dispositif doit présenter une perte d'insertion faible aux deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système.

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

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

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

1.6.2 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 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant. Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale.

De nouveaux amplificateurs optiques tels que les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de télécommunications. Ils sont basés sur le principe de la diffusion Raman, qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon.

Ce phénomène peut être spontané, s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal. Ainsi, dans le cas de l'amplificateur Raman, l'onde incidente, dite onde de pompe, stimulée par l'onde signal, va créer une autre onde signal, et un phonon. L'amplification est alors réalisée.

Comme pour les autres amplificateurs optiques, celui-ci a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG sont les plus souvent utilisés dans ce cas, en émettant une longueur d'onde inférieure à celle du signal. L'avantage principal de ces lasers est qu'ils sont accordables sur une très grande plage de longueurs d'onde.

Le gain obtenu peut atteindre quelques dizaines de décibels, mais une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître. La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman.

1.7 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. À la sortie de la fibre, on constate alors un élargissement de l'impulsion dans le domaine temporel (figure 1.14).

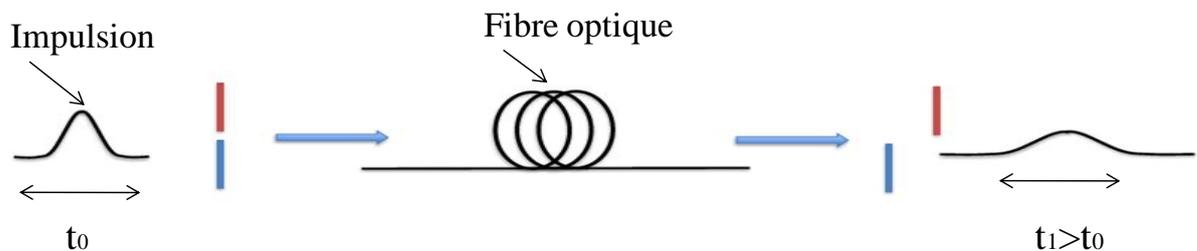


Figure 1.14: Phénomène de la dispersion dans une fibre optique.

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[6].

1.7.1 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) (figure 1.15).

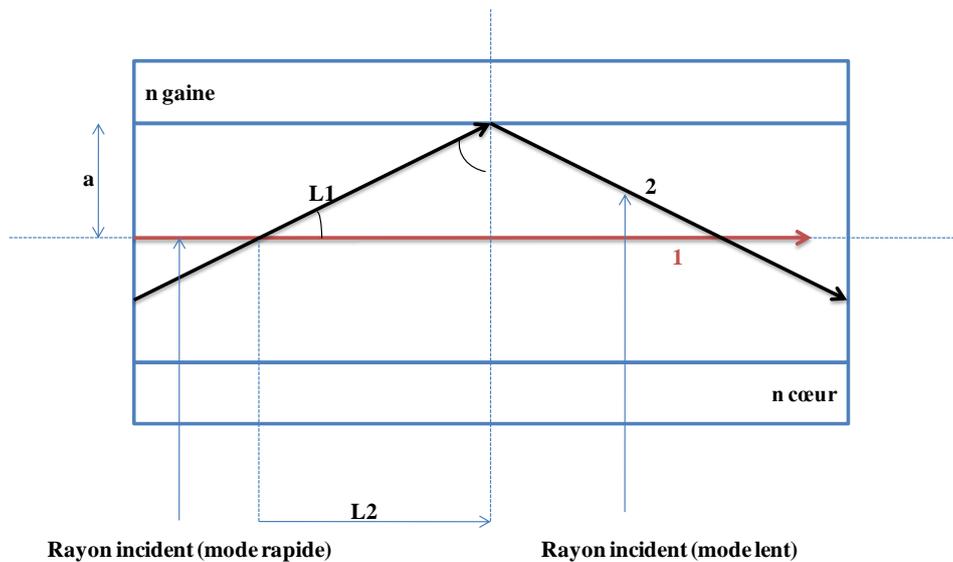


Figure 1.15: Dispersion modale, propagation d'un mode rapide et d'un mode lent.

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.

1.7.2 Dispersion chromatique

Dans les fibres optiques monomodes dont le profil est à symétrie de révolution, la dispersion chromatique est la cause principale de l'élargissement d'impulsion.

Elle résulte de la somme de deux effets: la dispersion propre au matériau D_{mat} et la dispersion du guidage $D_{guidage}$.

$$D_{chrom} = D_{mat} + D_{guide} \quad (1.4)$$

1.7.2.1 Dispersion matérielle

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

1.7.2.2 Dispersion du guidage

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

La figure 1.16 montre la courbe de la dispersion chromatique en (ps/nm.km), en fonction de la longueur d'onde λ en (nm). Calée sur les fenêtres de transmission actuelles, dans la silice et sur les régions proches de l'infrarouge.

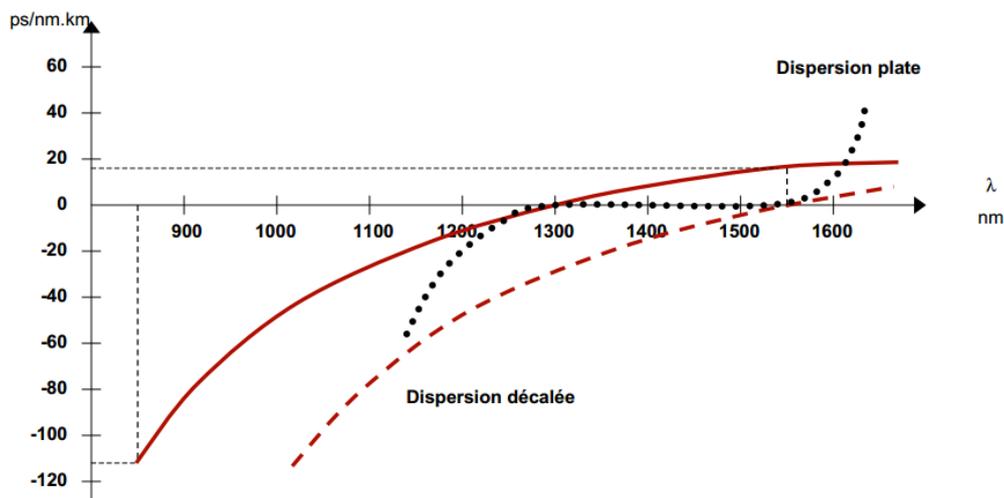


Figure 1.16: La dispersion chromatique.

On voit bien que la dispersion est négative aux longueurs d'onde courtes, nulle à la longueur d'onde à peu près 1.3 μm et positive aux longueurs d'onde plus larges.

1.7.3 Dispersion de polarisation

Le mode fondamental d'une fibre optique monomode LP01 est composé de deux modes électromagnétiques dégénérés caractérisés par deux directions de polarisation perpendiculaires (figure 1.17).

Dans une fibre monomode «idéale», ces deux modes, notés $LP01^X$ et $LP01^Y$, se propagent à des vitesses identiques. Lorsque la fibre présente une biréfringence, qui peut être due à des contraintes (élongation, courbures, micro courbures ...), on observe une levée de la dégénérescence des constantes de propagation entre les deux modes. Les deux composantes du mode se propagent alors à des vitesses différentes [7].



Figure 1.17: Représentation des modes dégénérés du mode LP01.

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.

1.8 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 deux techniques de modulation: la modulation directe et la modulation externe [5].

1.8.1 La modulation directe

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement: la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée modulation directe, ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser (figure 1.18).

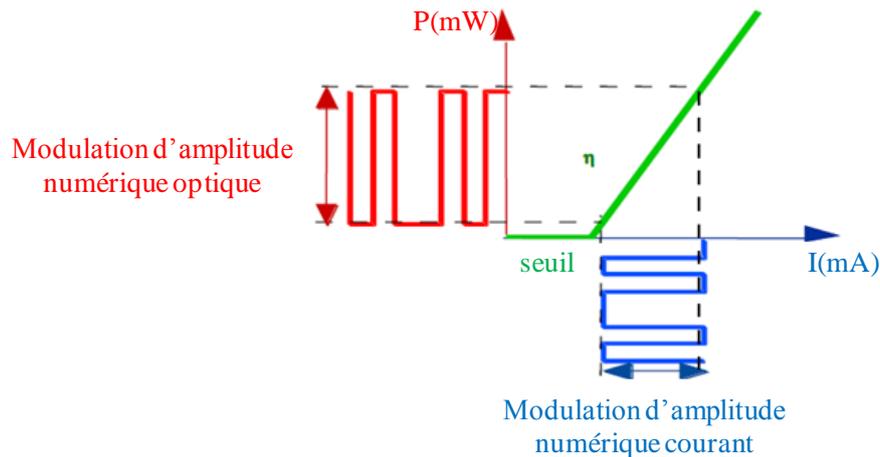


Figure 1.18: Modulation directe d'une diode laser.

Cette solution de modulation directe (figure 1.18) requiert assez peu de composants. En dehors de la source optique, le laser, seuls un générateur de courant et un driver sont nécessaires (figure 19). Le premier va émettre à un débit donné une séquence de données, expression de l'information à transmettre. Le rôle du driver est de commander la source optique au niveau des puissances émises (en fixant les valeurs du courant d'alimentation). Pour cela, il modifie, transforme les niveaux du courant issu du générateur.

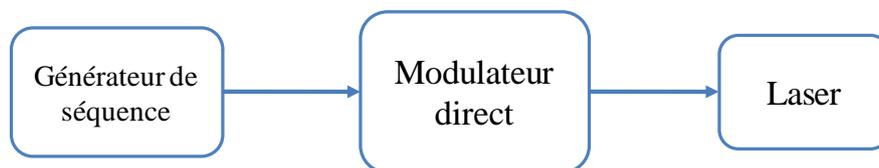


Figure 1.19: Schéma de la modulation directe.

1.8.2 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 plus le courant d'alimentation à l'entrée.

Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents dans le signal optique [5].

La modulation externe est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable qui est le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe $v(t)$, modulée et représentative de l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie.

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

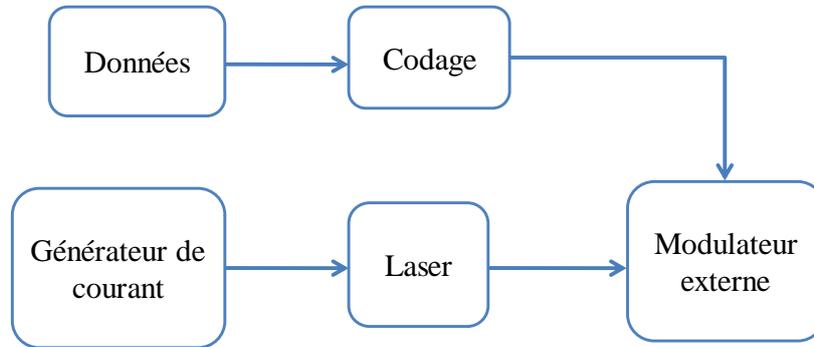


Figure 1.20: Schéma de la modulation externe.

1.8.2.1 Modulateur de Mach-Zehnder

Le modulateur de Mach-Zehnder est un interféromètre constitué d'un bras de référence et d'un bras dans lequel la version de phase est produite par effet électro-optique. Ces deux bras sont deux guides parallèles et de longueur égale (figure 1.21).

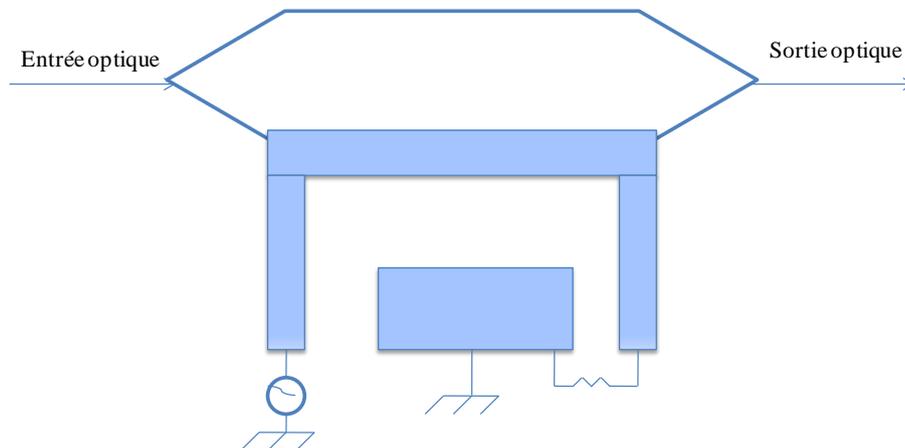


Figure 1.21: Interféromètre de Mach-Zehnder.

Les modulateurs de Mach-Zehnder sont en majorité réalisés sur des substrats LiNbO₃ qui permettent de réaliser des guides à très faibles pertes ($< 0,2$ dB/cm) [8].

Plusieurs critères de comparaison existent entre les composants en LiNbO₃ et à semi-conducteur.

Le composant en LiNbO₃ présente les avantages suivants :

- Montage plus facile de la fibre amorce, directement collée en bout de guide.
- Pertes de couplage faibles entre fibre et guide en niobate de lithium parce que le guide présente des caractéristiques similaires à celles des fibres monomodales.

Mais le composant en niobate de lithium présente aussi des inconvénients :

- Impossibilité d'intégration monolithique avec des composants d'émission.
- Encombrement important.
- Manque de stabilité dans le temps (dérive lente du point de fonctionnement).

1.9 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 de filtre.

1.9.1 Le photodétecteur

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation.

Ce rôle est tenu par le photodétecteur, qui se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité : il doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10 Gbits/s voire même 40 Gbits/s. La troisième propriété demandée, est un apport minimum de bruit.

Afin de satisfaire à ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles. Dans le paragraphe qui suit, nous rappellerons le principe de photodétection.

1.9.1.1 Principe de la photodétection

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres [5].

Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou. Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher les électrons de retomber dans leur état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, le photon est absorbé et les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés.

Dans ce qui va suivre on va étudier plus précisément deux exemples de photodétecteurs: la photodiode PIN et la photodiode à avalanche (PDA).

1.9.1.2 Les photodiodes PIN

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

Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large d'où l'intérêt de la photodiode PIN (figure 1.22).

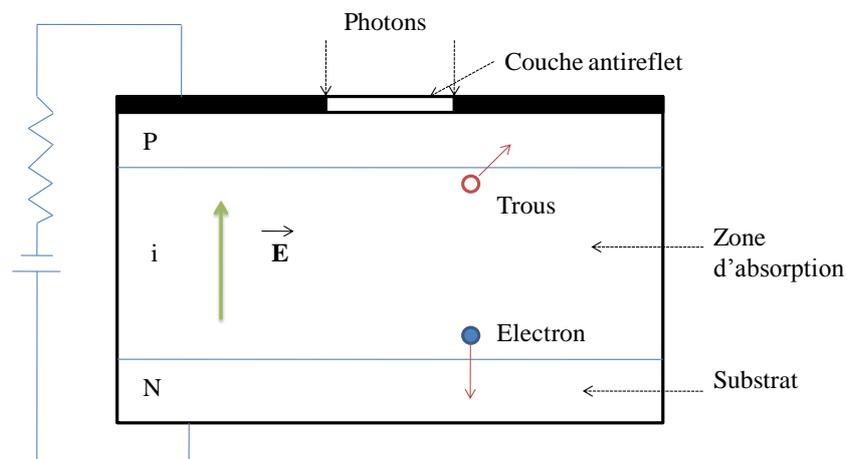


Figure 1.22: Photodiode PIN.

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

1.9.1.3 Les photodiodes à avalanche (PDA)

Afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, l'idée d'utiliser le phénomène de multiplication interne pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photo-électron, mais plusieurs a été soulevée, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à une puissance optique incidente donnée (figure 1.23).

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

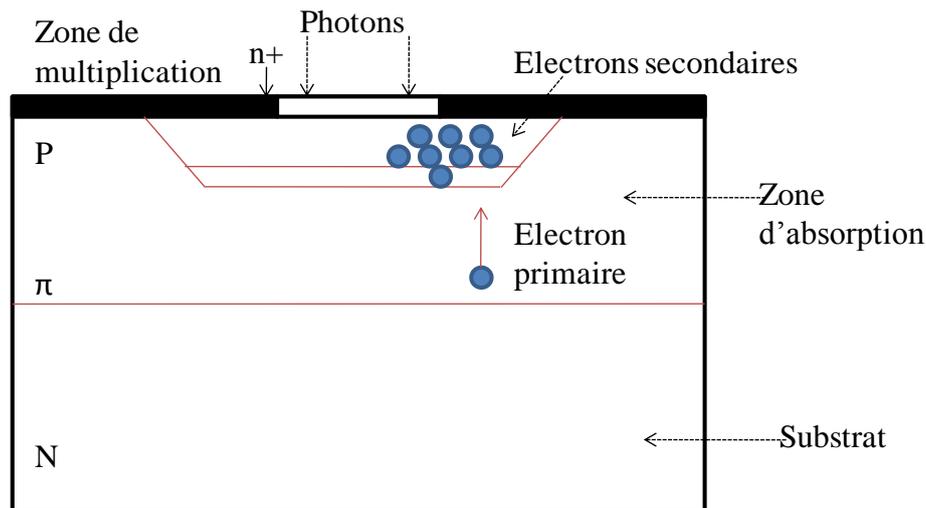


Figure 1.23: Photodiode à avalanche PDA

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.

1.10 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 les différents systèmes et applications.

Chapitre 2

Radio sur Fibre

2.1 Introduction

L'invention et le développement du laser à semi-conducteur et les technologies de fibres optiques à partir des années 1960 a donné lieu à la prolifération de communication à fibre optique et les déploiements de réseaux, en particulier au cours des deux dernières décennies du XXe siècle [9].

Ces déploiements ont procuré un avantage des fibres optiques par rapport au câble coaxial à faibles pertes qui avaient été élaborés pour les moyens de transmission longues distances en raison de la réduction du nombre de répéteurs nécessaires.

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.

Dans ce chapitre, l'accent est mis sur la radio et la technologie de la fibre. En contraste avec les communications par fibre optique. L'idée est que la technologie Radio sur Fibre optique rend possible la centralisation des fonctions de traitement du signal RF « Radio Fréquence » dans un emplacement partagé en utilisant la fibre optique.

2.2 Le concept d'un système Radio sur Fibre

Le principe fondamental de la transmission de la Radio sur Fibre est qu'elle implique le transport de signaux radio analogiques par l'intermédiaire d'une liaison par fibre optique, le signal radio est utilisé pour moduler l'onde lumineuse, et non le signal numérique en bande de base comme cela est courant dans la plupart des liaisons de communication optique.

L'utilisation du signal radio signifie que la liaison est de nature analogique, et son rendement doit être caractérisé en tant que tel [9].

La figure 2.1 montre des schémas d'une liaison radio sur fibre et d'une liaison bande de base. La liaison optique numérique peut être utilisée pour comprendre les différences et les principaux avantages et inconvénients de chaque approche.

Les schémas représentent uniquement les blocs fonctionnels de base, par exemple, l'amplification et le filtrage qui serait nécessaire dans les deux approches ne sont pas représentés.

Pour la liaison Radio sur Fibre représentée sur la figure 2.1 (a), apparaissent les données de protocoles de couche supérieure, par exemple le réseau pour la liaison de données des couches, est transmis à un protocole de couche physique pour le traitement du signal en bande de base. La figure 2.1 (b) montre des fonctions telles que le codage d'erreurs ou la modulation pour le système particulier.

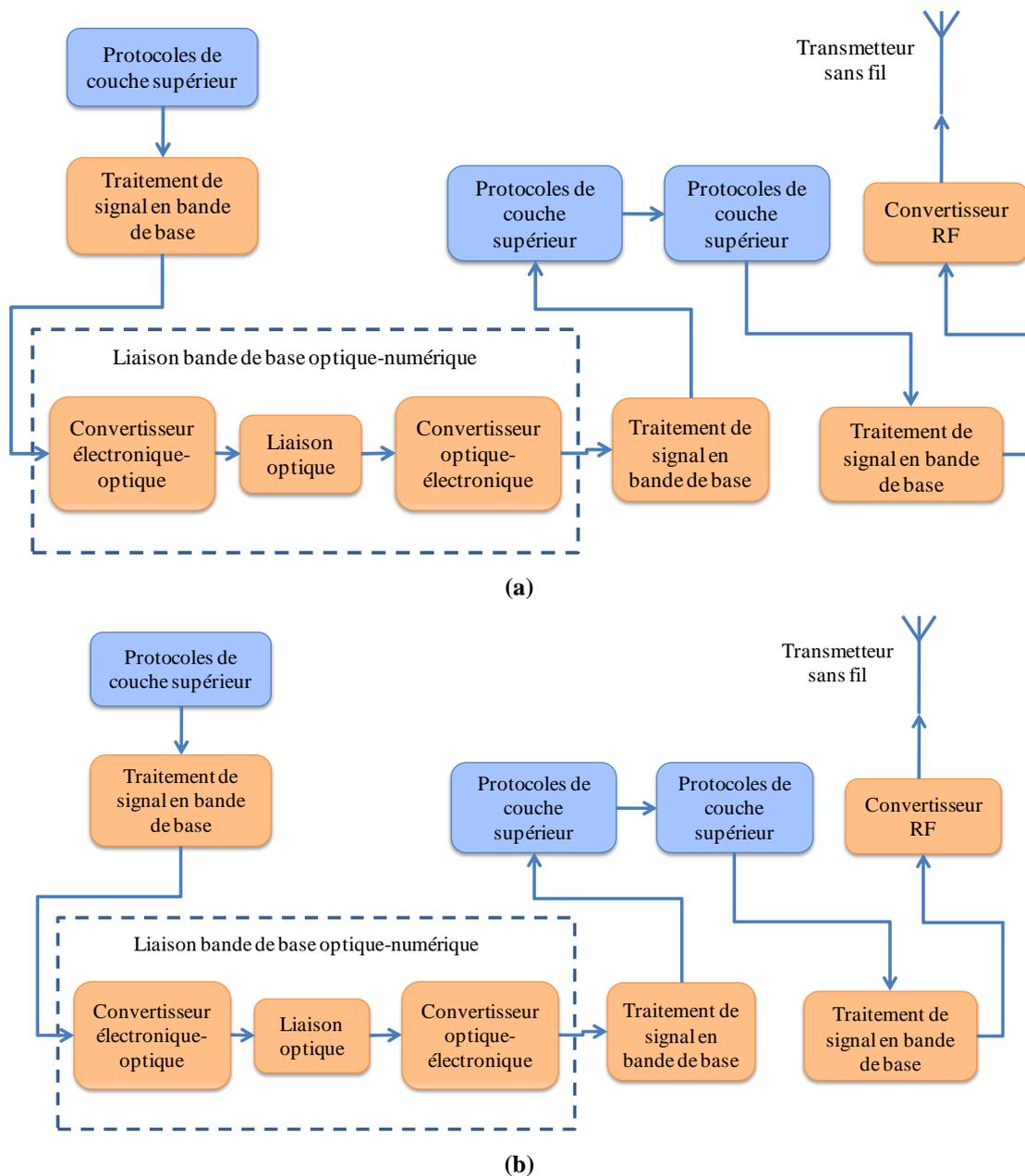


Figure 2.1: Comparaison de fibre de série et transmission sans fil des signaux utilisant (a) la Radio sur Fibre et (b) transport des fibres en bande de base numérique.

La fréquence radio (RF) est l'étape de conversion vers le haut débit. Cette fréquence est appliquée à la liaison optique à l'aide du convertisseur électronique-optique (généralement un type de transmetteur laser). A l'extrémité de la réception, le signal RF est récupéré à partir du convertisseur optique-électronique (photodiode). Si la liaison radio sur fibre est conçue comme un seul lien de communication, on aura à effectuer les fonctions inverses de conversion par diminution de la bande de base, la récupération du signal, le décodage/démodulation en bande de base, en passant à travers les couches supérieures du protocole.

Comme un lien de communication unique, la liaison Radio sur Fibre peut être comparée à une liaison en bande de base numérique, liaison optique de la figure 2.1 (b), en ignorant les blocs dans l'émetteur sans fil de droite. Dans le cas de la liaison numérique en bande de base optique, le convertisseur RF et les étapes de conversion ne sont pas nécessaires, et la liaison fonctionne sur des principes numériques uniquement. En règle générale, les schémas de modulation plus simples sont utilisés, de sorte que les blocs de traitement en bande de base sont simples et la performance est sans tension, bien que cela puisse se faire au détriment de l'augmentation de la bande passante et des composants optoélectroniques de vitesse supérieure.

En réalité, l'utilisation de l'approche de la Radio sur Fibre serait souhaitable, car un signal sans fil est transporté vers un emplacement distant. Dans le cas de la figure 2.1 (a), le signal RF récupéré à partir du convertisseur opto-électronique n'est pas diminué en fréquence, mais il est transmis par une antenne sur le trajet radioélectrique (interface radio). Si la transmission en bande de base numérique devait être utilisée, le système comprend alors des blocs de l'émetteur sans fil illustré à la Figure 2.1 (b). Le traitement en bande de base du signal sans fil, par exemple dans la génération de signaux OFDM-QAM d'un système Wifi, serait alors réalisée, suivie par une conversion ascendante RF à la fréquence radio souhaitée ainsi que la transmission radio.

2.3 Avantages et inconvénients de la technologie RoF

La technologie RoF présente les avantages suivants [10]:

a. Faible atténuation: La distribution des signaux radio-fréquence sous forme électrique, en espace libre ou par le biais de lignes de transport est coûteuse et peut être fortement limitée en termes de portée. En effet, les pertes de propagation en espace libre sont

d'autant plus importantes que la fréquence de la porteuse radio est élevée (les pertes sont inversement proportionnelles à la longueur d'onde). Dans les lignes de transmission, l'impédance augmente avec la fréquence impliquant des pertes d'autant plus importantes que la fréquence est élevée. Par conséquent, la distribution des signaux radio à haute fréquence sous forme électrique sur des longues distances nécessite des équipements de régénération coûteux. Une solution à ce problème consiste à distribuer optiquement les signaux en bande de base ou à des fréquences intermédiaires (FI) du CS (Control Station) vers la BS (Base Station). Au niveau de la station de base, les signaux sont convertis à une haute fréquence (RF) avant d'être amplifiés puis rayonnés. Ainsi, des oscillateurs locaux de hautes performances seraient requis pour la mise en œuvre de la conversion de fréquence au niveau de chaque station de base. Toutefois, étant donné que la fibre optique offre une très faible perte, la technologie RoF peut être utilisée pour obtenir à la fois une distribution de signaux sur de longues distances.

b. Large bande passante: Les fibres optiques offrent énormément de bande passante comme on l'a mentionné au chapitre 1. Il existe trois principales fenêtres de transmission qui offrent peu d'atténuation, à savoir 850 nm, 1310 nm et 1550 nm. Pour une seule fibre optique monomode, la largeur de bande combinée de ces trois fenêtres excède 50THz. Toutefois, les systèmes commerciaux actuels utilisent seulement une fraction de cette capacité (1,6THz). Mais les développements sont toujours en cours afin d'exploiter davantage la capacité de la fibre optique en termes de bande passante.

L'énorme bande passante offerte par les fibres optiques a d'autres avantages en dehors de la grande capacité de transmission des signaux micro-ondes. La grande bande passante permet une haute vitesse de traitement du signal ce qui est plus difficile, voir impossible, de faire en électronique. Certaines fonctions nécessaires au traitement des signaux RF telles que le filtrage, le mélange pour la conversion de fréquence peuvent être mises en œuvre dans le domaine optique. L'utilisation de l'énorme bande passante offerte par les fibres optiques est gravement entravée par la limitation de la largeur de bande des systèmes électroniques, qui sont les principales sources et récepteurs de transmission de données.

c. Immunité aux interférences des ondes RF: L'immunité aux interférences électromagnétiques est un avantage qu'offrent les fibres optiques, en particulier vis-à-vis des micro-ondes. Il en est ainsi parce que les signaux sont transmis sous forme lumineuse à

travers la fibre optique. En raison de cette immunité, les fibres sont préférables aux câbles électriques, même pour de courtes connexions.

d. Facilité d'installation et d'entretien: Selon la technologie RoF, les dispositifs complexes et coûteux sont maintenus au niveau de la station de contrôle (CS) permettant de simplifier au maximum l'architecture des stations de base (BS). Dans les cas les plus simples, la BS comprend juste un photo-détecteur, un amplificateur RF et une antenne. Les équipements de modulation et de commutation sont conservés au niveau du CS de manière à être avantageusement partagés par plusieurs BS. Ce dispositif conduit à des plus petits et plus légers BS réduisant effectivement le coût d'installation et d'entretien du système.

e. Réduction de la consommation d'énergie: La réduction de la consommation d'énergie est une conséquence de la simplification des BS avec des équipements réduits rendue possible par la centralisation des fonctions complexes.

La réduction de la consommation d'énergie au niveau des BS est particulièrement avantageuse dans la mesure où celle-ci doit être parfois placée dans des endroits reculés et ne peut pas être alimentée par le réseau électrique (recours à l'utilisation de sources d'énergies renouvelable telles que les cellules photovoltaïques).

f. Multi-opérateurs et multiservices: La technologie RoF offre une souplesse opérationnelle. En fonction de la technique de génération des signaux RF, la distribution des signaux peut être faite d'une manière transparente en allouant par exemple des longueurs d'ondes à chaque technologie ou à chaque opérateur.

Ainsi, le système RoF peut être partagé entre plusieurs opérateurs pour distribuer une pluralité de services. Cette utilisation « multi-opérateurs » et « multiservices » permettant à chaque opérateur de disposer d'un nombre de longueurs d'ondes, entraîne d'énormes économies.

g. Allocation Dynamiques des Ressources: Puisque la commutation, la modulation et d'autres fonctions sont effectuées au niveau du CS, il est possible d'allouer dynamiquement les ressources aux différentes stations de base. Par exemple, dans un système RoF de distribution de trafic GSM, une capacité peut être attribuée à une zone (par exemple, centre commercial) pendant les heures de pointe, puis réaffectée à d'autres zones (par exemple à des zones peuplées dans la soirée). Cet objectif de distribution de trafic GSM peut être atteint par une allocation de longueurs d'onde optiques par multiplexage en longueurs d'ondes (WDM).

L'allocation dynamique des ressources est utilisée pour éviter l'attribution d'une capacité permanente, qui serait un gaspillage de ressources (longueurs d'ondes).

La technologie RoF présente l'inconvénient que le coût des composants optique nécessaires dans une liaison soit important. On prend comme exemple ceux d'une liaison de bande de base et d'une liaison sans fil numérique, tel que Ethernet et Wifi cartes, ils sont fabriqués en grand volume avec un résultat à faible coût. Bien que l'application de la radio sur fibre puisse sembler simple, elle peut être plus chère que les autres techniques.

2.4 Applications de la Technologie Radio sur Fibre

Les applications de la technologie RoF sont multiples et comprennent notamment les communications par satellite, communications radio-mobiles, les Services Vidéo par distribution multipoint (MVDS), mobile haut débit, les communications routières, et les réseaux locaux sans fil reliés aux réseaux optiques [10].

2.4.1 Principaux domaines d'application

Les principaux domaines d'application sont brièvement discutés ci-dessous :

Réseaux cellulaires: Les réseaux mobiles représentent un domaine d'application important de la technologie RoF. Le nombre toujours croissant d'abonnés mobiles et l'augmentation de la demande des services à large bande passante ont maintenu une pression soutenue sur les réseaux mobiles pour offrir une plus grande capacité. Par conséquent, le trafic mobile (GSM ou UMTS) peut être efficacement acheminé entre la station de contrôle et la station de base en exploitant les avantages de la fibre optique.

Communications par satellite: Les communications par satellite constituent une première application de la technologie RoF. Dans ce cas, des liens optiques de courte distance (inférieure à 1 km) fonctionnant à des fréquences comprises entre 1 GHz et 15 GHz sont utilisés. Ainsi, les équipements à haute fréquence peuvent être centralisés.

Une seconde application dans le domaine satellitaire concerne la commande à distance des stations terrestres dont les antennes doivent être en dehors d'une zone de contrôle. Grâce à la technologie RoF, les antennes peuvent être situées à plusieurs kilomètres de distance par rapport à la zone de contrôle, dans le but d'améliorer la visibilité du satellite ou de réduire les interférences avec d'autres systèmes terrestres. Les équipements de commutation peuvent

également être placés de façon appropriée pour des raisons de coût des locaux, sans avoir besoin d'être à proximité de la station d'antennes.

Système de distribution vidéo: L'un des principaux domaines d'application prometteurs de la technologie RoF concerne les systèmes de distribution vidéo, tels que les Services de distribution vidéo multipoint (MVDS). MVDS est un système cellulaire de transmission terrestre pour vidéo (TV). Il a été initialement conçu pour faire uniquement de la diffusion sur un lien descendant, mais récemment, un canal de retour (lien montant) a été intégré afin de rendre le service interactif. MVDS peut être utilisé pour servir des zones de la taille d'une petite ville.

Les fréquences attribuées à ce service appartiennent à une bande spectrale centrée autour de 40 GHz. A ces fréquences, la taille maximale des cellules est d'environ 5 km. Pour étendre la couverture, des stations relais sont nécessaires, d'où le recours à la technologie RoF.

Services mobiles à haut débit: Le service mobile large bande (MBS) est destiné à étendre les services fixes à large bande (B-ISDN) aux utilisateurs de téléphones portables de toutes sortes. De futurs services seront développés sur le B-ISDN et les réseaux mobiles doivent également supporter ces services sur le système MBS. Ainsi, un très haut débit de l'ordre de 155 Mbps par utilisateur doit être fourni. Par conséquent, des bandes de fréquences autour de 60 GHz ont été allouées. Une bande de 62-63 GHz est attribuée pour la liaison descendante tandis qu'une autre bande de 65-66 GHz est allouée pour la transmission en liaison montante. Les cellules ont un diamètre de plusieurs centaines de mètres (microcellules). Par conséquent, une haute densité de cellules est nécessaire pour atteindre la couverture souhaitée. Les microcellules peuvent être connectées à la station B-ISDN fixe par fibre optique. L'utilisation de la technologie RoF pour générer les ondes millimétriques permettrait de simplifier l'architecture des stations de base et donc de réduire leurs coûts (fabrication et maintenance), rendant ainsi le déploiement des réseaux MBS économiquement viable.

Réseaux locaux sans fil: Comme les terminaux mobiles deviennent de plus en plus répandus, (ordinateurs, téléphones, assistants personnels numériques), la demande en haut débit mobile pour l'accès aux réseaux locaux est également à la hausse.

Cela entraînera une fois de plus l'utilisation de fréquences porteuses élevées dans le but de répondre à la demande de capacité. Par exemple, les réseaux locaux sans fil fonctionnent actuellement dans la bande ISM de 2,4 GHz permettant d'offrir un débit maximal de 11 Mbps (IEEE 802.11b). Les prochaines générations des réseaux locaux sans fil sont prêtes à offrir jusqu'à 54 Mbps, et exigent des fréquences porteuses plus élevées dans la bande des 5 GHz (IEEE 802.11g). Par contre les fréquences porteuses supérieures conduisent à des micro-cellules ou pico-cellules, et à toutes les difficultés associées à la couverture (interférences). Un bon moyen pour un meilleur rapport coût-efficacité est de contourner ce problème et de déployer la technologie RoF.

Communication routière: Les fréquences entre 63-64 GHz et 76-77 GHz ont été déjà allouées pour ce service en Europe pour fournir en continu une couverture de communication mobile sur les principaux axes routiers. En vue de répondre aux besoins de couverture du réseau routier, il est nécessaire de déployer un grand nombre de stations de base. Celles-ci peuvent être réalisées de manière simple et avec un coût faible par le biais de la technologie RoF, ce qui rend le système efficace et gérable.

La figure 2.2 présente un exemple de fonctionnement des stations de contrôle et de base par le biais de la technologie RoF pour la réalisation d'une communication routière.

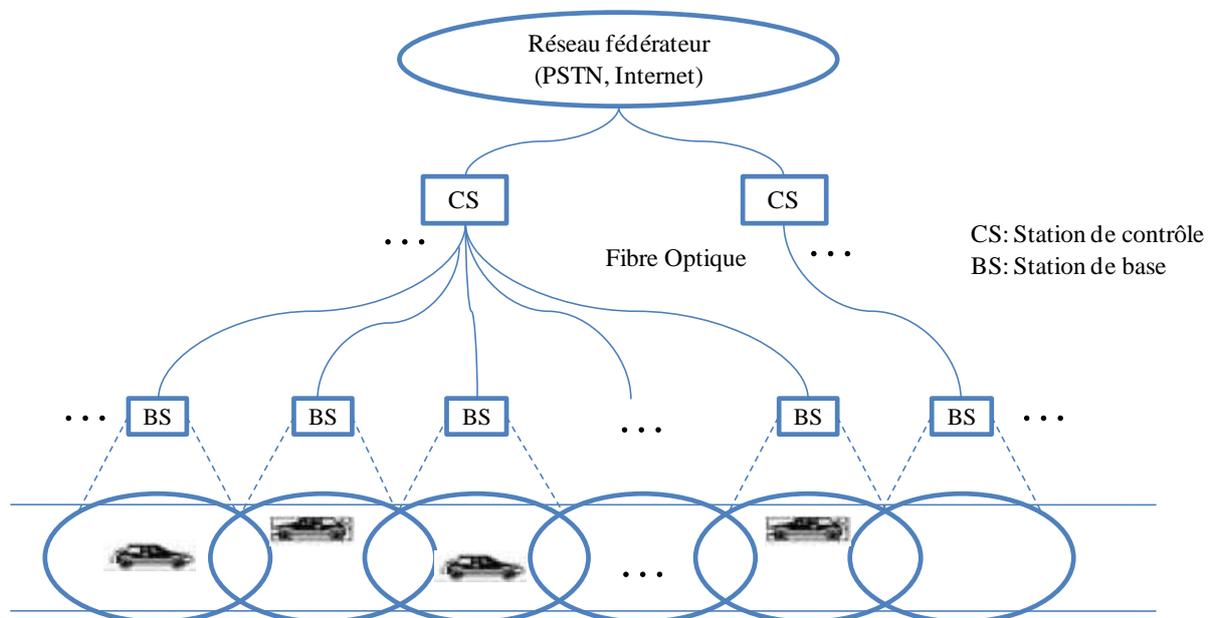


Figure 2.2 : Système de communication routier basé sur la technologie RoF.

2.5 Catégories des systèmes de Radio sur Fibre

Dans cette partie on va s'intéresser aux différents types de transport, aux différents types de modulation, aux différents types de fibre et le multiplexage de sous porteuses pour une liaison Radio sur Fibre [9]:

2.5.1 Différents types de transport

Le principe de base d'un système de Radio sur Fibre est le transport d'une onde radio analogique sur une liaison fibre optique. Des mises en œuvre précises peuvent différer et une méthode de catégorisation des liens Radio sur Fibre est dépeinte sur la figure 2.3.

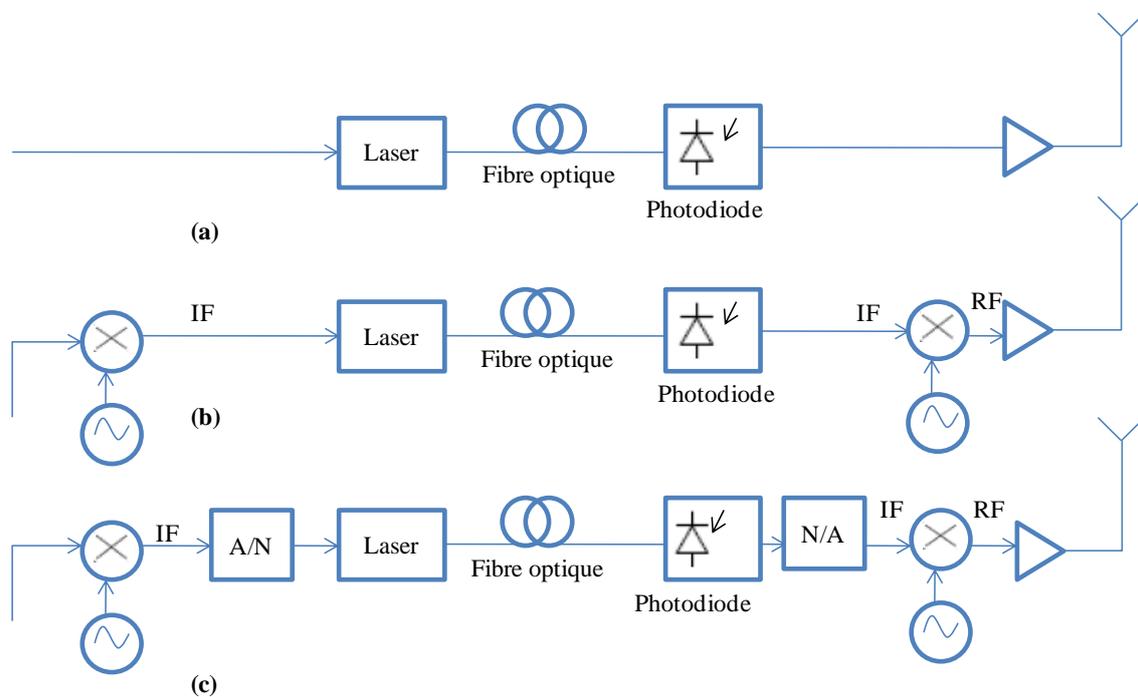


Figure 2.3: Catégories de transmission de la Radio sur Fibre:
(a) RF sur fibre, (b) IF sur fibre, (c) IF numérisé sur fibre.

Le signal RF est utilisé pour moduler un émetteur laser, dont la sortie est transportée par fibre optique et détecté par un récepteur (Figure 2.3 (a)). Après amplification, le signal RF est transmis par le biais d'une antenne en onde radio.

La figure 2.3 (b) montre une autre approche, dite «IF sur fibre». Le signal RF est transporté à une fréquence intermédiaire inférieure (FI), et ce signal est utilisé pour moduler l'émetteur laser. Après détection au niveau du récepteur par la photodiode, le signal FI est converti en signal RF ce qui est nécessaire avant la transmission sans fil. Au détriment des composants supplémentaire RF, la méthode présente l'avantage de l'utilisation d'émetteurs

laser et de récepteurs photodiodes fonctionnant à basse fréquence et réduire les effets de dégradation de fibres, plus particulièrement celui de la dispersion chromatique. Enfin, la figure 2.3 (c) montre une approche dans laquelle le signal RF est numérisé (en général après conversion en SI, afin de minimiser les besoins en bande passante de numérisation).

Il faut noter que ces catégories de transmission de la radio sur fibre: RF, IF, IF numérisé sur fibre, n'est pas le même transport de signaux en bande de base numériques qui est relayé à un protocole de transmission sans fil comme cela a été présenté sur la figure 2.1 (b). Sur la figure 2.3 (c), la forme d'onde de radio analogique est numérisée avant l'émetteur laser et ensuite reconverti en un signal analogique après réception. Par exemple, pour un signal sans fil de largeur de bande de 40MHz, on peut s'attendre à un taux de 100MHz d'échantillonnage. Ceci au prix d'une augmentation significative de la bande passante et l'ajout de la grande vitesse analogique-numérique (A/N) et des convertisseurs (N/A) numérique-analogique. L'approche numérique RF/IF sur fibre fournit une définition du niveau d'immunité à de dégradation du signal sur bruit inhérent aux approches purement analogiques RF et IF sur fibre [9].

2.5.2 Différents types de modulation

Il existe une autre méthode de classement des liaisons Radio sur Fibre dont le signal radio module l'onde lumineuse. L'approche de «modulation directe», dans laquelle le signal radio module le courant d'attaque d'un laser à semi-conducteur, est simple et généralement rentable. Dans les approches de «modulation externe», le laser fonctionne en mode continue (CW) et la modulation de l'onde lumineuse est réalisée par un composant supplémentaire, comme le montre la figure 2.4 (a). Cela peut offrir des avantages tels que, la réduction de fréquence de l'effet de chirp (la diffusion du contenu de fréquences d'ondes lumineuses en raison de la modulation directe) qui exacerbe la dispersion de la fibre, permettant la modulation de fréquence, au-delà des limitations de modulation de bande passante (généralement 2-20GHz) des lasers à semi-conducteurs, et permettant l'amélioration de la prise de lien à faible bruit. Les liaisons modulées à l'extérieur et à haute performances utilisent souvent des modulateurs de Mach-Zehnder (MZM) basés sur l'effet électro-optique, mais les modulateurs électro-absorptions (EAM) sont également très intéressants, car ils peuvent être intégrés à des lasers à semi-conducteurs. Les Modulateurs de réflexion, basés sur des principes physiques similaires à ceux des EAM ont également été étudiés, ils peuvent être combinés avec des amplificateurs à semi-conducteurs pour amplifier l'onde lumineuse

modulée et réfléchi. En général, les modulateurs réfléchissants sont d'un intérêt particulier pour la modulation à distance: dans un poste de système RoF, le signal capté par une antenne à distance peut être appliqué à un tel modulateur pour moduler l'onde lumineuse continue générée centralement, l'onde lumineuse réfléchi doit revenir à l'emplacement central, et elle est sensible au signal sans fil reçu, comme le montre la figure 2.4 (b) [9].

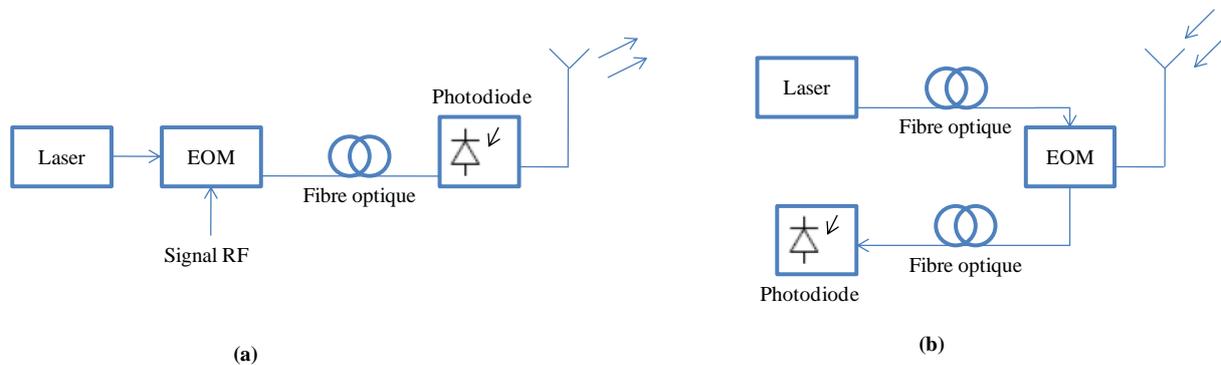


Figure 2.4: Liaisons radio sur fibre modulées extérieurement: (a) configuration de liaison descendante typique
(b) configuration de liaison montante en utilisant un modulateur à distance.

2.5.3 Les différents types de fibres optiques utilisés

Une troisième méthode de classement des liaisons Radio sur Fibre c'est le type de fibre utilisée, monomode ou multimode. Les fibres monomodes (SMF) utilisent généralement des lasers à émission latérale, comme Fabry-Pérot ou rétroaction répartie (DFB) de semi-conducteurs, qui peuvent coupler la lumière efficacement dans le cœur de la fibre. Les fibres multimodes (MMF) sont considérées comme les plus faciles à manipuler et ont été favorisée pour les applications à courte distance; elles ont tendance à utiliser des diodes électroluminescentes (DEL) au début, mais la nécessité d'une augmentation de taux de données les a amenées à l'utilisation des lasers à semi-conducteurs. Aujourd'hui, les émissions laser par la surface à cavité verticale (VCSEL) sont populaires en raison de leur faible coût. Les fibres MMF en verre déployées ces dernières années, sont de type à gradient d'indice, le type de source est également important dans la liaison (le profil d'indice est optimisé pour les modes généralement excités par ces sources). Les fibres multimodes ont également été mise au point dans les polymères. Certains de ces types de fibres ont des dimensions similaires à MMF en verre; d'autres ont des diamètres de base pour permettre une utilisation facile. La fibre MMF polymère présente une atténuation beaucoup plus élevée que MMF en verre, donc elle ne peut pas être utilisée sur de très courtes distances. Bien que tous les types de fibres

aient un intérêt dans la RoF, la plupart des technologies Radio sur Fibre commerciales ont été basées sur l'utilisation de SMF [9].

2.5.4 Le multiplexage de sous porteuses

Dans un système de Radio sur Fibre, un signal RF est utilisé pour moduler une onde lumineuse. Le signal RF est généralement un support d'informations, avec l'information modulé sur la porteuse RF à l'aide de technique analogique (AM, FM, etc.) ou de techniques numériques (PSK, QAM, FSK). Comme le signal RF module une onde lumineuse, dans le système de RoF, l'onde lumineuse devient le support. Le signal RF devient alors ce qu'on appelle une sous-porteuse. Dans de nombreux systèmes, tels que les communications mobiles, des fréquences différentes pour les porteuses RF sont utilisées pour prévoir le partage de la bande passante entre les opérateurs et les utilisateurs. Ces signaux à différentes fréquences pour les porteuses RF peuvent être combinés pour former un multiplexage de sous-porteuses dans un système de Radio sur Fibre, comme représenté sur la figure 2.5 (a).

Sur la figure 2.5 (a), les fréquences f_1 , f_2 et f_3 représentent ce que l'on appelle maintenant «Les fréquences de sous-porteuse», portant chacune un signal de modulation différent à la gauche de la figure. A la réception, le multiplexage est réalisé et détecté par la photodiode et toutes les sous-porteuse RF particulières sont démodulées typiquement en utilisant des techniques de détection hétérodyne RF pour abaisser la porteuse nécessaire en fréquence à la FI utilisée dans le récepteur par un oscillateur local accordable (LO) (comme le montre la figure 2.5 (a)).

Comme les fréquences porteuses du système sans fil et mobile sont typiquement dans la plage des GHz, des propositions ont été faites pour utiliser la partie de basse fréquence du spectre pour le transport simultané de signaux en bande de base, comme le montre la figure 2.5 (b). Là encore, les signaux de sous-porteuse et le signal de bande de base sont simplement additionnés (le spectre RF résultant est représenté au-dessus de l'émetteur laser à la figure 2.5 (b)) avant d'être utilisé pour fonctionner l'émetteur laser. Un filtre passe-bas au niveau du récepteur peut séparer le signal en bande de base à partir des sous-porteuses, ce dernier étant détecté en utilisant une détection hétérodyne RF [9].

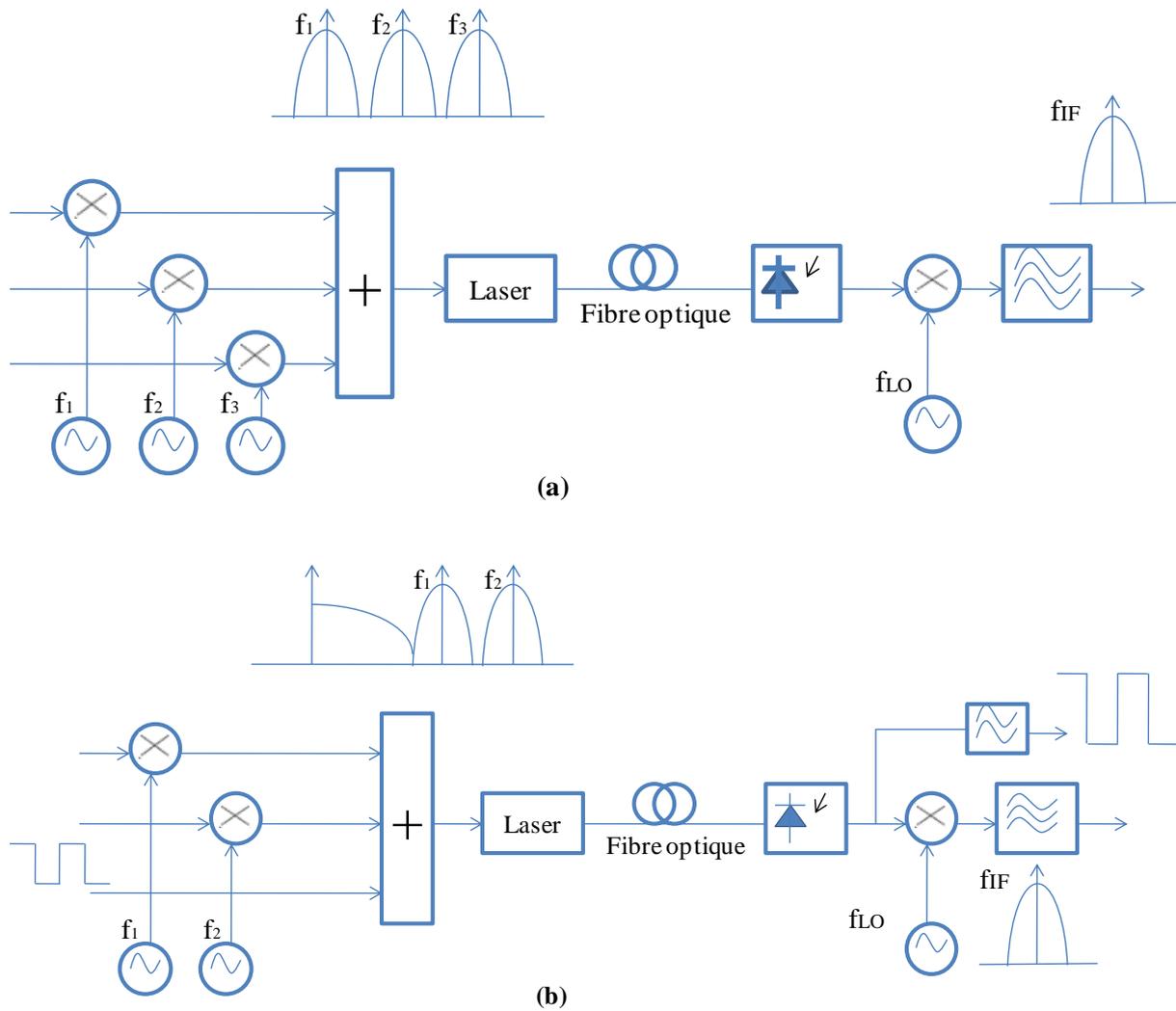


Figure 2.5: Sous-porteuses multiplexées, des communications optiques analogiques: (a) le système standard et (b) multiplex avec un canal de bande de base numérique.

Chaque type de lien combiné dans ce système devrait être analysé et conçu séparément: Les principes de conception de liaison analogique seraient utilisés pour le lien RoF et les principes de conception de la liaison de communication numérique seraient utilisés pour le lien de bande de base.

2.6 Génération du signal RF par détection hétérodyne

Pour générer un signal RF, la plupart des techniques reposent sur le principe de cohérence de mélange dans la photodiode. Ces techniques sont généralement désignées par le terme «Détection Hétérodyne (RHD)» [10].

Le principe du mélange peut être illustré comme suit. Deux signaux optiques de fréquences angulaires ω_1 et ω_2 peuvent être représentés par leurs champs électriques respectifs sous la forme suivante :

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega_1 t) \quad (2.1)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega_2 t) \quad (2.2)$$

Le photo-courant résultant est proportionnel au carré de la somme des champs électriques.

Ainsi, le photo-courant i_{pd} normalisé, sera: $i_{pd} = (E_1 + E_2)^2$.

On trouve : $i_{pd} = E_{01}E_{02} \cos((\omega_1 - \omega_2)t) + E_{01}E_{02} \cos((\omega_1 + \omega_2)t)$.

Le terme qui nous intéresse est : $E_{01}E_{02} \cos((\omega_1 - \omega_2)t)$ ce qui montre que par le contrôle de la différence de fréquence entre les deux champs électriques, on peut générer la fréquence souhaitée. La seule limite de la fréquence du signal qui peut être généré reste la bande passante de la photodiode.

Étant donné que la fréquence d'émission laser est très sensible aux variations de température, il est nécessaire d'utiliser des techniques (qui sont citées ci-dessous) pour maintenir la différence de fréquence entre les deux lasers, telles que:

- Optical Frequency-Locked Loop (OFLL) : boucle à verrouillage de fréquence optique
- Optical Phase-Locked Loop (OPLL) : boucle à verrouillage de phase optique
- Optical Injection Locking (OIL) : verrouillage par injection optique
- Injection Optical Phase-Locked Loop (OIPLL) : boucle à verrouillage de phase optique par injection.

Ces techniques ne seront pas détaillées car elles n'entrent pas dans l'intérêt du mémoire.

Il existe plusieurs façons de générer les deux porteuses optiques. Une approche consiste à utiliser un modulateur de phase optique pour générer plusieurs bandes latérales à partir d'une onde lumineuse issue d'une même source laser, puis sélectionner les composantes spectrales nécessaires. Une autre approche est d'utiliser deux sources laser. Les deux diodes laser sont utilisées pour émettre de la lumière à des fréquences dont l'écart fréquentiel

correspond à la fréquence à générer. Les techniques mentionnées ci-dessus sont utilisées pour maintenir l'écart fréquentiel fixe entre les deux porteuses optiques.

L'utilisation de l'hétérodynage optique permet la génération de très hautes fréquences.

En outre, cette technique conduit à un bon rapport de puissance détecté et de rapport signal sur bruit (CNR) étant donné que les deux champs optiques contribuent à la puissance RF générée.

La détection hétérodyne a un avantage par rapport à la dispersion chromatique. Si une seule des deux porteuses optiques est modulée par les données, la sensibilité du système à la dispersion chromatique peut être réduite considérablement. Réduire les effets de la dispersion chromatique est très important afin de diminuer le bruit de phase pour les formats de modulation tels que xQAM, où la dispersion entraîne une grande perte de puissance.

Parmi les autres avantages de la RHD on peut citer le traitement photonique du signal radio tels que le contrôle de phase, le filtrage et la conversion de fréquence.

L'inconvénient majeur de la RHD est la forte influence du bruit de phase du laser et l'influence de la variation de fréquence sur la stabilité de signal RF généré, et puisque les lasers à semi-conducteurs ont de grandes largeurs spectrales, des mesures supplémentaires doivent être prises pour réduire la raie de la génération de signaux RF. Ces mesures conduisent souvent à des systèmes plus complexes.

2.7 Systèmes de transport des signaux RF, IF, bande de base

Les systèmes Radio sur Fibre sont généralement classés selon trois principaux types d'architecture de transport: Radio Fréquence (RF), fréquence intermédiaire (IF) et bande de base. Le choix de l'architecture détermine le matériel nécessaire au niveau de la BS et sa complexité. Un système duplex complet peut utiliser des architectures de transport différentes sur la liaison montante et sur la liaison descendante.

2.7.1 Transport de fréquence RF sur fibre

L'architecture RF sur fibre permet de transporter via un lien optique les signaux RF directement à la fréquence à laquelle ils sont destinés à être rayonnés en espace libre comme illustré sur la figure 2.6.

L'avantage de cette approche est que les signaux ne subissent aucune transposition de fréquence au niveau des stations de bases qui bénéficient d'une architecture simple nécessitant uniquement des conversions électro-optique et opto-électrique, amplification RF, et émission/réception RF. En outre, un contrôle centralisé de traitement des signaux permet de faciliter l'évolutivité du système.

L'inconvénient est que la transmission directe des signaux RF s'avère d'autant plus difficile que la fréquence RF est élevée en raison des effets néfastes de la dispersion chromatique. Par ailleurs, dans le domaine millimétrique (30-300GHz), les prix des composants optoélectroniques demeurent élevés. Des photodiodes à large bande passante avec un bon rendement de conversion sont nécessaires tant au niveau du CS que de chaque BS. La modulation externe est effectuée à l'aide des modulateurs ultra-rapides permettant d'atteindre des vitesses de modulation élevées ($> 40\text{GHz}$) comme le modulateur Mach-Zehnder (MZM) ou le modulateur à électro-absorption (EAM).

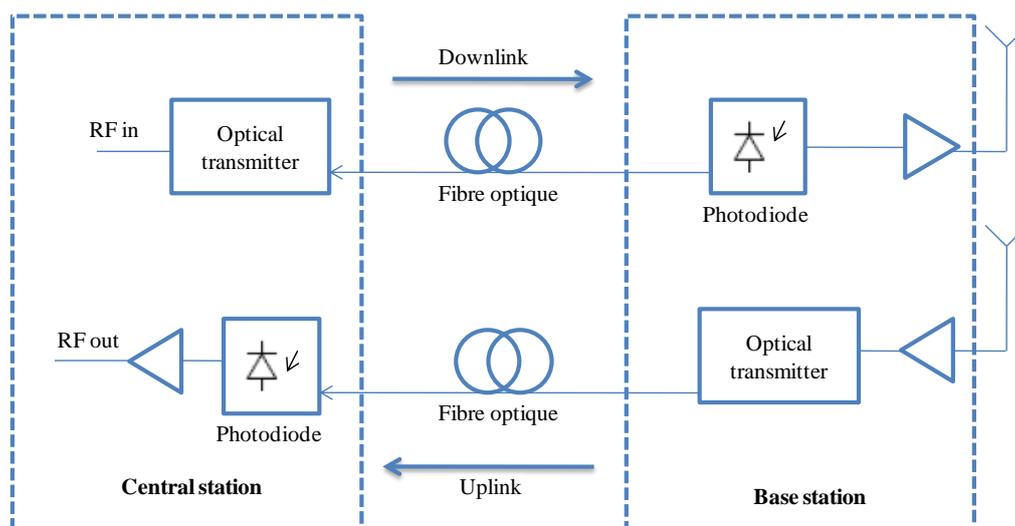


Figure 2.6: Système RoF utilisant un transport de signal RF.

2.7.2 Transport de fréquence IF sur fibre

L'architecture IF sur fibre permet le transport des signaux RF en réduisant fortement l'effet de la dispersion chromatique des fibres par le fait de transmettre des signaux radio sur fibre à l'aide de fréquences intermédiaires (IF) avec une transposition de fréquence effectuée à la BS comme le montre la Figure 2.7.

C'est l'utilisation d'une fréquence de modulation intermédiaire dans le cas du transport IF sur fibre qui permet avantageusement de réduire de manière significative les effets de la dispersion chromatique en comparaison avec le cas du transport RF-sur-fibre.

Un autre avantage de ce système est d'offrir une efficacité en termes de coût, puisqu'il permet d'intégrrer des composants électroniques à bas coût largement disponibles sur le marché.

L'inconvénient est que cette architecture reste compliquée par rapport à l'architecture RF sur Fibre, dans la mesure où des oscillateurs locaux et des mélangeurs sont nécessaires au niveau de chaque BS pour effectuer les transpositions de fréquence.

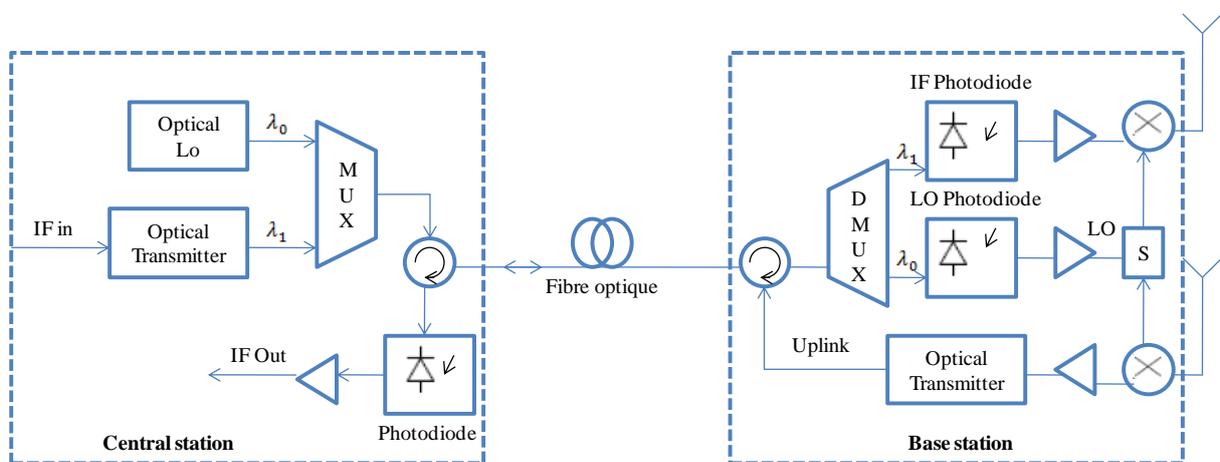


Figure 2.7: Système RoF utilisant un transport de signal IF.

2.7.3 Transport du signal en bande de base

Dans cette architecture, un signal en bande de base est généré et transmis à travers la fibre optique depuis la station de contrôle jusqu'aux stations de base.

Sur le lien descendant, le signal en bande de base détecté au niveau de la station de base est transposé sur une porteuse RF (i.e. onde millimétrique) avant qu'il soit rayonné par l'antenne. Réciproquement sur le lien montant, le signal RF reçu par l'antenne doit être converti en bande de base avant d'être acheminé vers la station centrale.

L'avantage de cette technique est qu'elle permet de réduire considérablement les effets de la dispersion du fait d'une transmission en bande de base, mais elle exige des équipements électro-optiques à haute fréquence coûteux (mélangeurs).

2.8 Modulation d'intensité avec une détection directe (IM-DD)

La méthode la plus simple pour la distribution de signaux radiofréquences dite IM-DD (Intensity Modulation Direct Detection) consiste à moduler directement l'intensité d'une porteuse optique par le signal radiofréquence lui-même et puis utiliser la détection directe par la photodiode pour récupérer le signal radiofréquence. Il existe deux façons d'effectuer la modulation de la porteuse optique [10].

Une première solution dite «modulation directe» est de laisser le signal radiofréquence directement moduler la porteuse optique d'une source de lumière (laser), comme illustré à la figure 2.8 (a) ci-dessous. Une deuxième solution dite «modulation externe» consiste à utiliser un modulateur externe (Mach-Zehnder (MZM)) pour moduler la porteuse optique issue d'une source lumineuse comme illustré à la figure 2.8 (b) ci-dessous. Dans les deux cas, le signal modulant l'intensité de la porteuse optique est le signal radiofréquence destiné à être distribué.

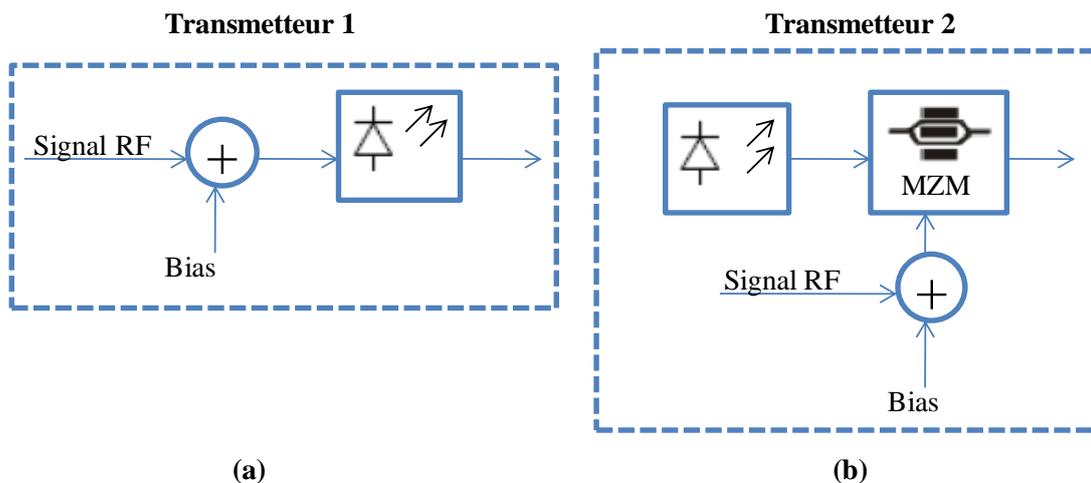


Figure 2.8: Les techniques de modulation directe (a) et externe (b) du signal optique.

Le signal RF doit être correctement pré-modulé avec des données avant d'être transmis optiquement. Le photo-courant obtenu par détection directe par photodiode subit une amplification de transimpédance pour produire une tension qui est à son tour utilisée pour exciter l'antenne. Ainsi, si le signal RF utilisé au niveau de l'émetteur est lui-même modulé par les données numériques à transmettre, le signal RF détecté au niveau du récepteur porte les mêmes données. Le format de la modulation sera préservé.

La plupart des systèmes RF, y compris ceux utilisant IM-DD, utilisent les fibres monomodes pour la distribution.

L'avantage de cette méthode est d'abord sa simplicité de mise en œuvre.

En suite, si une fibre à faible dispersion est utilisée avec un modulateur externe, le système devient linéaire.

En conséquence, la liaison optique agit seulement comme un amplificateur ou un atténuateur et elle est donc transparente au format de modulation du signal RF.

Un tel système nécessite peu de mises à jour (ajout d'un autre format de modulation, codage...) chaque fois qu'il y aura des changements dans le format de modulation du signal RF. Contrairement à la modulation directe du laser, les modulateurs externes tels que les modulateurs de Mach Zehnder (MZM) peuvent moduler des ondes millimétriques de près de 100GHz, même si cela a un coût énorme en ce qui concerne l'efficacité et les exigences de linéarisation.

Un inconvénient de la méthode IM-DD est qu'elle est difficile à utiliser pour les ondes millimétriques à haute fréquence. Il en est ainsi parce que, pour générer des signaux avec une fréquence plus élevée, le signal modulé doit avoir la même fréquence que celle du signal généré. Ce qui est difficile avec une modulation directe de laser en raison de la largeur de bande limitée et les non-linéarités introduites par le laser, ce qui conduit à des termes de produits d'intermodulation provoquant des distorsions.

2.9 Perspectives de la technologie Radio sur Fibre

Cette étude est portée sur les applications de la technologie Radio sur Fibre et ce qu'elle peut apporter aux prochaines générations.

2.9.1 Radio sur Fibre pour les mobiles de 4^{ème} génération

La génération de communications mobiles (4G) a été confrontée à un grand nombre de problèmes techniques. Pour répondre à une demande croissante en services à haut débit et en raison d'un fort encombrement du spectre électromagnétique, les fréquences utilisées par les systèmes 4G devraient être supérieures à 3GHz. L'utilisation de fréquences élevées conduit à de fortes pertes lors de la propagation des ondes radio en espace libre sur les liaisons montantes et descendantes. En particulier, une forte perte de propagation sur la liaison montante a pour conséquence une augmentation de la consommation d'électricité des terminaux mobiles, réduisant ainsi leur autonomie. Les opérateurs de réseaux mobiles pour la

4G avaient d'énormes difficultés pour faire face à l'augmentation du trafic, de manière à garantir un débit élevé pour chaque utilisateur. Le débit de données de cette génération des systèmes mobiles de communication devrait être supérieur à 100Mbps. En vue pour répondre à cette exigence, la gestion des ressources des réseaux sans fil pour les communications mobiles doit être plus souple. Une réduction de la taille des cellules de couverture et une centralisation des composants compliqués peut assouplir les problèmes. Un grand nombre d'unités d'accès a été installées sur des petites surfaces, et le réseau doit être en mesure d'assurer une connexion homogène entre les différentes entités du réseau.

La technologie RoF est l'une des meilleures solutions pour la réduction de la taille des cellules de couverture afin d'envisager le déploiement de réseaux d'accès pico-cellulaires à grande échelle. Grâce à l'utilisation de la fibre optique à ultra-large bande passante, il est possible de transférer les fonctions de traitement du signal à une station de contrôle centralisée, dite station de contrôle. La centralisation des équipements coûteux et complexes au niveau de cette station de contrôle rendue possible par la technologie RoF devrait permettre une mise en œuvre compacte et économique des unités d'accès à distance [10].

Par conséquent, il convient de développer des technologies RoF offrant l'accès à une grande variété de systèmes sans fil, y compris 3G, WLAN, systèmes de diffusion multimédia numérique (DMB), et B3G (Beyond 3G system), comme le montre la figure 2.9 ci-dessous.

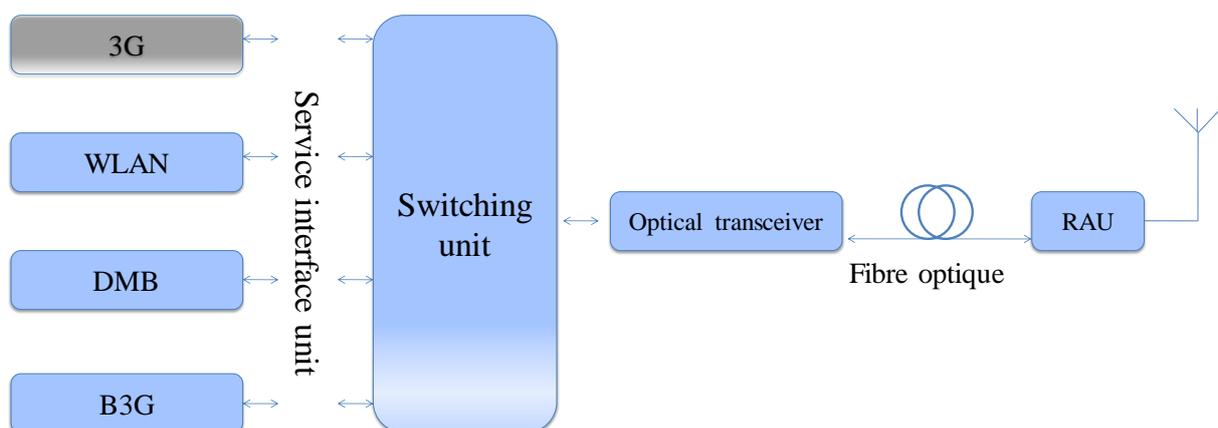


Figure 2.9: Les différentes technologies supportées par la Radio sur Fibre.

2.9.2 Radio sur Fibre pour les futurs réseaux domestiques

La multiplication des appareils connectés et services (ordinateurs, Media Center, visiophonie, TV, IP, etc. ...) conduit à une nouvelle architecture du réseau domestique et des technologies sans fil pour permettre d'offrir des débits supérieurs à 1Gbits/s. Cette

architecture de réseau domestique est fondée sur un réseau de distribution local câblé adapté à supporter des très hauts débits dans les différentes salles de la maison/immeuble. Une technologie radio prometteuse capable de fournir des débits au-delà du Gb/s utilise les fenêtres de fréquence à 60GHz (exemple normes IEEE 802.15.3c ou IEEE 802.11a/d) avec des portées qui ne dépassent pas 15m. Le réseau devient alors un réseau multicellulaire où les questions de gestion des interférences seront similaires à celles rencontrées dans les réseaux mobiles à large couverture et les réseaux de radiocommunication [10].

Dans ce contexte, une fois encore, l'utilisation de la technique RoF pour relier les différentes antennes du réseau d'accès permet de fournir un bon rapport coût efficacité et permet un développement des technologies de communication pour le futur.

2.10 Conclusion

L'état de l'art sur la Radio sur Fibre abordé dans ce chapitre 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), le concept de cette technologie ainsi que son application.

Dans le chapitre suivant on va modéliser une chaîne de transmission Radio sur Fibre.

Chapitre 3

Etude d'une liaison Radio sur Fibre

3.1 Introduction

En raison des besoins croissants en mobilité et en connectivité, l'utilisation des technologies Radio sur Fibre qui est en croissance continue présente un intérêt grandissant au niveau des réseaux d'accès, notamment pour étendre la couverture des réseaux sans fils dans les lieux publics. Cette croissance nous impose le développement d'un système de modélisation qui permet la simulation d'une chaîne de transmission de bout en bout.

Dans ce chapitre nous allons commencer par décrire le logiciel OptiSystem, puis nous allons définir les éléments qui serviront de critères de qualité pour évaluer la qualité de transmission de notre liaison. Après une analyse de liens, nous traiterons, la modélisation d'un système de transmission Radio sur Fibre en faisant une simulation de différents phénomènes

3.2 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.

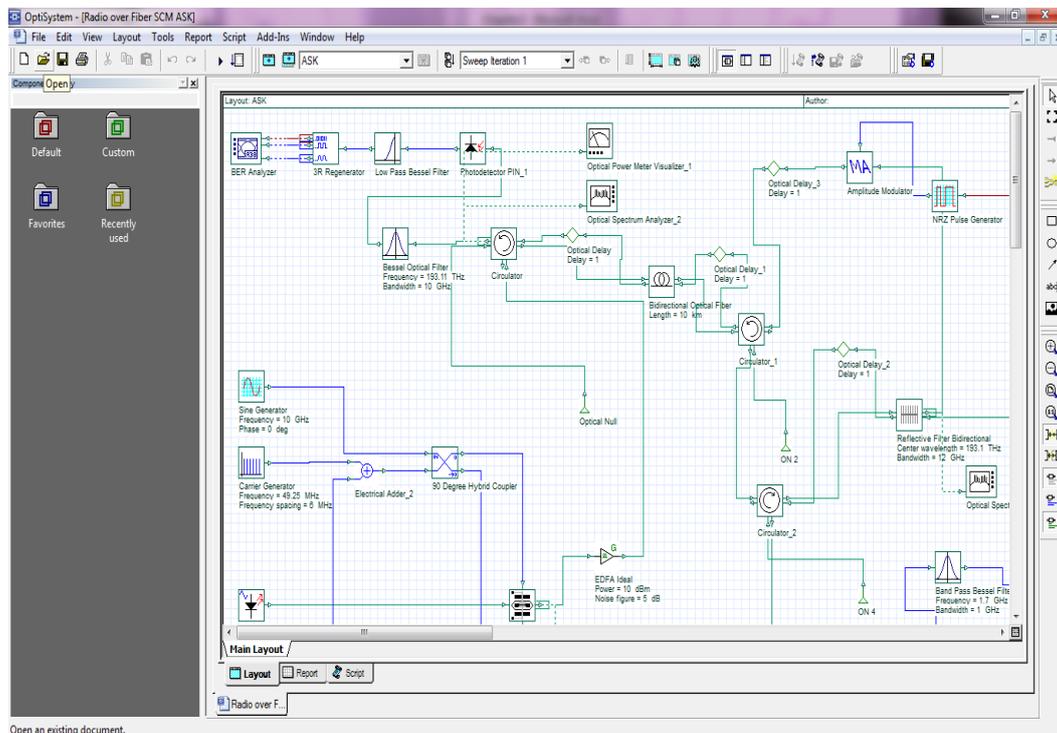


Figure 3.1: Schéma de l'interface OptiSystem.

L'interface utilisateur graphique complète et contrôle la disposition de composants optiques, elle contient une fenêtre principale répartit en plusieurs parties (figure 3.1):

- **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 élies à un large éventail d'outils. Une interface complète d'utilisateur graphique contrôle la disposition optique des composants, des modèles et des présentations graphiques.

3.2.1 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 produit 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.

3.2.2 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 optique (OSA).
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

3.2.3 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.

3.3 Présentation de la liaison

Notre objectif dans cette partie est de concevoir un réseau Radio sur Fibre qui implique une transmission de signaux radiofréquence (RF) par l'intermédiaire d'une fibre optique bidirectionnelle à 1550 nm de longueur d'onde, de longueur 10km, d'atténuation 0,22 dbm, de dispersion 16,75 PS/nm/km, de fréquence centrale de bruit 193,4 THz et de largeur de bande de bruit 13THz.

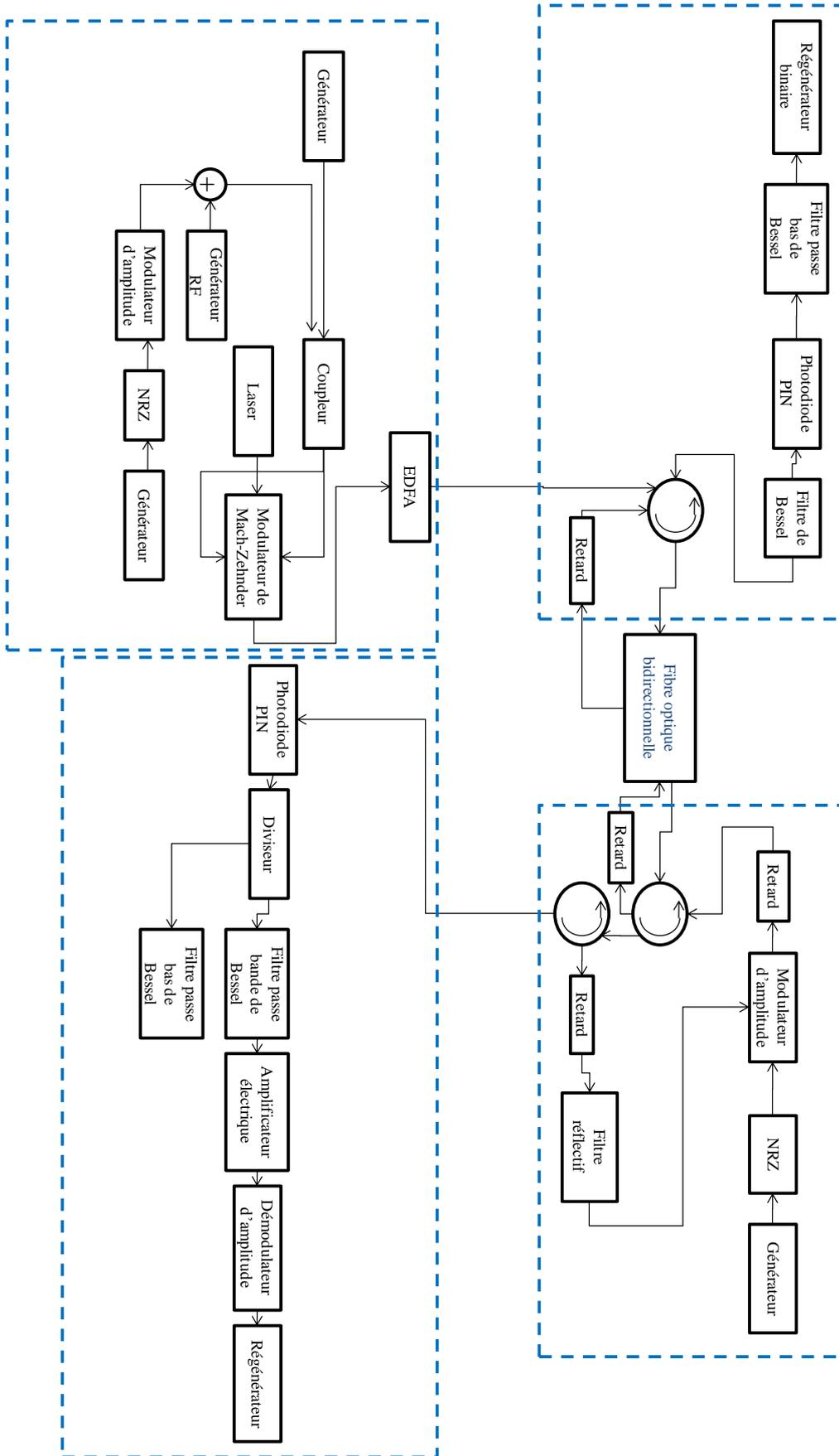


Figure 3.2: Schéma général de la liaison Radio sur Fibre

Notre liaison se compose de plusieurs parties, chaque partie est constituée de composants, ces parties sont détaillées dans ce qui suit.

3.3.1 Partie émission optique

La partie émission de notre liaison est composée de plusieurs composants définie par les paramètres du tableau ci-dessous.

Générateur binaire	
Débit	1Gbits/s
Modulateur d'amplitude	
Indice de modulation	1
Circulateur 1 et 2	
Pertes d'insertion	1dB et 0.5dB
Pertes de retour	60dB
Isolement	60dB
Filtre réflectif gaussien	
Ordre	4
Bande passante	12GHz
Réflexion	99%
Bruit dynamique	3dB

3.3.1.1 Le signal dans la liaison

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.

3.3.2 Partie réception optique

Le tableau suivant représente les paramètres des composants de la partie réception optique.

Circulateur	
Pertes d'insertion	1dB
Pertes de retour	60dB
Isolement	60dB
Filtre de Bessel	
Ordre	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	
Ordre	4
Fréquence de coupure	0,75GHz
Régénérateur	
Débit	1Gbits/s

3.3.3 Partie émission RF

Le schéma du module d'émission NRZ est présenté sur la Figure 3.3.

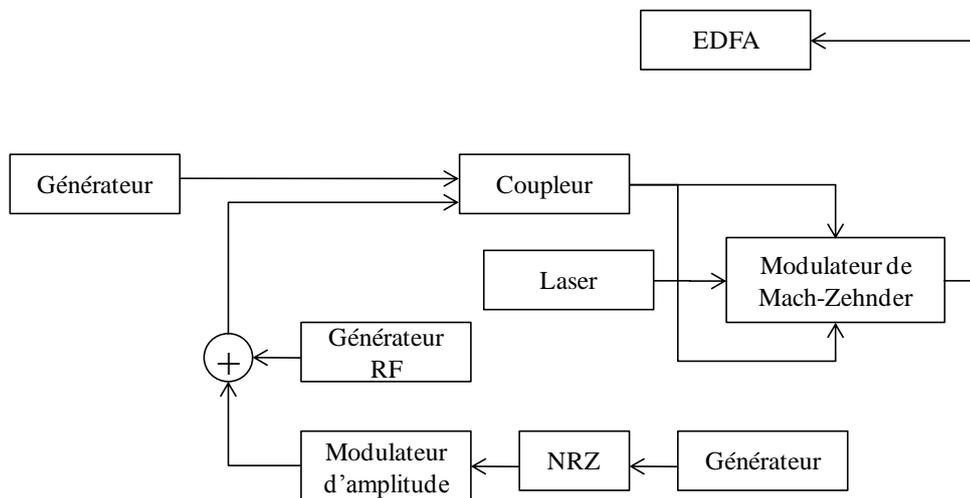


Figure 3.3:Partie émission RF de la liaison.

La partie émission RF est caractérisée par les paramètres des composants suivants :

Générateur	
Débit	1Gbits/s
Modulateur d'amplitude	
Fréquence	1,7GHz
Générateur RF	
Nombre de chaine	78
Fréquence	49,25MHz
Espacement de fréquence	6MHz
Générateur	
Fréquence	10GHz
Phase	0°
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 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.

3.3.4 Partie réception RF

En réception, le signal est détecté puis analysé. La chaîne de détection est représentée sur la Figure 3.4. 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.

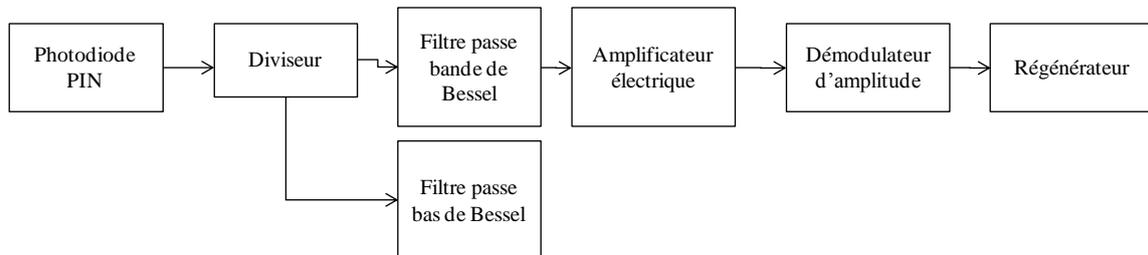


Figure 3.4:Partie réception RF de la liaison.

La partie réception est définie par les paramètres suivants:

Photodiode PIN	
Réceptivité	0,9A/W
Courant d'obscurité	10nA
Filtre passe bande de Bessel	
Ordre	8
Fréquence de coupure	1,7GHz
Bande passante	1GHz
Pertes d'insertion	2dB
Amplificateur électrique	
Gain	15dB
Démodulateur d'amplitude	
Fréquence	1,7GHz
Gain	1dB
Fréquence de coupure	0,6GHz
Filtre passe bas de Bessel	
Ordre	6
Fréquence de coupure	0,7GHz
Pertes d'insertion	2dB
Régénérateur	
Débit	1Gbit/s

Le récepteur reçoit le signal électrique déformé par les différents bruits accumulés, et le converti 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.

3.4 Les formats de modulation

Différentes modulations du signal optique permettent le codage du signal. Elles se classent en deux catégories, la modulation d'amplitude (ASK pour Amplitude Shift Keying)

pour laquelle le passage d'un symbole binaire à l'autre se caractérise par la présence ou non de signal optique, et la modulation de phase (PSK pour Phase Shift Keying) pour laquelle le passage d'un symbole binaire à l'autre se caractérise par une variation de la phase du signal.

Les deux principaux formats de modulation d'amplitude sont le format RZ (Return-to-Zero) et le format NRZ (Non-Return-to-Zero). Ils sont schématisés sur la Figure 3.5.

Pour le format NRZ, le signal transmis dans chaque temps bit est continu. Deux symboles «1» se succèdent, le signal reste à son niveau haut: Un «0» est codé par un signal à faible puissance, et un «1» par un signal à forte puissance.

Comme son nom l'indique, pour le format RZ qui est un dérivé du format NRZ le signal est éteint d'un bit sur l'autre, même si deux symboles «1» sont transmis successivement. C'est un format impulsionnel.

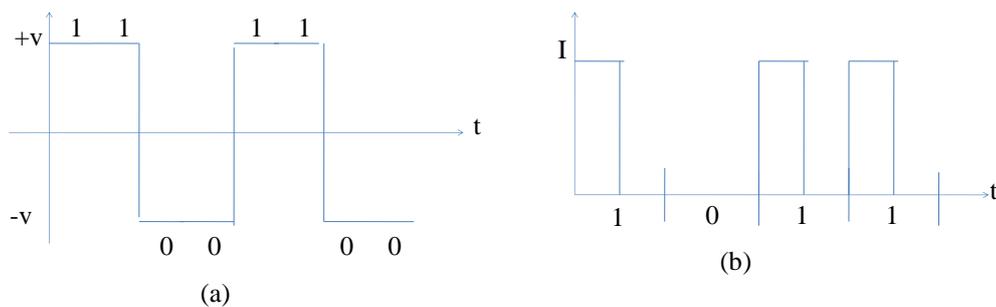


Figure 3.5: (a) format NRZ (b) format RZ.

Dans notre liaison Radio sur Fibre on a utilisé que le format NRZ, sachant qu'avec le format RZ on n'obtient pas de bons résultats.

3.5 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. Ces trois critères sont décrits dans la suite [1].

3.5.1 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.

$$\text{TEB} = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad (3.1)$$

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} .

3.5.2 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 :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.2)$$

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 :

$$\text{TEB} = \frac{1}{2} [\text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)] \quad (3.3)$$

Où *erfc* est la fonction erreur complémentaire définit par:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-y^2).dy \quad (3.4)$$

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}

3.5.3 Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est la superposition de tous les symboles binaires du signal émis. La Figure 3.6. représente une séquence de notre liaison radio sur fibre sous OptiSystem de la partie réception RF.

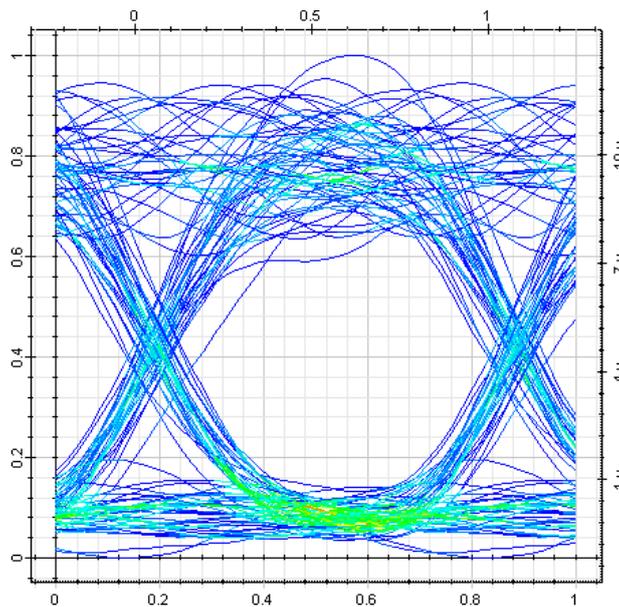


Figure 3.6: Diagramme de l'œil de la partie réception RF.

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.

3.6 Effet de variation de la longueur de la fibre bidirectionnelle

En générale en télécommunications optiques on considère qu'on a une bonne qualité de transmission pour un TEB variant entre 10^{-9} et 10^{-12} , dans ce qui suit on va prendre comme référence un TEB de 10^{-10} ce qui correspond à un facteur de qualité de 6,4. On considère que pour un TEB inférieur à 10^{-10} et un facteur de qualité supérieur à 6,4 on aura une bonne qualité du signal reçu.

En premier temps nous allons étudier l'effet de variation de la longueur de la fibre optique sur la qualité de la transmission.

Les figures 3.7 et 3.8, représentent la variation du facteur de qualité (Q) et du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la longueur de la fibre optique bidirectionnelle pour les deux analyseurs optique et RF de la liaison.

L'analyseur RF va comparer entre la séquence générée avant le modulateur AM et la séquence reçue après le modulateur AM.

L'analyseur optique compare la séquence générée avant le modulateur optique et la séquence reçue après le filtre passe-bas de Bessel.

Les résultats de l'analyseur optique sont montrés sur les figures 3.7 et 3.8:

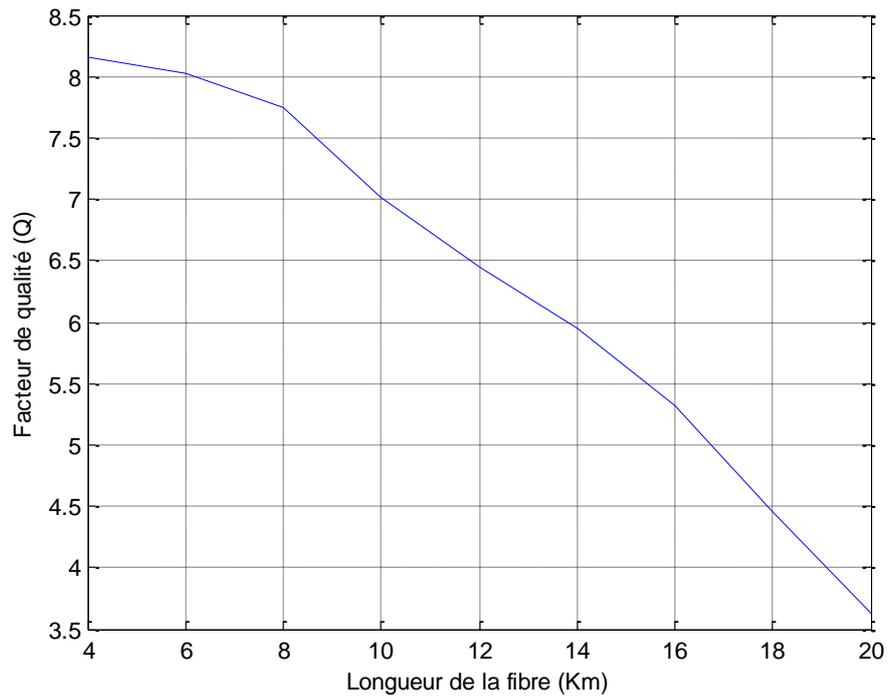


Figure 3.7: Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre.

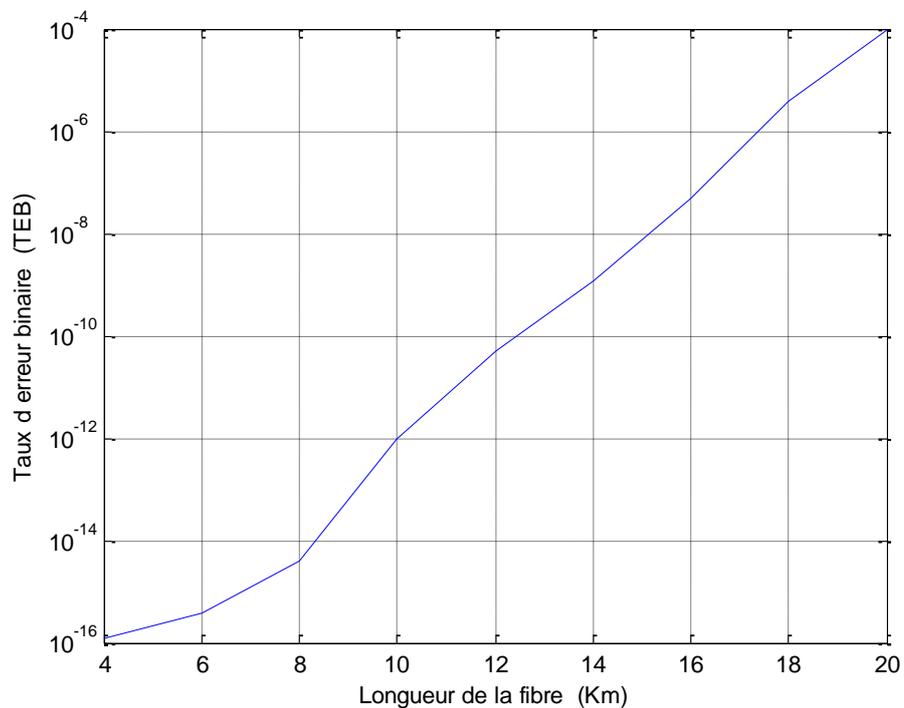


Figure 3.8: Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la longueur de la fibre.

Les résultats indiquent un bon facteur de qualité de 7 pour une longueur de 10km, plus on augmente la longueur de la fibre plus la qualité du signal diminue jusqu'à ce qu'elle se

détérioré à partir d'une longueur de 14km. Pour ce qui est du taux d'erreur binaire, qui est inversement proportionnel au facteur de qualité, il est de l'ordre 10^{-16} pour 4km et il atteint une valeur de 10^{-4} pour 20km.

Le deuxième analyseur permet aussi de mesurer le facteur de qualité (Q) ainsi que le taux d'erreur binaire (TEB) pour la partie réception optique RF.

Les résultats de l'analyseur RF sont montrés ci-dessous:

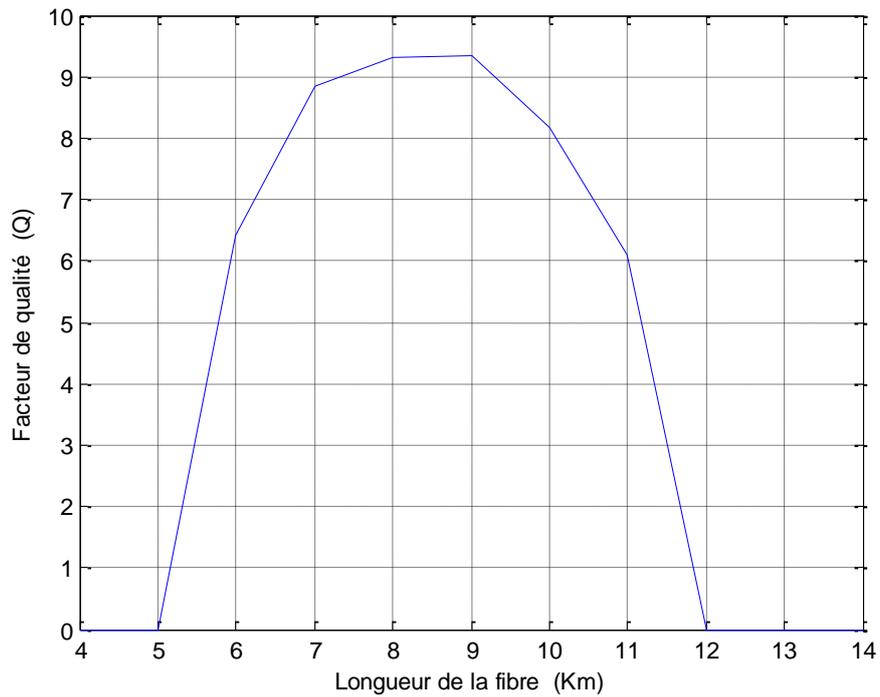


Figure 3.9: Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre.

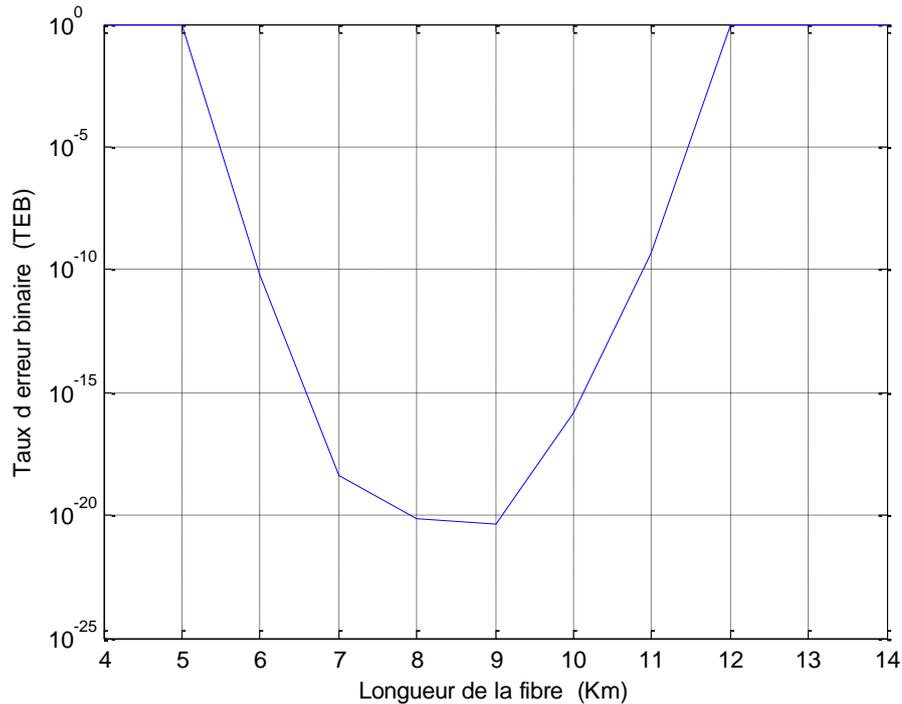


Figure 3.10: Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la longueur de la fibre.

On remarque que pour une longueur de fibre inférieure à 5 km le facteur de qualité est nul dans ce cas le signal reçu est inexploitable. A partir de 5 km on note une amélioration de la qualité du signal jusqu'à atteindre un facteur de qualité de 9,34 et un TEB de $4,71 \cdot 10^{-16}$ pour une longueur de 9 km, à partir de cette distance, il y a une dégradation du signal pour arriver à un TEB de 1 et un facteur de qualité nul pour 12 km.

Il est préférable d'avoir une longueur de fibre de 5 et 12 km. En se positionnant par rapport au facteur de qualité de 6,4 et un TEB de 10^{-10} .

Pour ce qui suit on va se fixer une longueur de fibre optique de 10 km.

3.7 Effet de variation de la puissance émise par le laser

Les mesures suivantes sont faites en variant la puissance du laser tout en gardant une longueur de la fibre constante de 10 km avec un débit de 1 Gbits/s.

Les graphes des figures ci-dessus montrent la variation du facteur de qualité (Q) et du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la puissance émise du laser.

Les résultats de l'analyseur optique sont montrés sur les figures 3.11 et 3.12:

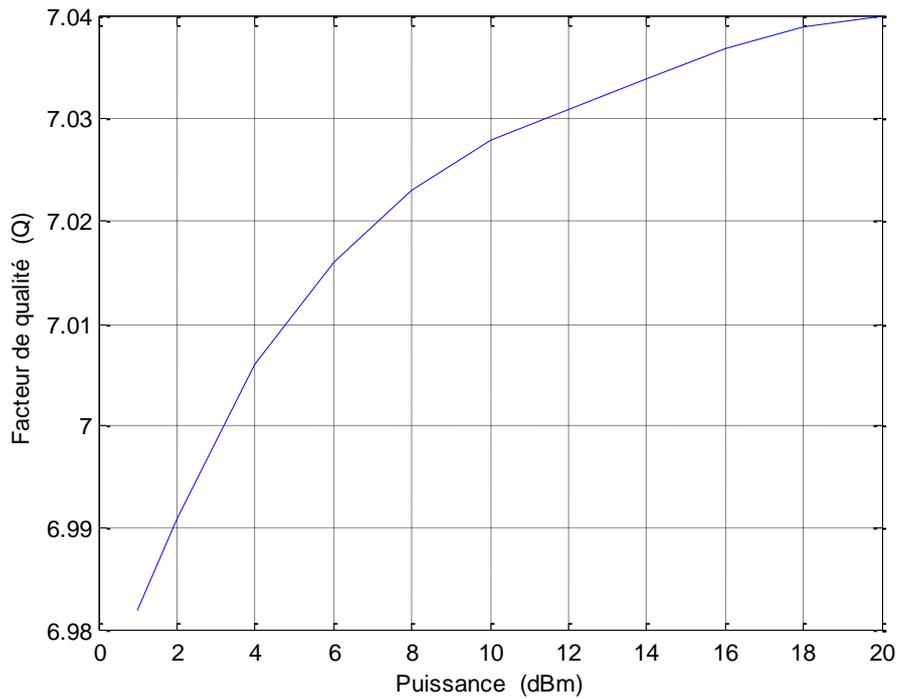


Figure 3.11: Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance émise par le laser.

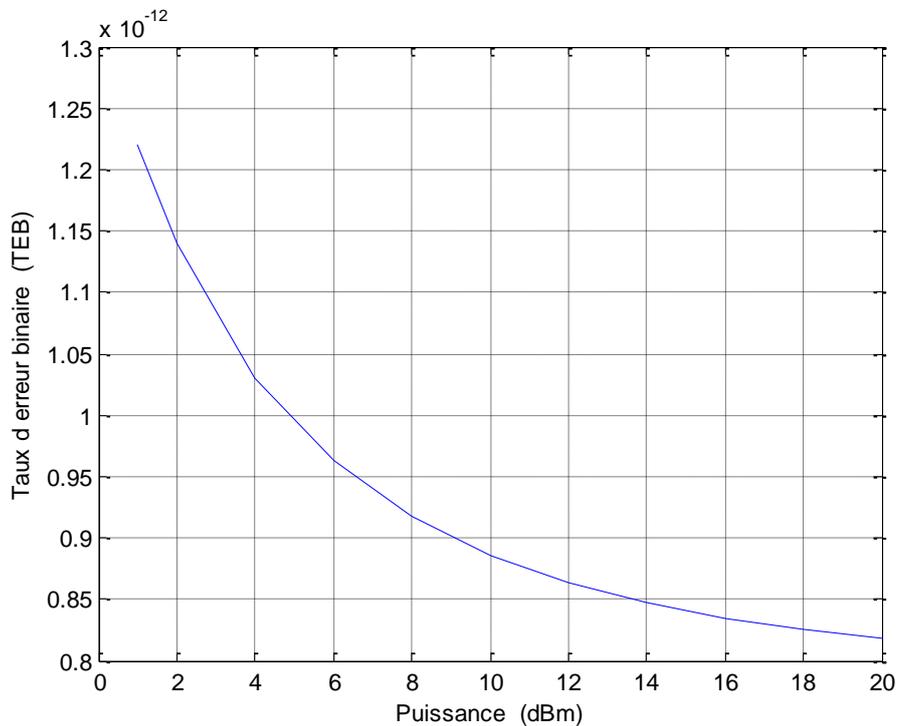


Figure 3.12: Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance émise par le laser.

On constate, que plus on augmente la puissance émise du laser plus on obtient un meilleur facteur de qualité. On remarque qu'à la puissance de 10dBm on a un facteur de

qualité de 8,3, à partir de cette puissance il se stabilise. On obtient aussi de très bonnes valeurs du taux d'erreur binaire pour des puissances allant de 1dBm jusqu'à 6dBm à partir de cette puissance, il se stabilise pour un intervalle allant de 6dBm à 20 dBm.

Dans tous les cas, le facteur de qualité est supérieur à 6,4 et le taux d'erreur binaire est inférieur à 10^{-10} , témoignant d'une très bonne qualité de transmission.

Les résultats de l'analyseur RF sont montrés ci-dessous:

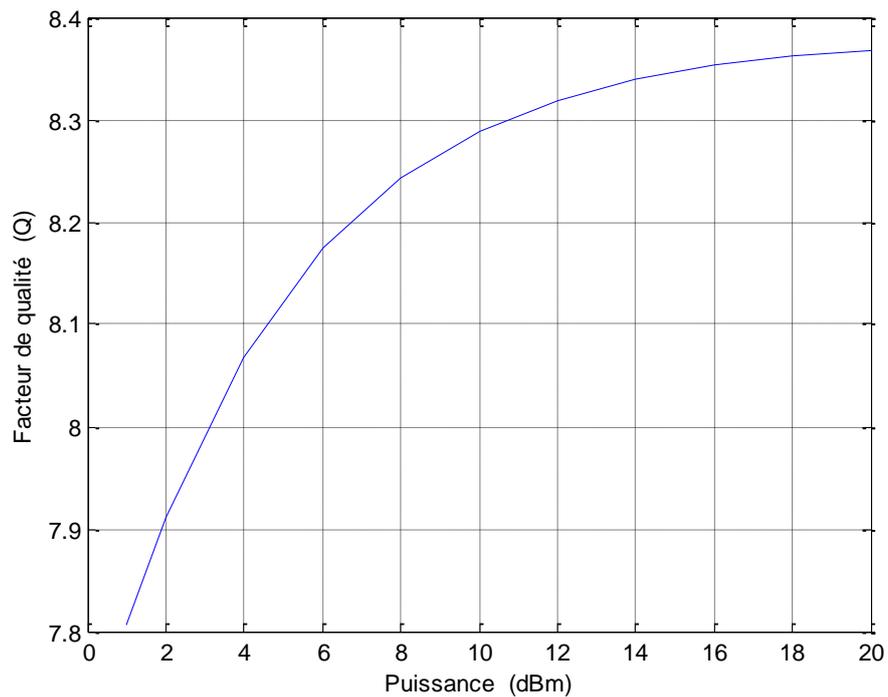


Figure 3.13: Variation du facteur de qualité en fonction de la puissance émise par le laser.

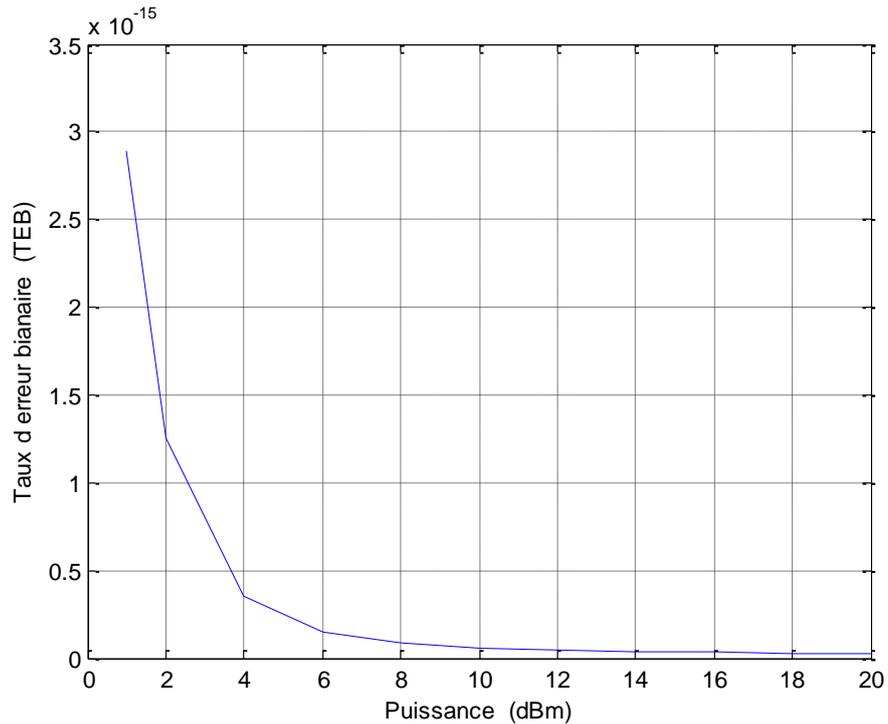


Figure 3.14: Variation du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance émise par le laser.

Les résultats du deuxième analyseur indiquent aussi un très bon facteur de qualité et un bon taux d'erreur binaire pour les puissances de 1dBm et 2dBm avec une forte augmentation du facteur de qualité pour des puissances allant jusqu'à 4dBm, à partir de cette puissance le facteur de qualité croît lentement avec des valeurs de TEB de l'ordre de 10^{-15} .

3.8 Effet de variation du débit

Le but de toute liaison est d'atteindre une bonne transmission avec le plus grand débit, tout en conservant le signal émis à la réception. Dans ce qui suit on va étudier l'effet du débit sur notre liaison.

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation pour différents débits se propageant sur une distance de 10km.

Les résultats de l'analyseur 1 pour le débit en fonction du taux d'erreur binaire sont présentés ci-dessous :

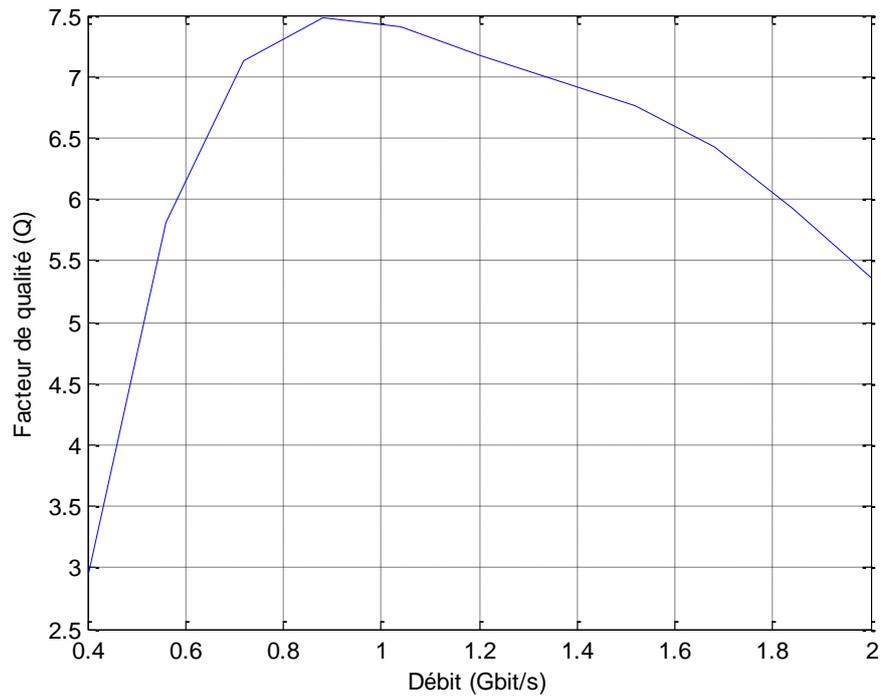


Figure 3.15: Variation du facteur de qualité en fonction du débit.

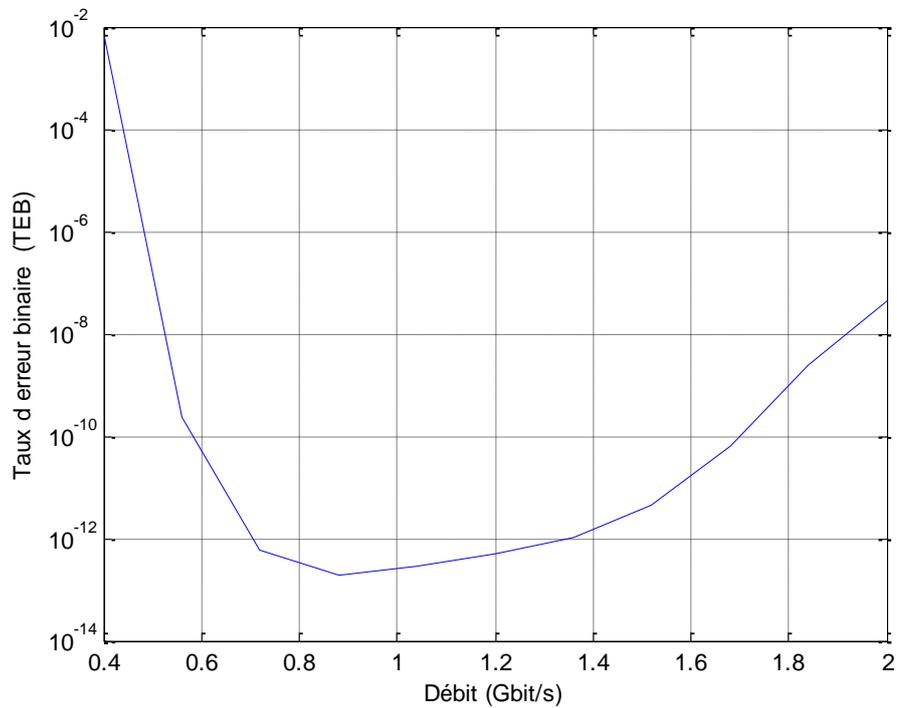


Figure 3.16: Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit.

D'après les résultats obtenus, on remarque une augmentation du facteur de qualité jusqu'à atteindre le meilleur résultat $Q=7,27$ et $TEB=10^{-13}$ pour un débit de 0,8Gbits/s. La

qualité du signal se dégrade à partir de 0,8Gbits/s, et elle descend sous un TEB de 10^{-10} pour un débit supérieur à 1,8Gbits/s.

Dans ce qui suit on va présenter les résultats de l'analyseur RF :

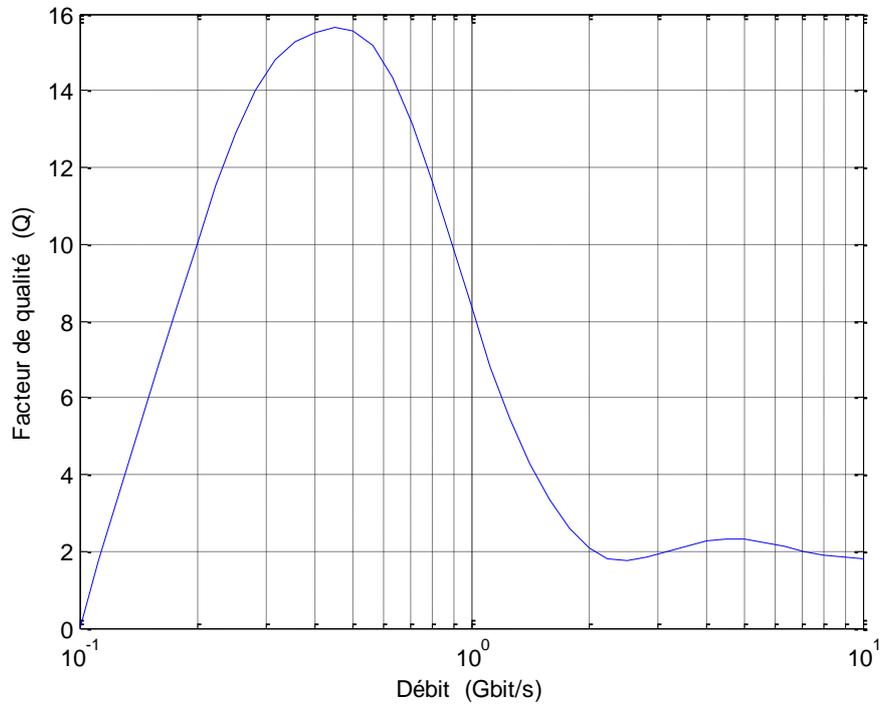


Figure 3.17: Variation du facteur de qualité en fonction du débit.

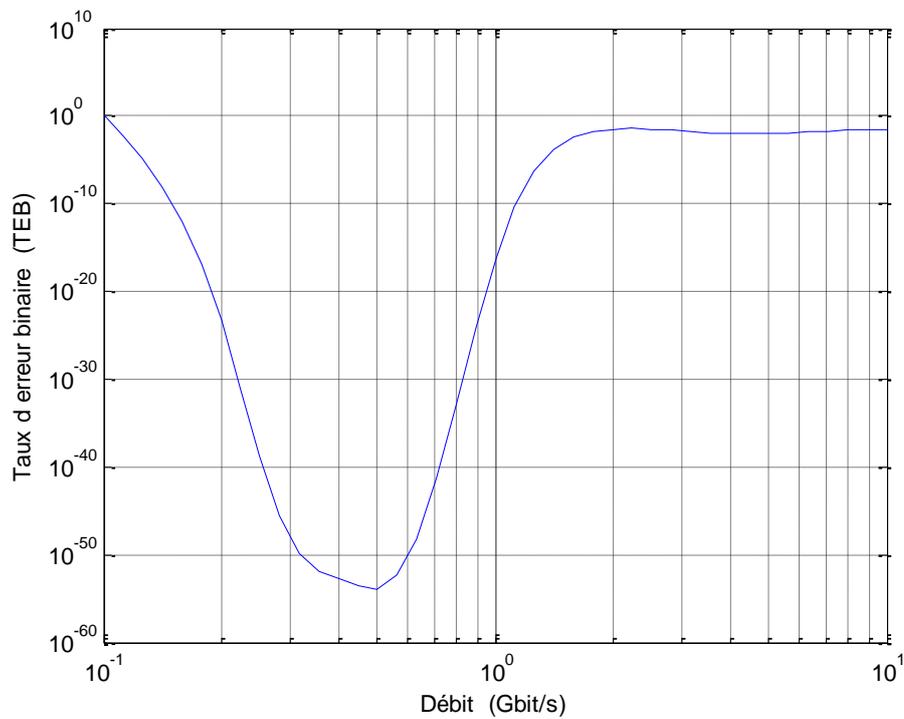


Figure 3.18: Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit.

Nous avons pris des valeurs du débit variant allant de 0,1Gbits/s à 10Gbits/s.

On note au départ une amélioration du facteur de qualité quand le débit augmente jusqu'à atteindre un facteur de 15 et un taux d'erreur binaire de 10^{-53} pour un débit de 0,5Gbit/s, à partir de la, on note une nette dégradation du signal reçu. Au final, on remarque que le facteur de qualité se stabilise à 2 et le TEB à 10^{-3} pour un débit de 2Gbits/s.

Pour ce qui est des valeurs de débit pour lesquelles le taux d'erreur binaire est inférieur à 10^{-10} , on obtient un intervalle allant de 0,15Gbits/s à 1,5 Gbits/s, dans ce cas on aura un signal reçu exploitable aux normes des télécoms optiques.

Dans ce sens on a pris un débit de 1Gbits/s comme valeur référence de notre liaison radio sur fibre.

3.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons effectué nos recherches sur la variation de la qualité de transmission en agissant sur différents paramètres tel que la longueur de la fibre bidirectionnelle, la puissance du laser et le débit de la liaison.

Et pour cela nous avons défini les différents critères pour améliorer le signal ainsi que la qualité de transmission: Facteur de qualité et taux d'erreur binaire.

L'étude de cette liaison nous a permis de mettre en œuvre un réseau Radio sur Fibre optique avec les meilleurs critères possibles en optimisant la longueur de la fibre bidirectionnelle, la puissance émise par le laser et le débit de transmission, tout en respectant le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire en télécoms optiques.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les progrès réalisés dans le domaine des télécommunications sont tellement importants et rapides, que les structures des systèmes de transmission connaissent de véritables bouleversements.

Le déploiement du réseau de télécommunications à haut débit nécessite le développement de nouveaux composants et architectures optoélectroniques adaptés à ces vitesses de transmission. Les enjeux stratégiques et économiques de ces développements découlent notamment de la nécessité de disposer, à assez court terme, de composants et d'outils économiquement viables (en matière de bas coûts de production et d'utilisation).

En outre, on peut identifier un certain nombre d'axes de recherche récents qui, s'ils débouchent sur des solutions industrialisables, pourront jouer un rôle important. Cela concerne d'une part les composants optoélectroniques et d'autre part la gestion du trafic des données ainsi que le traitement du signal optique.

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.

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.

Au cours du deuxième chapitre, l'étude était portée sur la découverte d'une nouvelle technologie qui permet d'avoir accès au haut débit tout en respectant les techniques de transmission du signal.

Et pour finir nous avons effectué une série de simulation en agissant sur des facteurs de liaison optique comme la longueur de la fibre, la puissance émise par le signal et le débit approprié à de telles liaisons. Ceci nous a permis de connaître l'utilité de cette nouvelle

technologie Radio sur Fibre optique pour avoir accès au haut débit utilisé pour les générations à venir.