



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté et de la Technologie

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En : Télécommunication

Spécialité : Systèmes de Télécommunication

Par :Mimoun Nora, Hadjadj Imen, Saadallah Salma

Thème

**Réseau Backhaul à très haute capacité via la transmission
des ondes radio millimétrique sur fibres optique**

Devant le jury compose de :

Dr. HIMA Abdelkader	MCA	President
Dr. TOUHAMI Rida	MAA	Examineur
Pr. MEDJOURI Abdelkader	Pr	Encadreur

2022 – 2023



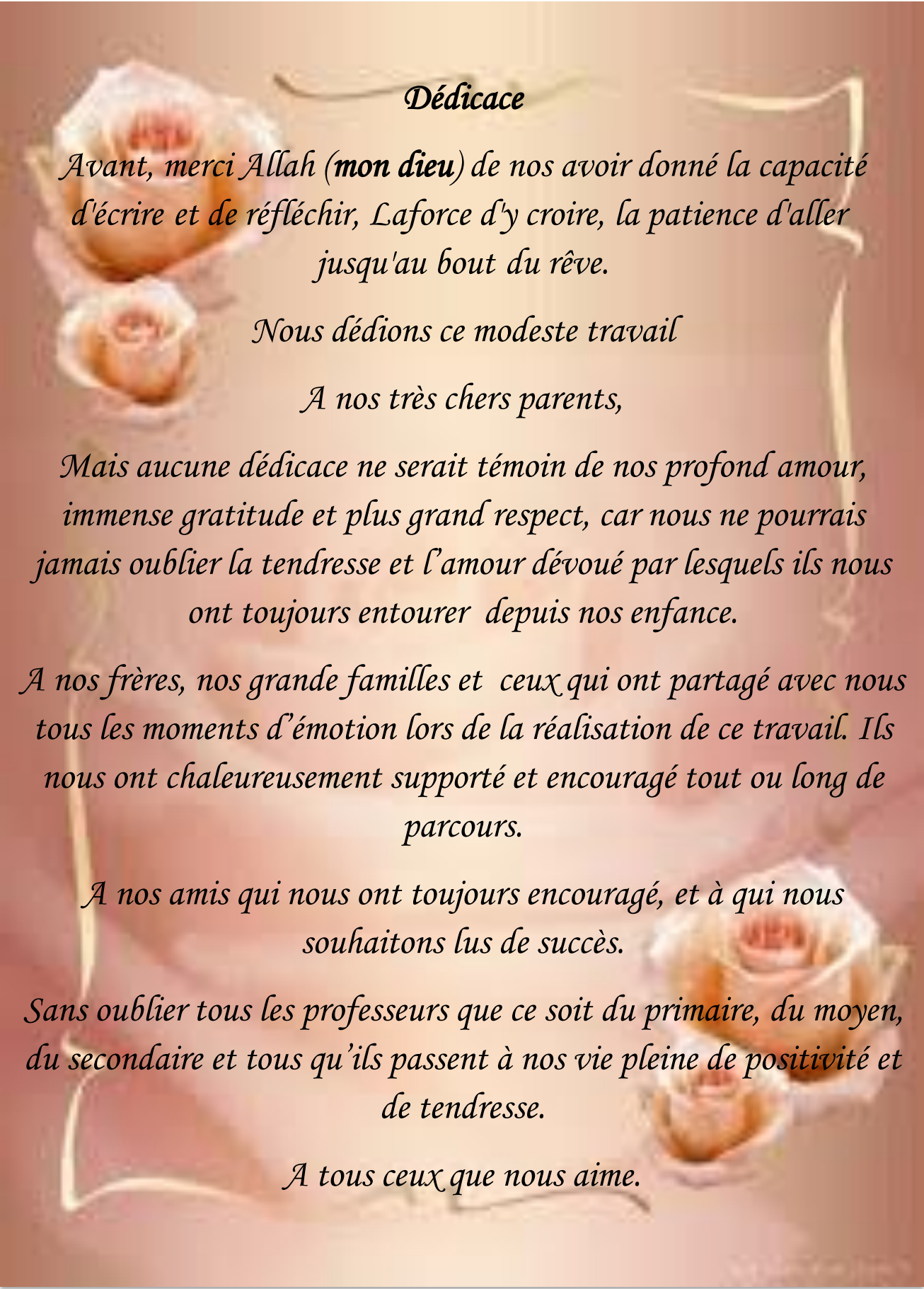
Remerciement

*Nous remercions tout d'abord **Dieu** le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Pr.Meadjouri Abd Elkader**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous remercions également labo de **Levres** affilié à la faculté de SM pour son accueil et le bon traitement, qui n'a ménagé aucun effort pour nous fournir le matériel nécessaire à la réalisation de ce projet.*

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les travailleurs du département du génie électrique, université de El Oued surtout les étudiants de 2^{ème} année de Master spécialité système de télécommunication 2023.



Dédicace

*Avant, merci Allah (**mon dieu**) de nos avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, Laforce d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.*

Nous dédions ce modeste travail

A nos très chers parents,

Mais aucune dédicace ne serait témoin de nos profond amour, immense gratitude et plus grand respect, car nous ne pourrais jamais oublier la tendresse et l'amour dévoué par lesquels ils nous ont toujours entourer depuis nos enfance.

A nos frères, nos grande familles et ceux qui ont partagé avec nous tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils nous ont chaleureusement supporté et encouragé tout ou long de parcours.

A nos amis qui nous ont toujours encouragé, et à qui nous souhaitons lus de succès.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire et tous qu'ils passent à nos vie pleine de positivité et de tendresse.

A tous ceux que nous aime.

Résumé

Dans ce mémoire, les fibres optiques ont été étudiées, qui représentent le moyen de communication le plus important utilisé dans les systèmes de communication à ondes millimétriques ROF modifiés via des réseaux de connexion, qui à leur tour représentent des réseaux backhaul intermédiaires notamment utilisés pour connecter le cœur de réseau d'un opérateur aux antennes relais, ces réseaux de backhaul connaissent une profonde transformation avec l'arrivée de la 5G, et il peut être utilisé pour transformer des données à haut débit en raison de ses nombreux avantages dans les opérations de transmission. Ou nous avons fait une simulation d'une chaîne de transmission optique avec un système de transfert ROF-OFDM à une fréquence de 90 GHz utilisant la modulation 64 QAM.

Les mots clé: le radio sur fibre, les réseaux mobiles, les ondes millimétriques, OFDM, le réseau Backhaul.

ملخص

في هذه المذكرة تمت دراسة الاليف الضوئية و التي تمثل اهم وسائل الاتصال المستخدمة في انظمة اتصالات الامواج المليمترية ROF المعدلة عن طريق شبكات التوصيل والتي بدورها تمثل شبكات وسيطة تستخدم على وجه الخصوص لتوصيل الشبكة الاساسية للمشغل بهوائيات الترحيل. وتشهد شبكات التوصيل هذه تحولا عميقا مع وصول تقنية الجيل الخامس 5G و قد تستخدم لنقل البيانات بسرعة عالية لمزاياها العديدة في عملية النقل ، حيث قمنا بمحاكاة لسلسلة نقل ضوئي بنظام نقل RoF-OFDM بتردد 90 جيجاهرتز باستخدام تعديل 64QAM.

الكلمات المفتاحية : راديو عبر الاليف، شبكات المحمول، الامواج المليمترية، OFDM، شبكة التوصيل

Abstract

In this Master thesis, optical fiber has been studied which represent the most important means of communication used in millimeter waves ROF communication systems modified via connection networks, which in turn represent intermediate backhaul network in particular used to connect the core network of an operator to cell towers, these backhaul networks are undergoing a profound transformation with the arrival of 5G, and it can be used to transform high-speed data due to its many advantages in the operations of transfer. Where we made a simulation of an optical transmission chain with an ROF-OFDM transfer system at a frequency of 90 GHz using 64QAM modulation.

Key words : Radio over fibre, Mobile networks, Millimeter waves, OFDM, The Backhaul network

N	Table des matières	page
	Remerciment	I
	Dédicace	II
	Résumé	III
	Table des matières	IV
	Liste de figure	IV
	Liste de Tableaux	IV
	Acronymes	IV
	Introduction générale	1
Chapitre I: Systèmes de communications optiques		
I.1	Introduction	3
I.2	Structure d'un système de communication optique	3
I.3	Les différents types d'un système de transmission optique	4
I.3.1	Les systèmes long distance terrestre	4
I.3.2	Les systèmes très long distance sous-marins	5
I.3.3	Autres systèmes (plus courts)	5
I.4	La fibre optique	5
I.4.1	Structure de la fibre optique	5
I.5	Les types de fibre optique	6
I.6	Les modes de propagation des dans les fibres optiques	7
I.7	Multiplexage dans les liaisons optiques	8
I.7.1	La technique WDMA	8
I.7.2	La technique OTDMA	9
I.7.3	La technique OFDM	10
I.8	Les effets linéaire	11
I.8.1	Atténuation	11

I.8.2	La dispersion chromatique	12
I.8.3	Dispersion modale de polarisation (PMD)	14
I.9	Les effets non linéaires	15
I.9.1	Définition	15
I.10	Eléments de bases des réseaux optiques	15
I.10.1	Les réseaux étendu ou longue distance (WAN)	15
I.10.2	Les réseaux métropolitain (MAN)	16
I.10.3	Le réseaux local (LAN)	16
I.11	Topologie physique du réseau fixe	17
I.11.1	Topologie en bus	17
I.11.2	Topologie en anneau	17
I.11.3	Topologie en étoile	17
I.12	Conclusion	17
Chapitre II: Communication mobile et radio sur fibre		
II.1	Introduction	18
II.2	Définition	18
II.3	Evolution	19
II.3.1	La 1G	19
II.3.2	Le 2G	20
II.3.2.1	Le Réseau 2.5G-GPRS	20
II.3.2.2	Le Réseau 2.75G-EDGE	20
II.3.3	La 3G	20
II.3.3.1	La 3G-UMTS	20
II.3.3.2	Le réseau 3G+	21
II..3.3.3	Le réseau H ⁺	21
II.3.4	La 4G	21
II.3.4.1	La 4G-LTE	21

II.3.4.2	Le réseau 4G+	21
II.3.5	La 5G	21
II.4	Comparaison	22
II.5	La 5G et les ondes millimétrique	22
II.5.1	les avantages et les inconvénients des ondes millimétriques	23
II.5.2	Les application des ondes millimétriques	23
II.5.3	Génération photonique Radio sur fibre	24
II.6	Radio sue fibre	25
II.6.1	Définition de la technique Radio sur Fibre	25
II.7	Les system de la communication ROF	26
II.8	Utilisation de la Radio-sur-Fibre pour les communications optiques	27
II.8.1	Généralité	27
II.9	Architecteur Radio sur fibre	27
II.9.1	Architecture point à point	28
II.9.2	Architecture point à multipoints	28
II.9.3	Architecture multipoints à multipoints	28
II.10	Les techniques de modulation de la Radio-sur-Fibre	29
II.10.1	La modulation directe	29
II.10.2	La modulation externe	30
II.11	Les applications de la Radio-sur-Fibre	31
II.11.1	Comparison des deux modulation	31
II.12	Avantages et limitations de la Radio-sur-Fibre	31
II.13	Conclusion	32
Chapitre III: Résultats de simulation		
III.1	Introduction	33
III.2	Schéma de simulation	33
III.2.1	Emetteur	35

III.2.2	Canal	35
III.2.3	Récepteur	36
III.4	Quelque paramètre	37
III.5	Résultat de simulation	37
III.6	Résultat (OFDM)	39
III.6.1	La premier partie	39
III.6.2	La deuxième partie	40
III.7	Conclusion	42
	Conclusion générale	43
	Annex	44
	Référence	46

Liste des Figures

<u>Figures Chapitre I</u>		
Figure I.1	Structure d'un système de télécommunication optique	3
Figure I. 2	Chain de transmission optique	4
Figure I.3	Structure d'une fibre optique	6
Figure I.4	Fibre multi-mode à gradient d'indice	7
Figure I.5	Fibre monomode à saut d'indice	7
Figure I.6	Système d'émission optique et de réception dans technique WDMA	8
Figure I.7	Système d'émission optique et de réception dans technique OTDMA	9
Figure I.8	Répartition fréquentielle des porteuses	10
Figure I.9	Schéma fonctionnel d'un système de communication numérique multi-porteuse OFDM	11
Figure I.10	Schéma représentation atténuation en fonction de la longueur d'onde dans fibre optique	12
FigureI.11	Courbe de mesure de la dispersion chromatique	14
Figure I.12	Principe de PMD	15
Figure I.13	Différents types de réseau publie	17
<u>Figures Chapitre II</u>		
Figure II.1	Les réseaux mobiles	18
Figure II.2	L'évolution de réseaux mobiles	19
Figure II.3	Architecture de GSM, UMTS,GPRS	20
Figure II.4	Spectre des fréquences (onde millimétrique)	22
Figure II.5	Système ROF pour un réseau backhaul haut capacité dans les réseaux mobiles hétérogène	23
Figure II.6	Système à deux longueur d'onde avec la technique de verrouillage par injection	25
Figure II.7	Synoptique d'un système Radio-sur-Fibre	26
Figure II.8	Synoptique d'un système radio sur fibre classique	26
Figure II.9	Architecture générale d'un système de communication par fibre optique	27
Figure II.10	Architecture point à multipoints	28
Figure II.11	Architecture multipoints à multipoints	29
Figure II.12	Synoptique de la modulation directe	30
Figure II.13	Synoptique de la modulation externe	30
<u>Figures Chapitre III</u>		
Figure III.1	Schéma 5G Wireless Backhaul radio sur fibre	32
Figure III.2	schéma représente le block d'émetteur	33
Figure III.3	schéma représente le block de signal porteuse	34
Figure III.4	Le canal :le fibre optique	34
Figure III.5	schéma représente le block de récepteur	35

Liste des Figures

Figure III.6	le spectre de signal électrique	36
Figure III.7	le spectre de signal modulé	37
Figure III.8	le spectre de signal optique	37
Figure III.9	le spectre de signal électrique après la photo-détection	38
Figure III.10	Symbole erreur rate (SER) en fonction des nombres de porteuses	38
Figure III.11	Le diagramme de la constellation de la porteuse numéro 10	39
Figure III.12	le diagramme de la constellation de la porteuse numéro 14	39
Figure III.13	SER l'effet d'augmenter la dispersion chromatique	40
Figure III.14	le diagramme de constellation de porteuse numéro 10 après le changement de dispersion	40
Figure III.15	le diagramme de constellation de la porteuse numéro 14 après le changement de dispersion	41

Liste des Tableaux

<u>Tableau chapitre II</u>		
Tableau II.1	Les comparaison entre les générations mobiles	22
<u>Tableau chapitre III</u>		
Tableau III.1	Les paramètre de system	38
Tableau III.2	Les paramètre d'OFDM	38
Tableau III.3	Les paramètre de fibre optique	38

Acronymes

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
CDMA	Code Division Multiple Access
DVB	Digital Video Broadcasting
EDGE	Enhanced Data rates for the Global Evolution
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
G	Generation
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
I/Q	in phase / Quadrature
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
LAN	Local Area Network
Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation
LTE	Long Term Evolution
MAN	Metropolitan Area Network
MMF	Multi-Mode Fiber
MS	Mobile Station
MZM	Mach Zehnder-Modulator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OTDMA	Optical Time Division Multiple Access
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
ROF	Radio Over Fiber
SB	Station de bases

Acronymes

SER	Symbol Error Rate
SMF	Single-mode Fiber
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WAN	Wide Area Network

Introduction générale

Introduction générale

Depuis sa création sur la surface de la terre, l'homme a été guidé vers l'utilisation de plusieurs moyens, et tout cela dans le but de faciliter sa vie. Au fur et à mesure que les âges progressent, ils redéveloppent davantage. Par exemple, dans le domaine de la communication et télécommunication, il a utilisé le pigeon voyageur, qui sont alors un moyen de communication utilisant un canal de communication entre l'expéditeur du message et son destinataire, mais avec le passage du temps et le progrès des âges, l'homme a inventé ce qui est plus rapide que cela, en utilisant les appareils les plus précis et les plus récents représentés dans les émetteurs et les récepteurs. Actuellement, il y a plusieurs systèmes de télécommunications mobiles; par satellite, par fibre optique...etc. les communication optique représentent le l'épine dorsale des systèmes de télécommunications, pour leur facilité d'installation, et bande passante parfait et bonne débit. L'objectif de ce mémoire est d'étudier une liaison de communication optique distingué comme un réseau backhaul pour les systèmes de communications mobiles 5G.

Ce mémoire est devisé en trois chapitres.

Le premier chapitre de ce mémoire dont l'objectif est d'apporter l'ensemble des éléments de base pour bien appréhender le fonctionnement des liaisons optiques dans l'accès, nous avons résumé généralités sur les systèmes de télécommunications optiques. passe en revue les structure d'un système de communication optique de façon générale et présente les différentes types de transmission optique. Nous avons ainsi présenté la fibre optique, définition, structure et leur types ,éléments bases des réseaux optiques. Nous avons étudié les topologies physiques du réseaux fixe, les modes de propagation dans les fibres optiques. Les techniques de multiplexage FDMA, TDMA, CDMA , et présente Multiplexage dans les liaisons optiques La fibre optique le WDMA, l'OTDMA et l'OCDMA et leurs avantages et les inconvénients. De plus, les effets linéaires et certaines non-linéarités. Enfin, nous avons présenté quelques paramètres permettant de quantifier la qualité des systèmes de transmission étudiés dans nos simulations numériques

Le seconde chapitre de ce mémoire sera consacré des réseaux mobiles, Dans la première partie nous allons décrire tout d'abord definition et l'évolution des réseaux mobiles de façon générale depuis la 1er génération (1G) jusqu'à la 5G avec comparaison entre eux. Ensuite , Les caractéristiques, Les avantages et les inconvénients, le Hanover et leur types. Dans la deuxièmes partie nous présenterons une étude sur la transmission Radio-sur-fibre (RoF) , Généralités, définition et système de communication. les différentes architectures de la technologie RoF seront décrites, son intérêt pour les technologies futures ainsi que le

Introduction générale

principe des techniques de modulation , comparaison entre eux et ses applications. Enfin, les avantages et inconvénients de la Radio-sur-Fibre.

Enfin, Le troisième chapitre qui fera l'objectif de la simulation a été consacré à l'étude des systèmes de transport des données modulé OFDM par onde millimétrique de 90 GHz utilisant la technologie RoF pour les applications sans fil 5G. Nous avons présenté Les blocs constituant chaque système dans le schéma de simulation de 5G Wireless Backhaul (Millimètre Wave over Fiber).

La qualité du signal reçu sera évaluée en termes de diagramme de constellation et en effet de paramètres. Nous verrons la diagramme constellation et le SER (symbole Error Rate) et évaluerons la qualité du transmission avec l'effet de quelque paramètres.

Chapitre I

Systèmes de communications optiques

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter d'une manière générale la technique de l'exploitation de la fibre optique dans un réseau de transmission des données, et sa structure constructive et fonctionnelle ainsi que leurs caractéristiques. Enfin nous présentons les différentes applications de la fibre optique dans une liaison de transmission des données qui la caractérisent.

I.2 Structure d'un système de communication optique

L'utilisation de la lumière comme moyen de communication remonte à l'antiquité. Des civilisations antérieures ont utilisé des signaux visuels, qu'on pourrait qualifier d'optiques, pour transmettre des messages. En 1792, Claude CHAPPE proposa un système qui consiste à transmettre mécaniquement des signaux codés sur des distances avoisinant les 100 Km, le rôle de la lumière se résumait simplement à rendre ces signaux visibles.

Les études ont montré à partir de la seconde moitié du 20^e siècle, que le confinement de la lumière dans un milieu directeur, pouvait être un moyen de transmission efficace. L'invention de la source laser permit alors une exploration des performances que les systèmes de communications optiques pouvaient offrir en termes de débit et de distance entre répéteurs, deux paramètres qu'on rassembla dans le produit débit-distance.

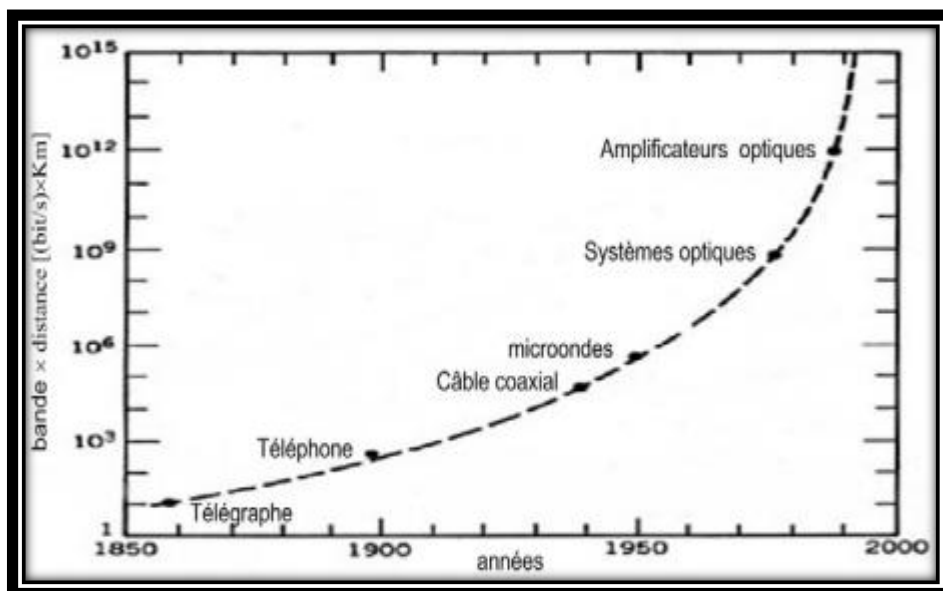


Figure I.1 : structure d'un système de télécommunication optique [1]

Les systèmes optiques ont permis une montée rapide des débits. Cette ascension s'est accélérée avec l'invention de l'amplificateur optique, qui a pallié aux problèmes de pertes sur

les longues distances, et remplacé les répéteurs dans les liaisons. Les systèmes de communication optiques peuvent être classés en deux catégories : systèmes non-guidés tels que les systèmes où le signal optique est envoyé depuis l'émetteur jusqu'au récepteur en se propageant dans l'espace libre, et les systèmes guidés où on utilise un support, principalement la fibre optique, pour transporter le signal optique depuis l'émetteur jusqu'au destinataire. Généralement, une chaîne de transmission optique est composée de 3 éléments principaux : un émetteur, un canal de transmission et un récepteur. La fibre optique est le canal utilisé par excellence pour les transmissions optiques.

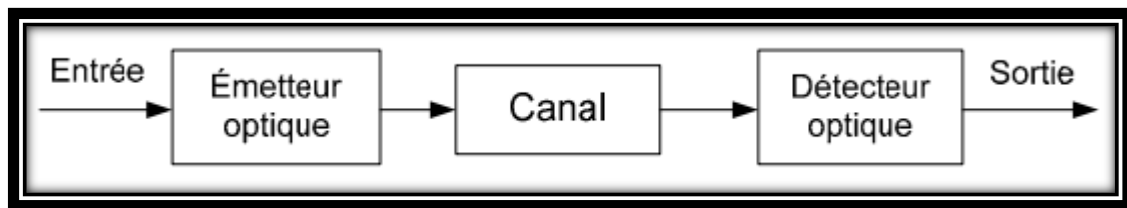


Figure I. 2 : Chaîne de transmission optique [1]

L'émetteur est composé d'une source lumineuse, une diode laser en général, dont on module l'intensité optique, par un signal électrique (analogique ou numérique). On parle alors de modulation directe. Si la puissance continue de la source est modulée avec un modulateur externe, associé à la source, on parle alors de modulation externe.

Le récepteur convertit le signal optique modulé en signal électrique, qui restitue le signal modulé, afin d'exploiter les données transmises. La conversion se fait grâce à un photo-détecteur.

En réponse aux besoins croissants en débit, les systèmes de transmissions optiques ont développé des techniques de multiplexage. Ces techniques permettent une densification du trafic des données sur les réseaux de télécommunications.[1]

I.3 Les différents types de systèmes de transmission optique [1] [2]

Il y a trois types principaux de système sont : longue distance terrestres, très longue distance sous-marins et plus courts.[2]

I .3.1 Les systèmes longue distance terrestres

Les systèmes de transmission optique terrestres sur longue distance (de 500 km à ~3000 km) sont conçus pour transmettre des informations par fibres optiques à l'intérieur d'un même continent. Ils sont susceptibles de former un réseau par eux-mêmes pour couvrir

une certaine surface, et ainsi de comporter des ramifications. Les tronçons de ces systèmes sont généralement longs d'environ 80 à 100 km, et sont le plus souvent composés de fibres standard monomodes (SMF ou SSMF pour Standard Single-Mode Fibre) ou de fibres LEAFTM (Large Effective Area Fiber). Les tronçons sont séparés par des EDFA dits " double étage".

I.3.2 Les systèmes très longue distance sous-marins

Les systèmes très longue distance sous-marins sont conçus pour relier par des câbles optiques deux continents, en effectuant la traversée d'un océan. Leur longueur est donc très élevée (de 6000 km pour les systèmes transatlantiques jusqu'à 13000 km pour les plus longs systèmes Trans pacifiques) et ne sont généralement " point-à-point".

I.3.3 Autres systèmes (plus courts)

Il existe d'autres types de systèmes de transmission optique, notamment lorsque les distances mises en jeu sont plus courtes. Dans le domaine terrestre il existe par exemple les systèmes métropolitains, à l'échelle d'une ville. Ils ont notamment pour rôle de relier les réseaux d'accès aux réseaux longue distance.

I.4 La fibre optique

La fibre optique peut être considérée comme un vecteur physique pouvant transporter, via un signal optique, des données numériques d'un point à un autre de la planète. Une fibre optique est un guide d'ondes. Son principe consiste à confiner une onde lumineuse (appartenant généralement au proche infra-rouge) à l'intérieur d'une zone, le cœur, dont l'indice de réfraction est plus élevé que celui de la zone qui l'entoure, la gaine. Les fibres optiques sont principalement constituées de silice, dopée au moyen de différents composés chimiques pour contrôler notamment le profil d'indice variant avec le rayon. [2]

I.4.1 Structure de la fibre optique

Les fibres optiques sont de longs poils en verre d'une grande pureté, ces poils sont alignés ensemble dans un faisceau appelé câble.[3].

La fibre optique compose de trois parties principaux comme suit [4]:

A. Le cœur : c'est du verre ultra clair (cylindrique) et représente le chemin dans lequel la lumière se déplace.

- B. Le gaine** : une substance qui entoure le noyau de verre et agit une sens inverse retour de la lumière au centre de la fibre optique
- C. Le revêtement** : une pellicule plastique protéger la fibre les dommages visuels et la casse

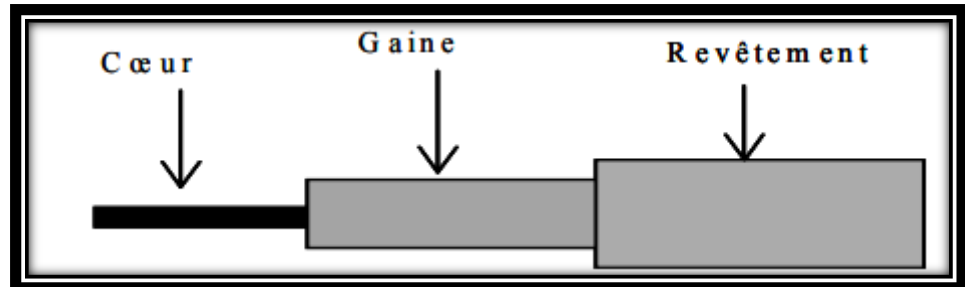


Figure I.3 : structure d'un fibre optique [4]

I.5 Les types de fibre optique

Il existe deux types de fibres : multimode et monomode. Dans une fibre multimode, les diamètres des diélectriques sont plus importants que ceux d'une fibre monomode ($\varnothing$ du cœur ≈ 50 microns et $\varnothing$ de la gaine ≈ 125 microns) et les différents rayons empruntent des trajectoires différentes. Leurs chemins optiques et donc leurs temps de propagation sont différents. Il en résulte donc une dispersion intermodale. Pour diminuer cet effet, le profil d'indice du cœur peut être modifié de telle sorte à créer un « gradient d'indice » et non un saut d'indice (l'indice n_1 n'est pas constant mais possède une symétrie autour de l'axe). Cela permet de réduire les différences de temps de propagation en réduisant les écarts entre chemins optiques.

Les fibres multi-modes sont de préférence employées pour les réseaux locaux, pour les bas débits ou encore pour des longueurs d'onde proches de 850 nm. Dans le cadre de ma thèse, nous ne parlerons uniquement que de fibres monomodes. Elles possèdent un diamètre de cœur plus petit (8 à 10 microns en général). Compte tenu de ces dimensions, la fibre optique monomode classique est à saut d'indice. [5]

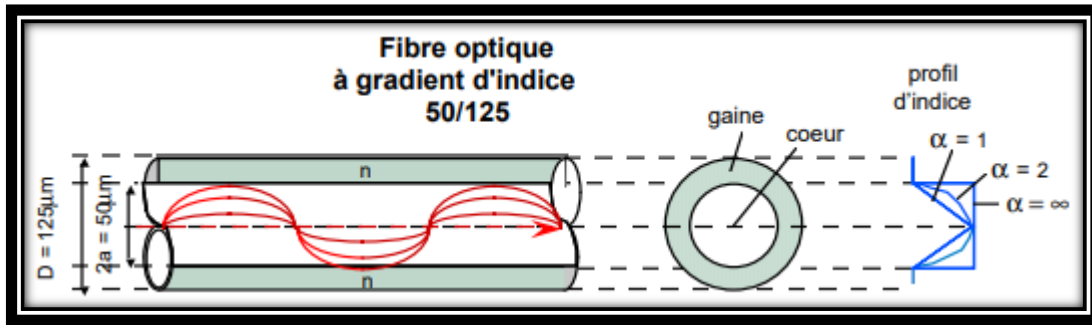


Figure I.4 : fibre multi-mode à gradient d'indice [5]

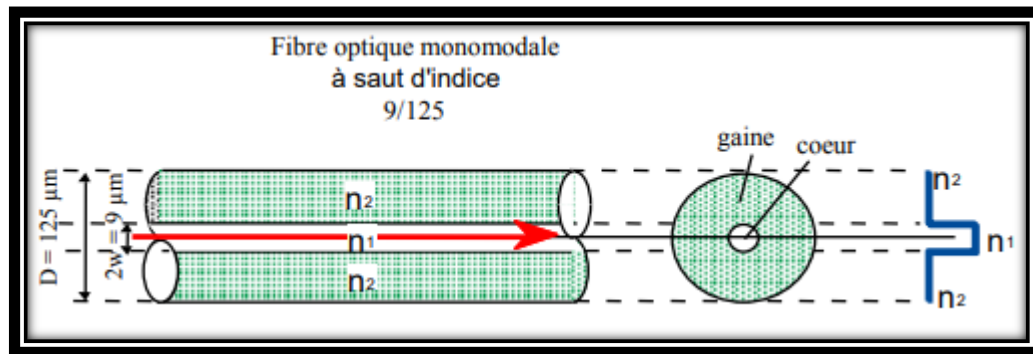


Figure I.5 : Fibre monomode à saut d'indice [5]

I.6 Les modes de propagation dans les fibres optiques [5]

1) La condition de région monomode est donnée par :

$$\lambda > \lambda_c = \frac{2\pi a n_1}{2.405} \sqrt{2\Delta} \quad (I.1)$$

λ_c : coupure

Le diamètre de cœur des fibres monomodes est de l'ordre de 10mm grandeur proche de la longueur d'ondes de la lumière qui se propage. Le nombre de modes guides, entre fini peut être approché par la formule :

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (I.2)$$

N peut être de l'ordre de quelque milliers.

2) Le diamètre des fibres multi-modes est plus important de l'ordre de 50 à 85 μm.

Pour une fibre à gradient d'indice, la condition de propagation à mode guide unique est donnée par :

$$v < v_c = 2.405 \sqrt{1 + \frac{2}{g}} \quad (I.3)$$

Dans le cas du profil parabolique : $v_c = 3.401$

I.7 Multiplexage dans les liaisons optiques de fibre optique

Ayant une largeur de bande importante permet d'effectuer les opérations d'accès multiples, ce qui favorise la communication entre plusieurs utilisateurs simultanément. Les techniques de multiplexage appliquées aux systèmes optiques sont : le WDMA, l'OTDMA et l'OCDMA. [6]

I.7.1 La technique WDMA

Cette technique développée dans les années 1980 est basée sur le multiplexage en longueur d'onde. Le WDMA (Wavelength Division Multiple Access) constitue en optique, l'équivalent des systèmes de multiplexage par répartition de fréquence ou FDMA dans le domaine radiofréquence. Dans cette technique, le multiplexage se fait en longueur d'onde, chaque utilisateur sélectionnant une longueur d'onde différente.

Les signaux optiques émis par les sources sont appliqués à l'entrée des modulateurs optiques qui permettent de les moduler par les données. En sortie des modulateurs les signaux sont multiplexés et transmis simultanément dans la même fibre optique.

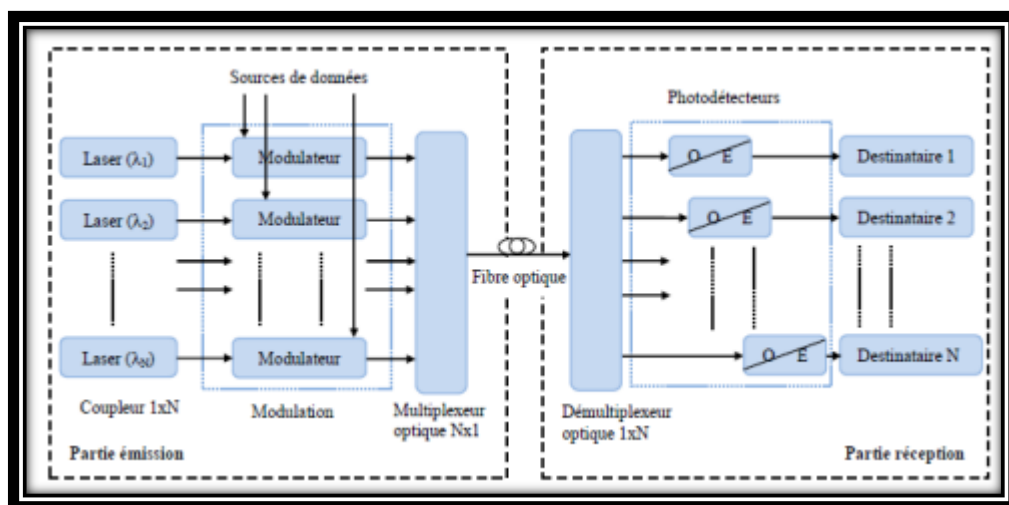


Figure I.6 : Système d'émission optique et de réception dans technique WDMA [6]

A la réception, les signaux reçus sont démultipliés pour être envoyés à chaque destinataire. Cette technique est utilisée dans les réseaux étendus (WAN : Wide Access Networks) et dans les réseaux métropolitains locaux (MAN : Metropolitan Access Networks).

I.7.2 La technique OTDMA

Cette technique, basée sur un multiplexage temporel, est utilisée pour les systèmes électroniques dont les débits de transmission sont limités aux environs de 10 Gb/s à cause des composants électroniques.

L'OTDMA qui a été développé au début des années 1990, permet de dépasser cette limite pour approcher des débits de l'ordre du Téra-bit par seconde.

A l'émission, le système de transmission en OTDMA est composé des éléments suivants :

- Une source laser qui émet des impulsions optiques courtes de durée T_c appliquées à l'entrée d'un modulateur optique commandé par le signal de donnée de durée T_d .

Si l'on a N utilisateurs, la relation existant entre ces deux durées est :

$$T_d = N \times T_c. \quad (I.1)$$

- Un ensemble de modulateurs assurant la modulation de la lumière par les données des utilisateurs, suivi d'un système de lignes à retard et d'un multiplexage optique avant transmission dans la fibre.

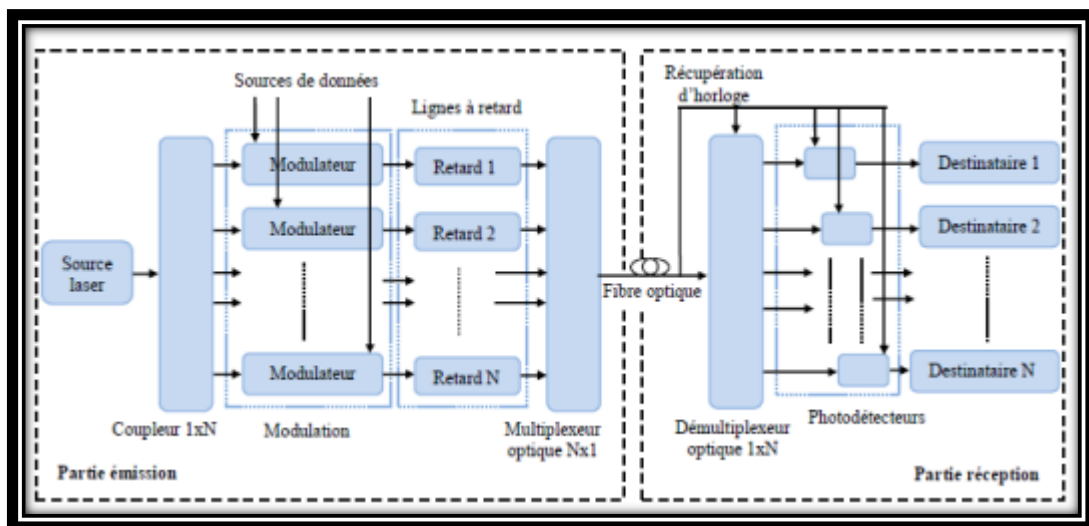


Figure I.7 : Système d'émission optique et de réception dans technique OTDMA [6]

Le débit des données étant égal à :

$$D_d = 1/T_b, \quad (I.2)$$

on aura un débit sur fibre optique pour N utilisateurs de :

$$D_{\text{fibre}} = N \times D_d \text{ bit/s.} \quad (\text{I.3})$$

Par exemple, pour un système ayant 6 utilisateurs, si à l'entrée de la fibre le débit est de 10 Mb/s, le débit total sera de 60 Mb/s. Par suite, la source laser devra émettre des impulsions ultra- courtes d'une largeur T_c de 16 ns.

I.7.3 La technique OFDM

L'OFDM est une technique de transmission ayant pour objectif de répartir sur un grand nombre de porteuses le signal numérique que l'on souhaite émettre.

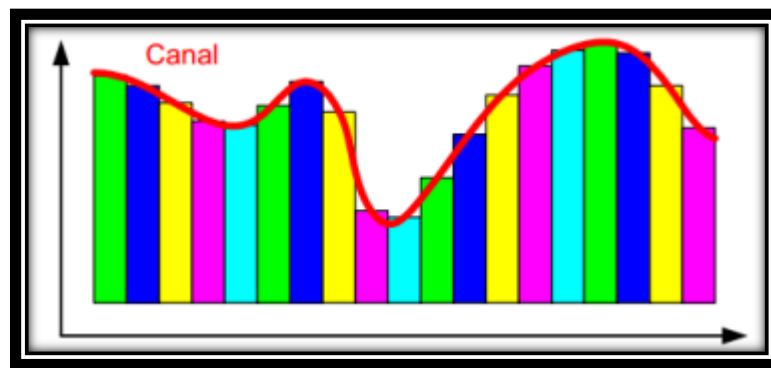


Figure I.8 : répartition fréquentielle des porteuses [6]

Les premières études sur les multi-porteuses datent de la fin des années 1950. Le multiplex à division de fréquences orthogonales que l'on appelle OFDM est apparu une dizaine d'années plus tard. Délaissé lors du développement de la théorie de l'égalisation pour les systèmes mono-porteuse, l'OFDM a vu son retour vers le milieu des années 1980. Les systèmes mono-porteuse, par opposition à l'OFDM ne favorisent pas les conditions de résistance aux trajets multiples et de débit élevé pour un taux d'erreur binaire faible. Depuis, l'OFDM est resté une technique prépondérante car elle est utilisée pour de nombreuses applications comme la télévision numérique DVB ou la norme ADSL permettant des liaisons internet à haut débit ; cette technique OFDM s'adapte parfaitement aux communications mobiles, et paraît incontournable pour les standards de troisième et quatrième génération.

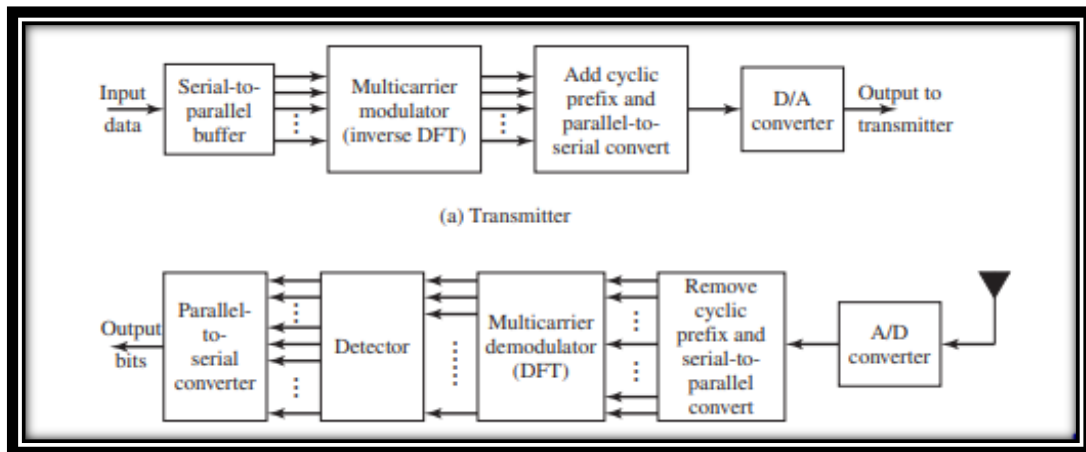


Figure I.9: schéma fonctionnel d'un système de communication numérique multi-porteuse OFDM [7]

Les avantages d'OFDM

- Robustesse aux interférences de trajets multiples
- Codage et entrelacement adapté pour réduire le taux d'erreur
- Modulateur et démodulateur réalisés par une IFFT et une FFT
- Robustesse en terme d'égalisation

Les inconvénients d'OFDM

- Sensible au décalage fréquentiel ce qui engendre une perte d'orthogonalité entre les sous porteuses
- Le signal peut présenter un PAPR (Peak to Average Power Ratio) élevé.

I.8 Les effets linéaires [8]

I.8.1 Atténuation

Lors de la propagation dans une fibre optique, la puissance moyenne du signal lumineux est atténuée en fonction de la longueur d'onde [8]:

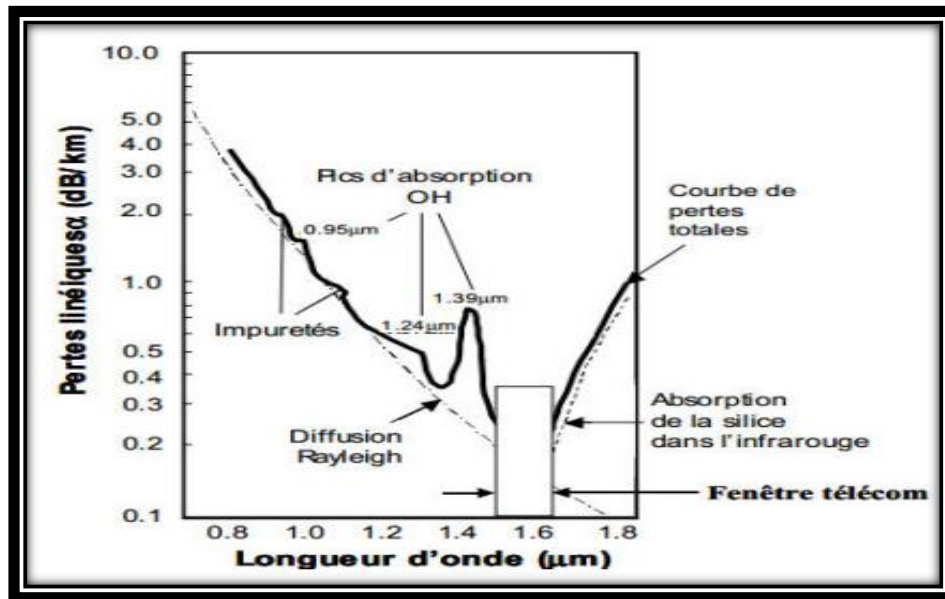


Figure I. 10 : schéma représentation atténuation en fonction de la longueur d'onde dans fibre optique [8]

Les propriétés d'atténuation ont pour origine les limites imposées par la diffusion Rayleigh dans la bande 0.7 μm à 1.6 μm, ensuite c'est l'absorption de la silice dans l'infrarouge qui est prépondérante. Il existe des pics d'absorption aux environs de 1.25 μm (faible) et de 1.39 μm qui sont dus à la présence d'ions OH⁻ dans la fibre et qui absorbent la lumière car ils sont particulièrement sensibles aux longueurs d'onde citées. En générale l'atténuation notée α se calcule en dB/km par la différence des puissances mesurées en entrée de fibre et en sortie

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} e^{-\alpha L} \quad (\text{I.4})$$

L'atténuation est un facteur important qui définit la distance de transmission possible entre émetteur et récepteur sans amplificateur.

I.8.2 La dispersion chromatique

Le champ électromagnétique d'une onde optique se propageant dans une fibre optique à une vitesse de propagation différente en fonction de sa longueur d'onde, ou inversement à sa fréquence. Ce phénomène est lié à la dispersion chromatique du matériau qui est directement reliée à son indice de réfraction ($n=n(\omega)$) qui varie avec la fréquence $f(\omega=2\pi f)$ [8]:

$$D(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n(\omega)}{d\lambda^2} \quad (\text{I.5})$$

C'est la célérité de la lumière dans le vide, et D la dispersion (s'exprime en Ps/nm/km); ce paramètre correspond en fait à la dérivée du temps de propagation (exprimé en Ps) par rapport à la longueur d'onde et à la distance. Si deux signaux dont les longueurs d'onde sont séparées de 1 nm, se propagent sur 1 km, D sera le temps séparant ces deux signaux après propagation. En considérant que la dispersion est localement linéaire autour de 1550 nm, on peut donc déduire assez simplement la différence de propagation Δt liée à la vitesse de groupe après avoir parcouru une longueur de fibre L :

$$\Delta t = L \cdot D(\lambda) \cdot \Delta \lambda \quad (\text{I.6})$$

Cet effet dispersif propre aux milieux diélectriques, se caractérise également par la pente de la dispersion notée ici D telle que :

$$D = \frac{dD}{d\lambda} \quad (\text{I.7})$$

On peut également donner la relation entre la constante de propagation β et l'indice de réfraction définie par

$$\beta(\omega) = \frac{n(\omega) \cdot \omega}{c} \quad (\text{I.8})$$

La constante de propagation β peut être aussi donnée par la relation suivante :

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}\beta_3(\omega - \omega_0)^3 + \frac{1}{24}\beta_4(\omega - \omega_0)^4 \quad (\text{I.9})$$

Où : ω_0 représente la pulsation centrale de l'onde étudiée

$$\beta_0 = \beta_0(\omega_0) \quad \text{et} \quad \beta_m = \left[\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right] \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{I.10})$$

$$\beta_1 \text{ est l'inverse de la vitesse de groupe } v_g : \beta_1 = \frac{1}{v_g} \quad (\text{I.11})$$

β_2 Correspond à la dispersion de la vitesse de groupe (GVD) traduisant la différence de vitesse de groupe de deux ondes évoluant avec des fréquences voisines, elle est responsable de l'élargissement de l'impulsion lors de la propagation. Elle s'exprime par :

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad (\text{I.12})$$

$$\beta_3 = 1000 \left(\frac{\lambda^2}{2\pi c} \right) (D' + \frac{2}{\lambda} D) \quad (\text{I.13})$$

On peut ainsi relier β_3 à la pente D' de la dispersion, et β_2 à la dispersion D . La pente de la dispersion n'étant pas constante, est également prise en compte dans le cadre du multiplexage de type WDM. Pour la fibre monomode standard (SSMF), la valeur de la dispersion chromatique est de 17 Ps/nm/km à la longueur d'onde de 1,55 μm , et la dérivée de la dispersion a pour valeur $D'=0,06$ Ps/km/nm² comme la plupart des fibres en silice.

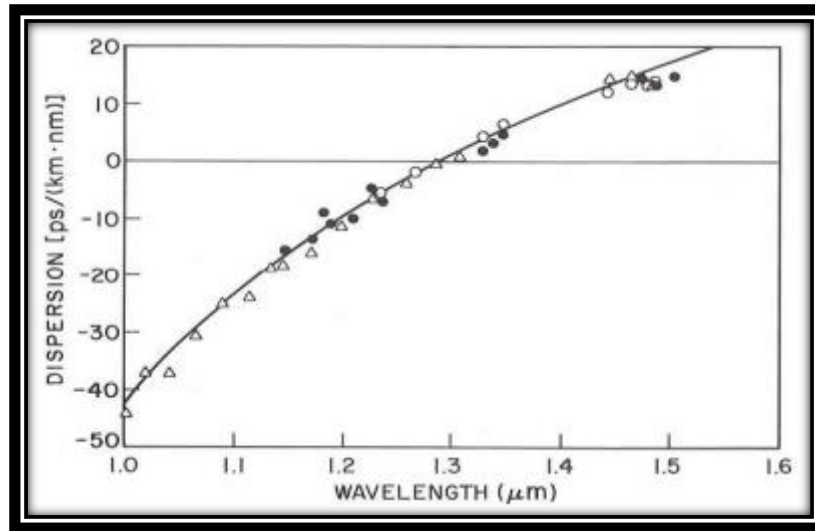


Figure I.11 : courbe de mesure de la dispersion chromatique [8]

I.8.3 Dispersion modale de polarisation (PMD)

La contribution de la PMD à l'élargissement temporel des impulsions du fait d'une biréfringence des modes de polarisations, doit d'autant plus être prise en considération pour les transmissions haut-débit. En effet, dans une fibre optique idéale, la section transversale possède une parfaite symétrie de révolution. Dans ce cas, le mode fondamental possède deux polarisations orthogonales (orientations du champ électrique) qui se propagent avec les mêmes caractéristiques : vitesse de phase, vitesse de groupe. Cependant, au cours de la fabrication, la fibre peut présenter certains défauts. D'autre part, les fibres installées peuvent également subir des contraintes mécaniques. Tous ces phénomènes induisent de la biréfringence dans la fibre optique qui fait apparaître localement un axe rapide et un axe lent, avec pour chacun un indice de réfraction associé.

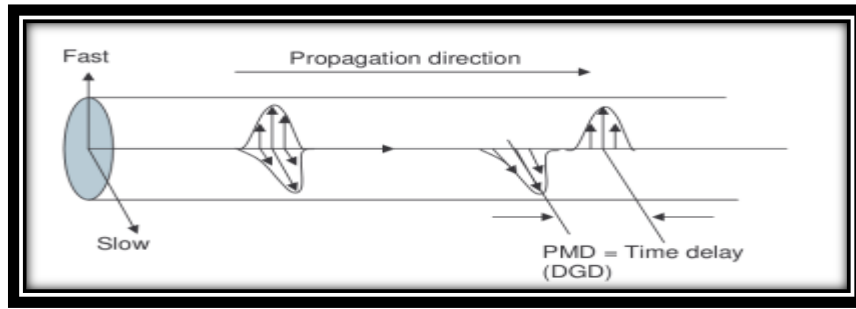


Figure I. 12 : principe de PMD [8]

I.9 Les effets non linéaires [9]

I.9.1. Définition

Les systèmes de télécommunications sur fibre sont conçus dans l'hypothèse d'une transmission linéaire et les effets non-linéaires sont alors des effets parasites qui en dégradent les performances quand les puissances véhiculées deviennent élevées. Dans l'effet non linéaire, on trouve l'effet Kerr, Les effets Raman et Brillouin.

I.10 Eléments de bases des réseaux optiques

Un réseau est un ensemble d'équipements reliés entre eux, grâce à des lignes physiques (câbles, fibre optique, ...) ou des ondes hertziennes dans le but d'échanger des données selon des règles (protocoles) bien définies. Si le lien est physique (câble, fibre, ...) le réseau est dit fixe ; si le lien est sous forme d'ondes hertziennes, on parle de réseau sans fil. On distingue un réseau d'un autre selon le nombre d'éléments qui le constituent, sa disposition géographique, et les protocoles qu'il utilise.

Généralement, on distingue trois types de réseau fixe : le réseau local (LAN), le réseau métropolitain (MAN) et enfin le réseau étendu ou longue distance (WAN). [4]

I.10.1 Le réseau étendu ou longue distance (WAN)

Le réseau longue distance qui couvre typiquement des distances comprises entre 150 et 700 km permet de relier des villes, des régions entre elles. Les réseaux très longue distance (Very Long Haul entre 700 et 1500 km - Ultra Long Haul > 1500 km) sont, quant à eux, plus dédiés aux liaisons internationales. Enfin les liaisons sous-marines doivent répondre aux contraintes liées à leur environnement.

Les liaisons longues et très longue distances sont en général de type « point à point » où une fibre permet de relier un point à un autre par opposition à une liaison dite « en anneau » où l'architecture de la liaison est plus complexe.

Si les liaisons terrestres doivent être le plus flexible possible, les liaisons sous-marines sont, elles, développées pour une liaison donnée. Le type de fibre (très faibles pertes $\sim 0,2$ dB / km) et l'espacement entre répéteurs (30-65 km) sont alors optimisés pour une meilleure performance de chaque liaison. Dans les liaisons terrestres par contre, les maîtres mots sont la flexibilité et le coût. La fibre présente alors souvent plus de pertes et l'espacement entre répéteurs peut varier entre 80 et 120 km. La régénération optique peut se situer dans ce cadre.[10]

I.10.2 Le réseau métropolitain (MAN)

Le réseau métropolitain, comme son nom l'indique, se situe à l'échelle des villes et plus largement des zones métropolitaines. Il présente en général une architecture complexe, où l'information doit commuter du réseau longue distance au réseau local jusqu'à l'utilisateur. La capacité des réseaux métropolitains sont souvent insuffisantes. Car si les réseaux longues distances ont été adaptés aux volumes croissants de communications, le réseau métropolitain présente souvent des zones d'engorgement. Dans le contexte économique actuel, les solutions qui semblent adéquates, sont celles qui permettent d'augmenter la capacité du réseau tout en augmentant les fonctionnalités et la flexibilité de l'infrastructure existante. La régénération optique 2R s'inscrit dans Ce contexte. [10]

I.10.3 Le réseau local (LAN)

Aussi appelé réseau d'accès ou de desserte, ce réseau

- A une longueur qui varie de 2 à 70 m
- Est constitué par une partie en fibre entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. [4]

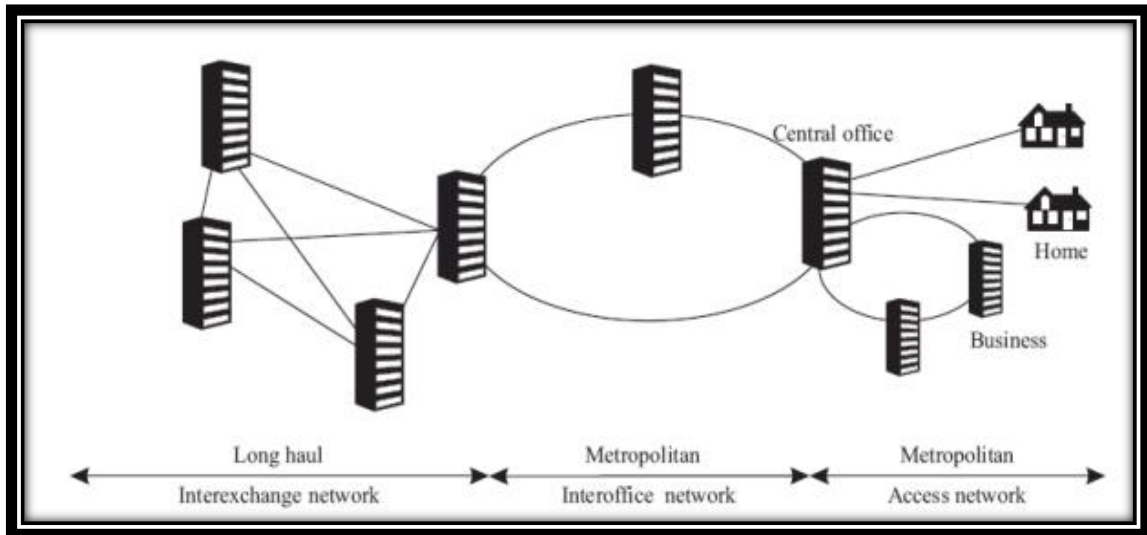


Figure I.13 : Différents types de réseau public [4]

I.11 Topologies physiques du réseau fixe

Une topologie est l'architecture ou l'arrangement physique des nœuds constituant le réseau. Pour un réseau fixe trois topologies sont possibles

I.11.1 Topologie en bus : le mot « bus » désigne le tronc physique qui relie les nœuds, dans un bus tous les éléments sont connectés à un même médium de transmission par l'intermédiaire d'un câble.

I.11.2 Topologie en anneau : dans la topologie en anneau (ring) les éléments communiquent alternativement sur un anneau.

I.11.3 Topologie en étoile (star) : dans ce cas tous les nœuds sont reliés à un équipement appelé « concentrateur (hub) » ou « commutateur ». Ce dernier assure la communication entre tous les éléments interconnectés. [4]

I.12 Conclusion

La fibre optique fournit une connexion internet rapide, constante et stable qui permet de transmettre beaucoup de données sur des distances. Comme les demandes de donnée deviennent énormes, le câblage en fibre optique est la solution la plus sûre pour assurer la flexibilité et la stabilité du réseaux.

Chapitre II

Communication mobile et radio sur fibre

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les notions de bases sur les réseaux mobiles et le système Radio sur Fibre. Actuellement les réseaux mobiles ont connu un grand développement, qui sont catégorisé dans des générations: la 1^{ère} génération, 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème} générations. L'objectif de ce chapitre est présenté les différentes caractéristiques des réseaux mobiles et de la technologie Radio sur Fibre.

II.2. Définition



Figure II.1: les réseaux mobiles [11]

Le réseau mobile est un réseau de communication sans fil. Il est réparti sur des zones appelées cellules, chacune d'entre elles desservie par au moins un émetteur-récepteur à localisation fixe, connu par la station de base. Cette station de base fournit à la cellule, la couverture réseau qui peut être utilisée afin d'assurer la transmission de la voix et des données. Une cellule peut utiliser un ensemble différent de fréquences des cellules voisines, pour éviter les interférences et fournir une qualité de service garantie dans chaque cellule [12].

II.3. Evolution

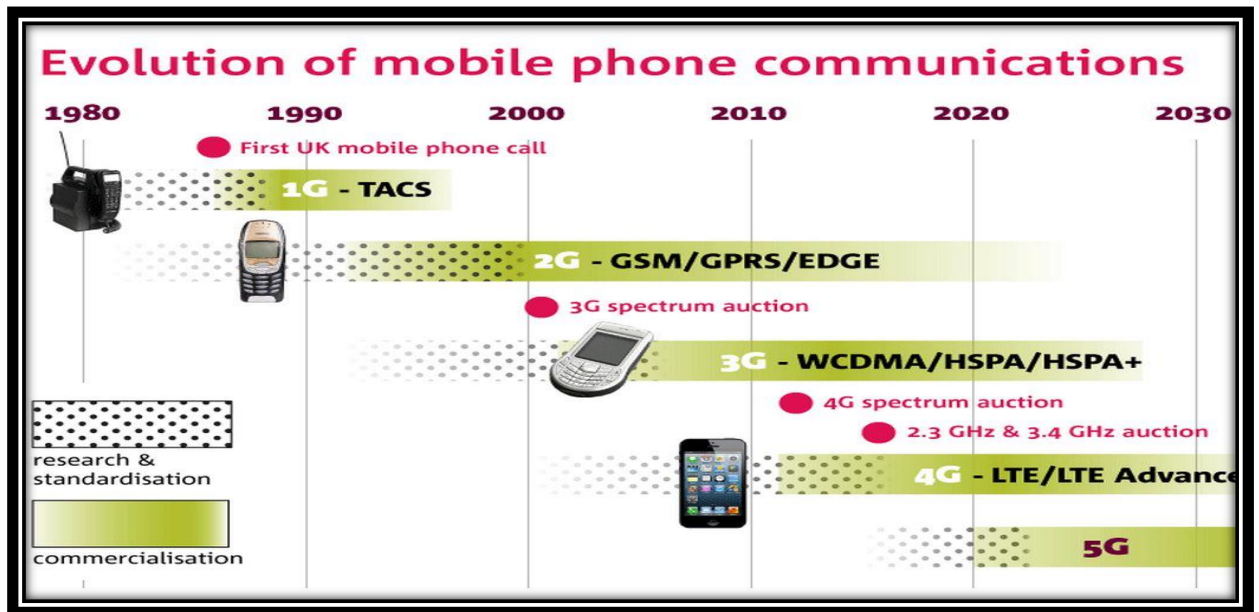


Figure II.2: l'évolution de réseaux mobiles [11]

Les réseaux mobiles sont au cœur des débats polémiques sur la mise en place de la 5G. Mais connaissons-nous exactement les différences entre les réseaux connus sous les sigles: 1G, 2G, G, E, 3G, H⁺ ou 4G et 4G⁺. En fait, ces sigles nous indiquent le type de réseau mobile auquel nous avons accès. Il faut savoir que cela dépend de la qualité de vos communications téléphoniques, du débit et de la performance de votre connexion internet mobile. Au début de la mise en place du réseau mobile, le téléphone portable a utilisé tour à tour 5 générations de réseaux mobiles qui se sont succédé: 1G, 2G, 3G, 4G, 5G. Elles ont toutes leurs spécificités. [13] [14]

II.3.1. La 1G

Il s'agit de la toute première génération de réseau mobile, déployée en France dès 1986. Du nom de Radio 2000, le réseau était l'œuvre et la propriété de France telecom. La 1G était accessible par le biais de téléphones analogiques portables, essentiellement intégrés aux voitures. Avant qu'il ne cesse d'être utilisé, le réseau Radio 2000 rassemblait environ 60000 clients.

II.3.2. La 2G GSM

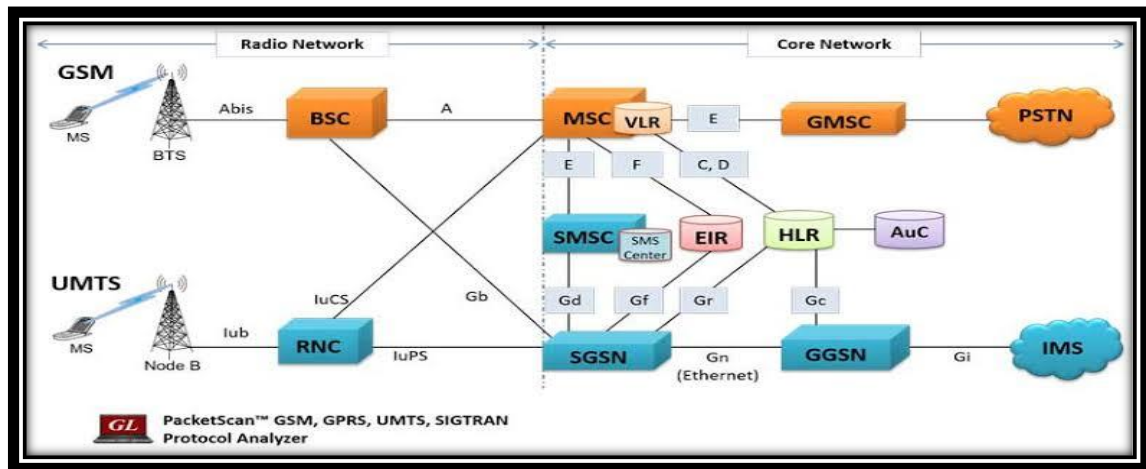


Figure II.3: architecture de GSM, UMTS,GPRS[15]

Ce réseau, également appelé GSM pour Global System for Mobile Communications ne permet que d'échanger par voix. Cette norme numérique a été créée en 1982, il y a donc presque quarante ans.

II.3.2.1. Le réseau 2.5G-GPRS

Ce réseau est aussi appelé 2.5G car il est situé entre la généralité 2G et la 3G. Il est possible, avec celui-ci, d'échanger des données (SMS, data, appels...) avec un débit théorique maximal de 171.2Kb/s.

II.3.2.2. Le réseau 2.75G-EDGE

Plus communément appelé EDGE pour Enhancement Data Rates for GSM Evolution, le débit peut ici atteindre les 384 Kb/s. cette norme est évoquée comme une "pré-3G".

II.3.3. La 3G

II.3.3.1. La 3G-UMTS

La troisième génération de normes de téléphonie mobile (UMTS) propose d'échanger à 1.9 mégabits par seconde, soit environ 5 fois plus rapidement que la génération précédente.

II.3.3.2. Le réseau 3G⁺

Appelée HSDPA, la 3G⁺ permet de monter le débit d'échanger de données théorique a 14.4 Mb /s, soit tout de même 7.5 fois plus que la 3G initiale.

II.3.3.3. Le réseau H⁺

Ce réseau est également appelée dual carrier ou HSPA⁺ , dans ce cas précis, le débit est de 42Mb/s. il s'agit d'un réseau approchant de la 4G, bien que le débit reste plus de 2 fois inférieur.

II.3.4. La 4G**II.3.4.1. La 4G-LTE**

Avec la 4^{ème} génération (4g LTE), l'échange de données peut dépasser les 100 Mégabit/s, Si ce n'est plus, et ainsi atteindre le très haut débit mobile. En réalité la bonde passante s'avère toutefois partagée entre les utilisateurs. Moins il y a d'utilisateurs utilisant le réseau est plus le débit est donc élevé.

II.3.4.2. Le réseau 4G⁺

La 4G⁺, aussi nommée 4G LTE Advanced, propose un débit bien plus rapide que la 4G classique. Alors que la 4G propose un débit théorique compris entre 100 et 150 Mb/s, la 4G⁺ fait aujourd'hui plus de 2 fois mieux, soit 200 à 300Mb/s de débit théorique au minimum.

II.3.5. La 5G

Qui est développée depuis quelques années et dont les premiers forfaits ont été lancés fin 2020. Cette technologie représente le plus gros investissement à venir des opérateurs télécom. la principale bande de fréquence de la 5G est la bande 3.5GHZ, mais les bandes 700MHZ et 2100MHZ peuvent être également utilisées. Les débits de la 5G prouvent, en théorie, dépasser les 1 Gbit/s.

II.4. Comparaisons [16]

	1G	2G	3G	4G	5G
Période	1980-1990	1990-2000	2000-2010	2010-2020	2020-2030
Bande passante	150/900Mhz	900Mhz	100Mhz	100Mhz	1000* BW Par unité de surface
Fréquence	Signal analogique (30 KHz)	1.8Ghz (numérique)	1.6-2Ghz	2-8Ghz	3-300Ghz
Débit de données	2 Kbit/s	64 Kbit/s	144Kbit/s-2Mbit/s	100Mbit/s-1Gbit/s	1Gbit/s <
Technologie	Cellulaire analogique	Cellulaire numérique (GSM)	CDMA, UMTS, EDGE	LTE, WIFI	WWW

Tableaux II.1: comparaison entre les générations mobiles [16]

II.5. La 5G et les ondes millimétriques

La bande millimétrique est une bande de spectre électromagnétiques correspondant à des longueur d'onde entre [1 mm-10 mm] a une propagation sur la plage de fréquence de [30GHz-300GHz]. On effet la communication par les ondes millimétriques et une solution d'un avenir proche la transmission des réseaux cellulaire mobile sans fil, les réseaux locaux sans fil, les réseaux personnels. [17]

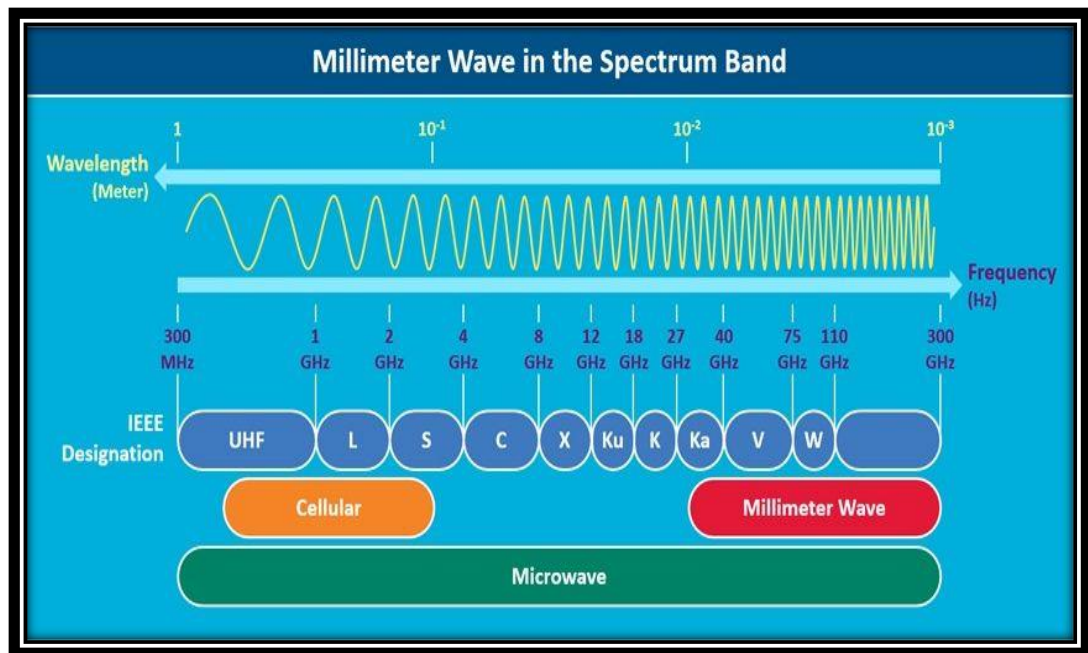


Figure II.4: Spectres des fréquences (ondes millimétriques)[17]

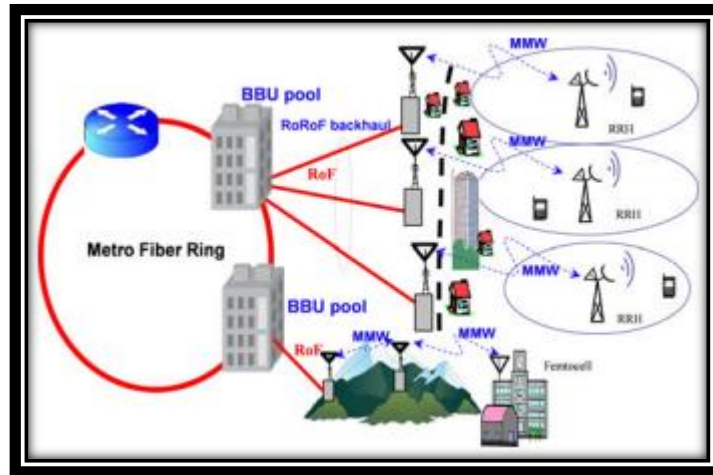


Figure II.5: système ROF pour un réseau backhaul haute capacité dans les réseaux mobiles hétérogènes. [18]

Voici certains avantages et inconvénients associés à l'utilisation des ondes millimétriques

II.5.1. Les avantages et les inconvénients des ondes millimétriques [19]

II .5.1.1. Les avantages

- ✓ Grande bande passante.
- ✓ Capacité de pénétration limitée.
- ✓ Large spectre disponible.

II.5.1.2. Les inconvénients

- ✓ Portée limitée.
- ✓ Sensibilité aux conditions météorologiques.
- ✓ Exigences d'alignement précis.

Il est important de noter que les avantages et les inconvénients des ondes millimétriques peuvent varier en fonction de l'application spécifique et du contexte d'utilisation.

II.5.2. Les applications des ondes millimétriques [20]

II.5.2.1. Application classiques

- Radio astronomie et télédétection
 - ✓ Radiotélescopes, radiomètres, interféromètres, etc.
 - ✓ Liaisons inter-satellites.

- Imagerie en millimétrique
 - ✓ Cameras en millimétrique.
 - ✓ Surveillance et localisation.
- Radars en millimétrique
 - ✓ Radars automobiles.

II.5.2.2. Application impliquant des interactions avec le corps humain

- Scanners actifs
 - ✓ Scanners de sécurité (très faibles densités de puissance).
- Application militaires
 - ✓ Radars.
 - ✓ Armes non létales (puissance très fort).
- Application biomédicales
 - ✓ Thérapeutiques (42-61 GHz, 5-15 mW/cm²).
 - ✓ Diagnostique dentaire.

II.5.2.3. Application émergentes en communications sans fil

- Communications <<longue portée>> (35,70/80,94,140 GHz)
 - ✓ Point-à-point.
 - ✓ Point-à-multipoints.
- WPAN et WLAN (57-64 GHz)
 - ✓ Wi-HD (liaison sans fil = HDMI sans fil).
 - ✓ Wi-Gig (réseau local à haut débit sans fil).
 - ✓ Access internet haut débit.
- Réseaux corporels (autour de 60 GHz)
 - ✓ Très prometteur pour des scénarios off-body.

II.5.3. Génération photonique des signaux millimétriques

La bande de fréquences millimétriques avec des largeurs de bande de canal de plusieurs GHz est devenue le centre d'intérêt de beaucoup de travaux de recherche. Différentes

approches sont proposées et réalisées pour la génération et l'exploitation des signaux millimétriques dans les systèmes RoF. [21]

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

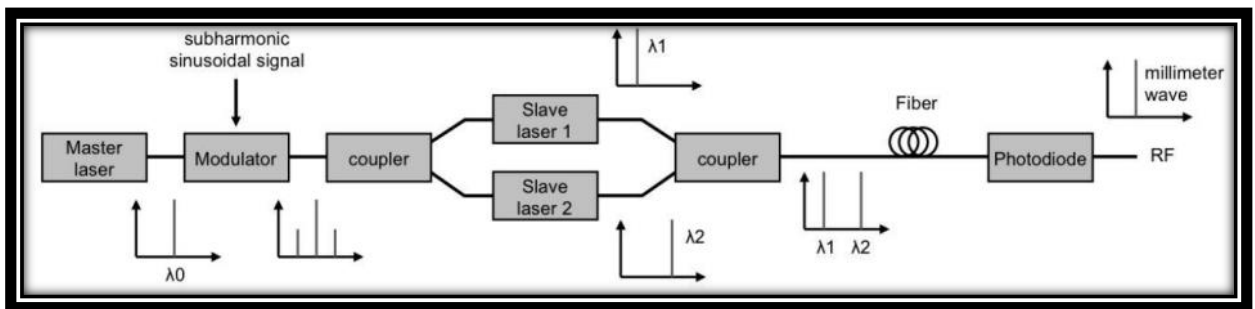


Figure II.6: Système à deux longueur d'onde avec la technique de verrouillage par injection [21]

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

II.6. Radio sur fibre

II.6.1. Définition de la technique Radio-sur-Fibre

En partant d'un point d'accès, la transmission de type coaxiale impose de courtes distances de transmission du fait des pertes induites proportionnelles à la longueur du câble. La fibre optique s'offre alors comme un candidat alternatif pour le transport d'un signal radiofréquence, car elle présente de nombreux avantages; en particulier ses faibles pertes favorisent la transmission sur de la longue distance sans amplificateur ni répéteur. Les normes

de constructions futures font qu'elles seront déployées à l'intérieur de bâtiments. La technique Radio-sur-Fibre (ROF) consiste à moduler une porteuse optique par le signal électrique RF contenant les données à transmettre. Les signaux radio sont ainsi transmis par l'intermédiaire des fibres optiques de la station centrale vers plusieurs stations de base. [22]

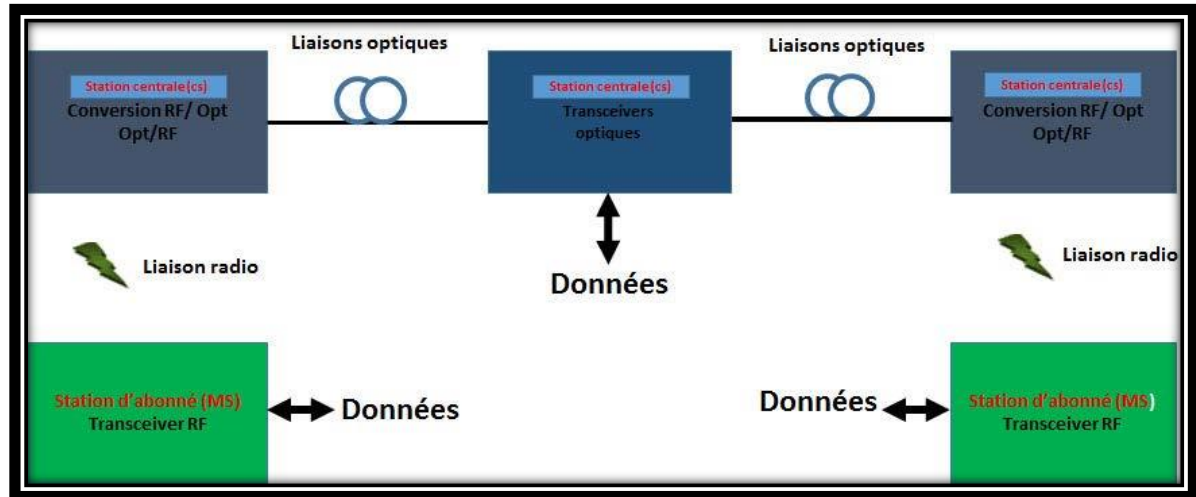


Figure II.7: Synoptique d'un système Radio-sur-Fibre [22]

II.7. Le système de communication ROF

Les technologies Radio-sur-Fibre s'appuient sur des technologies de transmission par fibre optique pour distribuer des signaux RF entre une station centrale CS et des modules d'antennes distribués RAU ou SB. Ces dernières communiquent par signaux radio avec les stations des abonnés MS [22].

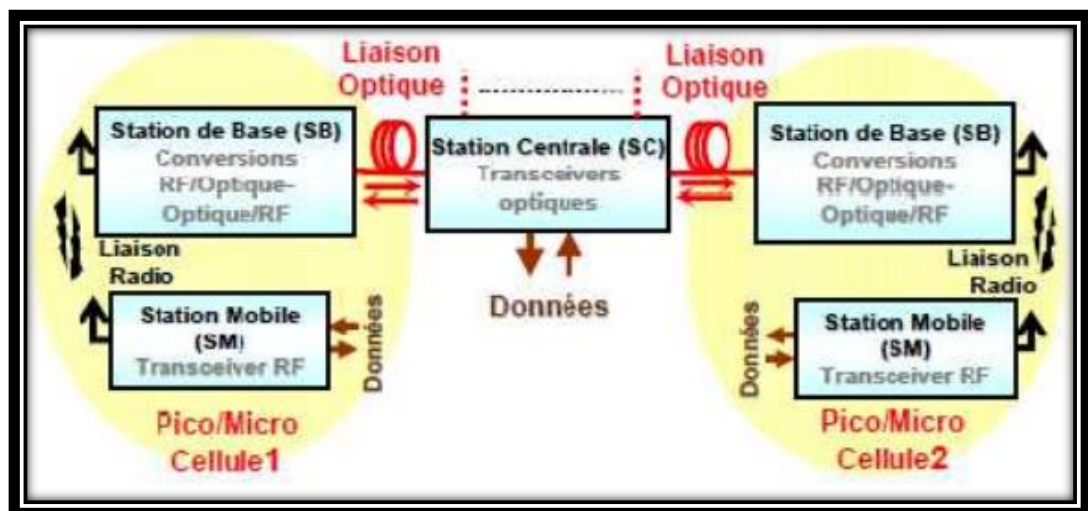


Figure II.8: Synoptique d'un système radio sur fibre classique[23]

II.8. Utilisation de la Radio-sur-Fibre pour les communications optiques

II.8.1. Généralités

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. La particularité de ce système provient des éléments utilisés pour effectuer le transport de l'information. [25]

- 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 une photo détectrice qui opère une conversion du signal optique en un signal électrique qui peut ensuite être traité par des systèmes électroniques plus conventionnels.

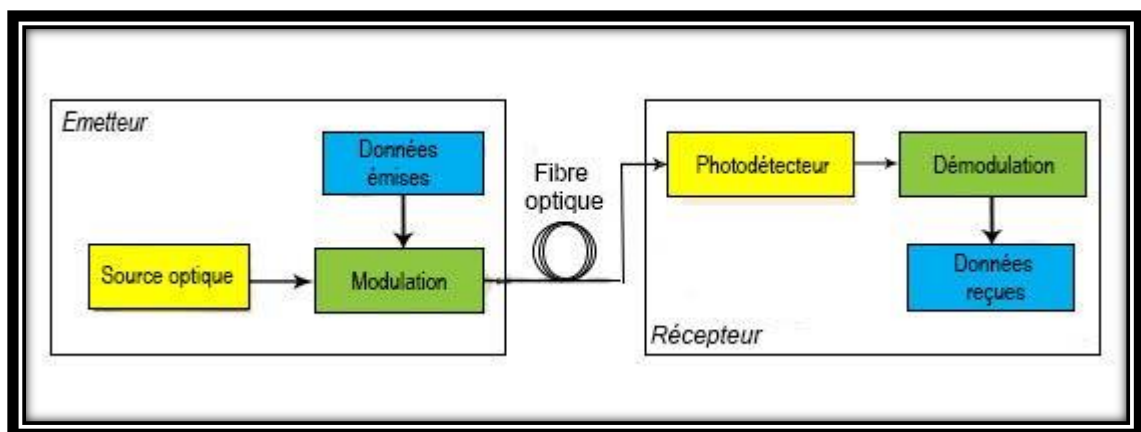


Figure II.9: Architecture générale d'un système de communication par fibre optique [24]

II.9. Architecture Radio-sur-Fibre

Il existe différentes topologies de réseaux Radio-sur-Fibre : [25]

- Point à point.
- Point à multipoints.
- Multipoints à multipoints.

II.9.1. Architecture point à point

L'architecture d'un système point à point se présente de manière très simple. Pour la voie descendante, c'est-à-dire du central vers le client, ce système convertit les données provenant du cœur du réseau en un signal radio qui module un convertisseur électro-optique, puis est envoyé à travers la fibre vers le convertisseur d'une station client. Ce signal est ensuite amplifié par un amplificateur de forte puissance et émis dans l'espace jusqu'au terminal.

II.9.2. Architecture point à multipoints

L'architecture point à multipoints permet de partager une fibre optique sur une longue portion du réseau puis de la diviser en plusieurs fibres sur une distance plus courte de manière à desservir plusieurs abonnés.

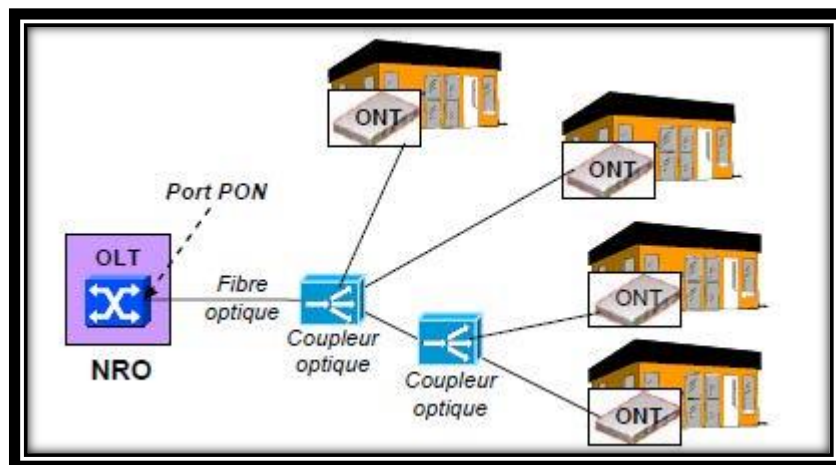


Figure II.10: Architecture point à multipoints [25]

II.9.3. Architecture multipoints à multipoints

La figure représente un exemple d'architecture multipoints à multipoints incluant un coupleur optique N×N. Le laser et la photodiode de chaque transducteur se trouvent reliés à une entrée et une sortie du coupleur.

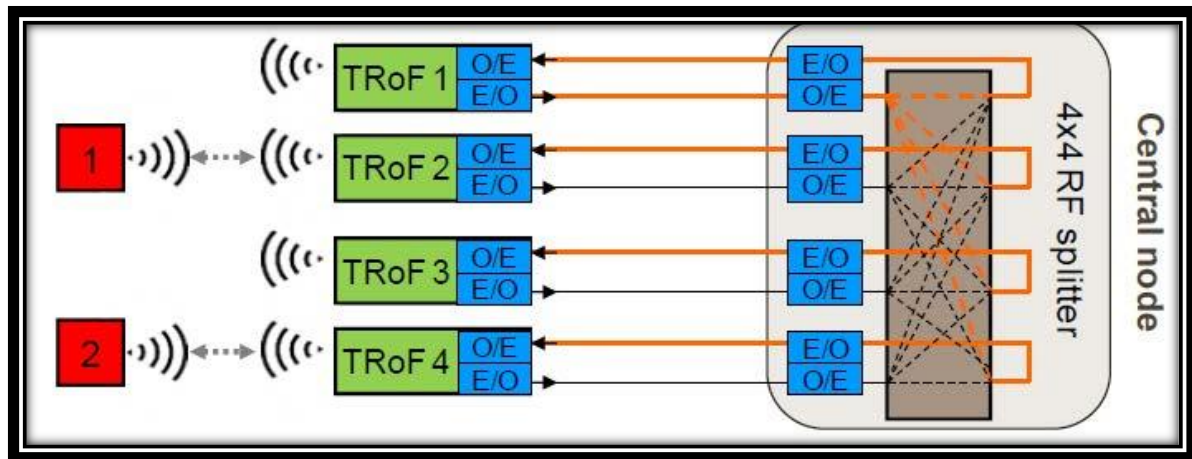


Figure II.11: Architecture multipoints à multipoints [25]

II.10. 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. [26]

II.10.1. 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. 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. Cette modulation, s'accompagne d'une modulation parasite appelée chirp. C'est un phénomène de conversion puissance fréquence. Le chirp est responsable de l'élargissement de la largeur de la raie d'une impulsion optique émise par le laser, de l'apparition de raies latérales dans le spectre de modulation, et l'association de la modulation intensité fréquence engendre une dissymétrie des raies latérales du spectre optique par rapport à la raie centrale qui correspond à la porteuse optique.

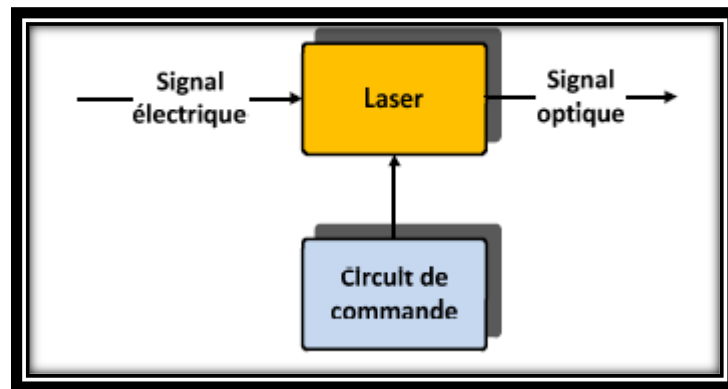


Figure II.12: Synoptique de la modulation directe [26]

II.10.2. La modulation externe

La modulation externe 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. 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.

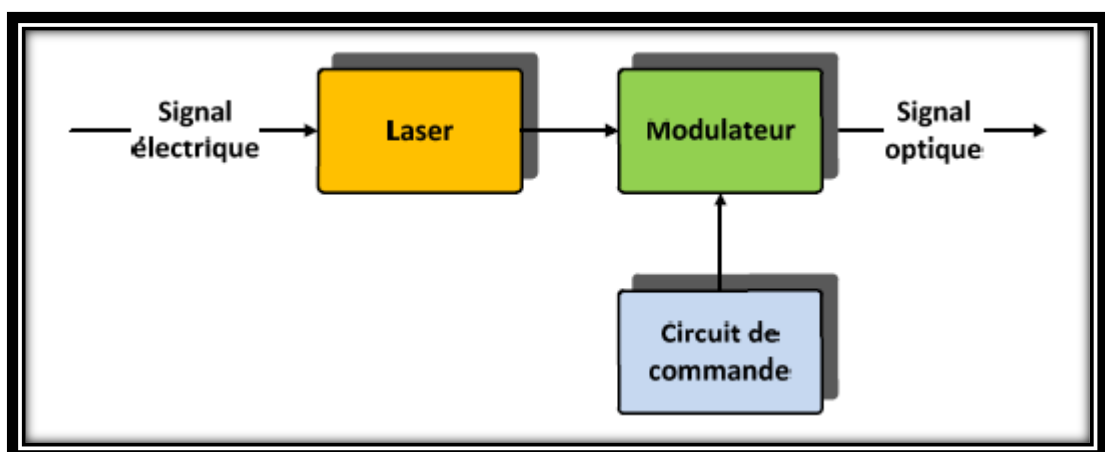


Figure II.13: Synoptique de la modulation externe [26]

II.11. Comparaison des deux modulations

On peut dire que la modulation externe possède une grande bande passante par comparaison avec la modulation directe. Cependant, la modulation directe est plus facile à réaliser et avec un moindre coût et sera utilisée dans les réseaux à accès optique. Dans la suite de la thèse, c'est la modulation externe qui sera utilisée pour réaliser des mesures à 40 Gb/s avec un modulateur externe à électro-absorption. Il est à noter, que pour la modulation externe, et fonction de l'usage que l'on souhaite développer, il existe deux types de modulateurs : les modulateurs à électro-absorption et les modulateurs électro-optiques.

II.12. Les applications de la Radio-sur-Fibre

Voici les principaux domaines d'application de la technique radio sur fibre : [27]

- Communication intra satellite : Dans ce cas, des liens optiques d'inférieurs à 1 km sont utilisés, en particulier, pour la distribution de sources de référence.
- Réseaux cellulaires : C'est le plus important domaine d'application. En effet, il existe trois contraintes principales liées à l'évolution du GSM vers l'UMTS:
 - ✓ L'augmentation du nombre de cellules à cause de l'augmentation de la fréquence.
 - ✓ La difficulté pour réutiliser des sites GSM et partager l'infrastructure.
 - ✓ L'augmentation de la capacité pour des services spécifiques en intérieur, la technique radio sur fibre permet de résoudre ces trois problèmes.
- Réseaux locaux sans fil : Comme les terminaux mobiles deviennent de plus en plus répandus, les réseaux d'accès sans fil à haut débit évolueront vers une demande haut débit. La technique radio sur fibre est une solution de manière à répondre à cette demande en utilisant la conception de réseaux pico-cellulaires afin d'optimiser la couverture tout en transmettant les signaux au plus près de l'utilisateur.
- Communication routière : L'objectif est de fournir en continu une couverture des réseaux mobiles sur les principaux axes routiers ou ferroviaires. Ceci sera rendu possible par la technique radio sur fibre avec un coût faible et un très grand nombre de BS le long des voies.

II.13. Avantages et limitations de la Radio-sur-Fibre

La technique ROF présente les avantages suivants : [28]

- Trois fenêtres de transmission à faible atténuation sont exploitées (850 nm, 1310 nm et 1550 nm), cette dernière étant actuellement privilégiée pour les transmissions à longue distance.

- Une bande passante élargie pour les signaux RF.

- Une faible atténuation : la transmission des signaux RF en espace libre ou par câble est coûteuse et compte tenu des pertes, la portée du système est limitée. La technique Radio-sur-Fibre est une solution pour résoudre ce problème et transporter des signaux à haute fréquence sur des longues distances.

- Une immunité aux perturbations électromagnétiques : les signaux sont transmis par une porteuse optique immune aux perturbations électromagnétiques.

- Une facilité d'entretien.

- Une réduction de la consommation d'énergie.

- Et une possibilité de multi-services et multi-opérateurs.

Limitations de radio sur fibre:

- Dispersion au niveau de la fibre optique : la dispersion est toujours une contrainte qui limite la longueur des liens. Dans une fibre monomode (SMF), la limitation est due à la dispersion chromatique alors que dans une fibre multi-modes (MMF), la dispersion intermodale est plus pénalisante.

- Bruit et non linéarité : comme on utilise des signaux analogiques, il faut dimensionner le système en tenant compte des imperfections des circuits telles que le bruit, les non linéarités (point de compression, produits d'intermodulation). Ces effets limitent la dynamique de la Radio sur Fibre.

II.14. Conclusion

Les réseaux mobiles évoluent constamment. Le nombre de ses utilisateurs augmente également, mais malgré le développement, il fait face à plusieurs problèmes et les utilisateurs exigent un service de haute qualité. Une solution à ces problèmes est la technologie radio sur fibre. Les derniers développements de la fibre radio abordés dans ce chapitre montrent que nous assistons à Il y a actuellement un regain d'intérêt pour ce domaine prometteur Communications radio et optiques.

Chapitre III
Résultats de simulation

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux résultats de simulations d'une chaîne de transmission optique dans la porteuse millimétrique distinguée comme un réseau backhaul du système de communication mobile 5G.

III.2 Schéma de simulation

le schéma de simulation qui donnée par la figure(III.1), illustre une fibre sur radio 10 km convergée de manière transparente et un système d'ondes millimétriques à 90 GHz pour la transmission de signaux sans fil à grande vitesse (ROF) convergé.

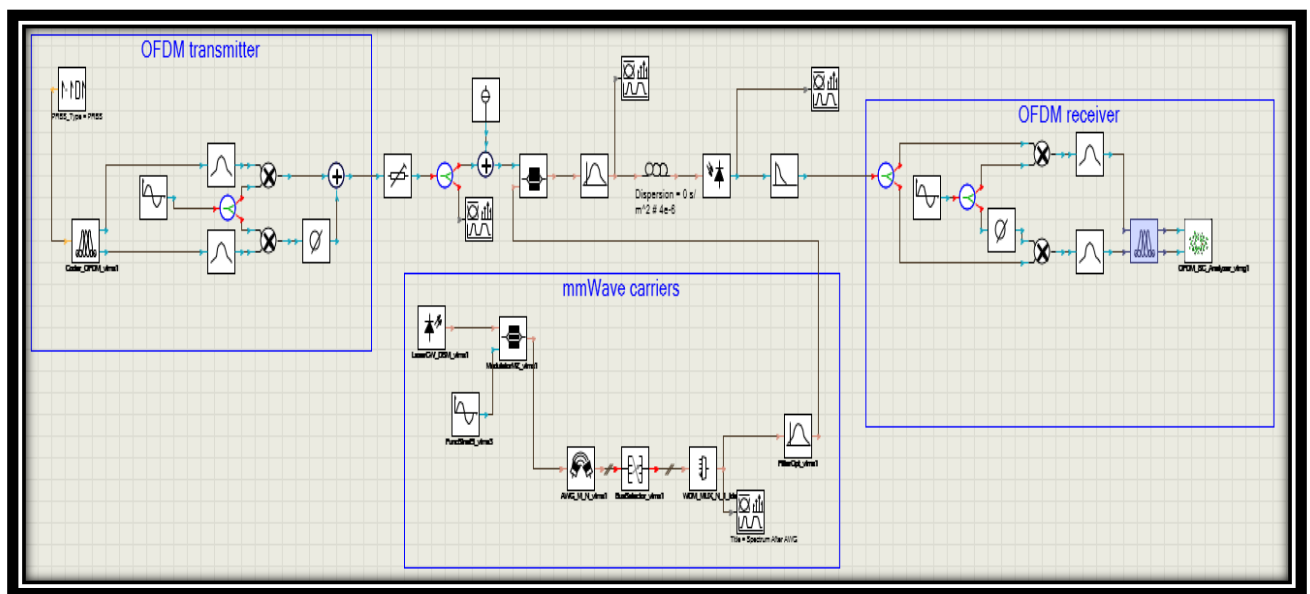


Figure III.1: schéma 5G Wireless Backhaul radio sur fibre

Le schéma compose de 3 blocks sont : Emetteur , canal, Récepteur

III.2.1- Emetteur

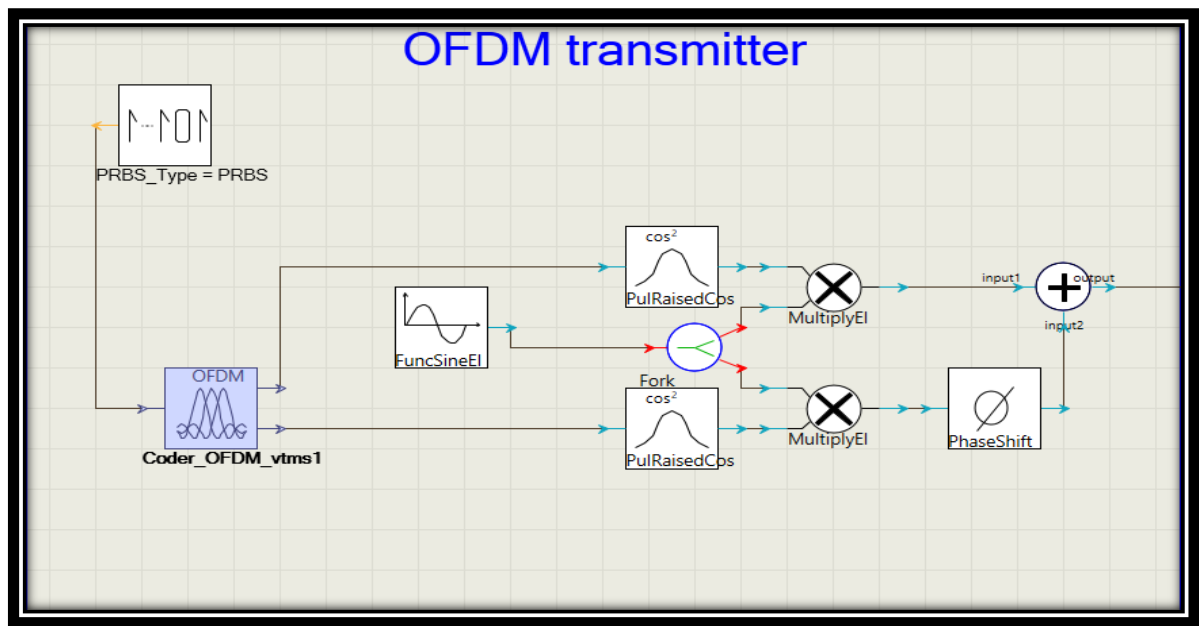


Figure III.2 :schéma représente le block d'émetteur

III.2.1.1.PRBS

est un signal déterministe périodique consiste d'une série de uns et de zéros numérique.

III.2.1.2.Coder OFDM

ce module génère des signaux électrique correspondant aux parties réelle et imaginaire d'un signal d'un signal dm multiplexé par répartition orthogonale de la fréquence.

III.2.1.3.Pulse Raised

ce module génère une réponse Nyquist à partir d'une impulsion électrique entrante utilisée avant un modulateur optique ou dans le cadre d'un récepteur .

III.2.1.4.Func Sine El

Ce module génère une forme d'onde sinusoïdale électrique superposée a une polarisation constante

III.2.1.5.Modulateur

les modules simulent un modulateur MZM et peuvent prendre en compte un chirp de fréquence résultant de l'asymétrie du modulateur.

Le module est conçu pour la facilité d'utilisation plutôt que pour la flexibilité le chirp du modulateur peut être spécifié de deux manières: en utilisant un factor de symétrie et un signe

de chirp ou en utilisant alpha la première méthode concerne la conception physique du modulateur et la seconde à ses caractéristiques comportementales

III.2.1.6.le signal porteuse: (ondes millimétrique porteuse)

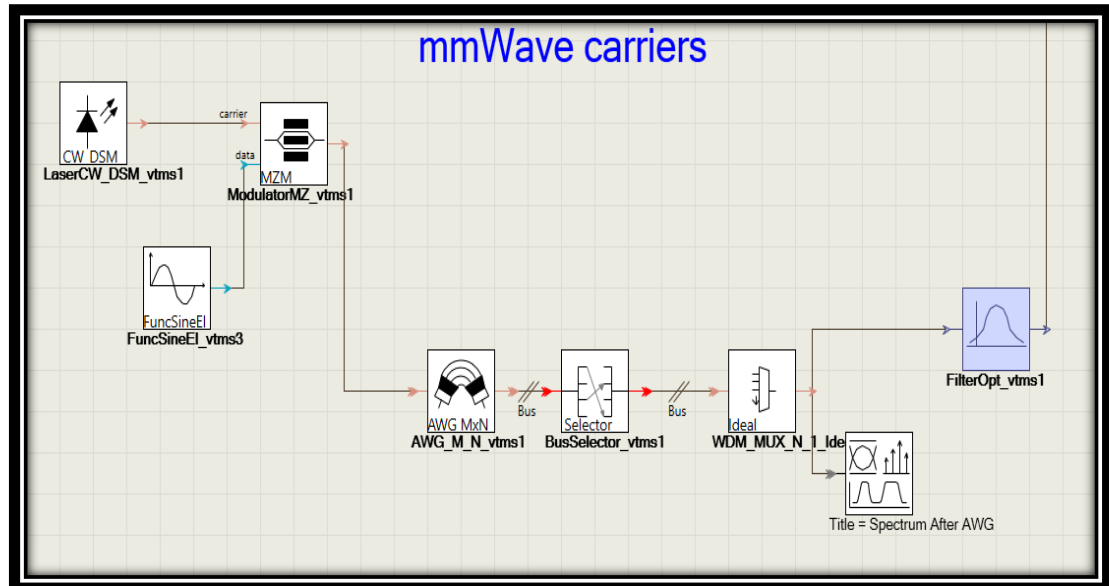


Figure III.3 :schéma représente le block de signal porteuse

III.2.1.6.1.Laser

Il s'agit d'un "modèle de fiche technique" d'un laser CW. Ses paramètres sont ceux que l'on trouve couramment sur la fiche technique d'un fabricant. Par implication, ce sont aussi des paramètres faciles à mesurer. Le laser a un mode latéral, un bruit d'intensité, une dérive de longueur d'onde avec la température et la longueur de ligne.

III.2.1.6.2.AWG mn

Le module simule un multiplexeur M à N basé sur un réseau de guides d'ondes en réseau.

III.2.2.canal

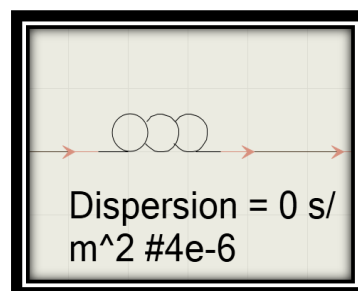


Figure III.4. :Le canal :le fibre optique

III.2.2.1.Fibre

lorsqu'il est utilisé avec signaux en mode échantillonné. Ce module résout l'équation de schroedingrenon linéaire (NLS) décrivant la propagation des ondes optique polarisées linéairement dans les fibres à l'aide de la méthode de Fourier à pas fractionné.

III.2.3.Récepteur

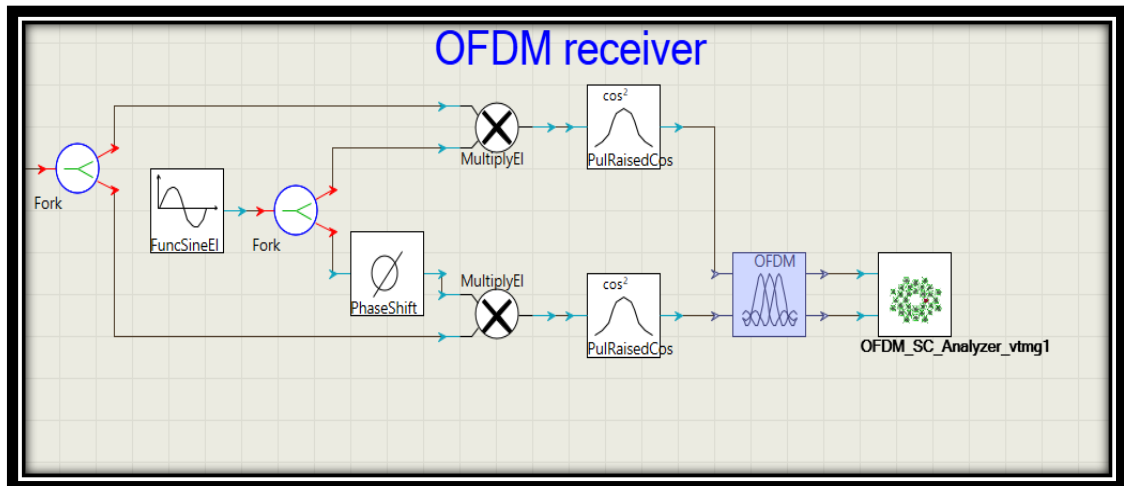


Figure III.5 :schéma représente le block de récepteur

III.2.3..1.Photo-détecteur

ce module peut gérer à la fois les signaux optiques monomodes et multi-modes. C'est un modèle de photodiodes PIN et APD celles-ci peuvent être simulées sur la base d'une réactivité prédéfinie. Et du bruit. Alternativement, la dépendance de la tension et de la température est déterminée en utilisant un circuit RC équivalent. La réponse en fréquence électrique n'est pas incluse et peut être modélisée par un filtre externe. Le module peut également être utilisé pour simuler des systèmes CWDM. Dans ce cas, le paramètre join signal bands doit être défini sur no pour éviter une consommation mémoire excessive.

III.2.3.2.Décoder

ce module décode un signal OFDM (tel que celui généré par le module coder-OFDM), il effectue la démodulation, la suppression des préfixes cycliques et le traitement DSP pré et post-FFT. Le flux d'échantillons renvoyé est rempli de zéros pour compenser toute différence entre les débit de données effectifs et transmis.

III.2.3.3OFDM_SC_Analyseur

Ce module estime le SER d'un signal OFDM pour les sous-porteuses sélectionnées

III.4. Quelque paramètre

Paramètre de system	Valeur	Unité
débit de symboles	10×10^9	Bd
Nombre de symboles	1024	
Bits par symboles	6	
Débit binaire par défaut	5×10^9	Bit/s

Tableau III.1: les paramètre de system

OFDM	Valeur	Unité
Débit en bauds	2.5×10^9	Bd
Nombre de porteuse	16	/
Préfixe cyclique	0.125	/

Tableau III.2: les paramètre d'OFDM

Fibre	Valeur	Unité
Longueur	10×10^3	M
Atténuation	0.2×10^{-3}	dB/m
Dispersion	0	s/m^2

Tableaux III.3: les paramètre de fibre optique

III.5. Résultat de simulation

III.5.1. Signal Analyzer: (électrical "I&Q" signal)

la figure si dessus représente le spectre de signal électrique à transmettre

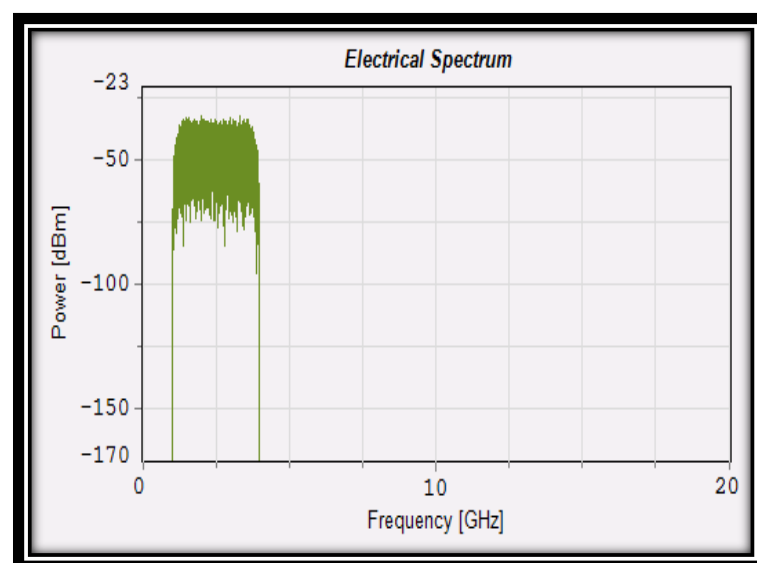


Figure III.6: le spectre de signal électrique

III.5.2. Signal Analyzer: (Spectrum après AWG)

la figure suivante représente le spectre de signal modulé, qui le AWG sélectionne deux pics que la distance entre eux soit de 90 GHz, cette distance représente la porteuse d'onde millimétrique que sera exploiter dans la partie radio

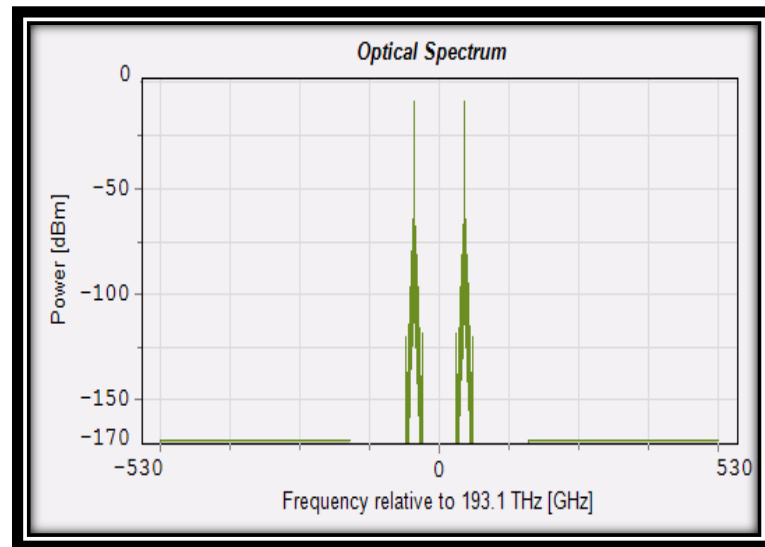


Figure III.7: le spectre de signal modulé

III.5.3. Signal Analyzer: (Optical OFDM on mm Waves)

la figure suivante représente le spectre de signal avant le filtrage

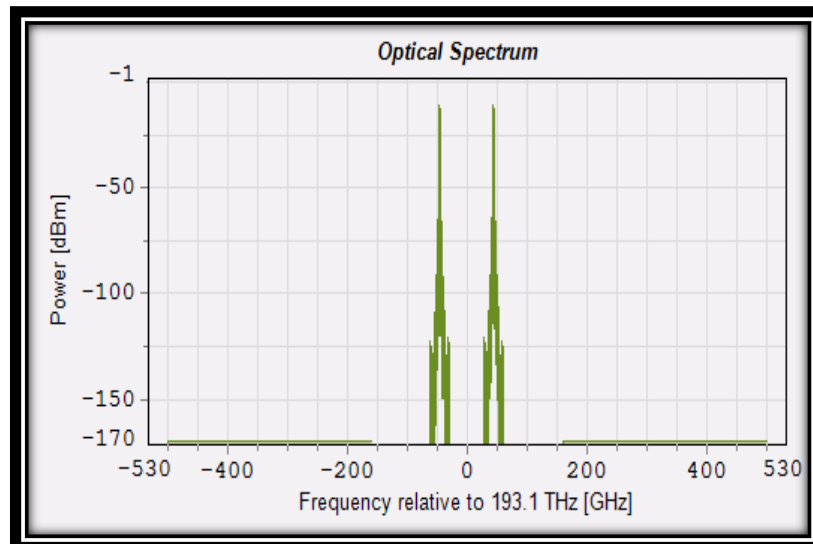


Figure III.8: le spectre de signal optique

III.5.4. Signal Analyzer: (Transmitted Optical OFDM on mm Waves)

la figure suivante représente le spectre de signal après la photo-détection.

Et ici, nous remarquons l'émergence et la génération d'onde millimétrique avec une fréquence de 90GHz.

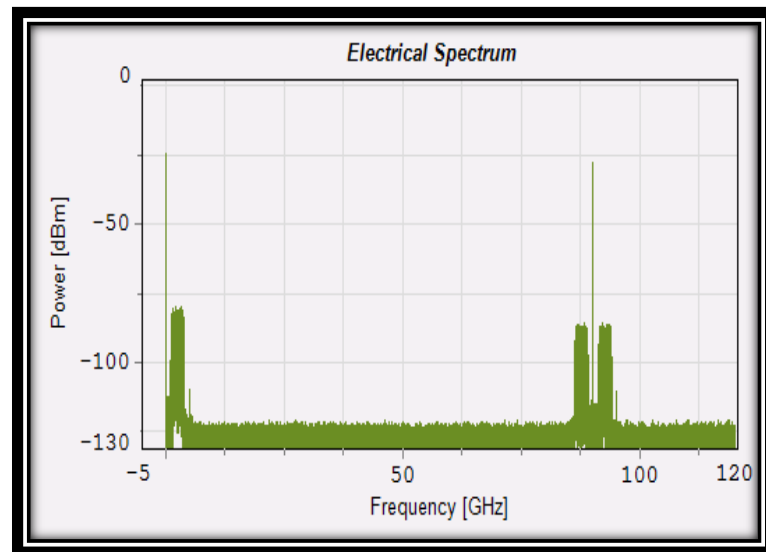


Figure III.9: le spectre de signal électrique après la photo-détection

III.6 la résultat (OFDM Analyzer)

III.6.1/ la première partie

III.6.1.1. le SER

La figure suivante représente le spectre de SER par rapport les nombres de porteuse

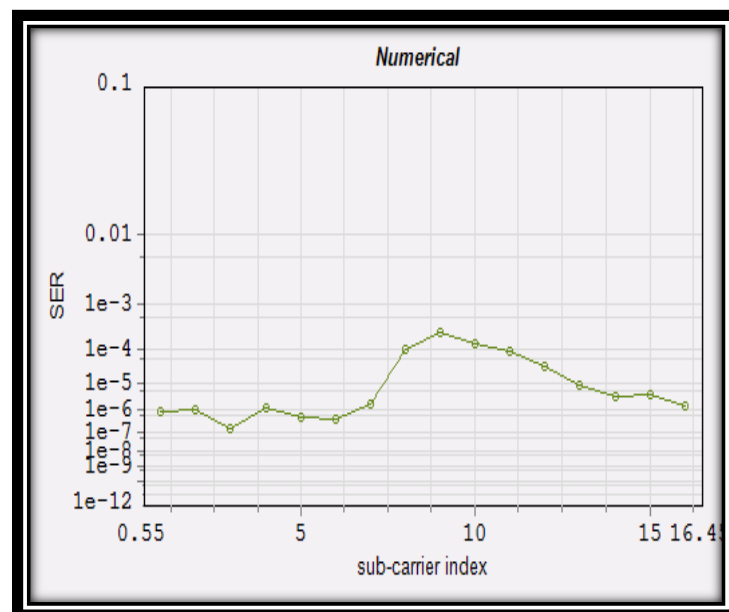


Figure III.10: Symbole erreur rate (SER) en fonction des nombres de porteuses

On observe que le diagramme de SER est pratiquement constante quel que soit le numéro de la porteuse.

III.6.1.2. Le diagramme de constellation

Les deux figures suivantes représentent le centre de symbole reçus dans les symboles théorique dans le diagramme de constellation en 64QAM

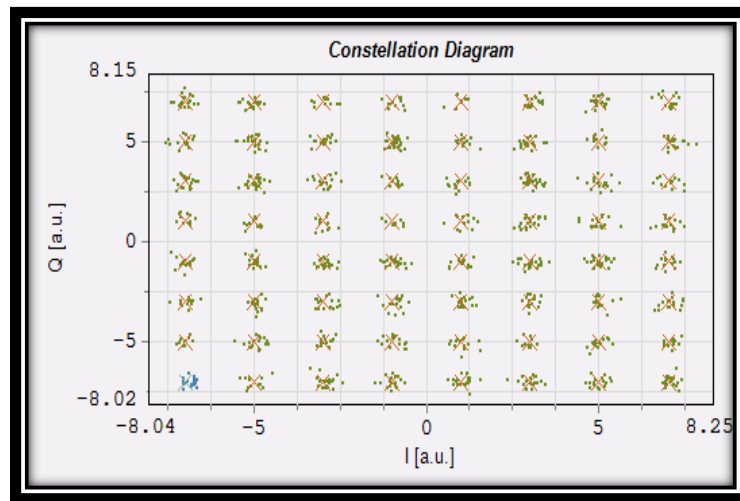


Figure III.11: le diagramme de constellation de la porteuse numéro 10

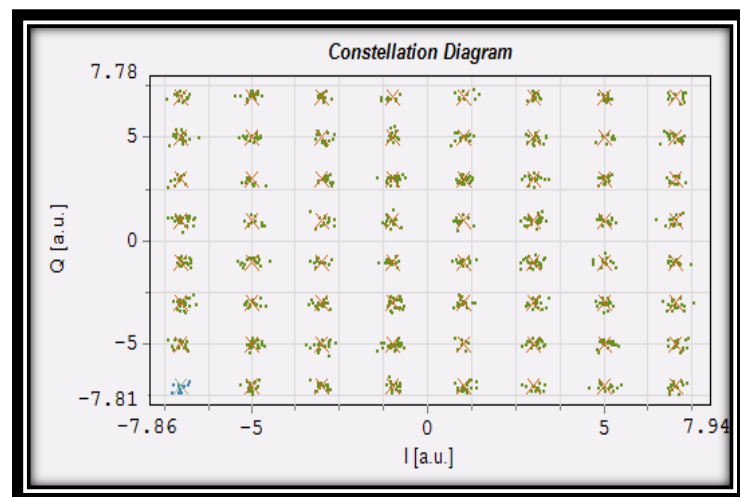


Figure III.12: le diagramme de la constellation de la porteuse numéro 14

nous remarquons que les symboles sont concentré dû la bonne qualité de transmission, et ils sont claire et il n'y a pas de chevauchement entre eux.

III.6.2/la deuxième partie

III.6.2.1. l'effet de dispersion chromatique

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet de la dispersion chromatique sur la qualité de transmission.

Après l'augmentation de coefficient de dispersion des fibres qui est égale à $4 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$, nous avons obtenu ces résultats

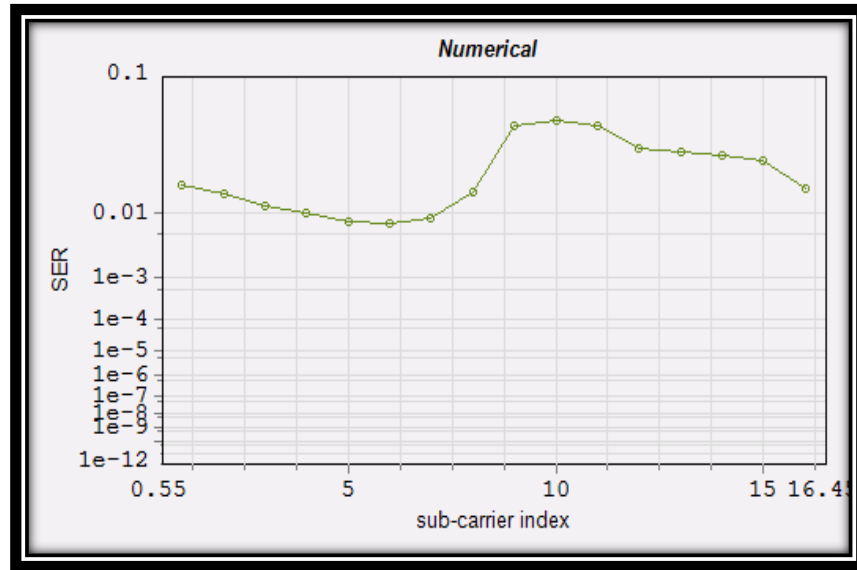


Figure III.13: SER l'effet d'augmenter la dispersion chromatique

Nous remarquons que SER augmenté d'une façon presque régulière pour tous les nombres des porteuses avec l'augmentation de facteur de dispersion chromatique cela explique l'effet négative la dispersion chromatique de la qualité de transmission.

III.6.2.2. Le diagramme de constellation

Les figures suivantes représente les diagrammes de constellation de l'effet de dispersion

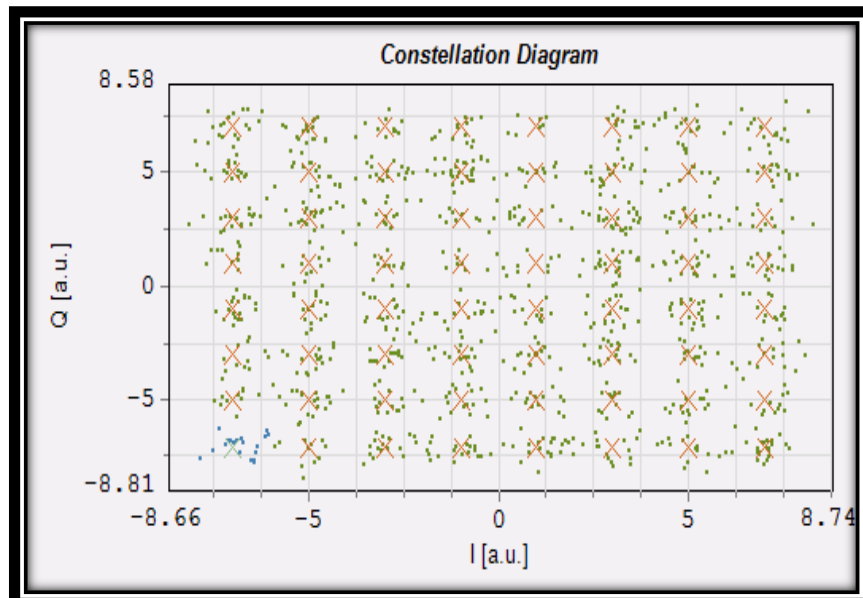


Figure III.14: le diagramme de constellation de porteuse numéro 10 après le changement de dispersion

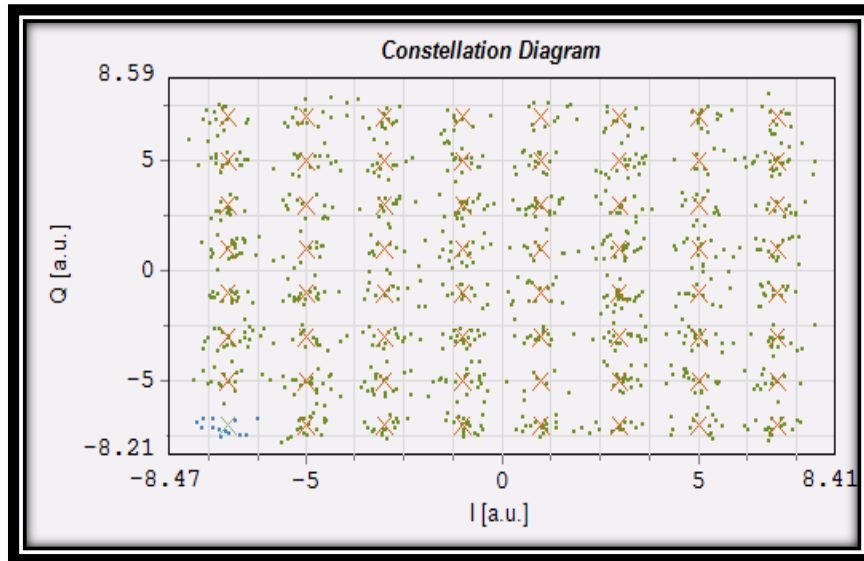


Figure III.15: le diagramme de constellation de la porteuse numéro 14 après le changement de dispersion

nous remarquons que les symboles ne sont pas claires en raison de l'interférence entre les symboles reçus, et cela est dû à l'effet négative de la dispersion chromatique sur la qualité des données transmises.

III.7.Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons analysé le système de transfert ROF-OFDM à une fréquence de 90 GHz utilisant la modulation 64 QAM, nous nous sommes appuyés sur le système ROF, ce qui a été étudié dans le deuxième chapitre pour concevoir un système plus efficace en termes de productivité et le nombre d'utilisateurs, et nous avons conclu que la dispersion affecte négativement le SER et le diagramme de constellation.

Conclusion générale

Conclusion general

Les systèmes de télécommunication et plus particulièrement les systèmes de communication sans fil ont connu une évolution spectaculaire au cours de ces deux dernières décennies. Cette évolution est allée de pair avec les prouesses réalisées en électronique numérique. Les systèmes de communication sans fil sont devenus presque omniprésents dans nos vies. Dans non proches, on peut trouver des téléphones, agendas électroniques, systèmes de positionnement par satellite, tous communiquant entre eux et avec l'extérieur. Toutes les communications sans fil, impliquant libertés, disponibilité et confort. L'évolution de la connectivité du réseaux (1G, 2G, 3G, 4G, 5G) joue un rôle essentiel dans la croissance du pays. Chaque exigence conduit à l'innovation. La 5G permet de surmonter les inconvénients présentes dans la 1G. une technologie remarquable est à l'origine de chaque génération et permet d'obtenir de bons résultats indépendamment des interruptions environnementales.

Dans notre projet de fin d'étude, nous avons examiné au début les concepts généraux des fibres optiques, Ses différents types et caractéristiques (atténuation, dispersion, etc.). ensuite nous avons fait une étude sur le système radio sur fibre afin d'élaborer un tableau de mesure des liaisons dans celui-ci a l'échelle millimétrique. du point de vue de la simulation, la méthodologie mise œuvre s'avère prometteuse et permet de modéliser des liaisons opto-microondes dans un logiciel de simulation électrique afin de prévoir leurs performances. Cette approche de simulation permettrait d'envisager des systèmes plus complexes en particulier pour les liaisons ROF à 90 GHz et évaluer les éléments critiques. Puis nous avons discuté de la technologie OFDM que nous avons présentée dans la radio sur le lien afin d'augmenter le débit et le nombre d'utilisateurs.

La technologie OFDM est issue du réseau de transport où les débits atteignent plusieurs dizaines de gigabits/seconde. L'intérêt de l'introduire dans le réseau d'accès réside d'une part dans la possibilité d'utiliser un accès multiple en longueurs d'onde au lieu d'un accès multiple dans le temps. Pour partager les ressources entre utilisateurs, et d'autre part en possibilité d'agréger plus d'utilisateurs sur une structure en utilisant le multiplexage simultané en temps et en longueur d'onde. Nous avons suivi le processus de simulation pour choisir différents paramètres permettant d'évaluer les performances de ces systèmes en tenant compte des différentes contraintes de canal sur la fibre optique.

Annexes

Les critères de qualité

1. Le diagramme d'œil

Le diagramme d'œil permet de visualiser la qualité d'un signal dans le domaine temporel en superposant un grand nombre de séquences en temps réel au moyen d'un oscilloscope rapide synchronisé sur le signal d'horloge du signal de données. Pour superposer tous les bits il suffit de faire glisser temporellement chaque séquence bit à bit. Ce diagramme permet de voir la dégradation de chaque symbole sur le même graphique.

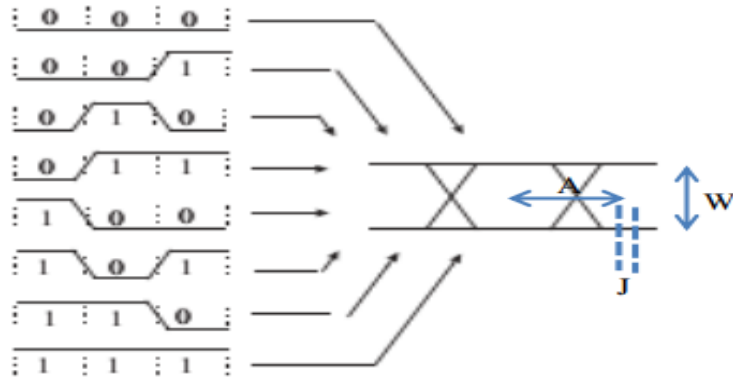


Figure: principe de constitution d'un diagramme de l'œil. L'ouverture verticale(A) et horizontale(W) de l'œil, et de la gigue de phase(J) []

L'ouverture de l'œil caractérise le bruit et les distorsions apportées par la chaîne de transmission. L'opération d'échantillonnage doit se produire à l'instant précis où l'œil est le plus ouvert. Un œil bien ouvert permettra au dispositif de démodulation de discerner aisément les symboles transmis. A l'opposé, un œil fermé se traduira inévitablement par de nombreuses erreurs de transmission. []

2 Le taux d'erreurs binaires (BER: Bit Error Rate)

Permet d'évaluer la qualité d'une transmission optique. Il peut être déterminé en comparant la séquence de données binaires émise et celle reçue car il est défini par le rapport du nombre de bits erronés sur le nombre total de bits transmis :

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bits transmis}}$$

Dans nos simulations numériques, le taux d'erreurs est estimé à l'aide de la méthode de Monte Carlo. Dans cette méthode le taux d'erreurs est estimé dans un intervalle de confiance avec une probabilité donnée. La probabilité d'erreurs est obtenue à l'aide de l'espérance mathématique. En effet suivant la précision que l'on veut obtenir sur la mesure, on compte un

nombre d'erreurs donné et la somme des erreurs est divisée par le nombre total de bits explorés pour le comptage d'erreurs N_{MC} . Ce nombre d'erreurs peut être compris entre 100 et 500 erreurs selon la précision de l'estimation souhaitée. Ainsi, la qualité de l'estimateur est meilleure quand N_{MC} est grand. Cependant dans les configurations de faibles taux d'erreurs, cette méthode de Monte Carlo peut être coûteuse en termes de temps de calcul. Il faut donc trouver un compromis entre l'augmentation du paramètre NMC et la durée de la mesure. Je vais maintenant décrire le facteur de qualité Q relié au taux d'erreurs binaires. [3]

3 Le Facteur Q , ou facteur de qualité

Est un autre critère de qualité d'un signal optique. Il est obtenu à partir des statistiques de bruit (moyennes et écarts-types) des niveaux « 1 » et « 0 » du signal à détecter. Le facteur Q est défini par : [3]

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0}$$

Où I_1 et I_0 désignent les valeurs moyennes des niveaux « 1 » et « 0 » du signal, et σ_1 et σ_0 désignent leurs écarts-types respectifs.

Dans le cas de statistiques de bruit gaussiennes, le BER est assez simplement relié au facteur Q par la formule :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q}{\sqrt{2}} \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q}$$

où erfc désigne la fonction d'erreur complémentaire, soit $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-y^2} dy$.

Le facteur Q est usuellement exprimé en dB en utilisant la formule suivante ;

$$D_{dB} = 20 \log_{10}(Q)$$

Reference

- [1] Khalil Merzouk. Etude d'un système bas coût de transmission optique par multiplexage temporel. Traitement du signal et de l'image. Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008. Français
- [2] Mathieu Le François. étude de technologies avancées pour l'optique des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s. Université Paris Sud - Paris, 2007
- [3] Aida SECK. Contribution à l'optimisation des systèmes de transmission optiques cohérents ($N \times 100$ Gbit/s) utilisant le multiplexage en polarisation par des formats de modulation en phase et une conception de ligne limitant l'impact des effets non-linéaires. These de doctorate. Telecommunications et Electronique de Paris, 18/02/2014.
- [4] Nassima BOUDRIOUA. Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD. University Paul Verlaine – Metz. le 25 octobre 2007.
- [5] Jean-Louis VERNEUIL. Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s. université de Limoges. Le vendredi 21 novembre
- [6] 2003book of Introduction to Fiber-Optic Communications . Rongqing Hui
- [7]
- [8] Victor Girondin. 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. l'université pierre et marié. le 19 mai 2016
- [9] Sarah Benameur. La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable. Optique / photonique. Université de Limoges, 2015. Français
- [10] Mathilde Gay. Etude théorique et expérimentale de l'impact de la régénération 2R dans un système de transmission optique haut débit. INSA de Rennes, 2006.
- [11] <https://www.jlnetwork.com>
- [12] BEDDIAF Safia - YAHIA Selma, Technologie Radio sur Fibre pour les applications sans fil (5G), Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019
- [13] <https://www.monpetitforfait.com>
- [14] selectra.info/télécom/guides/technologies/réseaux-mobile
- [15] <https://www.GL.communication.Inc>
- [16] Narima Channel, les réseaux mobiles 2G, 3G, 4G. You tube

Reference

- [17] T.S, rapport G.R, Mac Cartuey & M.K, Samimi a S.Sm,<<Wideband Millimeter-Wave propagation and channel Models for future wireless communication system design>>, Pearson Education,2015
- [18] Journal of light wave technology, vol 32, NO 20, page 3911,OCTOBER 15,2014
- [19] Chat gpt
- [20] <https://www.nextinpact.com>
- [21] Ali Kabalan, Etude de systèmes radio sur fibre pour des applications de réseaux domestiques en bande millimétrique, Thèse de doctorat Electronique, Optronique et Systèmes, le 8 juillet 2016.
- [22] Chettat, S. Mokhtar, Y. Bouslimani et H. Hamam, “Les systèmes Hybrides Fibre / sans fil, applications, limitations et approches de résolutions“, 2007, 4th International, Conférence : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Télécommunication, pp. 1/5, March 25/29, 2007, Tunisia.
- [23] H. Hallak Elwan, Optical systems for next wireless standard (5G) generation delivery, these doctorate, Grenoble: University Grenoble alpes, 2017.
- [24] Victor Girondin, « 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. » thèse de doctorat ,l'université pierre et marie cuire, 19 mai 2016
- [25] M. Sauer, A. Kobaykov,“Radio over Fiber Picocellular Network Architectures“, Journal of Lighthwave Technology, November 2007.
- [26] Y. Sumaetu, K.IGA, “Transmissions sur fibres optiques “, Edition Masson, 1984.
- [27] Hexin Liu. Radio sur fibre : réseaux, couvertures radio, architectures et dimensionnements matériels. Sciences de l'ingénieur . Télécom Bretagne, University de Bretagne Occidentale, 2013
- [28] R. Karthikeyan, S. Prakasam, “A Survey on Radio over Fiber (ROF) for wireless Broadband Access Technologies“, International Journal of Computer Applications, February 2013.