

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد
تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par: **BENMANSOUR Mohamed & BENEDDRA Abdelhadi**

Sujet

Etude d'un système de modulation ROF basé sur OFDM

Soutenu le 28 Juin 2022 devant le jury composé de :

M.ZERROUKI Hadj	MCA	Univ-Tlemcen	Président
M.DJEMAI Abderrezak	MCB	Univ-Tlemcen	Examineur
M.BORSALI Ahmed Riad	Pr	Univ-Tlemcen	Encadreur
M.FELLAG CHEBRA Abdennour	Doctorant	Univ-Tlemcen	Co-encadreur

Année Universitaire 2021-2022

REMERCIEMENT

Notre profonde reconnaissance et nos très vifs remerciements à notre encadreur MR.BORSALI Ahmed Riad professeur à l'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen en Systèmes des télécommunications. Nous lui exprimons notre très profonde gratitude pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la direction de ce mémoire.

Nos sincères reconnaissances au doctorant MR.FELLAG CHEBRA Abdennour, pour son aide et ses précieux conseils.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à Mr ZERROUKI Hadj maitre de conférence classe (A) à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider ce travail, ainsi que Mr DJEMAI Abderrezak maitres de conférences de classe (B) à l'université de Tlemcen d'avoir bien voulu faire partie de ce jury et examiner ce travail.

N'oublions pas aussi toutes personnes qui nous ont aimablement aide à la réalisation de ce mémoire

DEDICACES

Je dédie mon travail à

A mes chers parents,

En signe de ma profonde et affectueuse reconnaissance, pour tous les sacrifices qu'ils ont bien voulu consentir pour moi. Que ces pages soient pour eux un témoignage de mon grand amour.

A mes frères et sœur,

A mes amis,

BENMANSOUR Mohamed

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

A ma très chère mère, et mon très cher père, à leur grand sacrifice et le dévouement pour mon bonheur.

A mes frères et toute ma famille.

A mes amis et toute personne qui m'a aidée de loin ou de près.

BENEDDRA Abdelhadi

Résumé

Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) transmet à la fois des canaux sans fil et optiques et peut répartir les données sur un grand nombre de sous-porteuses. Il a reçu un signal RF pour une transmission longue distance à l'aide du système RoF (Radio over Fiber). Les réseaux sans fil sont appelés systèmes RoF, à cause de l'amélioration de l'orthogonalité du signal de modulation OFDM. Il utilise à la fois les réseaux fixes et mobiles pour la prochaine décennie. Pour une transmission de données élevée, OFDM peut être utilisé pour les réseaux de courte distance ou de longue distance. Cela commence par la mise en œuvre de la fibre optique, ensuite les caractéristiques de transmission jusqu'au concept de câble à fibre optique.

L'objectif de ce travail consiste à combiner les techniques Radio sur Fibre et l'OFDM pour augmenter la distance et améliorer le débit dans une liaison optique à l'aide du logiciel Optisystem.

Mots clés : OFDM, Radio sur Fibre, Facteur de qualité, Optisystem.

Abstract

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) transmits both wireless and optical channels and can distribute data over a large number of subcarriers. It received an RF signal for long distance transmission using the RoF system. Wireless networks are called RoF (Radio over Fiber) systems, because of the improved orthogonality of the OFDM modulation signal. It uses both fixed and mobile networks for the next decade. For high data transmission, OFDM can be used for short-haul or long-haul networks. This starts with the implementation of fiber optics, then the transmission characteristics to the concept of fiber optic cable.

The objective of this work is to combine Radio over Fiber and OFDM techniques to increase the distance and improve the throughput in an optical link using Optisystem software.

Keywords: OFDM, Radio over Fiber, Quality Factor, Optisystem.

ملخص

يقوم تعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد بإرسال القنوات اللاسلكية والبصرية ويمكنه توزيع البيانات عبر عدد كبير من الناقلات الفرعية. تلقت إشارة تردد لاسلكي للإرسال لمسافات طويلة باستخدام نظام الراديو عبر الألياف. يُشار إلى الشبكات اللاسلكية باسم أنظمة الراديو القائمة على الألياف بسبب تحسين تعامد إشارة التعديل. يستخدم كل من الشبكات الثابتة والهاتفية للعقد القادم. بالنسبة لنقل البيانات العالي، يمكن استخدام تعدد الإرسال لقسم التردد المتعامد لكل من شبكات المسافات القصيرة والطويلة. يبدأ هذا بتطبيق الألياف البصرية، ثم خصائص النقل حتى مفهوم كابل الألياف البصرية الغرض من هذا العمل هو الجمع بين تقنيات الراديو عبر الألياف ومضاعفة تقسيم التردد المتعامد لزيادة المسافة وتحسين الإنتاجية في رابط بصري باستخدام البرنامج
الكلمات الرئيسية: Optisystem، راديو على الألياف، عامل الجودة، OFDM

Table des matières

REMERCIEMENT	I
DEDICACES	II
DEDICACES	III
Résumé	IV
Table des matières	V
Liste des figures	VII
Introduction générale.....	1
Chapitre I Radio sur fibre.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Système de transmission par fibre optique	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Structure de fibre optique.....	5
I.2.3 Fonctionnement de la fibre optique	6
I.2.4 Caractéristique de fibre optique	6
I.2.5 Types de fibre optique	9
I.2.6 Les avantages et inconvénients	11
I.3 Radio sur fibre.....	12
I.3.1 Généralités sur la radio sur fibre pour communication optique [8]	12
I.3.2 Définition de la technique Radio-sur-Fibre	12
I.3.3 Avantages et limitation de la Radio-sur-Fibre :	13
I.3.4 Les architectures générales de la radio sur fibre	14
I.3.5 Les applications principales de la radio sur fibre :.....	16
I.3.6 Les techniques de modulation de la Radio-sur-Fibre :	17
I.3.7 Systèmes de transport des signaux RF, IF, bande de base.....	18
I.4 Conclusion	20
Chapitre II Systèmes de multiplexages	21
II.1 Introduction	22
II.2 Le multiplexage en longueur d'onde WDM	22
II.2.1 Principe de WDM.....	22
II.2.2 Définition de WDM.....	23
II.2.3 Les composants d'un réseau WDM.....	24
II.2.4 Application de WDM	25
II.2.5 Structure du système WDM	25
II.2.6 Modes de transmission de WDM	26

II.3 Multiplexage temporel optique OTDM	27
II.3.1 Principe de fonctionnement	27
II.3.2 Chaîne de transmission	28
II.3.3 Avantages et inconvénients	30
II.4 Multiplexage OFDM	31
II.4.1 Introduction	31
II.4.2 Historique de l'OFDM.....	31
II.4.3 Notion de Multi-porteuse.....	31
II.4.4 Principe de modulation OFDM	32
II.4.5 Clarification de la technique OFDM [33].....	36
II.4.6 Modulation de chaque sous porteuse QAM PSK	38
II.4.7 Avantage et inconvénient [36].....	39
II.5 Conclusion	40
Chapitre III Etude d'une liaison radio sur fibre basée sur OFDM	41
III.1 Introduction	42
III.2 Présentation du logiciel Optisystem	42
III.2.1 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem	43
III.2.2 Applications du logiciel Optisystem	43
III.2.3 Avantage du logiciel Optisystem	44
III.2.4 Critères de qualité d'une transmission	44
III.3 Présentation de la liaison.....	45
III.3.1 Détection direct OFDM.....	45
III.3.2 Résultat de simulation	48
III.3.3 Détection cohérente OFDM	49
III.3.4 Résultats de simulation.....	52
III.4 Conclusion.....	54
Conclusion générale	56
Liste des Acronymes	58
Bibliographie	60

Liste des figures

Figure I.1 : Fibre optique.....	5
Figure I.2: Structure de fibre optique.	6
Figure I.3:Ouverture numérique de fibre optique.	7
Figure I.4:Courbes de dispersion de quelques fibres optiques.....	8
Figure I.5:Dispersion du signal à la sortie de la fibre optique.	9
Figure I.6:Fibre optique Multi-mode à saut d'indice.....	10
Figure I.7:Fibre optique Multi-mode à gradient d'indice.	10
Figure I.8:Fibre optique Monomode.	11
Figure I.9:Architecture générale d'un système de communication par fibre optique.....	12
Figure I.10:Synoptique d'un système Radio sur Fibre.....	13
Figure I.11: Architecture ROF point à point.	15
Figure I.12: Architecture point à multipoint.	15
Figure I.13: Synoptique de la modulation directe.	17
Figure I.14: Synoptique de la modulation externe.	18
Figure I.15: Système RoF utilisant un transport de signal RF.	19
Figure I.16: Système RoF utilisant un transport de signal IF.....	19
Figure II.1:Notion de WDM.....	23
Figure II.2: Schéma de principe du multiplexage WDM.	23
Figure II.3: Peigne des fréquences en WDM.	24
Figure II.4: Structure de système WDM.	25
Figure II.5:Transmission unidirectionnelle.	26
Figure II.6:Transmission bidirectionnelle.	26
Figure II.7: Principe du multiplexage OTDM.....	27
Figure II.8: Emetteur OTDM à N utilisateurs.	28
Figure II.9: Exemple d'un multiplexage OTDM à (04) utilisateurs.....	29
Figure II.10: Récepteur OTDM à N utilisateurs.	30
Figure II.11: Classification des modulations Multi-porteuse.....	32
Figure II.12: Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM.	32
Figure II.13: Spectre en sortie du modulateur OFDM.	33
Figure II.14: Schéma de la modulation OFDM.....	34
Figure II.15: Schéma de la démodulation OFDM.....	34
Figure II.16: Intervalle de garde (Préfixe cyclique).	35
Figure II.17: Intégration du signal avec intervalle de garde.....	36
Figure II.18: Constellation de la modulation de phase QPSK.	38
Figure II.19: Constellation de la modulation d'amplitude 16-QAM.	39
Figure III.1: Schéma de l'interface Optisystem.	42
Figure III.2:Schéma de la liaison Radio sur fibre (DD).	46
Figure III.3: Schéma en bloc d'émission.	46
Figure III.4: Schéma en bloc canal de transmission.....	47
Figure III.5: Schéma en bloc de réception.	48
Figure III.6: Schéma de la liaison Radio sur fibre (DC).	50
Figure III.7: Schéma en bloc d'émission.	50

Figure III.8: Schéma en bloc canal de transmission.....	51
Figure III.9: Schéma en bloc de réception.	51
Figure III.10: Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF (représentation spectrale).....	52
Figure III.11:Signal OFDM.....	52
Figure III.12:Signal de CW Laser après LINb-MZN.....	53
Figure III.13:Signal reçu par le récepteur RF (représentation spectrale).	53

Introduction générale

La communication optique a acquis une importance considérable dans les réseaux de communication longue distance. L'un des principaux critères de ce succès est la bande passante élevée de la fibre de verre, mais surtout, la perte de fibre de verre est très faible. Il est devenu possible de concevoir des systèmes de transmission de puissance de très grande capacité. Cela fait de la fibre une partie intégrante des réseaux métropolitains, transnationaux et intercontinentaux.

Trente ans après sa première fabrication, la fibre optique est enfin utilisée pour connecter les gens grâce à la technologie FTTH (Fiber To The Home). Ce support de transmission transformera l'environnement de la communication dans le monde entier. Cette évolution aura un impact significatif sur les fournisseurs et les opérateurs de réseau. En fait, les réseaux d'accès en cuivre sont largement remplacés par des réseaux d'accès en fibre optique dans le monde entier. L'impulsion la plus importante pour ce changement est la prise de conscience croissante que les réseaux d'accès en cuivre ne sont plus en mesure de répondre à la demande croissante de bande passante. Cet environnement a conduit à une transition majeure vers la fibre dans certains pays où les consommateurs attendent de meilleures performances et un service plus complet.

Plusieurs points d'accès sont nécessaires pour connecter les utilisateurs au réseau et assurer une couverture sans fil. La technologie Radio-over-Fiber (RoF) offre une solution prometteuse pour l'utilisation d'ondes millimétriques sur plusieurs points d'accès. Cette technologie utilise la lumière pour envoyer des signaux radio sur des liaisons optiques. Dans une liaison RoF, le signal radio est converti en amplitude ou en phase de la porteuse optique par un convertisseur électro-optique (E/O) et restitué en fin de liaison par un convertisseur électro-électrique (O/E). Cette combinaison de ces deux domaines permet d'améliorer la couverture sans fil, avec les performances de la fibre optique (faible perte, très large bande passante, et résistance aux interférences électromagnétiques) et la mobilité, qui est le principal avantage des systèmes sans fil combinés pour augmenter le débit.

Dans le système RoF il y a plusieurs avantages, il existe une distorsion du signal RF transmis sur cette liaison optique, ce qui peut affecter la qualité de transmission. Ces distorsions sont liées à plusieurs facteurs, notamment l'intensité relative du laser et le bruit de phase, le

bruit de tir de la photodiode, le bruit thermique de l'étage électronique, la dispersion de la fibre optique et la non-linéarité de divers composants optoélectroniques. Ces facteurs limitants doivent être pris en compte lors de l'étude et de l'analyse de la transmission de signaux radio sur la liaison RoF.

En réponse aux problèmes économiques posés par l'augmentation des équipements à fibre optique due à la demande croissante de débit d'information, l'OFDM est un mode de transmission optique qui utilise principalement les besoins d'Internet (inondations d'images et audio et vidéo), et donc réagir au nombre toujours croissant de ses utilisateurs.

Avant OFDM, la fibre optique était ajoutée à chaque nouvelle demande d'un canal pour une nouvelle liaison. Le coût élevé d'un tel procédé ne permet pas d'être compétitif ni d'élargir le marché au grand public. L'OFDM avec préfixe cyclique (CP-OFDM), qui utilise un ensemble orthogonal de sous-porteuses est de loin le cas le plus populaire des systèmes multi porteuses qui a été proposé dans le but de partager les différents sous-porteuses avec un orthogonalité qui permet une utilisation optimale des ressources spectrales. Ce chapitre décrit les techniques de multiplexage dans les systèmes de transmission optique, leurs performances, leurs avantages et leurs limites, puis explore les différents composants nécessaires à un tel multiplexage.

Notre mémoire est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente une introduction de la technologie Radio-sur-Fibre et ses applications, son intérêt pour les technologies futures ainsi que le principe des techniques de modulation.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude d'une technique de modulation OFDM et le concept de multi porteuse, intervalle de garde, modulation à base de FFT/iFFT, quadrature de phase des canaux, sélectivité du canal.

Le troisième chapitre, sera consacré à la présentation de logiciel Optisystem. Ensuite on va faire la simulation de la technologie OFDM sur la Radio sur fibre, donnant des résultats de BER et EVM avec des différents systèmes de communication.

Chapitre I

Radio sur fibre

I.1 Introduction

La communication par fibre optique est une technique de transmission de l'information entre un endroit et un autre par l'envoi d'une fibre optique. Les systèmes de communication par fibre optique ont été principalement installés dans des applications à longue distance, où ils peuvent être utilisés à leur pleine capacité de transmission, ce qui compense l'augmentation du coût. Les systèmes de transmission optique sont populaires pour maintenir une faible puissance pour les communications sans fil de courte et moyenne portée. Mais pour d'autres applications où la distance de transmission est importante, une puissance élevée est nécessaire. Dans une fibre optique, divers effets non linéaires commencent à apparaître lorsque le niveau de puissance optique augmente.

La radio sur fibre (RoF) est considérée comme une liaison optique analogique transmettant des signaux RF modulant. Il permet de transmettre le signal RF en liaison descendante et en liaison montante, de manière bidirectionnelle de la station centrale (CS) à la station de base (BS). Ces systèmes RoF présentent non seulement les caractéristiques de haute vitesse, de grande capacité et de faible perte de la communication par fibre optique, mais aussi la flexibilité de la communication mobile.

Ce chapitre introduit la notion de fibre optique, de Radio-sur-fibre (RoF), ainsi que les différents systèmes de transmission par voie optique. Les principales caractéristiques de ces liaisons seront aussi décrites, ainsi que les différentes causes de dégradation de leurs performances.

I.2 Système de transmission par fibre optique

I.2.1 Définition

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans la transmission de données et de lumière. Elle offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et peut servir de support à un réseau " large bande " par lequel transite aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. Le principe de la fibre optique a été développé au cours des années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works (actuelle Corning Incorporated) [1].

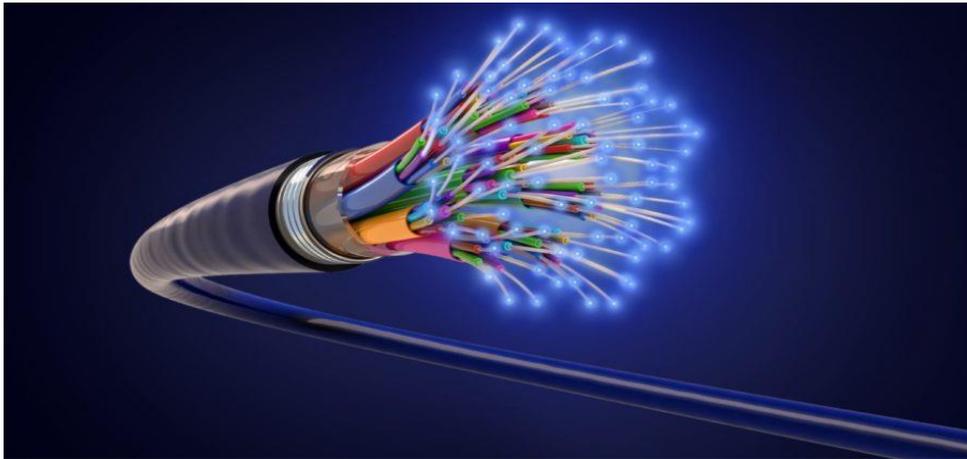


Figure I.1 : Fibre optique.

I.2.2 Structure de fibre optique

Une fibre optique est un guide d'onde cylindrique en verre (silice (SiO_2)). Elle est essentiellement constitué de la partie centrale appelée cœur d'indice de réfraction n_1 . Il est entouré d'une autre partie appelée gaine avec une gaine inférieure d'indice de réfraction n_2 .

L'induction lumineuse n'est possible que lorsque l'indice de réfraction du noyau n_1 est supérieur à l'indice de réfraction de la gaine n_2 .

I.2.2.1 Cœur

C'est la partie centrale de la fibre qui permet la propagation des ondes lumineuses et l'indice de réfraction n_1 .

I.2.2.2 La gaine

C'est la couche qui entoure le cœur de la fibre avec un indice de réfraction de n_2 . Généralement inférieur à celui du cœur, permettant un réflexe complet et constant du mode à une interface cœur-gaine.

I.2.2.3 Le revêtement

Une couche de protection mécanique en matière plastique. En effet, la fibre de silice est protégée par un revêtement de quelques dizaines de micromètres, qui l'isole des agents corrosifs du milieu extérieur et lui confère sa très grande flexibilité. Les matériaux le plus souvent utilisés pour ce revêtement protecteur sont des polymères [2].

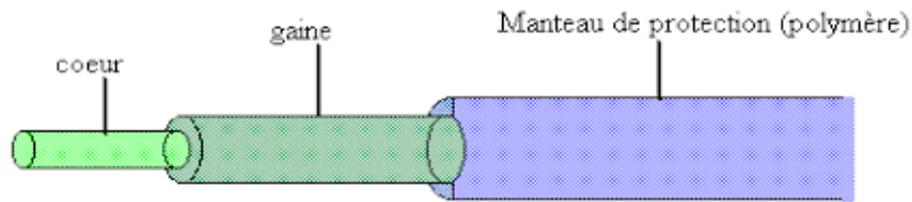


Figure I.2: Structure de fibre optique.

I.2.3 Fonctionnement de la fibre optique

Pour guider la lumière, celle-ci comprend un cœur, où l'énergie lumineuse est confinée, et une gaine, dotée d'un indice de réfraction plus faible. Le cœur est constitué d'une silice très pure comportant un minimum d'ions hydroxyles (OH⁻). La gaine optique est réalisée avec une silice de moindre qualité. Des substances sont incorporées aux deux éléments afin d'en modifier les propriétés : du germanium et du phosphore dans le cœur pour augmenter son indice de réfraction, du bore et du fluor dans la gaine pour le réduire [3].

I.2.4 Caractéristique de fibre optique

I.2.4.1 L'indice de Réfraction

L'indice d'optique ou indice de réfraction peut être vu comme la "résistance" du milieu à la pénétration de la lumière. Dans un milieu de faible indice optique la vitesse de propagation de la lumière est plus grande que dans un milieu d'indice optique élevé. L'indice optique est une quantité sans dimension, c'est à dire sans unité, la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu quelconque [4], est donnée par :

$$\eta = \frac{c}{v} \quad [I.1]$$

I.2.4.2 L'angle d'acceptante

C'est l'angle à l'entrée de la fibre qui détermine le cône d'acceptante dans laquelle les rayons injectés dans soient totalement réfléchis par l'interface cœur gaine. L'angle d'acceptante permet de définir ce qu'on appelle l'ouverture numérique

I.2.4.3 Ouverture numérique

L'angle sur lequel la lumière peut pénétrer dans la fibre pour assurer la propagation. Plus ON est grande plus il est facile d'injecter la lumière dans la fibre, cette ouverture définit par la figure (I.3).

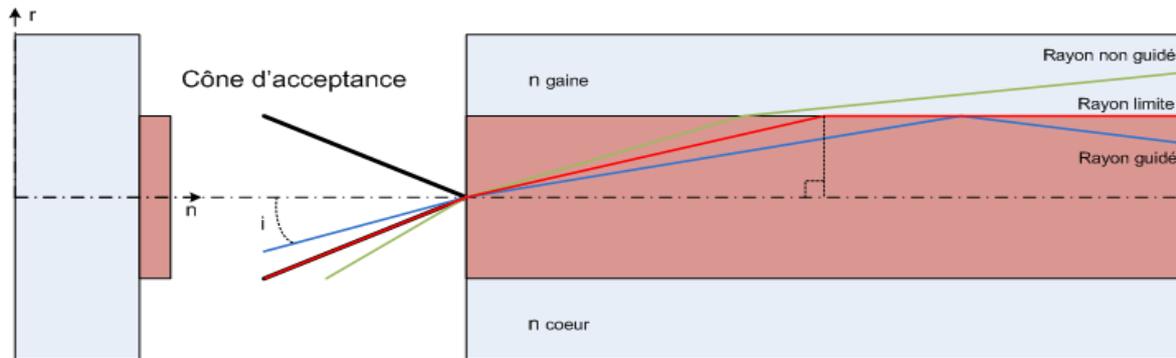


Figure I.3: Ouverture numérique de fibre optique.

Avec : n_1 : l'indice de réfraction de cœur.

n_2 : l'indice de réfraction de la gaine.

I.2.4.4 Atténuation

La puissance optimale « P » disponible après un parcours de « x » Km dans une fibre optique est pour une puissance injectée P_0 égale à :

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad [I.2]$$

α : est le coefficient d'atténuation linéique, exprimé en dB/Km et représente la somme de l'ensemble des pertes dans la fibre ($\alpha = 0,16 \text{ dB/Km}$ pour $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$).

I.2.4.5 Dispersion

La Dispersion au sens large est un étalement ou un élargissement des pulses lumineux lors de leur propagation le long d'une fibre. La dispersion est un élargissement temporel des impulsions émises, Les impulsions à la sortie de la fibre sont élargies par rapport aux impulsions à l'entrée. Les types de la dispersion :

I.2.4.5.1 Dispersion chromatique

Le temps de propagation de groupe [5], c'est-à-dire le temps mis par un signal pour parcourir l'unité de longueur, dépend de la longueur d'onde. Le paramètre de dispersion chromatique (D) est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km. On le donne généralement en $\text{Ps}/(\text{nm.km})$, les picosecondes correspondant à l'élargissement temporel, les nanomètres à la largeur spectrale et les kilomètres à la longueur de fibre.

En fait, la dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion modale).

I.2.4.5.1.1 Dispersion du matériau (D_{mat})

Elle résulte du fait que la silice qui compose majoritairement la fibre optique a un indice de réfraction qui varie en fonction de la longueur d'onde. Cette dépendance induit une modification de l'indice de groupe propre au milieu et doit être incluse dans les lois de propagation de la lumière dans le guide. Pour la silice, D_{mat} varie d'environ -100 ps/km/nm à 0,85 μm, +23 ps/km/nm à 1,55 μm et elle s'annule à 1,27 μm.

I.2.4.5.1.2 Dispersion du guide D_g

Elle est liée à la structure géométrique et aux dimensions du guide par rapport à la longueur d'onde, elle résulte de la variation de la constante de propagation β avec la fréquence normalisée V (qui dépend-elle-même de la longueur d'onde λ) ; la dispersion du guide est toujours négative et dépend des paramètres de la fibre.

Il existe aussi des fibres à dispersion aplatie pour lesquelles la dispersion totale reste très faible, de l'ordre de quelques Ps/ (nm.km), sur plus d'une centaine de nanomètres. La figure (I.4) nous montre les courbes de dispersion de quelques Fibre :

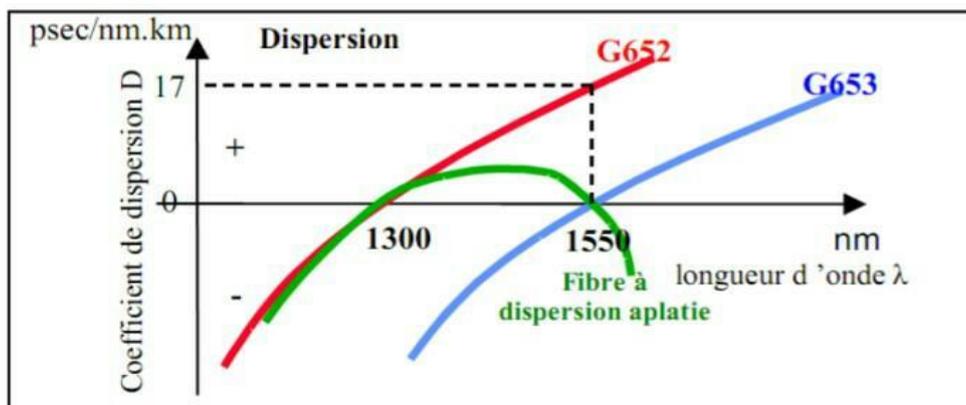


Figure I.4: Courbes de dispersion de quelques fibres optiques.

I.2.4.5.2 Dispersion Modale

Dans une fibre les différents rayons lumineux ne suivent pas le même trajet, ou mode : Celui-ci dépend de l'angle d'incidence à l'interface air-verre. Le mode le plus court sera celui qui suit parfaitement l'axe optique de la fibre. Le plus long sera celui ayant l'angle d'incidence à l'interface cœur- gaine le plus grand autorisé. L'ensemble des retards entre les différents rayons composant le signal lumineux détermine en réception une distorsion du signal lumineux. C'est la dispersion modale, qui se traduit par l'élargissement d'impulsion [12].

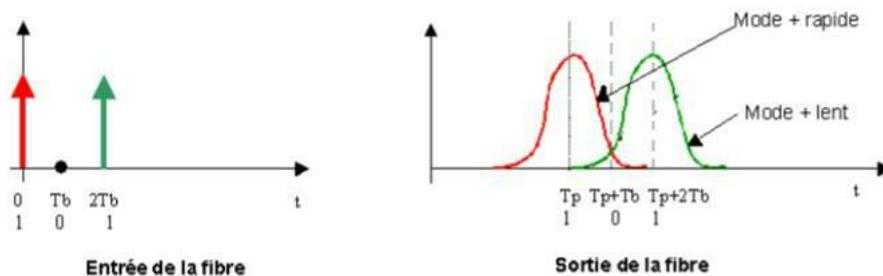


Figure I.5: Dispersion du signal à la sortie de la fibre optique.

I.2.4.6 Bande passante

La bande passante est probablement l'une des caractéristiques des systèmes de transmission. Elle est définie comme la largeur de la gamme de fréquence disponible sur le support. Définit la quantité d'informations pouvant être transmises sur un câble à fibre optique. La bande passante de la fibre optique dépend de l'effet de connexion des deux phénomènes, la dispersion modale et de la dispersion de la longueur d'onde, et donc de la longueur de la fibre. En effet, la variance est proportionnelle à la longueur de la fibre. La bande passante est définie par l'expression :

$$BP = \frac{1}{2\alpha_{tot}^2} \quad [I.3]$$

Où

$$\alpha_{tot}^2 = \alpha_c^2 + \alpha_m^2 \quad [I.4]$$

Avec :

α_c, α_m : Dispersion chromatique et modale.

α_{tot} : Dispersion total.

I.2.5 Types de fibre optique

Il existe deux principaux types de fibres

I.2.5.1 Fibre optique Multi Mode

Plusieurs modes de propagation coexistent, les faisceaux lumineux peuvent suivre des chemins différents suivant l'angle de réfraction. A l'arrivée, les rayons franchissent l'extrémité à des instants différents avec une certaine dispersion du signal. Ce type est utilisé pour les courtes distances (centaine de mètres) et un débit plus faible (1Gbits/km environ), et pour les réseaux privés [5, 6]

I.2.5.1.1 Multi mode à saut d'indice

Ce type de fibre qui est utilisé dans les réseaux LAN. Cette fibre possède un cœur très large dont le diamètre du cœur varie entre $100\ \mu\text{m}$ et $200\ \mu\text{m}$, dans lequel on peut avoir plusieurs modes de propagation de la lumière, et celui de la gaine varie de $150\ \mu\text{m}$ à $250\ \mu\text{m}$, et l'atténuation du signal est très importante [5, 6].

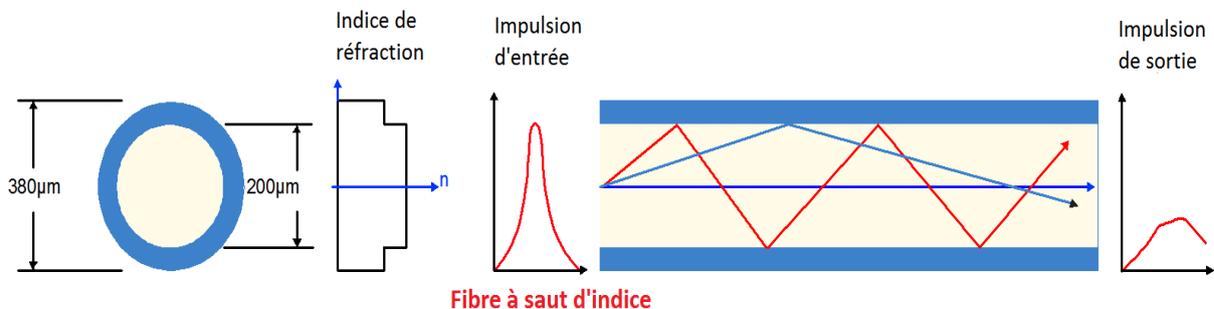


Figure I.6: Fibre optique Multi-mode à saut d'indice.

I.2.5.1.2 Multi mode à gradient d'indice

Dans ce cas il n'y a pas de différence entre l'indice de réfraction entre cœur et la gaine le diamètre diminue progressivement vers l'extérieur. Le diamètre de la gaine est de $150\ \mu\text{m}$ et celui du cœur est de $50\text{-}100\ \mu\text{m}$, constitué de plusieurs couches avec un indice de réfraction de densités multiples qui influent sur la direction des rayons [5, 7].

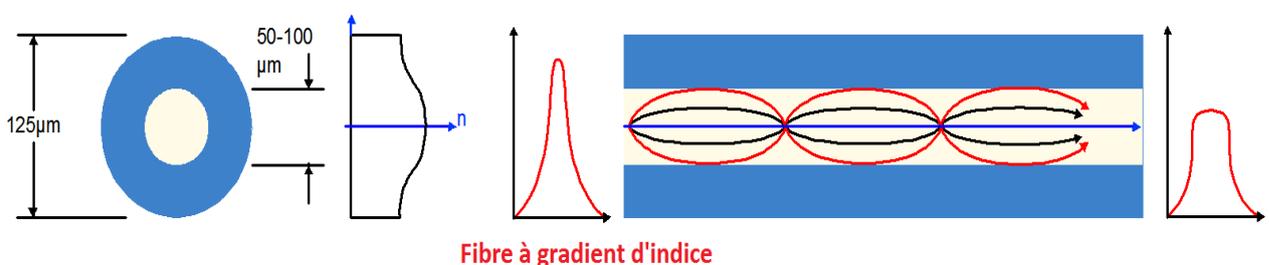


Figure I.7: Fibre optique Multi-mode à gradient d'indice.

I.2.5.2 Fibre optique Monomode

Dans ce type de fibre, Le diamètre du cœur est inférieur à $10\ \mu\text{m}$ (varie entre $6\ \mu\text{m}$ et $8\ \mu\text{m}$), le diamètre de leurs gaines est $125\ \mu\text{m}$. Un seul mode se propage dans cette fibre (mode fondamental), elles sont largement utilisées pour la transmission de signaux à haute débit et sur de longues distances grâce à la bande passante la plus large et le niveau de pertes le plus bas et l'absence de dispersion modale.

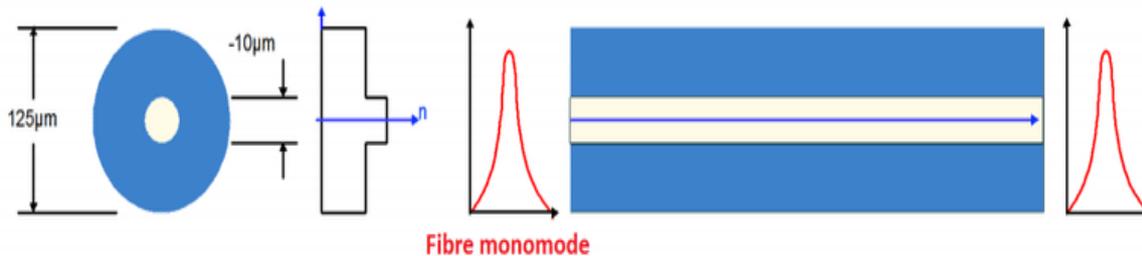


Figure I.8: Fibre optique Monomode.

I.2.6 Les avantages et inconvénients

I.2.6.1 Les avantages

- Large bande passante
- Débits binaires élevés
- Affaiblissements minimisés
- Faible sensibilité aux facteurs extérieurs (température, humidité...)
- Immunité à l'interférence statique due aux sources de bruit. L'isolation des sources de bruit optique est plus facile que l'isolation des sources de bruit électrique.
- Sécurité d'installation et maintenance. Les fibres optiques ne sont pas des conducteurs d'électricité.
- Sécurité dans la transmission contre des intrus, facilement détectables.
- Faibles encombrements et leurs faibles poids

I.2.6.2 Les inconvénients

- La difficulté de raccordement.
- Coût d'exploitation élevé.
- Le câble ne doit pas dépasser une certaine longueur.
- Perte de raccordement entre différents composants optiques du système

I.3 Radio sur fibre

I.3.1 Généralités sur la radio sur fibre pour communication optique [8]

Les liaisons optiques se basent sur trois blocs fondamentaux pour effectuer le transfert de l'information, le bloc d'émission, le canal de transmission et le récepteur.

Le bloc d'émission est constitué d'un dispositif permettant de convertir un signal complexe électrique en un signal optique.

La fibre optique, qui constitue le canal de transmission, transporte une porteuse optique modulée contenant l'information à véhiculer.

Le récepteur de signal inclut un photodétecteur qui opère une conversion du signal optique en un signal électrique qui peut ensuite être traité par des systèmes électroniques plus conventionnels.

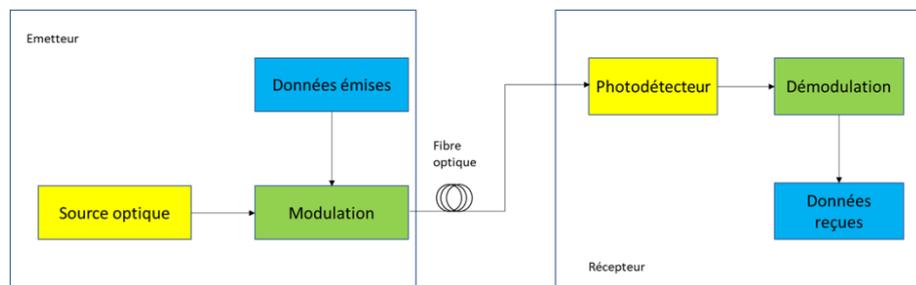


Figure I.9: Architecture générale d'un système de communication par fibre optique.

I.3.2 Définition de la technique Radio-sur-Fibre

La radio sur fibre (RoF) est une technique dans laquelle le signal de radiofréquence (RF) est basé sur un signal lumineux avant d'être transmis sur la fibre et récupéré en signal RF à l'extrémité de réception par démodulation. On a deux types de transmission : la transmission de radiofréquences (RF) sur fibre et la transmission de fréquences intermédiaires (IF) sur fibre. Au cours des deux dernières décennies, elle est devenue une invention populaire et a attiré l'attention de chercheurs compétents pour satisfaire la demande toujours croissante de débit de données élevé et de mobilité [9]. Un système RoF général se compose d'un signal radiofréquence (RF), d'un matériel de système optique pour moduler une lumière avec un signal RF et pour récupérer le signal RF sous forme de signal optique, et d'un support optique. La station centrale (CS), la station de base (BS) et la fibre sont les trois principaux composants de l'architecture du système RoF, la figure (I.10) montre la synoptique d'un système Radio sur Fibre.

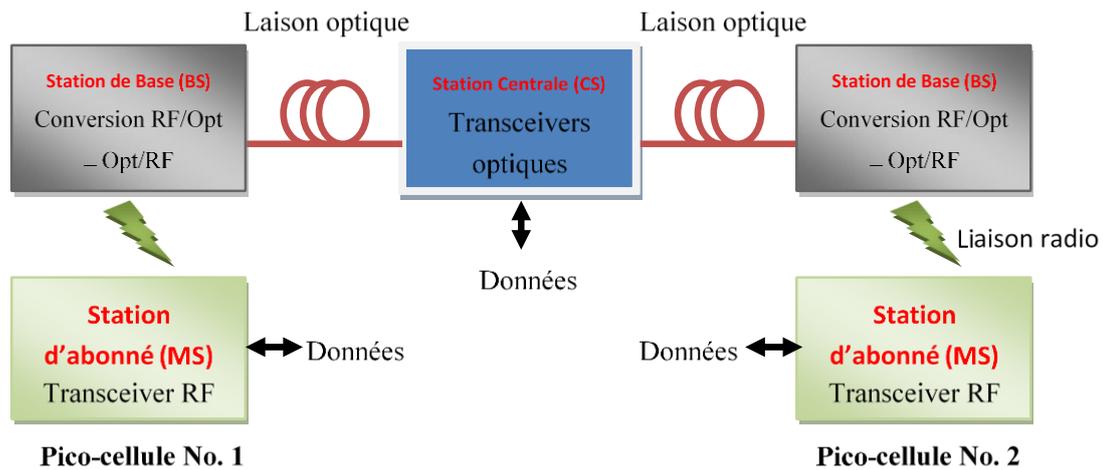


Figure I.10: Synoptique d'un système Radio sur Fibre.

I.3.3 Avantages et limitation de la Radio-sur-Fibre :

I.3.3.1 Les avantages :

La solution RoF représente une technique hybride, car elle peut reposer sur la communication par voies optique et sans fil. L'avantage d'un système RoF est sa capacité à regrouper les hautes performances de ces deux domaines de communication [10]. On peut citer :

- Faible atténuation de la fibre : pour la fibre de silice, la longueur d'onde des télécommunications est de (0,2 ; 0,3) dB/km, ce qui permet d'améliorer la zone de couverture de transmission radio.
- Le poids de la fibre est nettement plus léger que le câble coaxial classique.
- Bande passante très élevée de la fibre optique et la possibilité d'atteindre des débits de transmission supérieurs au Gbit/s.
- La liaison RoF est transparente vis-à-vis des protocoles de transmission, ce qui permet d'envisager la transmission des signaux RF configurés selon les standards dédiés à la bande millimétrique à 60 GHz avec des formats de modulation complexes [11].
- Immunité aux interférences des signaux RF : C'est un autre avantage de la technique RoF car le signal est transmis sous forme de lumière immune aux impulsions CEM.
- Efficacité d'énergie : La BS se compose uniquement de modules de conversion E/O et O/E, d'amplificateurs, filtre RF et d'antennes, ce qui la rend plus simple et consomme moins d'énergie.
- Pérennité d'installation : Les dispositifs complexes et coûteux pour les systèmes RoF sont centralisés au niveau du SC. Cela vous permet de centraliser des fonctions

complexes. Par conséquent, les composants SC sont partagés entre plusieurs systèmes d'exploitation, ce qui réduit les coûts d'installation et de maintenance du système.

- Faible cout d'installation : l'utilisation des systèmes RoF a l'avantage de centraliser les différentes fonctions de traitement du signal dans la station centrale CS ce qui simplifie la structure des stations de bases BS, et donc le coût du système.

I.3.3.2 Les limitations :

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

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

I.3.4 Les architectures générales de la radio sur fibre

Pour l'utilisation de la technologie radio sur fibre, plusieurs possibilités de topologies s'offrent à nous : Point à point et Point à multipoints.

I.3.4.1 Point à point :

L'architecture d'un système radio sur fibre point à point (P2P : Point To Point) est assez simple. Le signal transmis au lien descendant est amplifié par un amplificateur de puissance puis transmis dans l'air. Pour la voie montante, l'antenne de réception doit être suivi d'un filtre

et un amplificateur faible bruit LNA (Low Noise Amplifier) pour s’immuniser aux interférences et améliorer le SNR [12].

Cette architecture est typiquement utilisée pour réaliser des dépôts d’antennes UMTS, Wi MAX ... en raison de sa facilité de mise en œuvre pour un faible nombre d’antennes déportées. Par ailleurs, cette méthode peut aussi être utilisée pour réaliser le système multipoints à multipoints, avec le multiplexage optique ou électrique.

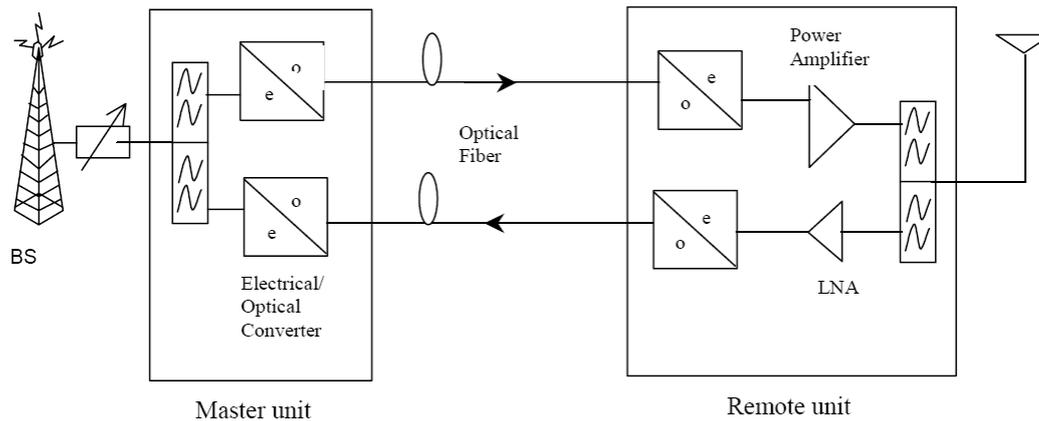


Figure I.11: Architecture ROF point à point.

I.3.4.2 Architecture point à multipoints

Les premières applications d’un système RoF point à multipoints ont été réalisées dans les années 90 pour transmettre le multiplex de fréquences de chaînes de télévisions sur une seule longueur d’onde optique, puis de la distribuer aux abonnés via le réseau optique [12].

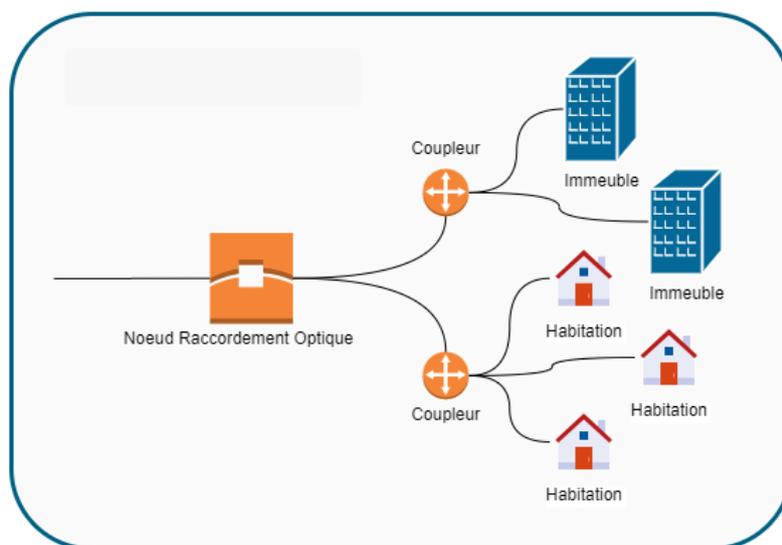


Figure I.12: Architecture point à multipoint.

I.3.5 Les applications principales de la radio sur fibre :**I.3.5.1 Les communications par satellite :**

Les communications par satellite constituent une première application de la technologie RoF en ce qui concerne la distribution des informations aux utilisateurs sur une courte distance. Une autre application dans le domaine satellitaire concerne la bande de la distribution 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, avec pour objectif d'améliorer la visibilité du satellite ou de réduire les interférences avec d'autres systèmes terrestres. Les équipements des stations de base peuvent ainsi être regroupés, ce qui réduit les coûts [13].

I.3.5.2 Les systèmes de distribution vidéo

Les systèmes de distribution vidéo offrant des services comme la distribution vidéo multipoint (MVDS) constituent un domaine très prometteur pour la technologie RoF. Le MVDS désigne les systèmes multimédia de diffusion vidéo, dans la bande de fréquence de 40 GHz [14].

I.3.5.3 Les services mobiles à haut débit

Le service mobile large bande (MBS) est destiné à étendre les services fixes à large bande (BISDN : Broadband Integrated Services Digital Network) aux utilisateurs de téléphones portables. De futurs services seront développés sur le BISDN et les réseaux mobiles doivent également supporter ces services sur le système MBS. Ainsi, un très haut débit de l'ordre de 155 Mb/s par l'utilisateur doit être fourni. Par conséquent, des bandes de fréquences autour de 60 GHz ont été allouées. Une bande de 62 à 63 GHz est attribuée pour la liaison descendante tandis qu'une autre bande 65 à 66 GHz est attribuée pour la transmission en liaison montante. 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 [15].

I.3.5.4 Les communications routières

Les fréquences entre 63-77 GHz sont destinées pour ce service en Europe afin de fournir en continu une couverture des communications mobiles sur les principaux axes routiers. De manière à 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 [15].

I.3.5.5 La RoF pour les futurs réseaux domestiques

La multiplication des appareils connectés et des services comme les médias center, les ordinateurs, la visiophonie, la VOIP conduit à une nouvelle architecture du réseau domestique et des technologies sans fil pour permettre d'offrir des débits supérieurs à 1Gb/s. Cette architecture du réseau domestique est fondée sur un réseau de distribution local câblé adapté à supporter des très hauts débits dans les différentes pièces de la maison et d'un immeuble. Une technologie radio prometteuse capable de fournir des débits au-delà du gigabit utilise les fenêtres de fréquences à 60 GHz avec des portées qui ne dépassent pas 15 m.

I.3.6 Les techniques de modulation de la Radio-sur-Fibre :

La modulation de la lumière est une fonction essentielle pour la transmission des données dans une fibre optique. Ainsi les systèmes opto-hyperfréquences utilisent une porteuse optique pour transporter les informations et assurer le transfert des signaux hyperfréquences sur le lien optique. La conversion des signaux électriques en signaux optiques s'effectue en agissant sur l'un des paramètres de la lumière comme son intensité, sa phase ou sa polarisation. Il existe deux techniques de modulation, à savoir la modulation directe et la modulation externe.

I.3.6.1 La modulation directe

La modulation directe a pour but de moduler le courant d'alimentation de la diode laser, ce qui entraîne une modulation de la puissance optique délivrée. Cependant, le niveau de puissance délivrée est souvent très faible, et l'utilisation d'amplificateurs optiques s'impose dans le cas des transmissions sur des longues distances. [16]

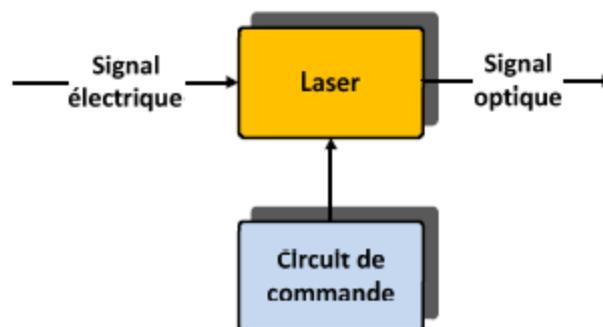


Figure I.13: Synoptique de la modulation directe.

La modulation directe du courant d'injection de la diode laser, est une modulation d'intensité optique ou de puissance optique, mais ce n'est pas la modulation de l'intensité du courant.

I.3.6.2 La modulation externe

La modulation externe [16] consiste à changer l'un des paramètres de l'onde lumineuse par l'intermédiaire d'un modulateur externe à la source lumineuse. Cette méthode de modulation est très privilégiée pour les télécommunications à haut débit sur de longues distances, à cause de la limitation du chirp. Elle permet d'obtenir une bande passante plus importante et un indice de modulation plus élevé que dans le cas de la modulation directe.

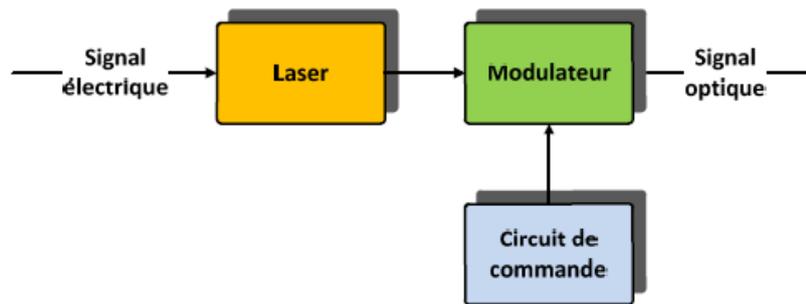


Figure I.14: Synoptique de la modulation externe.

Le signal optique continu émis par la diode laser fonctionnant à courant constant subit très peu de dégradation. Lors de sa transmission à travers le modulateur, il est modulé par les données, car le signal électrique qui leur est associé module l'indice optique du matériau du modulateur et par suite son facteur de transmission.

I.3.7 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 requis et sa complexité au niveau de la base station. Un système duplex complet peut utiliser les différentes architectures sur la liaison montante et sur la liaison descendante.

I.3.7.1 Transport de fréquence RF sur fibre

L'architecture RF sur fibre permet aux signaux RF d'être transférés directement sur une liaison optique à des fréquences rayonnées dans l'espace libre, comme illustré à la figure (I.15).

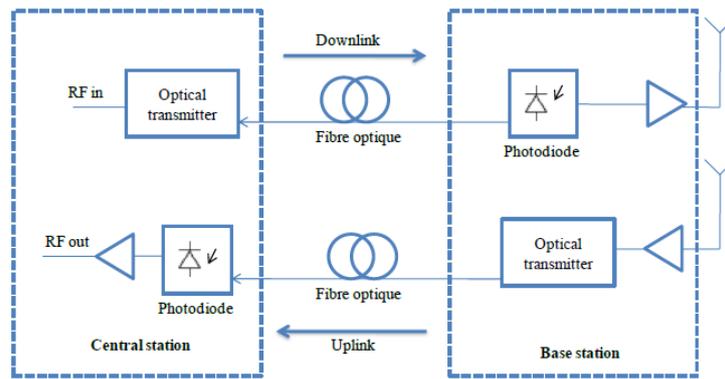


Figure I.15: Système RoF utilisant un transport de signal RF.

L'avantage de cette approche est que les signaux ne subissent pas de conversion de fréquence à des stations de bases qui bénéficient d'une architecture simple qui ne nécessite que la conversion électro-optique et opto-électrique, l'amplification RF, et l'émission/réception RF. De plus, le contrôle centralisé du traitement des signaux aide à promouvoir l'évolutivité du système.

L'inconvénient est que plus la fréquence RF est élevée, plus il est difficile d'envoyer le signal RF directement en raison des effets néfastes de la dispersion chromatique. Par ailleurs, dans le domaine millimétrique (30-300GHz), les prix des composants optoélectroniques demeurent élevés.

I.3.7.2 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 (I.16).

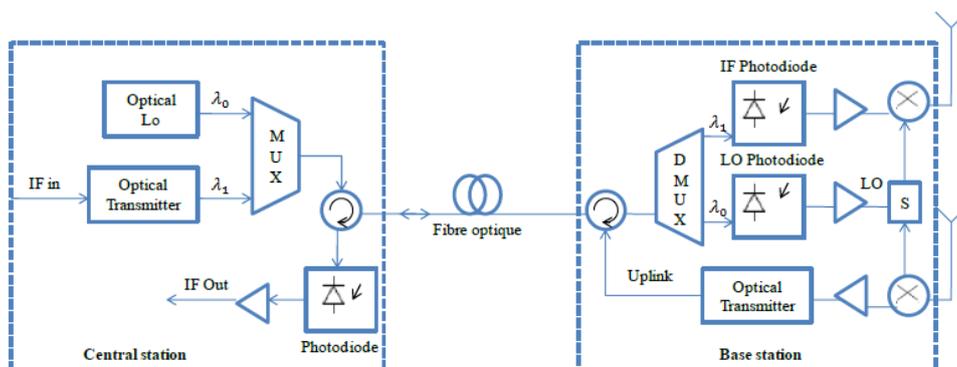


Figure I.16: Système RoF utilisant un transport de signal IF.

C'est l'utilisation des fréquences de modulation intermédiaire dans le cas du transport IF sur fibre qui permet de réduire significativement les effets de la dispersion en longueur d'onde par rapport au cas du transport RF sur fibre. Un autre avantage de ce système est qu'il est économique car il peut intégrer des composants électroniques à faible coût largement disponibles sur le marché.

L'inconvénient est que cette architecture reste plus complexe que l'architecture RF sur fibre, car chaque BS nécessite un oscillateur local et un mélangeur pour effectuer la transposition de fréquence.

I.3.7.3 Transport du signal en bande de base

Dans cette architecture, un signal en bande de base est généré et envoyé de la station de contrôle à la station de base sur fibre optique.

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 méthode est que l'effet de dispersion dû à la transmission en bande de base peut être significativement réduit, mais elle nécessite un équipement électro-optique haute fréquence coûteux.

I.4 Conclusion

Il y a de nombreux avantages à atteindre des vitesses de transmission élevées et à répondre aux besoins de propagation des différents médias (Internet, TV, etc.). La nouvelle infrastructure mise en place peut être compatible avec les systèmes développés pour la transmission à courte distance et répondre aux exigences de mobilité des utilisateurs.

De nombreuses techniques de modulation complexes ont été développées pour maintenir des taux d'erreur de transmission faibles et assurer un débit élevé. Certains, comme l'OFDM, sont adaptés à la bande passante élevée fournie par la fibre optique. La stabilité en fréquence des lasers de type DFB est également un avantage pour le développement de réseaux optiques. Ces sources agissent soit sur le courant laser, soit sont modulées directement à l'aide d'un modulateur externe, qui a généralement une bande passante élevée.

Chapitre II

Systemes de multiplexages

II.1 Introduction

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

Les fenêtres de 1,55 μm et 1,3 μm ont une fréquence de 15 THz, ce qui permet théoriquement des débits de données extrêmement élevés. Cependant, l'utilisation de cette capacité souffre d'un certain nombre de problèmes, ne serait-ce que la dégradation due aux interférences inter symboles dues à la dispersion des fibres, qui devient de plus en plus importante à mesure que les débits augmentent, ainsi qu'à l'électronique de traitement du signal en pré-modulation et en post-détection. C'est pourquoi diverses solutions ont été conçues pour utiliser la capacité des fibres optiques à augmenter la transmission d'informations sur un même support.

Pour l'essentiel, le principe reste le même : utiliser N signaux de débit nominal D avec une capacité équivalente à des signaux de débit $N \times D$: c'est ce qu'on appelle le multiplexage. Le débit délivré est maintenant plus élevé. Un signal concentré de flux provenant de diverses sources est appelé un signal multiplexé. Pour maintenir l'intégrité de chaque signal sur le canal, le multiplexage introduit une séparation temporelle, spatiale ou fréquentielle entre les signaux.

II.2 Le multiplexage en longueur d'onde WDM

II.2.1 Principe de WDM

A l'inverse de la technologie TDM qui n'utilise qu'une seule longueur d'onde par fibre optique, la technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) met en œuvre un multiplexage de longueurs d'onde. L'idée est d'injecter simultanément dans une fibre optique plusieurs trains de signaux numériques sur des longueurs d'ondes distinctes. Le WDM consiste à diviser le spectre optique en plusieurs sous canaux, chaque sous-canal étant associé à une longueur d'onde. La fibre optique se prête bien à ce type d'usage car sa bande passante est très élevée : de l'ordre de 25 000 GHz. Elle présente donc un fort potentiel au multiplexage de très nombreux canaux sur de longues distances. [17]

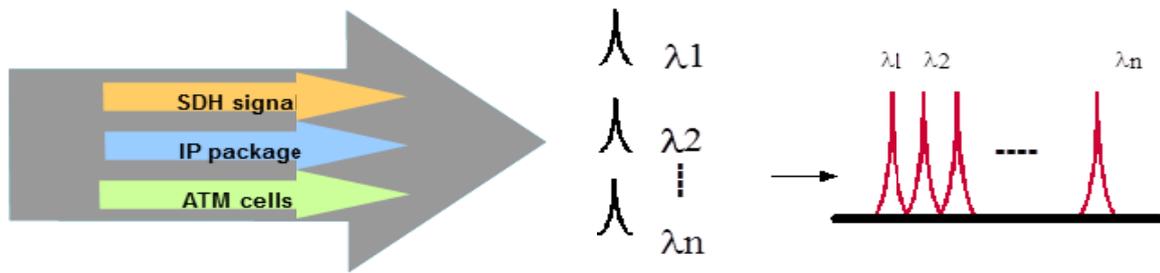


Figure II.1: Notion de WDM.

II.2.2 Définition de WDM

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes laser émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches dans le voisinage des 1550 nm, et de multiplexeur/démultiplexeur optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans la fibre [18, 19].

La figure (II.2) montre un exemple d'une liaison utilisant le multiplexage WDM.

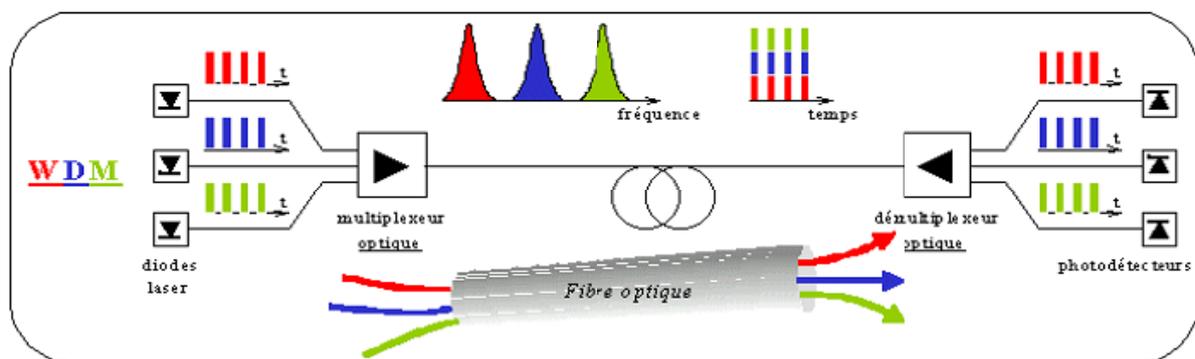


Figure II.2: Schéma de principe du multiplexage WDM.

Afin d'assurer une bonne qualité de transmission du multiplexage dans la fibre, il est important de déterminer l'espacement minimum à respecter entre les longueurs d'onde émises par chacune des sources. Cette grandeur dépend de plusieurs choses: qualité de la fibre, qualité des multiplexeur/démultiplexeur, longueur de transmission, qualité des sources, débit des données de chaque source. La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à $N \times D$. La norme ITU-T G692 définit la plage de longueurs d'ondes dans la fenêtre de transmission de 1530 à 1565 nm. L'espacement normalisé entre deux longueurs d'ondes est de 1,6 ou 0,8 nm.

Le peigne de fréquence dans les réseaux WDM est présenté dans la figure (II.3)

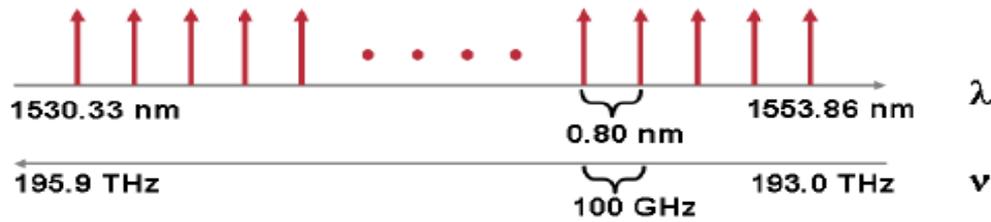


Figure II.3: Peigne des fréquences en WDM.

II.2.3 Les composants d'un réseau WDM

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

II.2.3.1 Les multiplexeurs terminaux optiques (Optical Terminal Multiplexer ou OTM):

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

II.2.3.2 Les multiplexeurs à insertion/extraction optique (Optical Add Drop Multiplexer ou OADM) :

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

II.2.3.3 Les brasseurs optiques (Optical Cross Connect ou OXC) :

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

Les nœuds WDM peut être déployés dans les réseaux de transport optiques selon plusieurs topologies. En pratique, la topologie maillée est surtout utilisé pour les réseaux de

cœur étant donné qu'elle garantit une meilleure stabilité du réseau en cas de panne des nœuds. La topologie en anneaux est principalement utilisée dans les réseaux métropolitains et d'accès.

Similairement à SDH, la technologie WDM définit des mécanismes d'auto cicatrisation d'anneaux tels qu'OCh-DPRING (Optical Channel Dedicated Protection Ring) et OMS-SPRING (Optical Multiplex Section-Shared Protection Ring) [20], qui assurent un rétablissement rapide des longueurs d'onde défailantes en cas de pannes.

II.2.4 Application de WDM

L'intérêt premier du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs. On trouve aujourd'hui des systèmes à $4 \times 10 \text{ Gbits/s}$, $16 \times 10 \text{ Gbits/s}$. Mais le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission WDM s'est fait lorsqu'il a été associé à l'amplification optique.

En effet, l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) a permis l'amplification simultanée de l'ensemble des N canaux d'un multiplex, sans distorsion du signal utile, envoyer N canaux dans une fibre optique plutôt que N fibres devenait un avantage économique indiscutable. S'il y a encore peu de temps, l'espacement entre canaux était de l'ordre de 1nm, le terme de DWDM (Dense WDM) est maintenant utilisé. En effet, avec l'apparition, sur le marché, de lasers accordables de très bonne qualité, l'espacement entre les longueurs d'onde a pu être progressivement réduit, et est descendu à 0,8 nm ou 0,4 nm. Une seconde application du WDM concerne les réseaux locaux. Chaque abonné se voit alors attribuer une longueur d'onde, c'est à dire une "couleur" [21].

Cette méthode présente l'avantage de permettre une évolution continue du réseau par l'adjonction de nouveaux services ou de nouveaux abonnés simplement par insertion d'une nouvelle longueur d'onde.

II.2.5 Structure du système WDM

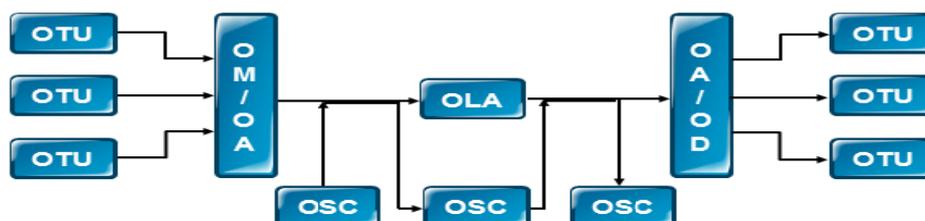


Figure II.4: Structure de système WDM.

OTU (Optical Transponder Unit) : La réception des services clients et les convertir en un signal WDM normalisé.

OM (Optical Multiplexer): multiplexeur des services de différente longueur d'onde.

ODU (Optical De-multiplexer Unit): Démultiplexeur des services.

OA (Optical Amplifier): Amplificateur optique.

OLA: Amplificateur de ligne.

OSC (optical Supervisory Channel): Canal de supervision optique.

ESC (electrical Supervisory Channel): Canal de supervision électrique.

II.2.6 Modes de transmission de WDM

II.2.6.1 Transmission unidirectionnelle

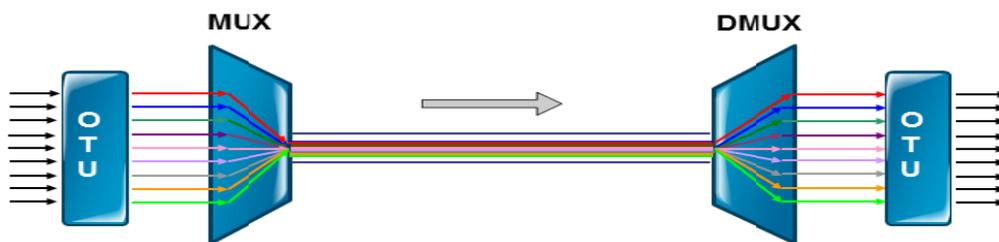


Figure II.5: Transmission unidirectionnelle.

Le système WDM unidirectionnelle adopte deux fibres optiques, un implémente que la transmission de signaux dans un sens, et l'autre met en œuvre la transmission des signaux dans la direction opposée , Largement utilisé dans le monde entier [22, 18].

II.2.6.2 Transmission bidirectionnelle

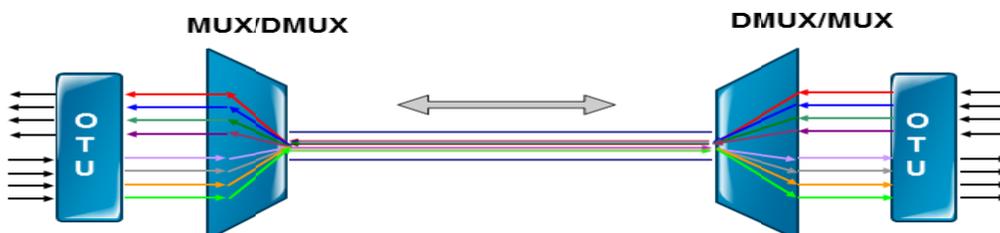


Figure II.6: Transmission bidirectionnelle.

Le système WDM bidirectionnel onde utilise une seule fibre optique, la fibre transmet des signaux optiques dans les deux directions simultanément, et les signaux dans les différentes

directions devraient être attribués en longueurs d'onde différentes, ce mode est généralement utilisé dans le système CWDM pour réduire le coût.

II.3 Multiplexage temporel optique OTDM

II.3.1 Principe de fonctionnement

Le multiplexage OTDM (Optical Time Division Multiplexing) est un outil robuste qui surmonte la limitation de la bande passante des composants électroniques et optoélectroniques et augmente le débit binaire du signal transmis. C'est une solution pour surmonter les effets non linéaires associés au système WDM (Wavelength Division Multiplexing) qui fût introduit au début des années 1990. Ce système utilise uniquement une approche dans le domaine temporel. L'avantage du système OTDM est de combiner de nombreuses données optiques au débit de base B dans le domaine temporel pour obtenir un débit associé plus élevé ($N \times B$), où N est le nombre de canaux [23]. Dans le récepteur, le signal OTDM est séparé dans de nombreux canaux.

La figure (II.7) représente un schéma de principe du système OTDM à canaux. Le train d'impulsions optiques d'une diode laser est divisé en trajets. Dans chaque canal, le train d'impulsions est modulé individuellement par un signal de données électrique créant N canaux de données au format optique RZ (Retour à Zéro). L'émetteur OTDM utilise le format de modulation RZ au lieu du NRZ (Non-Retour à Zéro) car l'énergie des impulsions RZ est concentrée dans un intervalle de temps plus court qu'une période de bits. Chaque impulsion est retardée d'une fraction de la période d'horloge et synchronisée. Pour éviter la diaphonie entre les canaux, la source laser doit pouvoir générer des impulsions optiques d'une durée de la période d'horloge [24]. Pour multiplexer un signal optique de période pour le canal, le retard requis pour chaque trajet est :

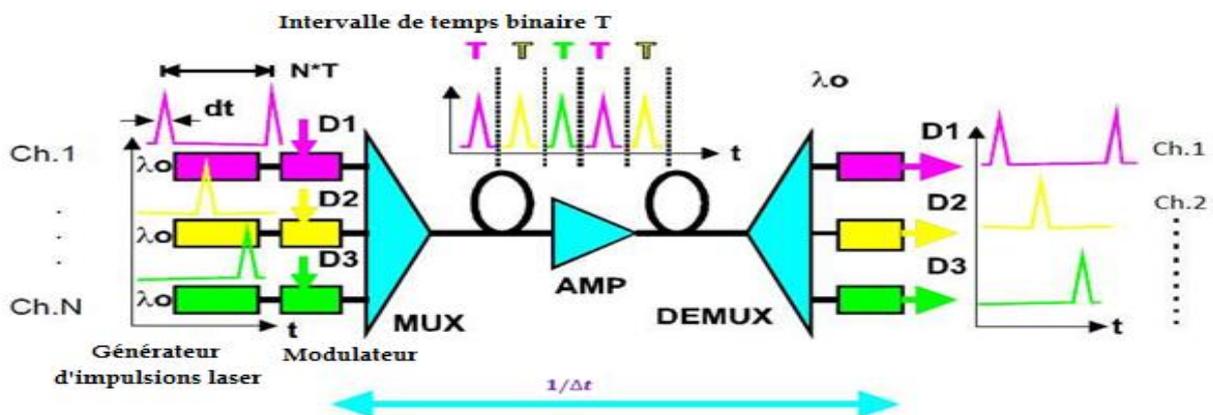


Figure II.7: Principe du multiplexage OTDM.

II.3.2 Chaîne de transmission

Comme illustré dans la figure (II.8), une chaîne de transmission utilisant le multiplexage OTDM (tout-optique) est constituée d'un émetteur, d'un récepteur [21].

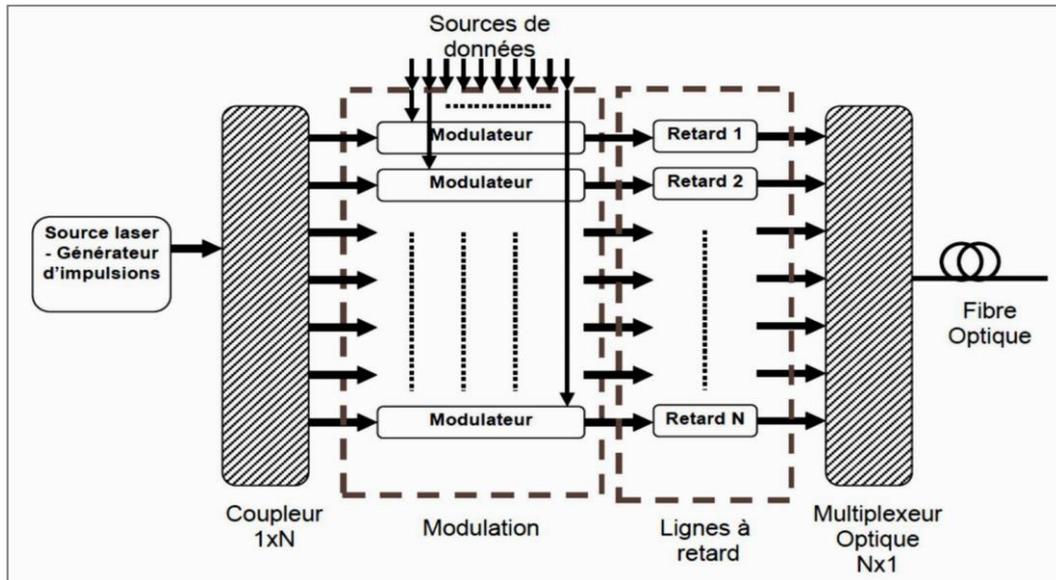


Figure II.8: Emetteur OTDM à N utilisateurs.

A l'émission, une source optique pulsée (généralement un laser) génère un train d'impulsions optiques de durée T_c très courte (représentant la porteuse optique). Ces impulsions sont ensuite appliquées à l'entrée d'un modulateur optique, commandé par un signal électrique (représentant la donnée des utilisateurs) codé en RZ (RZ : Return to Zéro) [25] ou en NRZ (NRZ : Non Return to Zéro) à un débit binaire $D_b = 1/T_b$ [26].

Cependant, pour que le multiplexage optique puisse se faire sans recouvrement optique, il est primordial de choisir le codage RZ puisqu'il génère des impulsions ayant une durée inférieure à T_b/N (étant le nombre d'utilisateurs) [21]. De cette manière une marge de sécurité est ajoutée afin d'éviter tout recouvrement entre les données.

Les signaux optiques en sortie des modulateurs sont ensuite décalés en temps et combinés en un seul signal, ayant un débit global N fois plus grand que celui de la donnée, avant d'être transmis à travers la fibre optique, comme montré avec l'exemple illustré sur la figure (II.9) pour quatre (04) utilisateurs [21].

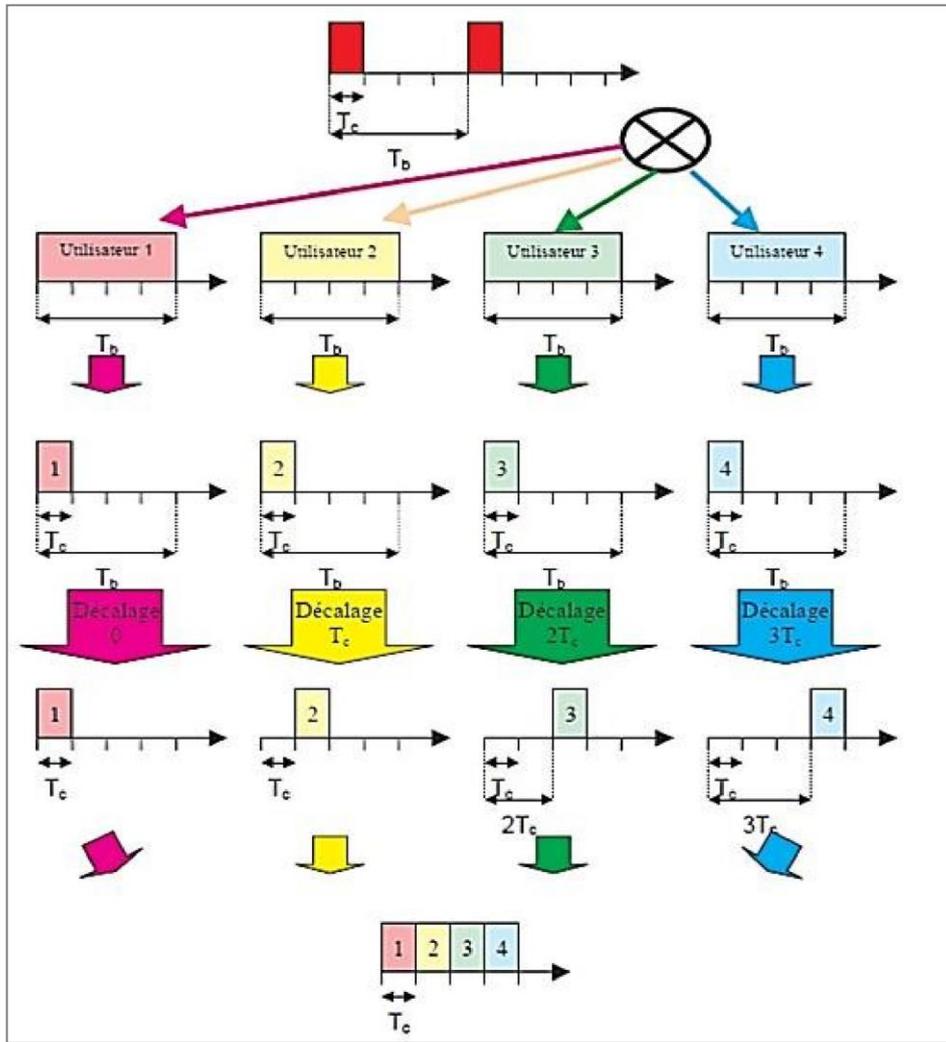


Figure II.9: Exemple d'un multiplexage OTDM à (04) utilisateurs.

En réception, les données des différents utilisateurs sont récupérées en isolant temporellement les impulsions optiques à l'aide d'un signal de synchronisation au rythme des données émises comme est illustré sur la figure (II.10) [26].

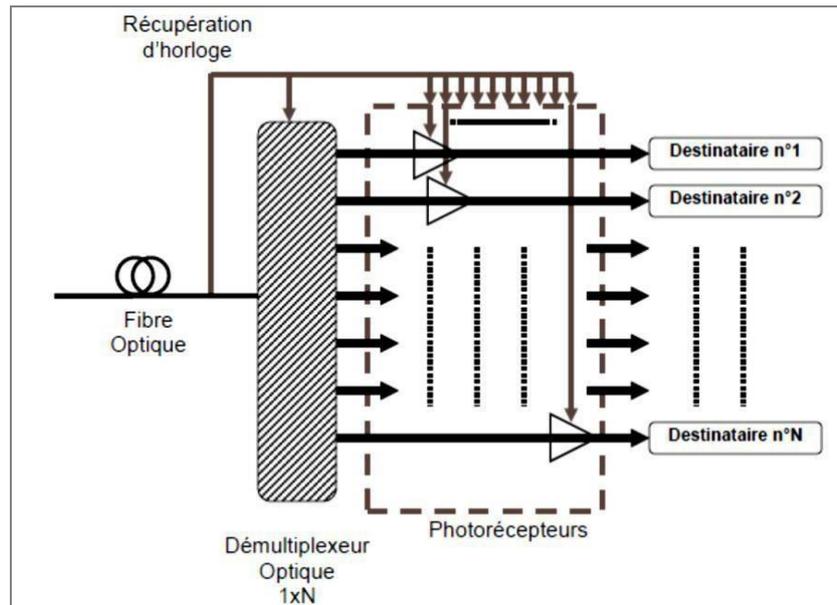


Figure II.10: Récepteur OTDM à N utilisateurs.

II.3.3 Avantages et inconvénients

L'OTDM présente plusieurs avantages notamment en ce qui concerne la bande passante, la mise en œuvre ainsi que la possibilité d'intégration dans le système WDM tout en remédiant aux effets non-linéaires. Ces avantages sont donnés comme suit [27]:

- Bande passante flexible ;
- Surmonte l'effet non linéaire associé au WDM ;
- Le système est très simple à mettre en œuvre ;
- La capacité totale du réseau OTDM monocanal = DWDM ;
- Equipement de nœud terminal pas complexe.
- Peut fonctionner à la fois :
 - ✓ 1500 nm (comme WDM) en raison de l'EDFA ;
 - ✓ 1300 nm ;

La dispersion dans ce système est une grande préoccupation car la distance de transmission des signaux OTDM est limitée par la dispersion de la fibre en raison de l'utilisation des impulsions optiques ultra-courtes (de l'ordre de Ps) commandées par un débit binaire relativement élevé.

II.4 Multiplexage OFDM

II.4.1 Introduction

Les techniques qu'on appelle multi porteuses OFDM consistent à transmettre des données numériques simultanément en les modulant sur un grand nombre de porteuses. Ce sont des techniques de multiplexage en fréquence qui existent depuis longtemps. Le regain d'intérêt actuel réside dans l'amélioration apportée pour augmenter l'efficacité spectrale en « Orthogonalisant » les porteuses, ce qui permet d'obtenir un meilleur recouvrement spectral. l'implémentation de la modulation et de la démodulation s'effectue à l'aide de circuits performants basée sur la transformée de Fourier rapide (FFT).

II.4.2 Historique de l'OFDM

La modulation multi-porteuse a été introduite à la fin des années 50, sa première utilisation était dans des systèmes de communications hautes fréquences militaires. Quelques années plus tard elle a été améliorée avec l'apparition du concept des signaux orthogonaux à bande limitée, concept que l'on appellera par la suite « Orthogonal frequency Division multiplexing » (OFDM). La mise en œuvre de l'OFDM à l'époque consistait à utiliser des filtres de Nyquist [28]. Du fait de la complexité à générer des bancs de filtres de sinusoides, l'OFDM n'a pas tout de suite intéressé les industriels civils. 20 ans plus tard le schéma de modulation-démodulation a été simplifié avec l'utilisation de la Transformée de Fourier discrète Inverse (TFDI) à l'émission et de la TFD au niveau du récepteur, ce qui rend facile son implémentation numérique. Dans le milieu des années 1980, la technique OFDM a été développée dans les domaines industriels civils tels que le projet de radiodiffusion numérique DAB.

II.4.3 Notion de Multi-porteuse

Le transfert des données est généralement basé sur une transmission successive dans le temps des symboles dans le temps. Dans ce cas chaque symbole occupe la totalité de la bande disponible. La deuxième technique de transmettre les symboles simultanément dans le temps, occupant des bandes parallèles. La durée temporelle ainsi que la largeur de bande peuvent être allouées uniformément ou non-uniformément à chaque symbole.

Dans le contexte de la transmission des données, les modulations multi-porteuses se réfèrent à une structure dans laquelle plusieurs symboles sont envoyés en même temps en occupant des sous-bandes différentes. La décomposition de la bande peut être uniforme ce qui conduit à des modulations basées sur les systèmes de Gabor, ou non-uniforme ce qui génère des systèmes de modulation en ondelettes ou en paquets d'ondelettes [29, 30].

La figure ci-dessous montre la classification des modulations multi-porteuses selon la décomposition de la bande uniforme ou non-uniforme.

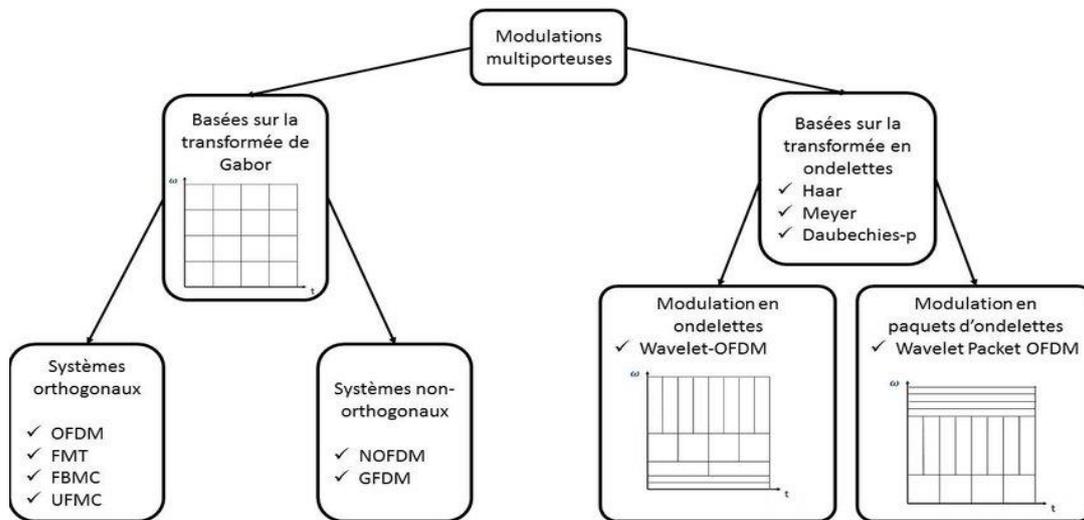


Figure II.11: Classification des modulations Multi-porteuse

II.4.4 Principe de modulation OFDM

Le principe de l’OFDM consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l’on veut transmettre. Comme si l’on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes.

Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d’information sur une portion de fréquences donnée, l’OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l’orthogonalité n’interfèrent pas entre eux. Comme le montre la Figure (II.12).

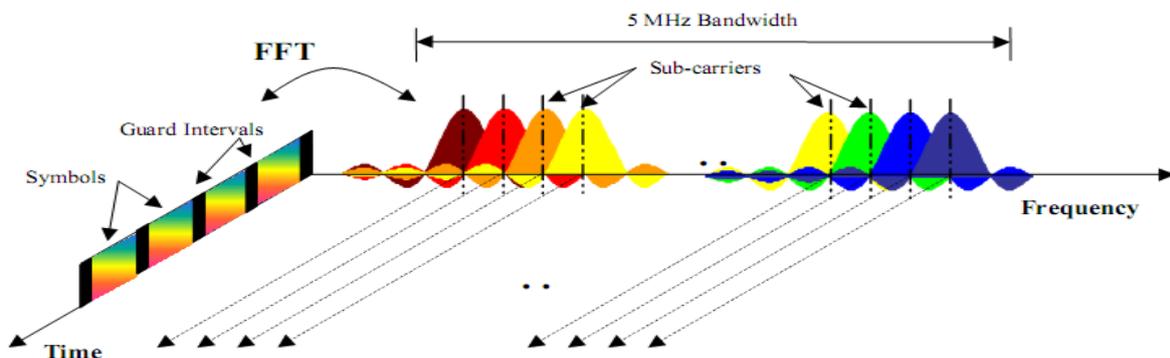


Figure II.12: Représentation fréquentielle et temporelle d’un signal OFDM.

II.4.4.1 Notion d'orthogonalité

La technique de modulation OFDM permet un fort chevauchement spectral entre les sous-porteuses. Cependant, l'opérateur doit respecter la contrainte d'orthogonalité dans les domaines temporel et fréquentiel fonctionnent normalement en même temps. L'orthogonalité est atteinte si l'espace entre deux fréquences adjacentes $F_n = \frac{1}{T_n}$. En effet, pendant la fenêtre de durée rectangulaire, chaque symbole est modulé par la porteuse temps, le sinus de base représente son spectre, la figure (II.13) montre le spectre de sortie du modulateur OFDM.

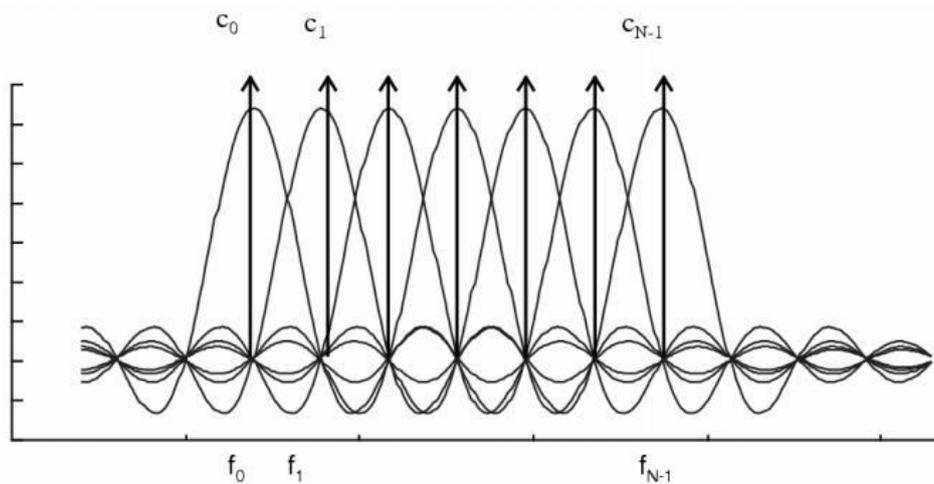


Figure II.13: Spectre en sortie du modulateur OFDM.

Par conséquent, il n'existe pas des interférences avec les autres sous porteuse, ce qui donne un chevauchement spectral et occupation optimale du spectre pour différentes porteuses.

II.4.4.2 Modulateur OFDM

Pour la réparation des données à transmettre sur les N porteuses, Les symboles doivent être regroupés par des paquets de N . Les symboles sont des nombre complexes offrent les constellations souvent de type QAM ou PSK Le signal est modulé par le k ième train de symboles parmi les N trains. Et C_k la forme complexe de signal porteur modulé du train K [31]. Le rassemblement des symboles OFDM nous donne le signal total $s(t)$ figure (II.14).

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi f_k t} \quad [2.1]$$

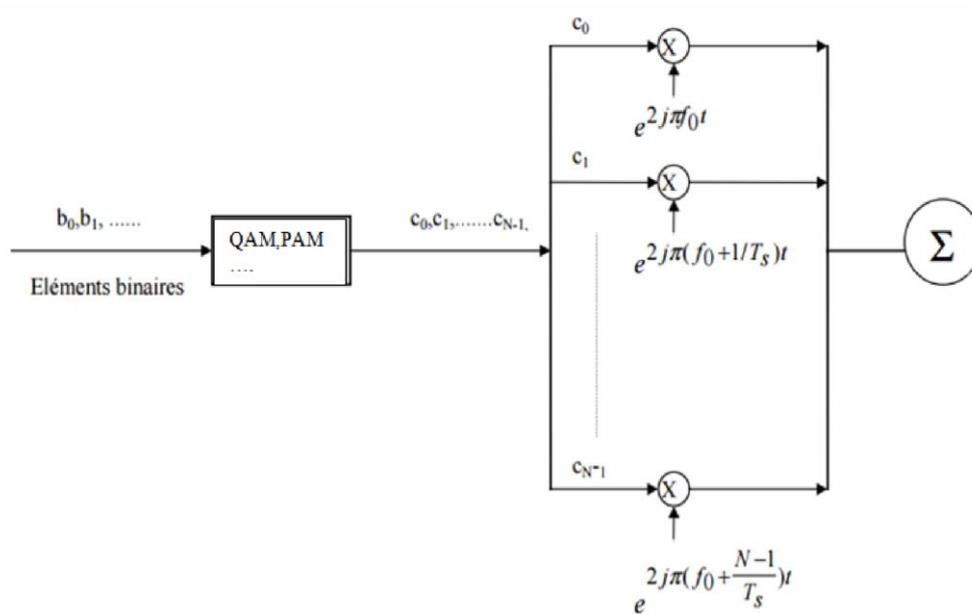


Figure II.14: Schéma de la modulation OFDM.

II.4.4.3 Principe de la démodulation OFDM

Le signal parvenu au récepteur s'écrit sur une durée symbole T_s :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{j2\pi f_k t} \quad [2.2]$$

$H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal qui varie lentement. La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous porteuses suivant la figure (II.15).

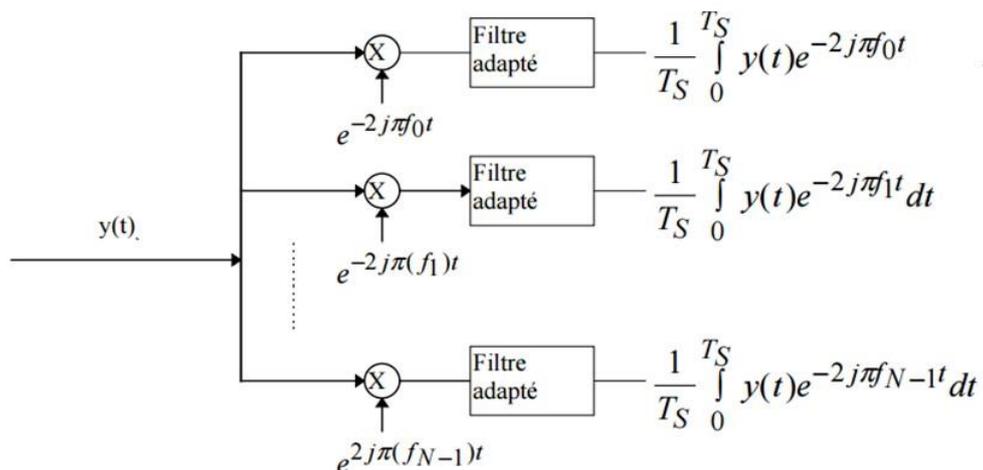


Figure II.15: Schéma de la démodulation OFDM.

II.4.4.4 Intervalles de gardes [32]

Une même suite de symbole arrivant à un récepteur par deux chemins différents se présente comme une même information arrivant à deux instants différents, elles vont donc s'additionner provoquant ainsi les deux types de défauts suivants :

- L'interférence intra symbole : Addition d'un symbole avec lui-même légèrement déphasé.
- L'interférence inter symbole: addition d'un symbole avec le suivant plus le précédent légèrement déphasé.
- Entre chaque symbole transmis, on insère une zone "morte" appelée intervalle de garde.

De plus, la durée utile d'un symbole sera choisie suffisamment grande par rapport à l'étalement des échos. Ces deux précautions vont limiter l'interférence inter symbole. La durée T_u pendant laquelle est émise l'information diffère de la période symbole T_s car il faut prendre en compte, entre deux périodes utiles, un "temps de garde" T_g qui a pour but d'éliminer l'ISI qui subsiste malgré l'orthogonalité des porteuses. Pour que cet intervalle de garde soit efficace, sa durée doit être au moins égale à l'écho non négligeable le plus long (celui qui a le retard maximal).

Entre la période symbole, la période utile et l'intervalle de garde s'instaurent donc la relation :

$$T_s = T_u + T_g \quad [2.3]$$

Le temps de garde, s'il peut être un intervalle de garde "blanc" pendant lequel on n'émet rien, est plus généralement une copie de la fin de la trame OFDM. Si cette méthode est efficace pour lutter contre l'ISI, elle pénalise cependant sensiblement le débit de transmission, et certains systèmes OFDM profitent des progrès dans le domaine de l'égalisation pour s'en affranchir.

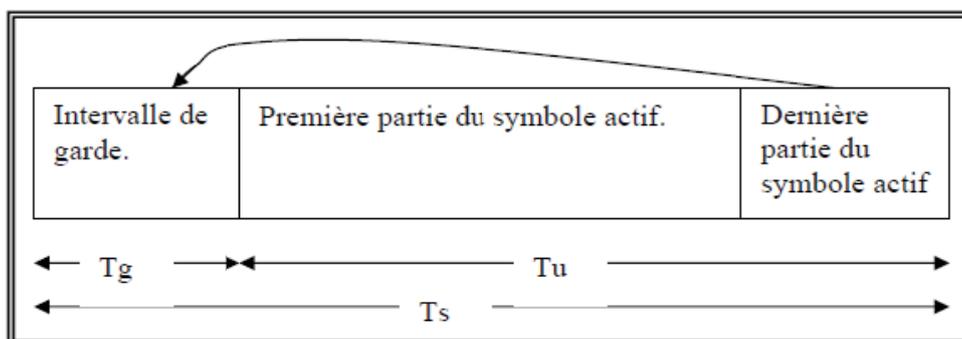


Figure II.16: Intervalle de garde (Préfixe cyclique).

La figure (II.16) illustre l'adjonction d'un intervalle de garde. La période du symbole est prolongée de manière à être supérieure à la période d'intégration T_s . Toutes les porteuses étant cycliques à l'intérieur de T_u , il en va de même pour l'ensemble du signal modulé. Le segment ajouté au début du symbole pour former l'intervalle de garde est donc identique au segment de même longueur à la fin du symbole. Tant que le retard d'un trajet par rapport au trajet principal (le plus court trajet) est inférieur à l'intervalle de garde, les composantes du signal à l'intérieur de la période d'intégration viennent toutes du même symbole: le critère d'orthogonalité est satisfait. Les brouillages ICI (Inter Code Interference) et ISI (Inter Symbol Interference) ne se produisent que lorsque le retard relatif est plus long que l'intervalle de garde.

La longueur de l'intervalle est choisie de manière à correspondre au niveau de trajets multiples prévus. Elle ne devrait pas représenter une trop grande partie de T_u , pour ne pas sacrifier trop de capacité en données et de rendement spectral.

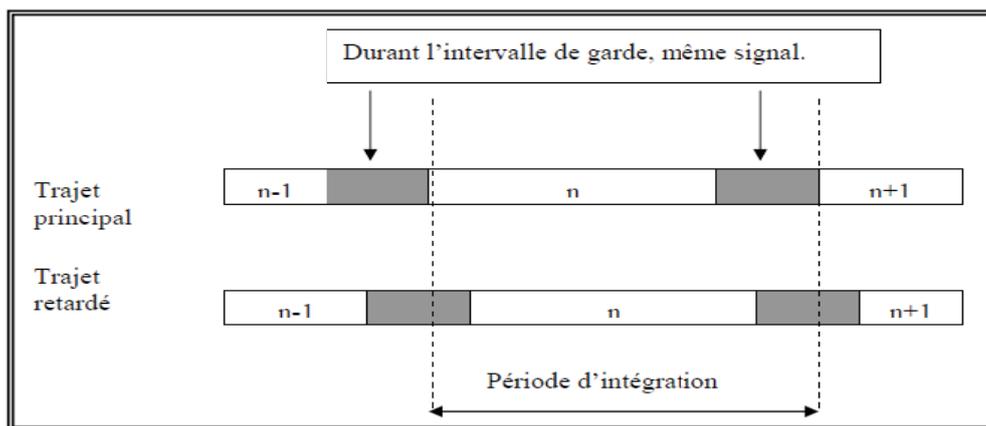


Figure II.17: Intégration du signal avec intervalle de garde.

Les signaux, arrivant de différents trajets, peuvent s'ajouter de manière constructive ou destructive. En fait, il est possible de montrer que le signal démodulé à partir d'une porteuse donnée est très similaire au signal émis: il est simplement multiplié par la réponse fréquentielle équivalente du canal (à propagation par trajets multiples) sur la même fréquence porteuse.

II.4.5 Clarification de la technique OFDM [33]

La technique OFDM peut être utilisée pour augmenter la robustesse du signal reçu. Du point de vue de l'évanouissement sélectif en fréquence ou des interférences à bande étroite. C'est-à-dire son principal atout. Dans un système à transporteur unique, un seul point de défaillance ou Le fondu peut entraîner l'échec de toute la connexion, mais sur un seul système et avec plusieurs porteuses, le pourcentage de sous-porteuses affectées est négligeable. Là vous

pouvez utiliser le codage de canal pour la détection et la correction des erreurs reconstruire les informations perdues.

Examinons par exemple la modulation en quadrature (QAM) d'une porteuse par des informations numériques. A chaque symbole, la porteuse transmise est présentée suivant une phase et une amplitude particulière, choisie dans la constellation utilisée. Un symbole donné achemine un certain nombre de bits d'informations, égal au logarithme base 2 du nombre d'états différents dans la constellation. On suppose que ce signal est reçu suivant deux chemins, avec un délai maximum entre eux égale à τ_{\max} . Si l'on considère le i -ème symbole reçu, le récepteur s'efforcera de démoduler les données envoyées dans ce symbole en examinant toutes les informations reçues, en direct et avec retardement, par rapport à ce i -ème symbole.

Lorsque le délai maximum est supérieur à une période d'un symbole, le signal reçu du second trajet agit uniquement comme un brouillage, puisqu'il n'achemine que des informations appartenant à un ou plusieurs symbole(s) précédent(s). Ce brouillage inter symbole est reconnu par l'interférence inter-symbole (ISI). Lorsque le retard est inférieur à une période d'un symbole, seule une partie du signal reçu de ce trajet agit comme un brouillage, puisqu'elle n'achemine que des informations appartenant au symbole précédent. Le reste achemine des informations du symbole utile, qui peut s'ajouter de manière constructive ou destructive aux informations du trajet principal.

La technique OFDM est utilisée pour éviter un seul débit très élevé. Cette technique divise ce débit élevé en plusieurs canaux parallèles à faible débit. Chacun transporté par sa propre sous-porteuse. C'est, la signalisation OFDM consiste en une distribution aléatoire de symboles de durée numérique T_u (temps d'utilisation des symboles numériques) de diverses porteuses modulées par QPSK ou QAM considéré dans l'étude.

La technique OFDM découpe le canal en cellules selon les axes du temps et des fréquences. Le canal est alors constitué d'une suite de sous bandes de fréquences et d'une suite de segments temporels. A chaque cellule, fréquence/temps, est attribuée une sous porteuse dédiée. L'information à transporter est répartie sur l'ensemble de ces sous porteuses, modulée chacune a faible débit. Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant « t ». Chacune des sous-porteuses est orthogonale en fréquence à la précédente. Une même suite de symboles arrivant par deux chemins différents se présente comme la même information arrivant à deux instants différents et qui s'additionnent. Ces échos provoquent l'interférence inter symbole.

II.4.6 Modulation de chaque sous porteuse QAM PSK

Dans les systèmes OFDM, les bits d'informations de chaque sous-porteuse sont modulés à l'aide de diverses techniques de modulation telles que la modulation BPSK, QPSK et QAM16. L'augmentation du nombre d'états dans la constellation peut augmenter le débit binaire, ce qui se traduit par un espacement plus étroit entre les points de la constellation et une plus grande sensibilité au bruit dans le système.

En général, la constellation de chaque sous-porteuse montre un changement aléatoire d'amplitude et de phase provoqué par l'environnement par trajets multiples. Parmi les modulations utilisées dans un système OFDM, la plus robuste est la modulation QPSK qui codé sur 2 bits par symbole [34].

II.4.6.1 Modulation QPSK

La modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) est codée sur 2 bits par symbole. Le flux de données binaires est divisé en deux "flux partiels" appelés la composante sinusoïdale (I ou mode commun) et la composante sinusoïdale (Q ou orthogonale). Les paires de valeurs (ou doublets) forment ce que l'on appelle des symboles.

Du point de vue électronique, les signaux I et Q sont centrés sur 0V. On peut donc supposer que I et Q prennent symboliquement deux niveaux +1 et 1 correspondant à l'état binaire.

L'état de phases du signal modulé se représentent en coordonnées polaires dans le plan **I, Q**. Suivant les combinaisons de **I** et **Q**, on obtient alors un diagramme que l'on appelle communément constellation. La figure 19 montre le diagramme de constellation pour la modulation QPSK [35].

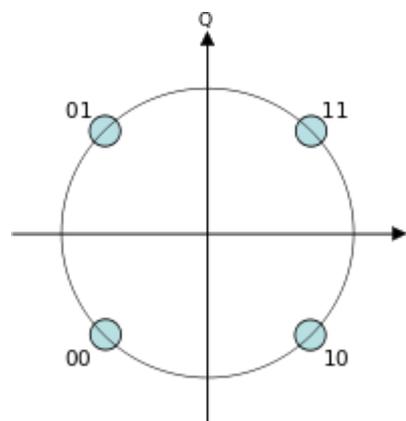


Figure II.18: Constellation de la modulation de phase QPSK.

Cette modulation permet d'augmenter l'efficacité spectrale sans modifier la bande passante allouée.

II.4.6.2 Modulation QAM-16

La Modulation d'amplitude en quadrature QAM (Quadrature Amplitude Modulation) résulte de la combinaison de deux fréquences porteuses sinusoïdales déphasées l'une de l'autre de 90° (d'où le nom de quadrature). Elle peut aussi être vue comme une modulation de phase et d'amplitude. Elle permet des débits élevés avec une rapidité de modulation relativement faible, par exemple, la QAM-16 utilise 4 bits par symbole 2 bits sur i et deux bits sur Q . La valeur de i peut être une des 4 amplitudes possibles. Il en est de même pour la valeur de Q . La figure 20 montre le diagramme de constellation de la modulation QAM-16 [35].

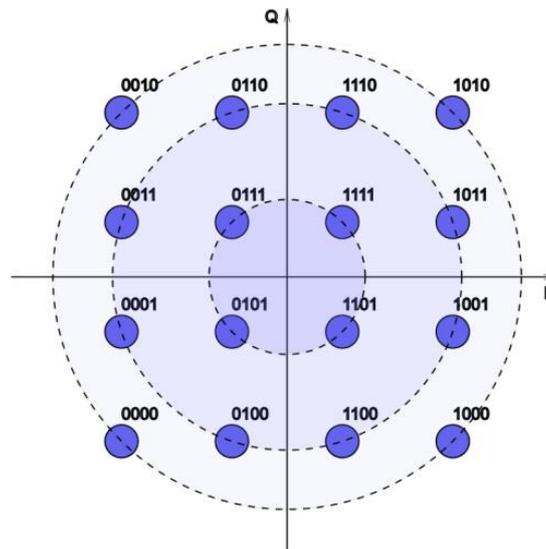


Figure II.19: Constellation de la modulation d'amplitude 16-QAM.

II.4.7 Avantage et inconvénient [36]

Les principaux avantages de la modulation l'OFDM sont nombreux, on peut en citer :

- L'utilisation de la bande de fréquence allouée est optimale par orthogonalisation des porteuses.
- La modulation est basée sur un algorithme bien connu et peu complexe : la FFT.
- Un codage et entrelacement adapté permettent d'améliorer la qualité de la transmission des données.
- L'OFDM permet une égalisation simple grâce à l'ajout du "préfixe cyclique" ou du "zero padding", même en présence de canaux multi trajets denses.

L'OFDM possède néanmoins des inconvénients qu'il est important d'appréhender :

- Du fait de la modulation, un signal OFDM temporel peut être considéré comme une somme de NDF T sinusoïdes. L'enveloppe de ce signal suit, selon le théorème de la limite-centrale. La loi de Gauss et la probabilité que le signal total ait une grande dynamique d'amplitude est d'autant plus importante que NDF T est grand. Cette caractéristique ne doit pas être négligée dès lors que l'on travaille à des forts niveaux d'amplification. Cette dynamique est souvent définie comme le rapport entre la puissance maximum et la puissance moyenne du signal (PAPR, Peak to Average Power Ratio). Le PAPR impose que le front-end Radio Fréquence (RF) soit linéaire sur une grande plage de puissance.
- L'orthogonalité des sous-porteuses est l'élément clef de la modulation OFDM. Le bruit de phase ou le désaccord en fréquence entre les oscillateurs locaux de l'émetteur et du récepteur (appelé offset fréquentiel) impliquent une perte d'orthogonalité entre sous porteuses et une forte dégradation des performances du système.
- Si le récepteur OFDM est mal synchronisé temporellement, un phénomène d'interférence entre symboles OFDM peut intervenir dégradant considérablement les performances du système global.
- Les systèmes OFDM sont très sensibles au déséquilibre entre les voies I et Q des étages de transposition de fréquence de l'émetteur et du récepteur. Le déséquilibre IQ entraîne des interférences mutuelles entre paires de sous porteuses symétriques et implique une forte dégradation des performances du système global.

II.5 Conclusion

Nous avons tout d'abord présenté, les différents systèmes de multiplexages optiques (WDM, OTDM, OFDM). OFDM est une technique de multiplexage multiporteuse les plus connus et les plus utiles dans le domaine des télécommunications par rapport aux WDM et OTDM. En effet, elle présente l'avantage que les effets des trajets multiples peuvent être éliminés très facilement. Ses applications incluent la radio mobile DAB, la télévision numérique terrestre DVBT, la communication numérique haut débit ADSL et les réseaux mobiles de 4e génération (4G).

Chapitre III

Etude d'une liaison radio sur fibre basée sur OFDM

III.1 Introduction

Dans les dernières années, les systèmes de communication optique se développent à un rythme très rapide, l'analyse de ces systèmes est très complexe et exige des outils logiciels avancés. Optisystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, analyser et concevoir tout module de communication optique, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication.

Dans ce chapitre, on va d'abord présenter le logiciel Optisystem en définissant leur interface, bibliothèque et l'éditeur de layout, on va aborder aussi les différentes applications de ce logiciel.

On va étudier ensuite deux systèmes de communication basés OFDM (deux liaison radio sur fibre) l'un avec détection direct et l'autre avec détection cohérente, on va examiner la liaison en déterminant les résultats de taux d'erreur binaire et le vecteur d'erreur magnétique.

III.2 Présentation du logiciel Optisystem

Le logiciel Optisystem est utilisé pour simuler et analyser les systèmes de transmission optique. La variété des systèmes de simulation peut être étendue en insérant des fonctions définies par l'utilisateur qui peuvent être ajoutées au système de simulation.

Optisystem peut tester et optimiser pratiquement n'importe quel type de liaison optique et est basé sur une modélisation réelle des systèmes de communication à fibre optique.

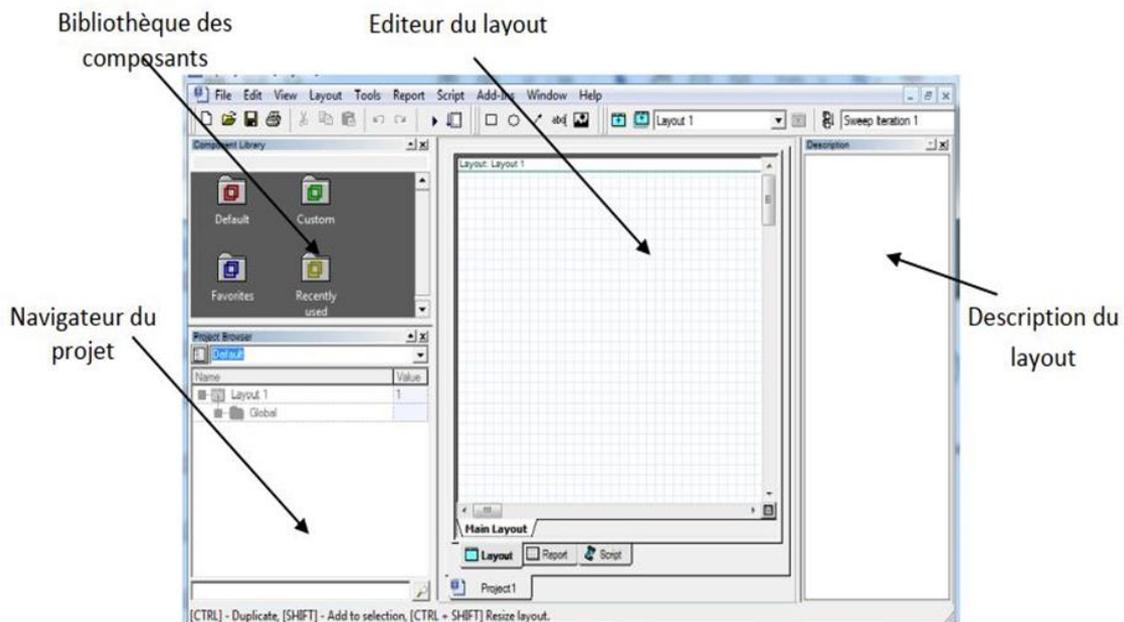


Figure III.1: Schéma de l'interface Optisystem.

L'interface utilisateur graphique complète et contrôle la disposition des composants optiques. Il contient une fenêtre principale divisée en plusieurs parties (Figure III.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.

La riche bibliothèque de composants actifs et passifs contient des paramètres réalistes, et ces fonctionnalités peuvent être facilement étendues en ajoutant des composants et en se connectant à divers outils. Une interface utilisateur graphique complète contrôle le placement visuel des pièces, des modèles et des graphiques.

III.2.1 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem

Les principales fonctionnalités 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 mesurés à partir de périphériques réels, ces composants s'intègrent aux équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.
- ✓ Les outils de visualisation avancée produisent le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation des schémas et beaucoup plus.
- ✓ Il est possible de joindre un nombre arbitraire de visualiseurs sur le moniteur au même port.
- ✓ Plusieurs mises en page.

III.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.
- ✓ L'espace libre pour les systèmes optiques (OSA).
- ✓ La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

III.2.3 Avantage du logiciel Optisystem

- ✓ 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.

III.2.4 Critères de qualité d'une transmission

III.2.4.1 Taux d'erreurs binaires

La qualité de transmission numérique binaire est intrinsèquement simple à évaluer puisqu'il suffit de comparer la séquence de symboles envoyés avec la séquence de symboles reçus, et de compter les erreurs c'est -à- dire le nombre de fois d'un « 0 » est détecté pour un symbole « 1 » émis ou vice versa. On définit alors le taux d'erreurs binaires ou Bite Error Rate en anglais (BER) correspondant au nombre d'erreurs sur le nombre de bits transmis pendant la durée de la mesure.

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad \text{[III.1]}$$

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} .

III.2.4.2 Facteur de qualité

Le signal mesuré à l'entrée du canal de l'oscilloscope contient une contribution due au signal utile ainsi qu'un apport en bruit dû à l'ensemble des éléments de la chaîne de transmission . Dans le diagramme de l'œil qui retrace le signal mesuré, le signal utile est représenté par les niveaux moyens μ_0 et μ_1 . Le bruit représente les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens, il est quantifié en combinant les écarts-types μ_0 et μ_1 on définit donc le facteur Q à partir de relevé du diagramme de l'œil par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\delta_1 - \delta_0} \quad \text{[III.2]}$$

III.2.4.3 Diagramme de l'œil

La façon la plus « visuelle » de juger la qualité d'un signal est d'observer le diagramme de l'œil qui représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise. Plus le signal est de mauvaise qualité, plus le diagramme de l'œil est

fermé, plus le facteur de qualité est faible et ainsi plus la détection du signal sans erreur est difficile.

III.2.4.4 Amplitude du vecteur d'erreur

L'EVM est un paramètre important utilisé pour qualifier numériquement l'émission d'un signal modulé. Un signal reçu par un récepteur doit avoir les points de constellations à dispositions idéaux, mais certaines imperfections peuvent changer ces positions. L'EVM est décrit par la valeur du vecteur d'erreur entre le signal de référence idéal et le signal de mesure traité. Mathématiquement, l'EVM est donné par la relation suivante :

$$EVM_{dB} = 10 * \log\left(\frac{P_{\text{erreur}}}{P_{\text{référence}}}\right) \quad (\text{III.3})$$

III.3Présentation de la liaison

Le but de cette liaison est de combiner les techniques Radio sur Fibre et l'OFDM pour augmenter la distance et améliorer le débit dans une liaison optique à l'aide du logiciel Optisystem.

III.3.1 Détection direct OFDM

Un système de détection directe (DD) est un système de communication basé sur la détection de la puissance optique modulée (également appelée intensité du champ optique ou simplement intensité optique). Dans les systèmes de détection directe classiques, le récepteur est constitué d'une seule photodiode (PD) et, en conséquence, l'émetteur module la puissance optique. C'est pourquoi ces systèmes sont souvent appelés systèmes de modulation d'intensité et de détection directe (IM-DD).

À l'époque où les débits requis par interface d'émetteur-récepteur étaient de 10 et 40 Gb/s, les systèmes DD étaient largement déployés pour divers types de systèmes de communication par fibre optique, allant des connexions métropolitaines à courte portée aux liaisons à longue portée dans les réseaux centraux. Par la suite, les réseaux centraux se sont tournés vers les systèmes cohérents, car ils offrent une plus grande sensibilité du récepteur et une meilleure efficacité spectrale, et sont donc plus adaptés à la transmission sur longue distance à des débits d'interface de 100 Gb/s et au-delà. Les applications des systèmes DD étaient alors limitées aux applications à courte portée sensibles aux coûts, telles que les transports métropolitains, les interconnexions intra et inter-centres et les réseaux optiques passifs. Aujourd'hui, les distances de transmission typiques des systèmes DD vont de quelques mètres à environ 100 km [37].

III.3.1.1 Description de la chaine de transmission détection direct OFDM

La figure (III.2) représente l'architecture générale de notre liaison RoF sous le logiciel Optisystem. Elle comporte une partie émettrice, canal de transmission et une partie réceptrice.

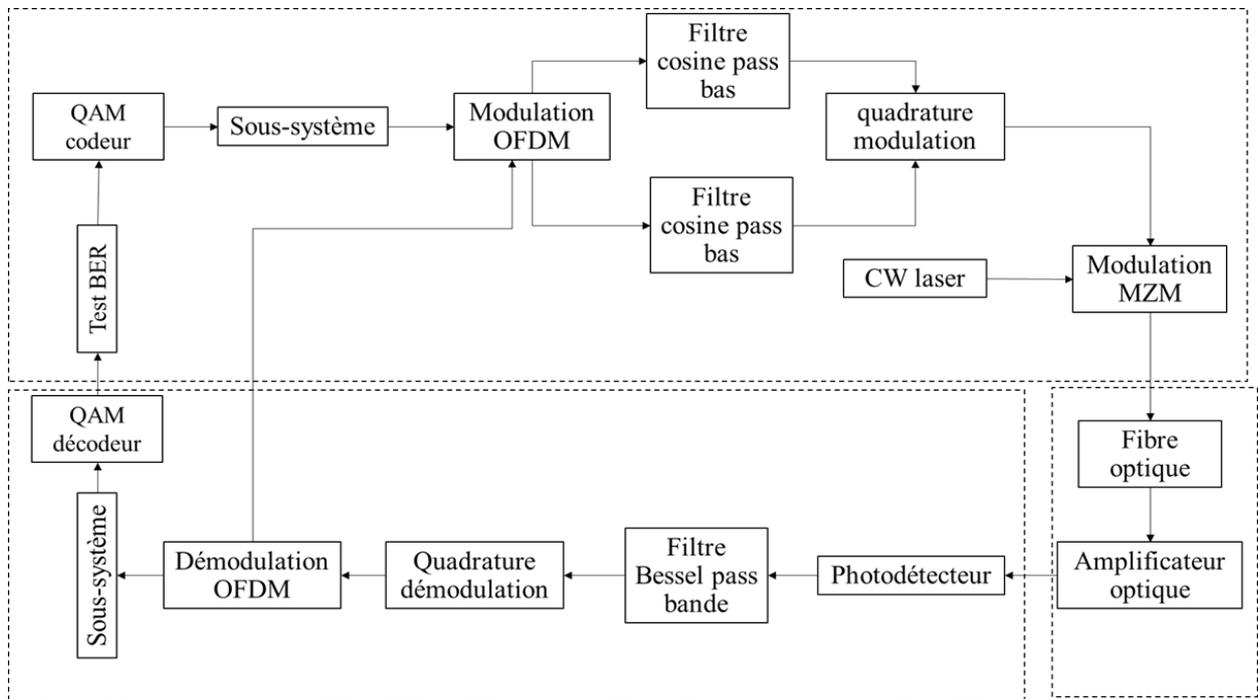


Figure III.2: Schéma de la liaison Radio sur fibre (DD).

La liaison radio sur fibre est constituée de trois parties essentielles, à savoir l'émetteur, canal de transmission et le récepteur.

III.3.1.1.1 Partie émission

La figure (III.3) représente le schéma en bloc de la partie d'émission.

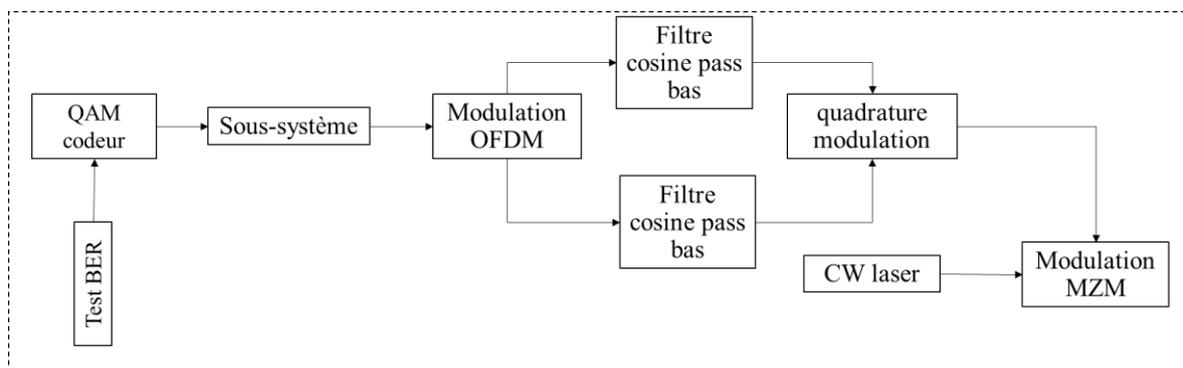


Figure III.3: Schéma en bloc d'émission.

- ✓ **BER Test Set:** Ce composant génère une grande séquence de bits, transmet la séquence de bits à l'objet sous test à la séquence de bits transmise et nous permet de calculer les nombres des bits erronées, taux d'erreur binaire.

- ✓ **Générateur QAM:** pour générer les bits par symboles pour toutes formes de QAM.
- ✓ **Modulateur OFDM :** qui suit des opérations pour obtenir un signal OFDM , il contient des paramètres sur : nombres de sous-porteuses (1024), et le nombre de points de préfixe (100), puissance de 16 dBm.
- ✓ **Modulateur quadrature:** pour convertir le signal à haute fréquence (après la combinaison entre les symboles réels et imaginaires (I /Q). La fréquence devient 7.5GHz.
- ✓ **Une diode laser (CW Laser) :** c'est la source optique pour générer le signal lumineux. La puissance lancée indique la perte de fibre qui peut être tolérée ; soit 0 dBm avec une largeur de ligne de 10 MHz dans une fenêtre de 1550 nm (193,1 THz).
- ✓ **Filtre pass bas Roll off:** Filtre avec une fonction de transfert de fréquence en cosinus.
- ✓ **Modulateur Mach-Zehnder :** pour moduler les symboles OFDM une modulation qui consiste à graver les données électriques sur un signal optique obtenu avec une modulation directe de courant d'alimentation de CW Laser.

III.3.1.1.2 Partie transmission

La figure (III.4) représente le schéma en bloc de la partie transmission.

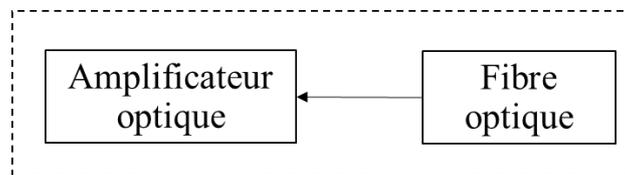


Figure III.4: Schéma en bloc canal de transmission.

- ✓ **Fibre optique:** pour améliorer le rendement en puissance, avec les paramètres suivants :
 - Longueur d'onde $\lambda=1550$ nm.
 - Longueur de fibre $L=80$ Km.
 - Atténuation $\alpha=0.2$ dB/Km.
 - Dispersion chromatique $=16.75$ Ps/nm/km.
- ✓ **Amplificateur optique:** pour garder un signal fort avec un gain de 20 dB.

III.3.1.1.3 Partie réception

La figure (III.5) représente le schéma en bloc de la partie réception.

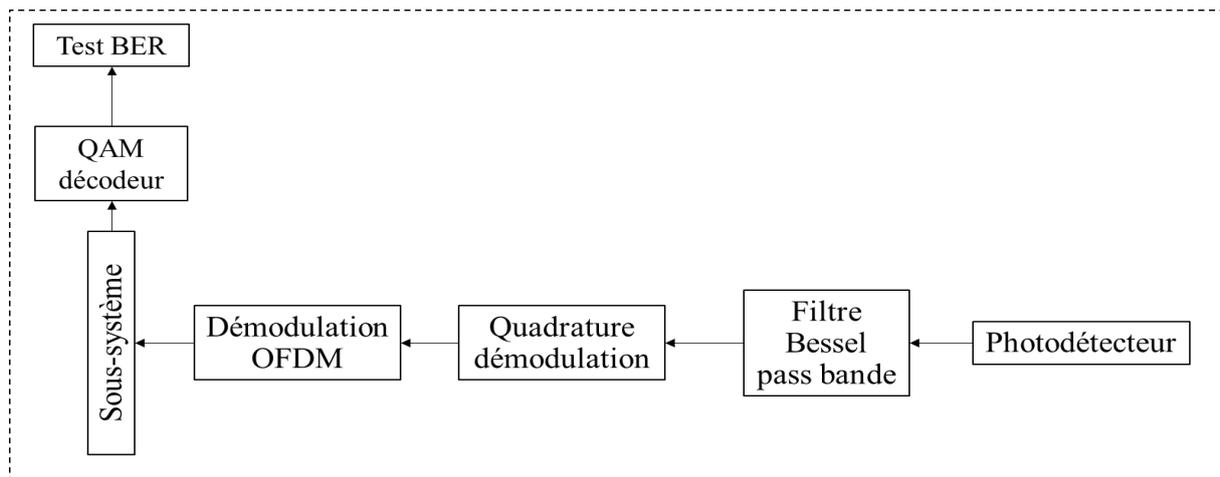


Figure III.5: Schéma en bloc de réception.

- ✓ **Démodulateur OFDM** : on démodule le signal pour extraire les symboles.
- ✓ **Décodeur QAM**: pour extraire les bits à partir de symboles pour toutes formes de QAM.
- ✓ **Démodulateur quadrature**: pour convertir le signal optique en radiofréquence donc la séparation entre les symboles réelles et imaginaires (I/Q). La fréquence est 7.5 GHz.
- ✓ **Filtre passe bande**: pour filtrer le signal afin d'éliminer le bruit ajouté dans la fibre.
- ✓ **Photodétecteur PIN**: pour détecter le signal après la liaison optique, avec un courant d'obscurité de 10 nA et une fréquence centrale de 193,1 THz.

III.3.2 Résultat de simulation

III.3.2.1 Effet de variation de la puissance de laser

Le tableau (III.1) représente la variation du taux d'erreur binaire (BER) et l'amplitude du vecteur d'erreur (EVM) en fonction de la puissance de laser.

Puissance (dBm)	0	2	4	6	8	10
BER	51.39×10^{-6}	8.5663×10^{-6}	42.8316×10^{-6}	0	0	0
EVM (%)	21.48	20.5799	21.3197	18.9532	19.0386	18.36

Table III.1: Variation de BER et EVM en fonction de puissance.

A partir des résultats obtenus, on note une amélioration du taux d'erreur binaire pour une puissance allant jusqu'à de 4dBm. Concernant le vecteur d'erreur magnétique, on aura un pourcentage acceptable entre le signal mesuré et signal idéal.

III.3.2.2 Effet de variation de la distance de fibre optique

Le tableau (III.2) représente la variation du taux d'erreur binaire (BER) et l'amplitude du vecteur d'erreur en fonction de la longueur de la fibre optique.

Distance (Km)	10	20	40	60	70	80	100
BER	0	0	0	0	0	51.39×10^{-6}	0.096
EVM (%)	3.37	5.95	9.37	12.79	15.75	21.48	169

Table III.2: Variation de BER et EVM en fonction de distance de fibre.

Pour ce qui est de la distance de la fibre optique on note une stabilité de BER a 0 jusqu'au 70km puis on obtient un BER de l'ordre de 10^{-6} pour une distance de 80Km après on aura une perturbation du signal au-delà de 100Km. Pour les résultats obtenue de EVM on remarque une augmentation jusqu'à 80Km, puis un signal perturbé a 100Km.

III.3.3 Détection cohérente OFDM

La détection cohérente permet non seulement d'atteindre une sensibilité plus élevée que la détection directe, mais aussi d'augmenter considérablement l'efficacité spectrale (codage de plus de bits sur chaque symbole), car elle utilise la phase, l'amplitude et la polarisation d'une porteuse optique pour transporter les informations. Bien que la détection cohérente ait connu un grand succès dans les réseaux de transport optique, aujourd'hui, pratiquement toutes les interconnexions optiques à l'intérieur des centres de données utilisent des techniques de modulation d'intensité et de détection directe (IM-DD) en raison de leur coût, de leur consommation d'énergie et de leur empreinte.

Les progrès réalisés en photonique et en électronique ont permis de réduire considérablement le coût, la puissance et la densité de la technologie cohérente au cours de la dernière décennie. Les techniques de détection de modulation cohérente commencent à être déployées dans les réseaux métropolitains ainsi que dans les liaisons plus courtes. D'autre part, avec l'augmentation des débits binaires, il devient difficile d'utiliser des techniques IM-DD simples et certaines techniques avancées telles que la modulation externe, des signaux plus complexes et la détection doivent être utilisées, ce qui augmente la complexité et le coût des systèmes IM-DD. Il convient de noter que la complexité du traitement numérique du signal d'un émetteur-récepteur cohérent peut être considérablement réduite pour les applications à courte portée, par exemple, la compensation numérique de la dispersion chromatique peut être supprimée et la longueur de prise du filtre adaptatif peut être réduite, etc. L'un des défis d'un système cohérent est qu'il nécessite un laser à faible largeur de ligne et à longueur d'onde stable,

ce qui augmente le coût et la consommation d'énergie de l'émetteur-récepteur. Cependant, un émetteur-récepteur cohérent ne nécessite qu'un seul laser au lieu de quatre, ce qui peut réduire le coût d'encapsulation dans un émetteur-récepteur à base de silicium-photonique [37].

III.3.3.1 Description de la chaîne de transmission détection cohérente OFDM

La figure (III.6) représente l'architecture générale de notre liaison RoF basée OFDM testée sous le logiciel Optisystem. Elle comporte une partie émettrice, canal de transmission et une partie réception.

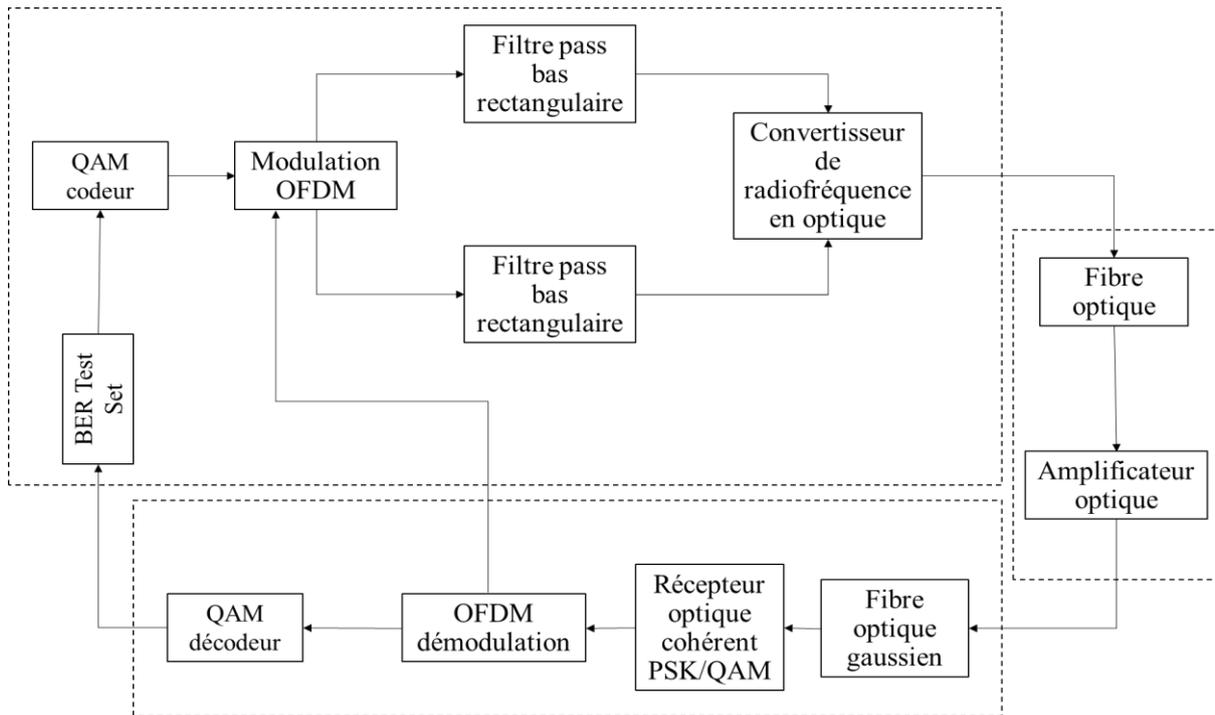


Figure III.6: Schéma de la liaison Radio sur fibre (DC).

III.3.3.1.1 Partie émission

La figure (III.7) représente le schéma en bloc de la partie émission.

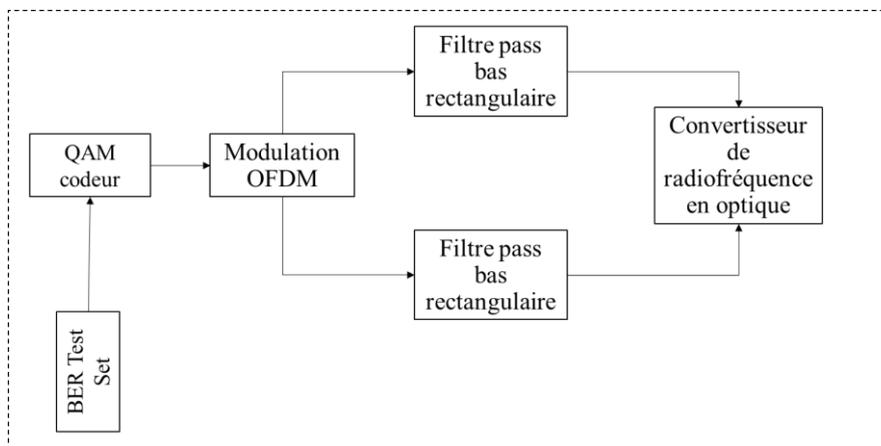


Figure III.7: Schéma en bloc d'émission.

On trouve sur ce schéma bloc les éléments suivants :

- ✓ **Générateur QAM:** pour générer les bits par symboles pour toutes formes de QAM.
- ✓ **Modulateur OFDM:** qui suit des opérations pour obtenir un signal OFDM , il contient des paramètres sur: nombres de sous-porteuses (128), et le nombre de points de préfixe (10).
- ✓ **BER Test Set:** Ce composant génère une grande séquence de bits, transmet la séquence de bits à l'objet sous test à la séquence de bits transmise, et nous permet de calculer les nombres des bits erronées, taux d'erreur binaire.
- ✓ **Low Pass Rectangle Filter:** Filtre avec une fonction de transfert de fréquence en rectangle.

III.3.3.1.2 Partie transmission

La figure III.8 représente le schéma en bloc du canal de transmission.

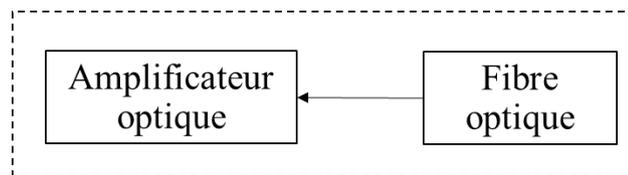


Figure III.8: Schéma en bloc canal de transmission.

- ✓ **Fibre optique:** pour améliorer le rendement en puissance, avec les paramètres suivants :
 - Longueur d'onde $\lambda=1550\text{nm}$.
 - Longueur de fibre $L=80\text{ Km}$.
 - Atténuation $\alpha=0.2\text{ dB/Km}$.
 - Dispersion chromatique $=16.75\text{ Ps/nm/km}$.
- ✓ **Amplificateur optique:** pour garder un signal fort avec un gain de 10 dB.

III.3.3.1.3 Partie réception

La figure III.9 représente le schéma en bloc de la partie réception.

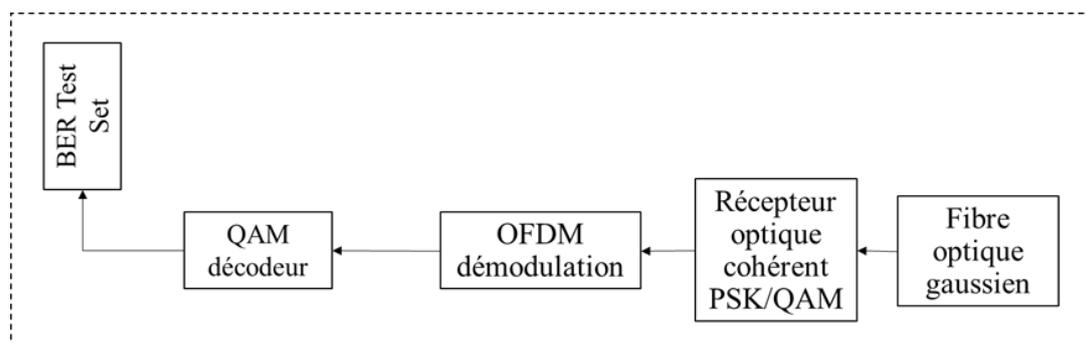


Figure III.9: Schéma en bloc de réception.

Dans cette partie on trouve :

- ✓ **Décodeur QAM:** pour extraire les bits à partir de symboles pour toutes formes de QAM.
- ✓ **Démodulateur OFDM :** on démodule le signal pour extraire les symboles.
- ✓ **Récepteur optique cohérent PSK/QAM:** le composant simule un récepteur optique cohérent pour les signaux M-PSK ou M-QAM basé sur une conception homodyne.
- ✓ **Filtre optique gaussien:** pour filtrer le signal optique en même fréquence 193,1 THz et une puissance de 10 dBm.

III.3.4 Résultats de simulation

Suivant les paramètres puissance de laser est de 10dBm avec un débit de $5 \cdot 10^9$ et longueur de fibre de 80Km, fréquence 193.1THz les résultats obtenus par cette simulation sont démontré par les figures suivants :

➤ **Signal émis par l'émetteur RF**

Les figures (III.10) et (III.11) montre respectivement le spectre du signal RF émis après la modulation OFDM et le signal OFDM.

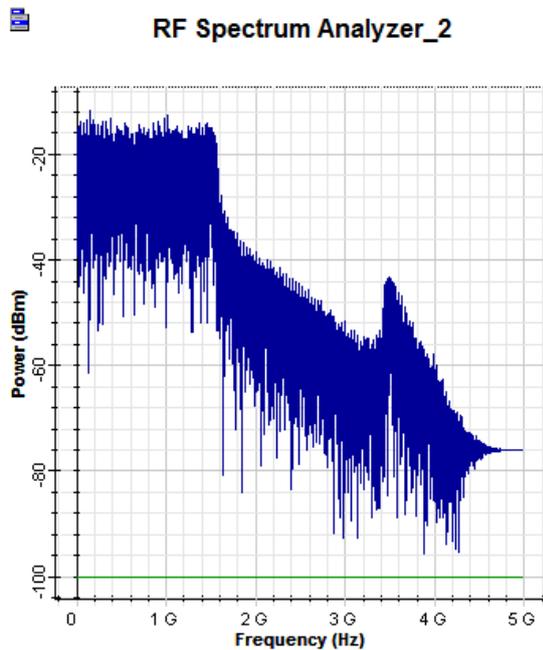


Figure III.10: Signal de sortie du modulateur de l'émetteur RF (représentation spectrale).

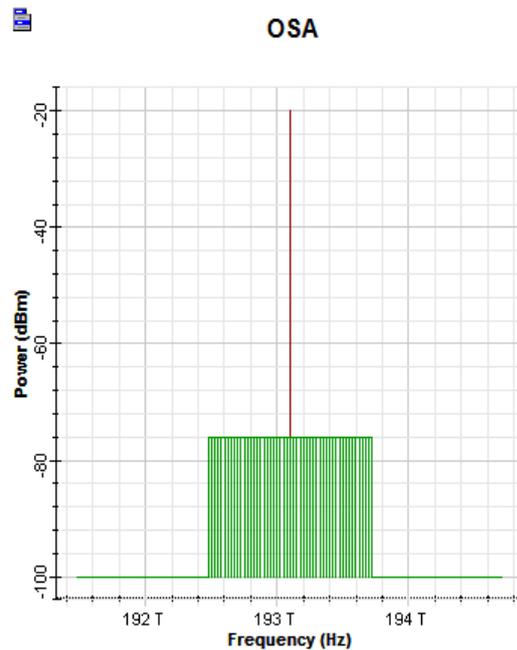


Figure III.11: Signal OFDM.

La figure (III.12) représente le signal de laser après les 2 modulations LINb-MZN

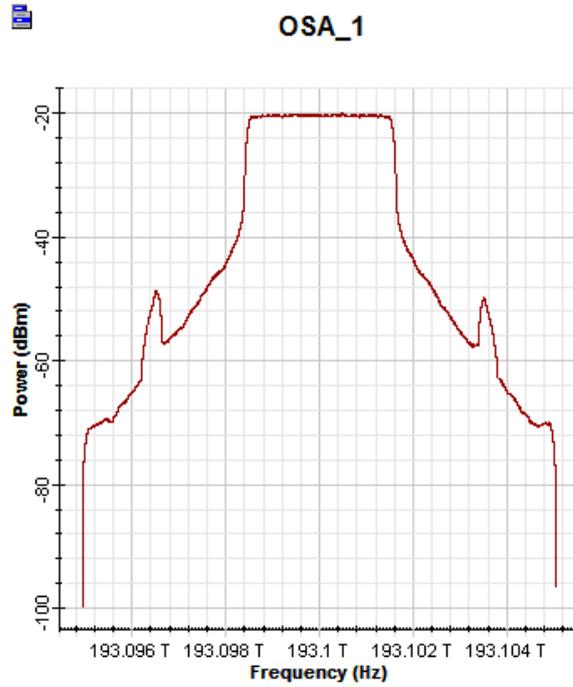


Figure III.12: Signal de CW Laser après LINb-MZN

➤ **Le signal reçu par récepteur RF**

Le signal reçu par le récepteur RF est donné par la figure (III.13) :

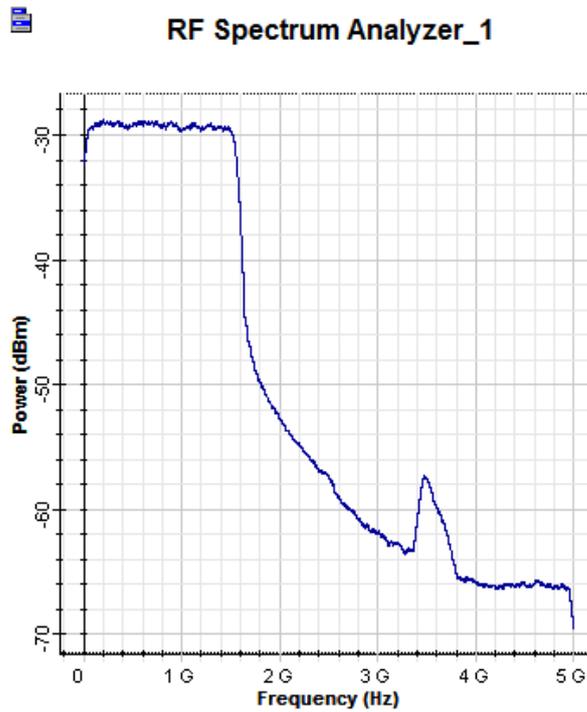


Figure III.13: Signal reçu par le récepteur RF (représentation spectrale).

III.3.4.1 Effet de variation de la distance de fibre optique

➤ **Distance de fibre vs EVM**

Le tableau (III.3) représente la variation de l'amplitude du vecteur d'erreur en fonction de la distance de fibre optique.

Distance (Km)	80	100	120	140	160
EVM (%)	10.5126	11.7480	13.7661	16.8974	22.4007

Table III.3: Variation d'EVM en fonction de longueur de fibre.

Pour les résultats obtenus on remarque une amélioration d'EVM qui donne un bon signal de transmission de 80Km à 160Km.

➤ **Distance de fibre optique vs BER**

Le tableau (III.4) représente la variation du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la distance de fibre optique.

Distance (Km)	120	130	140	150	160
BER	3.576×10^{-6}	28.615×10^{-6}	75.114×10^{-6}	23.965×10^{-5}	93.457×10^{-3}

Table III.4: Variation de BER en fonction de distance de fibre.

Concernant les résultats obtenus du BER on note un bon signal de transmission sur une distance de 120Km, au delà on remarque une dégradation considérable du BER.

III.3.4.2 Effet de variation de la puissance de laser

Le tableau ci-dessous présente les résultats de simulation pour différents variations de l'amplitude du vecteur d'erreur avec des puissances différentes entre 0 et 10dBm.

Puissance (dBm)	0	2	4	6	8	10
EVM (%)	26.3956	16.8974	14.3784	11.0409	10.1995	9.7348

Table III.5: Variation d'EVM en fonction de puissance de laser.

Pour ce qui est de la puissance on note des bons pourcentages de 2dBm à 10 dBm.

III.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons effectué l'étude de la qualité de transmission d'une liaison RoF basée sur OFDM, en agissant sur différents paramètres tel que la longueur de la fibre optique, la puissance du laser et le débit de transmission.

Chapitre III Etude d'une liaison radio sur fibre basée sur OFDM

Cette étude nous a permis de définir les meilleurs paramètres possibles qui assurent une qualité de transmission optimale. Au final, nous avons testé deux liaisons avec ces paramètres avec le taux d'erreur binaire et l'amplitude du vecteur d'erreur, témoignant d'une très bonne qualité de transmission.

Conclusion générale

La dernière technologie en matière de sans fil sur fibre montre que nous assistons à un nouvel intérêt pour ce domaine prometteur des communications sans fil et optiques. Les recherches actuelles portent sur les performances des composants, l'ensemble du système et les nouvelles applications (intégration de nouveaux réseaux sans fil).

Grâce à l'utilisation réussie de la technologie de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) dans une variété d'applications telles que la diffusion numérique et la vidéo numérique, plusieurs groupes de recherche associés à différentes entreprises et universités ont utilisé ces résultats de transmission, l'avantage qui peut en être tirés.

En dirigeant les télécommunications à haut débit, la technologie de modulation OFDM devient l'un des centres d'intérêt privilégiés des recherches actuelles. Ceci, d'une part, vous permet de contrer les interférences causées par le canal multi-trajets de l'autre côté. Améliore l'efficacité spectrale ou la capacité du système.

Pour cette raison, il nous a semblé intéressant de commencer ce mémoire par une étude d'une liaison fibre optique, une description détaillée des composants présents dans le lien fibre optique, et diverses limitations connues lors de la propagation du signal.

Ensuite, nous avons étudié le système de modulation OFDM et présenté son principe de fonctionnement. Un système OFDM permet une occupation spectrale optimale, grâce au principe d'orthogonalité entre sous-porteuses. L'orthogonalité et la modulation/démodulation OFDM peuvent être facilement réalisées en mettant en œuvre la Transformée de Fourier Discrète (FFT/IFFT). Les systèmes OFDM présentent de nombreux avantages dans le domaine des télécommunications, mais le principal inconvénient est le niveau PAPR élevé des signaux OFDM. Cette technique de modulation permet de s'affranchir de la sélectivité des canaux multi-trajets en augmentant la durée du symbole par rapport au retard maximal du canal. L'ajout d'un intervalle de garde élimine complètement les interférences inter-symboles résiduelles.

Dans le dernier chapitre, on a défini d'abord le logiciel de simulation Optisystem, ensuite on a parlé des différents critères d'évaluation de performance d'une liaison, à savoir le facteur de qualité Q, le taux d'erreur binaire et le diagramme de l'œil.

Nous avons effectué l'étude de la qualité de transmission d'une liaison RoF basée sur OFDM, en agissant sur différents paramètres. Ce qui permet de définir les meilleurs paramètres possibles, qui assurent une qualité de transmission optimale.

Liste des Acronymes

BER	Bit Error Rate
BISDN	Broadband Integrated Services Digital Network
BS	Base Station
CEM	ElectroMagnetic Compatibility
CP-OFDM	Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplex
CS	Central Station
CW Laser	Continious Wave Laser
DAB	Digital Audio Broadcasting
DD	Direct Detection
DFB	Distributed FeedBack
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EVM	Error Vector Magnitude
E/O	Electro/Optical
FFT	Fast Fourier Transform
FTTH	Fiber To The Home
IF	Intermediate frequency
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IM-DD	Intensity Modulation-Direct Detection
ISI	Inter Symbol Interference
LAN	Local Area Network
LNA	Low Noise Amplifier
MBS	Mobile Broadband Service
MMF	MultiMode Fiber
MVDS	Multipoint Video Distribution System
NRZ	No Return to Zero
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
OCh-DPRING	Optical Channel Dedicated Protection Ring

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OMS-SPRING	Optical Multiplex Section-Shared Protection Ring
OTDM	Optical Time Division Multiplexing
OTM	Optical Terminal Multiplexer
OXC	Optical Cross Connect
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio frequency
RoF	Radio over Fiber
RZ	Return to Zero
SNR	Signal to Noise Ratio
TDM	Time Division Multiplexing
TFD	Discrete Fourier Transform
TFDI	Discrete Fourier Transform Inverse
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VOIP	Voice Over Internet Protocol
WDM	Wavelength Division Multiplexing

Bibliographie

- [1] K. K. Djogoo, "Etude d'une liaison transmission par fibre optique et simulation d'un résonateur optique en anneau", 2016.
- [2] A. Mammar, "Etude Et Simulation D'un Système De Transmission Optique Cohérent", 2020.
- [3] B.Hamri, "Etude et évaluation d'une chaîne de transmission optique point à point avec une longueur d'onde 1.55 μ m", 2017.
- [4] P. Michel, "Physique Des Solitons", EDP SCIENCES éd., 2004.
- [5] M. SidiAli, "Télécommunications Optiques", 2001, p. 162.
- [6] F. Maurice, "Thèmes actuels en optique, Collection Physique fondamentale et appliquée" 0299-2434 éd., E. Masson, Éd., 1986, p. 120.
- [7] C. Alain, "optique et télécommunications", Collection technique et scientifique des télécommunications, ISSN 0221-2579 éd., 1981.
- [8] V. Girondin, "Etude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques", 2016.
- [9] A. Kumar-Vyas, "Radio over Fiber: Future Technology of Communication", vol. 1, n° 12, August 2012.
- [10] P. Monteiro, "Next Generation Wireless Communications Using Radio over Fiber", J. W. & Sons, Éd., 2012.
- [11] K. Ali, "Etude des systèmes radio sur fibre pour des applications de réseaux domestiques en bande millimétrique", 2017.
- [12] L. Hexin, "Radio sur Fibre : réseaux, couverture radio, architectures et dimensionnements matériels", 2013.
- [13] C. Berrou, "Codes et turbocodes", france, 2007.
- [14] V. Martine, "Radio-communications numériques", Tome 1 - 2ème éd., Dunod, Éd., paris, 2007.
- [15] G. Victor, "Etude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques. Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe", 2016.

- [16] D. Frederique, "Optical transimpedance receiver for high data transmission in OFDM modulation format", *Lightwave Technology*, vol. 33, 2015.
- [17] M. Julien, "Etude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique", 2003.
- [18] HUAWEI technologie CO.LTD, "Optic WDM network design basics", vol. 01, 2009.
- [19] HUAWEI technologie CO.LTD, "WDM principale", vol. 25, 2012.
- [20] P. Soo-Jin, "Fiber-to-the-Home Services Based on Wavelength-Division-Multiplexing Passive Optical Network", vol. 22, n° % 111, 2004.
- [21] S. Naufal, "Contribution à l'étude de l'application de la technique CDMA aux systèmes de transmission optique", 2005.
- [22] M. Julien, "Etude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique", université de limoges, 2003.
- [23] K. Uchiyama, «"160 Gbit/s all-optical time-division demultiplexing utilising modified multiple-output OTDM demultiplexer (MOXIC)"», vol. 38, pp. 1190-1191, september 2002.
- [24] M. Arpana, "Optical Communication with Time Division Multiplexing (OTDM) and Hybrid WDM/OTDM PON", *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 3, n° % 112, pp. 1681-1684, december 2014.
- [25] B. Radhwane, "Contribution À L'étude Des Performances Et Limitations D'une Liaison Cdma Optique Haut Débit", 2010.
- [26] G. Ahmed, "Contribution à l'étude des codes optiques ZCC: Application au système SAC-OCDMA", 2015.
- [27] G. Viorreta, "Toward to design of 5G optical communications", 2017.
- [28] L.Hanzo, "OFDM and MC-CDMA for Broadband multiuser communications, WLAN and Broadcasting", John Wiley and Sons éd., 2006.
- [29] C. Marwa, "Etude d'une nouvelle forme d'onde multiporteuses à PAPR réduit", 2016.
- [30] B. Samir, "Réduction du PAPR du système OFDM-MIMO en 4G", 2015.
- [31] S. Traverso, "Transposition de fréquence et compensation du déséquilibre IQ pour des systèmes multiporteuses sur canal sélectif en fréquence", 2007.
- [32] R. Basel, "Analyse et réduction du Power Ratio des systèmes de radiocommunications multi-antennes", vol. 2, 2008.

- [33] L. Abdelhak, "Les réseaux sans fils", universite sid mohamed Ben Abdalah, 2014-2015.
- [34] A. G. Michel Joindot, "Introduction aux Communications Numériques", 1995.
- [35] A. RACHINI, "Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMO OFDM appliquées aux réseaux mobiles", 2014.
- [36] S. Traverso, "Transposition de fréquence et compensation du déséquilibre IQ pour des systèmes multi porteuses sur canal sélectif en fréquence", 2007.
- [37] A. Cristian, "Optical Fiber Telecommunication VII", 2020, pp. 419-441.
- [39] B. Assia, "Etude et simulation de système MIMO à multiplexage spatial associé à la technique MC-CDMA", 2014.
- [40] B. Mourad, "Optimisation des systèmes multi-antennes appliqués aux systèmes", 2013.
- [41] R. Dib, "Conception et validation d'un simulateur de système OFDM pour les réseaux intérieurs sans fil", 2003.
- [42] B. D. Benhammou Fatiha, "Etude d'une Chaîne de Transmission Numérique en Bande Base", 2011.