

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 : Réseaux et Télécommunications

Par : BOUDOUAIA Cherifa et BELMIMOUN Dounia Zed

Sujet

Génération d'ondes millimétriques dans les systèmes photoniques Radio sur Fibre

Soutenu publiquement, le 28/06 /2022, devant le jury composé de :

Mme BADAOUI Hadjira	Pr	Université de Tlemcen	Présidente
Mme DJELTI Hamida	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
M BORSALI Ahmed Riad	Pr	Université de Tlemcen	Encadreur
M FELLAG CHEBRA Abdennour	Doctorant	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire :2021 /2022

Remerciements

En préambule à ce mémoire, nous remercions d'abord Dieu Tout-Puissant de nous avoir aidé et donné le courage et la volonté pour mener ce travail jusqu'au bout.

*Nous tenons à remercier sincèrement **Monsieur Borsali Ahmed Riad** qui, en tant qu'encadrant de mémoire, il a toujours montré l'écoute et la disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer pour que ce mémoire réussisse.*

*On souhaite particulièrement remercier **Monsieur Fellag Chebra Abdennour** pour la qualité de son Co-encadrement, et ses directives précieuses pendant toute la durée de ce travail.*

*On tient aussi à remercier tous les membres de jury **Madame Badaoui Hadjira** et **Madame Djelti Hamida** qui ont accepté d'évaluer et de juger le présent travail.*

Enfin, que nos parents, nos familles et nos amis trouvent à travers ces quelques lignes l'expression de notre profonde gratitude pour leur soutien et leurs encouragements de tous les instants. Merci infiniment, et que Dieu vous protège.

Dédicaces

« Mlle BOUDOUAIA Cherifa »

Je dédie ce travail

A ma très cher Mère, qui me donne toujours la force et qui n'a jamais cessé de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Je t'aime mama et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.

A l'âme de mon Père, j'espère que tu es fier de moi, que Dieu t'accueille dans son vaste Paradis.

A mon seul frère, et à ma cousine.

A toute ma famille, aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements.

A ma chère binôme "Dounia zed".

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A toute la promo de Télécommunication dont je fais partie.

A mes professeurs tout au long du cycle de mes études qui m'ont dirigé vers la porte de réussite.

« Mlle BELMIMOUN Dounia Zed »

Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon père disparu trop tôt. J'espère que, mon défunt père appréciera cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !

A la femme qui m'a enfanté, celle qui a sacrifié tout pour moi : son temps, son bonheur et sa santé ma mère noyau de mon esprit.

À mes frères, ma petite sœur, mes cousines et mes cousins.

À la mémoire de mes chères grands-mères et grands-pères.

A toute ma famille paternelle et maternelle.

A ma sœur et binôme "Cherifa".

A tous mes amis, tous ceux qui j'ai passé des meilleurs moments et gardé de très bons souvenirs

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieurs.

Résumé

L'évolution des réseaux de communication offre des conditions favorables aux technologies photoniques pour répondre aux exigences de débits de données élevés et de latence réduite. Beaucoup d'études sont faites dernièrement sur l'introduction de la Radio sur Fibre (RoF) dans les systèmes de communication optique, qui constituent une avancée considérable en termes de débit, de bande passante et de distance pour la transmission de signaux radio. Les ondes millimétriques sont une innovation récente dans le cadre ROF pour une avancée prometteuse en disponibilité, taux d'information et diminution de l'inactivité. Ce travail nous a permis de faire la lumière sur une investigation sur la connexion MMW-RoF dans le cadre d'une transmission optique.

Mots clés : Onde millimétrique, fibre optique, radio sur fibre (RoF), modulation externe, MMW-RoF, OptiSystem.

Abstract

The evolution of communication networks provides favorable conditions for photonic technologies to meet the requirements of high data rates and low latency. Many studies are made lately on the introduction of Radio over Fiber (RoF) in optical communication systems, which are a considerable advance in terms of throughput, bandwidth, and distance for radio signal transmission. Millimeter waves are a recent innovation in the ROF framework for a promising advance in availability, information rate and decrease in inactivity. This work has allowed us to shed light on an investigation of the MMW-RoF connection in the context of optical transmission.

Key words: Millimeter wave, optical fiber, radio over fiber (RoF), external modulation, MMW-RoF, OptiSystem.

ملخص

ويوفر تطور شبكات الاتصال ظروفًا مواتية لتكنولوجيات الصور الفوتونية للوفاء بمتطلبات معدلات البيانات العالية وزمن الوصول المنخفض. أجريت في الآونة الأخيرة العديد من الدراسات على إدخال تقنية الراديو عبر الألياف الضوئية في أنظمة الاتصال البصري، وهي تقدم كبير من حيث سعة المعالجة وعرض النطاق الترددي والمسافة التي تفصل بين إرسال الإشارات اللاسلكية. وتعد موجات المليمتر ابتكارًا حديثًا في إطار تقييم ترددي الأراضي لتحقيق تقدم واعد في التوافر ومعدل المعلومات وانخفاض عدم النشاط وقد أتاح لنا هذا العمل أن نلقي الضوء على تحقيق الاتصال بين المركبات في سياق الإرسال البصري.

الكلمات الرئيسية: موجة مليمتر، ألياف بصرية، راديو عبر الألياف، تعديل خارجي، MMW- RoF، OptiSystem، RoF.

Glossaire des acronymes

BBoF	Base Band over Fiber
BER	Bit Error Rate
Bp	Bande passante
BS	Base Station
CDM	Code Division Multiplexing
CS	Central Station
CSRZ	Carrier-Suppressed Return-to-Zero
CW-Laser	Continuous Wave Laser
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DEL/LED	Light Emmiting Diode
Demux	Demultiplexer
DWDM	Dense WDM
DR	Dynamic Range
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
E/O	Electro-optical
FO	Fibre optique
GHz	Gigahertz
IFoF	Intermediate Frequency over Fiber
IM-DD	Intensity Modulation – Direct Detection
LAN	Local Area Network
LD/DL	Laser Diode
LOS	Line Of Sight
Linb-MZM	Linb-Mach-Zender-Modulator

MIMO	Multiple Input Multiple Output
MUX	Multiplexage
MZM	Mach-Zender Modulator
MM	Millimeter wave
MMF	Multi Mode fiber
MMW-RoF	Millimeter Wave Radio over Fiber
NRZ	No Return to Zero
nm	nanomètres
O/E	Opto-électrical
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PRBS	Pseudo-random bit sequence
P2P	Point to Point (point à point)
PON	Passive Optical Network
Q	Qualité Factor
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RF	Radio frequency
RFoF	Radio Frequency over Fiber
RoF	Radio over fiber
RZ	Return-to-Zero
SMF	Single Mode Fiber
SNR	Signal to Noise Ratio
VDSL	Very High Data Rate Digital Subscriber Line
WAN	Wireless Area network

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicaces	II
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
ملخص.....	VI
Glossaire des acronymes	VII
Table des matières.....	IX
Liste des figures	XII
Liste des tableaux.....	XIV
Introduction générale	1
Chapitre 1 : La technologie de la radio sur fibre RoF.....	3
1.1 Introduction	4
1.2 Généralités sur les fibres optiques.....	4
1.2.1 Définition de fibre optique.....	4
1.2.2 Composition d'une fibre optique	4
1.2.3 Différentes catégories de fibres optiques.....	5
1.2.4 Caractéristiques de Fibre optique.....	7
1.2.5 Les avantages et les inconvénients des fibres optiques	9
1.3 La radio sur fibre RoF	10
1.3.1 Définition de RoF	10
1.3.2 Systèmes de transport des signaux RF, IF, bande de base.....	11
1.3.3 Avantages des systèmes RoF.....	12
1.3.4 Limitations des systèmes RoF	13
1.3.5 Les applications principales de la radio sur fibre.....	13
1.3.6 Les architectures générales de la radio sur fibre	14
1.3.7 Les composants optoélectronique d'une liaison RoF	15
1.3.8 Les techniques de génération des signaux RF sur fibre optique.....	16
1.4 Conclusion.....	19
Chapitre 2 : Les ondes millimétriques dans la radio sur fibre	20
2.1 Introduction	21

2.2	Les ondes millimétriques :	21
2.3	Les avantages et les inconvénients des ondes millimétriques :	22
2.4	Limitation des ondes millimétriques	22
2.5	Les applications des ondes millimétriques	23
2.5.1	5G et concept de petites cellules	23
2.5.2	La bande V :	23
2.5.3	WiGig :	24
2.5.4	Communication par Satellite	24
2.6	Potentiel des ondes millimétrique :	24
2.7	Caractéristique de propagation des ondes millimétriques	25
2.7.1	Une large bande passante	25
2.7.2	Courte longueur d'onde	25
2.7.3	Pertes en espace libre	26
2.7.4	Atténuation atmosphérique	27
2.7.5	Atténuation de la pluie	28
2.7.6	Pénétration de matériau	29
2.7.7	Perte de propagation	29
2.7.8	Perte de feuillage	31
2.7.9	Directivité	31
2.7.10	Diffraction, réflexion et diffusion	31
2.8	RoF basé sur les ondes millimétriques	32
2.9	Génération de signaux optiques à ondes millimétriques	33
2.10	Communication MIMO massive par ondes millimétriques	34
2.11	Conclusion	36
Chapitre 3 :Étude d'une liaison MMW radio sur fibre		37
3.1	Introduction	38
3.2	Présentation du logiciel OptiSystem :	38
3.3	Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem	39
3.4	Avantages du logiciel OptiSystem	40
3.5	Applications du logiciel OptiSystem	40
3.6	Critères de qualité d'une transmission :	40
3.6.1	Taux d'erreur binaire (Bite Error Rate BER) :	40

3.6.2	Facteur de qualité.....	40
3.6.3	Diagramme de l'œil :	41
3.7	Description de la chaîne de transmission Radio sur fibre RoF	41
3.7.1	Le schéma général de la liaison Radio sur fibre	41
3.7.2	Description de partie d'émission :	43
3.7.3	Le canal de transmission :.....	44
3.7.4	Description de partie réception :.....	45
3.7.5	La modulation de phase optique PM	46
3.7.6	La modulation CSRZ	46
3.8	Résultats de simulation.....	47
3.8.1	Description du système étudié	49
3.8.2	Comparaison entre les signaux d'origine :.....	51
3.8.3	Effet de variation de la longueur de la Fibre.....	52
3.9	Conclusion.....	55
	Conclusion générale.....	56
	Références.....	58

Liste des figures

Figure 1. 1: Câble de fibres optiques.	4
Figure 1. 2: Description de la fibre optique.	5
Figure 1. 3: Fibre optique monomode.....	5
Figure 1. 4: Fibre optique multimode a gradient d'indice	6
Figure 1. 5: Fibre optique multimode à saut d'indice.	7
Figure 1. 6: Ouverture numérique d'une fibre optique.	7
Figure 1. 7:Dispersion modale.....	9
Figure 1. 8:Dispersion chromatique.....	9
Figure 1. 9: Modèle d'un système RoF simplifié	10
Figure 1. 10: Schéma synoptique d'une liaison RoF.....	11
Figure 1. 11: Les trois types de transmission de signaux	12
Figure 1. 12: topologie FTTH point à point (P2P).....	14
Figure 1. 13: Architecture point-multipoint (PON)	15
Figure 1. 14: Liaison à modulation directe.	17
Figure 1. 15: Modulation externe avec le modulateur Mach-Zehnder.	19
Figure 2. 1: Spectres des fréquences (ondes millimétriques).	22
Figure 2. 2: Pertes en espace libre entre antennes isotropes.	26
Figure 2. 3: Atténuation spécifique de O2 et H2O en fonction de la fréquence.....	27
Figure 2. 4: Atténuation des ondes millimétriques par pluie	28
Figure 2. 5: Paramètres du réseau frontal RoF basé sur les ondes Mm	33
Figure 2. 6: Un résumé de la génération de signaux optiques en ondes millimétriques basée sur un modulateur externe, des lasers pulsés et à verrouillage de mode.	34
Figure 3. 1: Interface OptiSystem.....	39
Figure 3. 2: Diagramme de l'œil.....	41
Figure 3. 3: Schéma générale de la liaison Radio sur fibre.	42
Figure 3. 4: Schéma bloc d'émission.....	43
Figure 3. 5: Spectre en sortie du laser.....	44
Figure 3. 6: Schéma bloc canal de transmission.	44

Figure 3. 7: Schéma bloc de réception.....	46
Figure 3. 8: Schéma synoptique de la liaison RoF.....	48
Figure 3. 9: Les signaux au niveau du circuit d'émission.....	50
Figure 3. 10: Les signaux au niveau du circuit de réception	51
Figure 3. 11: Signal d'entrée.....	52
Figure 3. 12: Signal de sortie	52
Figure 3. 13: facteur de qualité $Q = f(\text{longueur de fibre})$	53
Figure 3. 14: Taux d'erreur binaire BER =f (longueur de fibre).....	53
Figure 3. 15: diagramme de l'œil pour différentes longueurs de fibre	55

Liste des tableaux

Tableau 2. 1:Pertes de pénétration de différentes matières en dB/cm [15]	29
Tableau 2. 2:Mesure de PL pour les systèmes cellulaire, wifi, et système on onde millimétrique à 460MHz, 2.4GHz, et 60GHz respectivement à un mètre [19].....	30
Tableau 2. 3:Mesure de PL pour les systèmes cellulaire, wifi, et système on onde millimétrique à 460MHz ,2.4GHz, et 60GHz respectivement à un 100m [19].....	30
Tableau 3. 1:les résultats de la simulation	52

Introduction générale

Récemment, on a observé une énorme demande de bande passante dans les communications sans fil et filaires avec l'arrivée d'applications exigeantes en bande passante comme les services interactifs et multimédias basés sur la vidéo. La congestion et le spectre de fréquences ont limité les débits de données des systèmes sans fil actuels à des mégabits par seconde (Mbps) seulement. Pour atteindre des débits de données élevés, la solution fiable est la bande passante et la voie la plus sûre vers le multi gigabit par seconde (Gbps) est l'utilisation de fréquences d'ondes millimétriques (mm) qui occupent de larges bandes du spectre des fréquences. La technologie Radio over Fiber (RoF) offre une solution prometteuse pour déployer les ondes millimétriques entre plusieurs points d'accès.

Dans une liaison RoF, le signal radio est transposé sur l'amplitude ou la phase d'une porteuse optique par des transducteurs électro-optique (E/O) et ensuite récupéré à l'extrémité de la liaison par des transducteurs opto-électrique (O/E) correspondants. Cette combinaison entre ces deux domaines permet l'extension de la couverture radio et offre des débits de plus en plus élevés par l'association des performances de la fibre optique (faibles pertes, très grande largeur de bande passante et immunité aux interférences électromagnétiques) avec le principal avantage d'un système sans fil qui est la mobilité. Bien qu'un système RoF offre de multiples avantages, des distorsions sur le signal RF transmis sur cette liaison optique peuvent exister et affecter la qualité de la transmission. Ces distorsions sont liées à plusieurs facteurs : le bruit d'intensité relatif et bruit de phase du laser, le bruit de grenaille de la photodiode, le bruit thermique des étages électroniques, la dispersion de la fibre optique, les non-linéarités des différents composants optoélectroniques et le gain négatif de la liaison RoF. Ces facteurs limitants doivent être considérer dans l'étude et l'analyse de la transmission des signaux radio sur des liaisons RoF. Pour ce travail on a utilisé un logiciel appelé « OptiSystem » pour le calcul des performances du système RoF.

Notre mémoire est divisé en trois chapitres. Le premier est consacré à des généralités sur la fibre optique l'épine dorsale de la télécommunication, ses caractéristiques ainsi que les avantages et les inconvénients de cette fibre. Après, nous allons faire une étude sur le concept de la technologie radio sur fibre « radio-over-fiber (RoF) » et ces applications ainsi que son architecture, on parlera par la suite des limitations du système RoF, de la notion de modulation optique dans un système RoF et description des différents types.

Dans le deuxième chapitre nous allons d'abord faire une étude sur les ondes millimétriques, ses généralités, ses avantages, ses limitations, et ses applications. Ensuite on va voir les caractéristiques de propagation des ondes millimétriques, et aussi, nous aborderons la technologie radio sur fibre à ondes millimétriques (MMW-RoF). Nous finirons par parler de communication MIMO massive par ondes millimétriques.

Le troisième et le dernier chapitre est consacré aux résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel OptiSystem. L'analyse des performances du système MMW-RoF en se basant sur le facteur de qualité, le taux d'erreur binaire et le diagramme de l'œil.

Nous terminerons par une conclusion générale et nous exposerons quelques perspectives.

Chapitre 1

La technologie de la radio sur fibre RoF

1.1 Introduction

Depuis la fin des années 90, de plus en plus de réseaux d'opérateurs et d'entreprises demandent des larges bandes passantes pour les communications multimédia, les applications Internet, les commerces électroniques..., comme le nombre d'utilisateurs a considérablement augmenté.

Pour étendre la couverture géographique des signaux radio fréquences, la solution proposée a été de réaliser des systèmes hybrides combinant les technologies de fibres optiques et radio communément "système Radio sur Fibre" (RoF).

Dans ce chapitre nous allons commencer dans la 1 ère partie par généralités sur les fibres optique. Nous présenterons ensuite dans la 2^{ème} partie la technologie radio sur fibre tout en spécifiant son principe, ses architectures, ses applications, ses avantages et limitations.

1.2 Généralités sur les fibres optiques

1.2.1 Définition de fibre optique

La fibre optique est constituée d'un fil en verre ou en plastique très fin qui possède la propriété de conduire la lumière. Elle sert dans les transmissions de données terrestres et océaniques et offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux. La communication par fibre optique utilise la fibre optique comme support de transmission et la lumière comme transporteur [1].

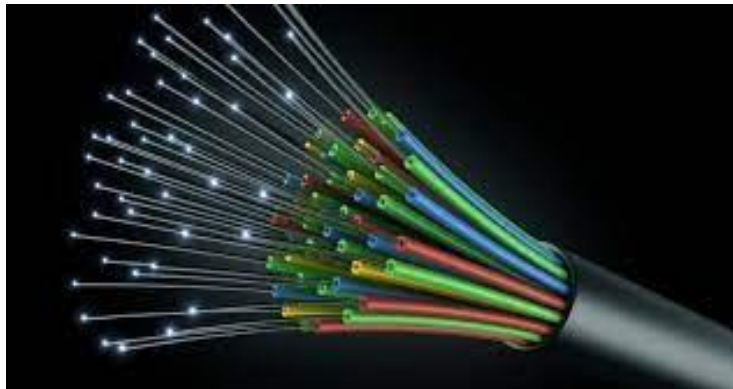


Figure 1. 1: Câble de fibres optiques.

1.2.2 Composition d'une fibre optique

La fibre optique est constituée de trois parties (figure 1.2):

- **Le cœur:** Est un milieu dans lequel une quantité d'énergie lumineuse véhiculée au sein de la fibre sera confiné au voisinage du centre dont l'indice de réfraction est dans laquelle se propage la lumière.
- **La gaine:** Elle est la partie qui enveloppe le cœur dont la réfraction est plus faible.
- **Le fourreau (revêtements):** Aussi appelé la gaine protectrice, assure à son tour la protection mécanique et chimique adéquate à la fibre optique [2].

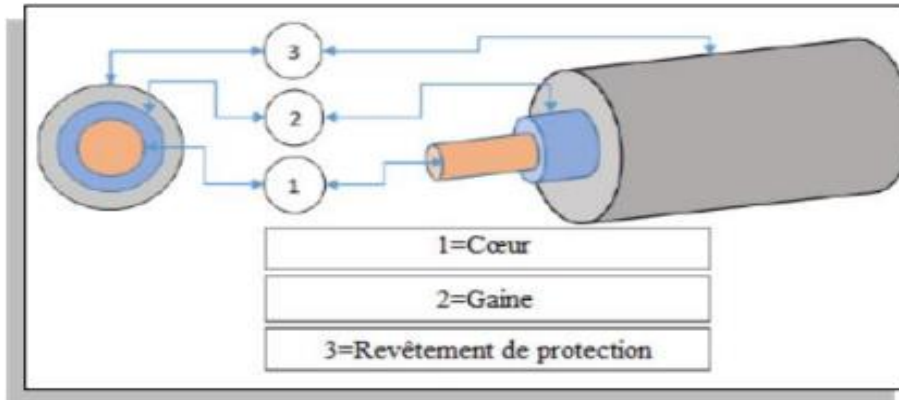


Figure 1. 2: Description de la fibre optique.

1.2.3 Différentes catégories de fibres optiques

1.2.3.1 Fibre monomode

Fibre optique dans laquelle un seul mode de propagation peut être entretenu à la longueur d'ondes considérée. Diamètre de gaine identique au standard multimode 125 μm et valeur de cœur située autour de 9 μm . Les fibres monomodes ont des portées jusqu'à 50 fois plus importantes que les fibres multimodes, ainsi qu'une bande passante beaucoup plus conséquente.

De ce fait, le trajet du rayon lumineux ne change pas, pour ainsi dire. Peu de rebonds, donc peu de pertes. C'est pour cette raison que ce type de fibre est le plus souvent réservé aux transmissions sur de très longues distances [3].

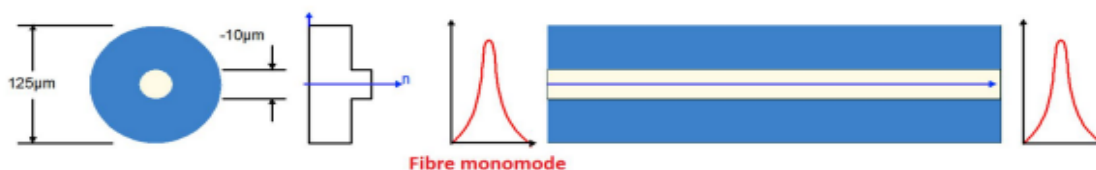


Figure 1. 3: Fibre optique monomode.

1.2.3.2 Fibre optique multimodes

La fibre multimode a été la première utilisée. Elle a un diamètre du cœur entre $50\mu\text{m}$ ou $62.5\mu\text{m}$ elle est limitée en bande passante. Elle existe sous deux formes.

1.2.3.2.1 Fibre optique multimodes à gradient d'indice

Les fibres optiques multimode à gradient d'indice ont été spécialement conçus pour les télécommunications, afin de minimiser cet effet de dispersion intermodale sans trop diminuer suivant avec une loi d'allure parabolique depuis l'axe jusqu'à l'interface cœur-gaine.

De la sorte, les rayons suivent une trajectoire d'allure sinusoïdal, et ceux ayant le trajet le plus long passant par les milieux d'indice plus faible ce qui augmente leur vitesse et permet d'égaliser approximativement les temps de propagation [5].

La fibre optique multimode à gradient d'indice a 50 à $62.5\mu\text{m}$ de diamètre pour le cœur, $125\mu\text{m}$ de diamètre pour la gaine et sa bande passante de 100 à 1000 MHz .

On l'utilise pour liaison de longue distance ou à grand débit [4]

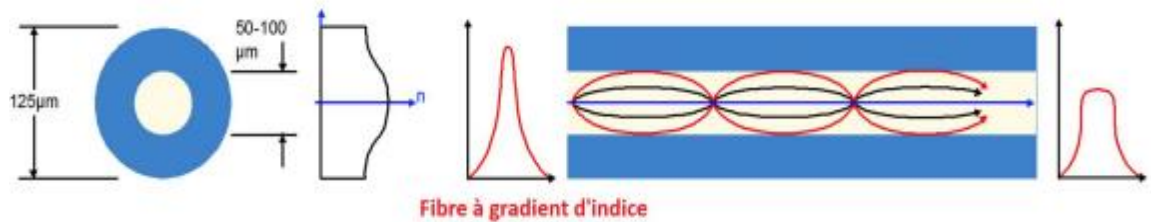


Figure 1. 4: Fibre optique multimode a gradient d'indice

1.2.3.2.2 Fibre optique multimodes à saut d'indice

Les fibres multimodes sont à saut d'indice lorsque le rayon lumineux change de parcours brutalement [3].

La fibre optique multimode à saut d'indice a 1 mm de diamètre pour le cœur, 2.2 mm de diamètre pour la gaine et 25 MHz comme bande passante.

On l'utilise pour liaison jusqu'à 150 m [4].

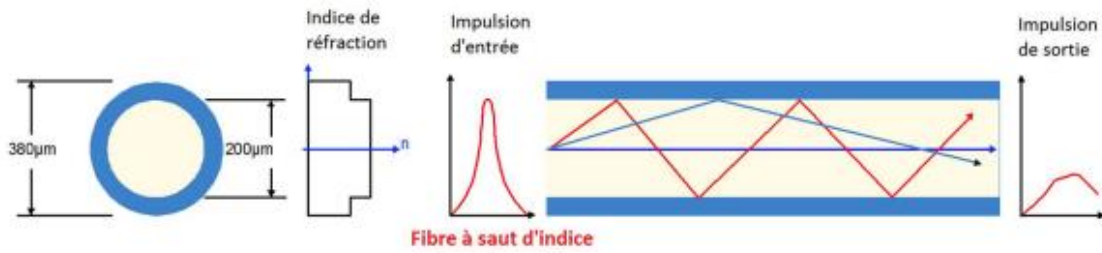


Figure 1. 5: Fibre optique multimode à saut d'indice.

1.2.4 Caractéristiques de Fibre optique

1.2.4.1 L'ouverture numérique

L'ouverture numérique caractérise l'angle maximum que peut faire le faisceau pour assurer sa propagation dans la fibre optique.

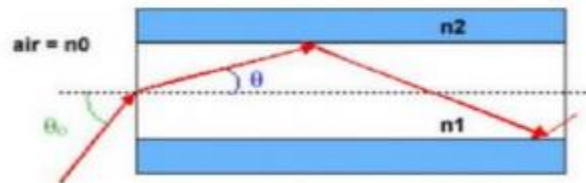


Figure 1. 6: Ouverture numérique d'une fibre optique.

$$ON = \sin \theta_0 = \sqrt{n1^2 - n2^2} \tag{I.1}$$

Au-delà de cette limite, les rayons sont déviés dans la gaine et finissent par disparaître. Une grande ouverture numérique permet d'injecter une grande quantité de lumière issue d'une source assez divergente (DEL) alors qu'une petite ouverture numérique n'autorise que l'injection d'un faisceau lumineux issue d'une source laser [6].

1.2.4.2 Propagation

La lumière est une onde électromagnétique que l'on définit habituellement par sa longueur d'onde dans le vide.

$$\lambda = C \times T = \frac{c}{f} \tag{I.2}$$

c : célérité dans le vide = 3×10^8 m/s, f : fréquence de l'onde.

La lumière infrarouge utilisée dans les fibres optiques est dans les longueurs d'ondes: 0,85µm; 1,3µm et 1,5µm principalement [7].

1.2.4.3 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 :

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (\text{I.3})$$

α : est le coefficient d'atténuation linéique, exprimé en dB/Km et représente la somme de l'ensemble des pertes dans la fibre ($\alpha=0,22\text{dB/Km}$ pour $\lambda=1,55\mu\text{m}$).

1.2.4.4 La bande passante

Elle représente la fréquence maximale d'émission des impulsions. Elle est limitée par la dispersion modale et la dispersion intrinsèque du matériau. La bande passante de la longueur de fibre L est :

$$Bp = \frac{L}{\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$\Delta\tau_1$: Le retard temporel entre le rayon le plus incliné ($\theta=\theta_c$) et le rayon parallèle à l'axe

($\theta=0^\circ$). Où θ_c est l'angle critique

$\Delta\tau_2$: le retard temporel résultant d'une variation de la longueur d'onde en fonction de l'indice due à la dispersion intrinsèque du matériau.

1.2.4.5 Dispersion

La dispersion est accomplie en élargissant l'impulsion au fur et à mesure qu'elle se développe. Nous avons identifié différentes causes d'élargissement des impulsions lumineuses, il existe deux types de dispersion : la dispersion modale et la dispersion chromatique.

1.2.4.5.1 Dispersion modale

Il existe plusieurs modes qui se propagent dans une fibre optique multimodes, chaque mode a sa propre vitesse de groupe. L'énergie lumineuse transmise dans la fibre se répartie entre les modes.

La distorsion du signal électrique obtenu par le convertisseur optique – électrique est déterminée par l'ensemble des retards entre les différents rayons, qui composent le signal lumineux. On appelle cette distorsion une dispersion modale [8].

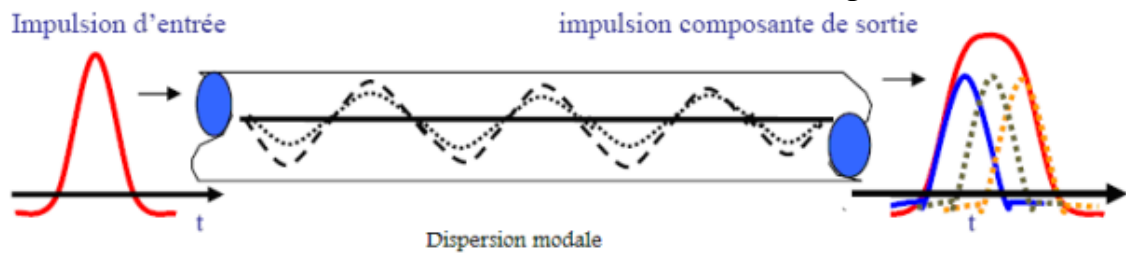


Figure 1. 7:Dispersion modale

1.2.4.5.2 Dispersion chromatique

Une dispersion chromatique peut être compensée optiquement par à travers une courte longueur de fibre à dispersion négative élevée appelée DCF (qui l'atténuation est élevée). Vous pouvez également utiliser un équipement de compensation de dispersion chromatique, il agit pour retarder les longueurs d'onde qui arrivent en premier.

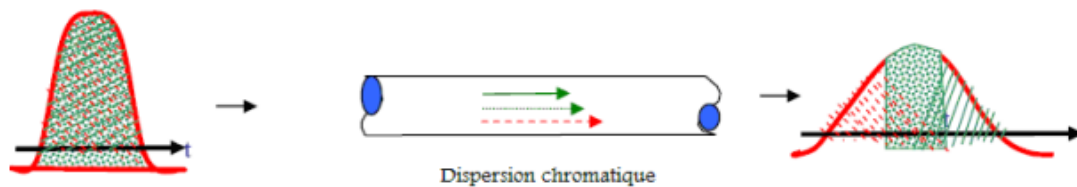


Figure 1. 8:Dispersion chromatique

1.2.5 Les avantages et les inconvénients des fibres optiques

La fibre ne connaît pas beaucoup de points négatifs. Son principal inconvénient demeure son prix.

La connectique et les travaux représentent un investissement conséquent dans le cadre du déploiement de la fibre optique mais offrent de nombreux avantages pour les télécommunications:

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

1.3 La radio sur fibre RoF

1.3.1 Définition de RoF

Le terme « Radio-sur-Fibre » (RoF) fait référence à des techniques de génération et/ou de transmission de signaux radiofréquences (RF) par voie optique. La technique de transmission RoF est basée principalement sur la modulation d'une porteuse optique par au moins un signal RF portant lui-même des données à transmettre.

Ainsi, les technologies Radio-sur-Fibre s'appuient sur des technologies de transmission par fibre optique pour distribuer des signaux RF entre une station centrale (Central Station :CS ou headend) et des modules d'antennes distribués (Remote Antenna Units : RAUs ou Base Stations: BSs).

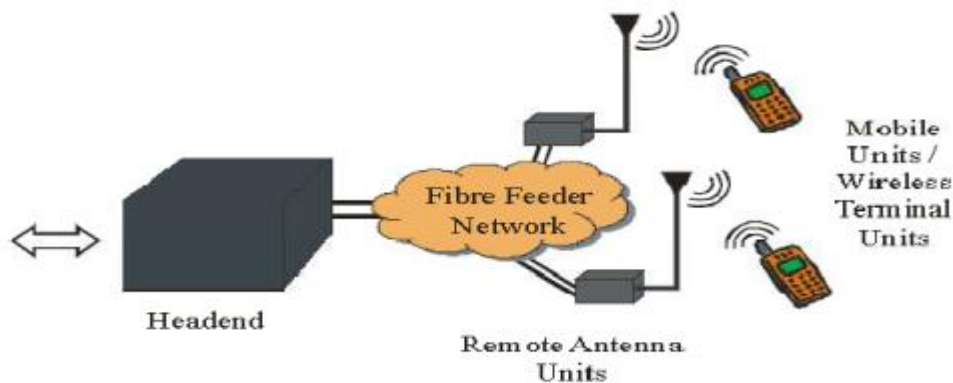


Figure 1. 9: Modèle d'un système RoF simplifié

Dans les systèmes de communication à bande étroite et les réseaux locaux sans fil, les fonctions de traitement de signaux RF, telles que la modulation et le multiplexage, sont exécutées au niveau du BS et immédiatement intégrées dans le module d'antenne.

La technologie RoF rend possible la centralisation des fonctions de traitement du signal RF dans un emplacement partagé en utilisant la fibre optique afin de distribuer les signaux RF. Ainsi, les BSs sont considérablement simplifiées comme elles ne doivent effectuer que la conversion optoélectronique et les fonctions d'amplification.

La centralisation des fonctions de traitement du signal RF permet le partage d'équipement, l'allocation dynamique des ressources et la simplification du système d'exploitation et de maintenance [9].

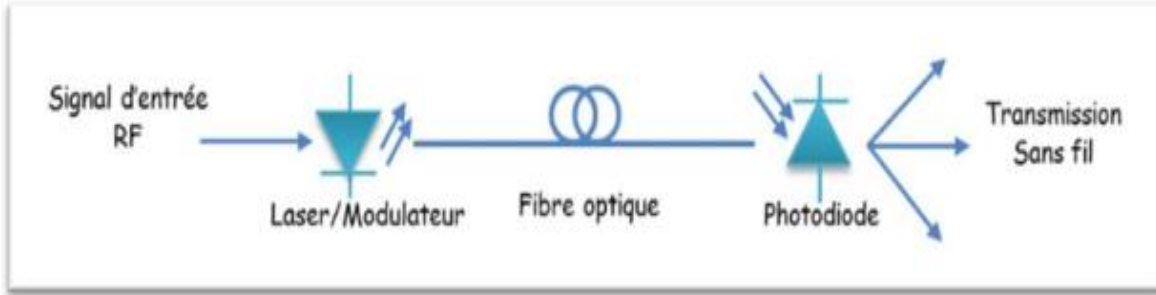


Figure 1. 10: Schéma synoptique d'une liaison RoF

1.3.2 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 comme illustré sur la figure 1.11. Le choix de l'architecture détermine le matériel nécessaire au niveau de la BS et sa complexité. Un système duplex complet peut utiliser des architectures de transport différentes sur la liaison montante et sur la liaison descendante [10].

1.3.2.1 Transmission du signal en bande de base

(BBoF, Base Band over Fiber) est une transposition en fréquence après photo détection.

1.3.2.2 Transmission du signal à une fréquence intermédiaire

(IFoF, Intermediate Frequency over Fiber) est une transposition en fréquence après photo détection.

1.3.2.3 Transposition directe du signal micro-onde à une fréquence radio

(RFoF, Radio Frequency over Fiber) est une émission directe après photo détection.

La liaison RoF permet de transporter sur la fibre optique le signal RF dédié aux applications en bande millimétriques mais cela nécessite une bande passante élevée des transducteurs E/O et O/E. En outre, la dispersion chromatique de la fibre optique a des effets plus prononcés pour la transmission RF RoF à fréquence RF élevée. Le terme RoF est utilisé pour ces trois types de liaisons [2].

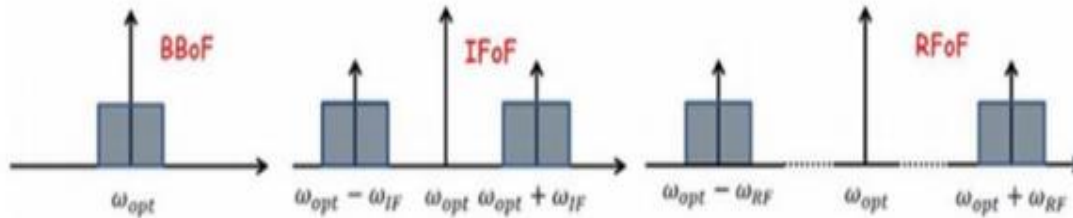


Figure 1. 11: Les trois types de transmission de signaux

1.3.3 Avantages des systèmes RoF

L'avantage d'un système RoF est sa capacité à regrouper les hautes performances de ces deux domaines de communication. On peut citer :

- Faible atténuation de la fibre optique : 0.2-0.3 dB/km pour les longueurs d'ondes télécom dans le cas de la fibre en silice ce qui permettant ainsi d'améliorer la zone de couverture de transmission sans fil.
- Le poids des fibres est considérablement inférieur à celui des câbles coaxiaux classiques.
- Bande passante très élevée de la fibre optique et la possibilité d'atteindre des débits de transmission supérieurs au Gbit/s.
- - en termes de protocole de transmission, ce qui permet d'envisager la transmission de signaux RF selon la configuration standard dédiée à la bande millimétriques 60 GHz, avec des formats de modulation complexes.
- Des systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output) efficaces peuvent être réalisés à l'aide d'un réseau RoF [9].
- Immunité aux interférences électromagnétiques.
- Efficacité d'énergie : le réseau RoF permet le déploiement de cellules radio plus petites fournissant des liens sans fil en liaison directe (LOS, Line Of Sight) plus performants diminuant le niveau de puissance de transmission nécessaire dans la station de base. A ceci s'ajoute, la faible consommation d'énergie des transducteurs E/O et O/E.
- Faible coût d'installation : l'utilisation des systèmes RoF a l'avantage de centraliser les différentes fonctions de traitement du signal dans la station centrale (CS, Central Station) ce qui simplifie la structure des stations de bases (BS, Base Station), et donc le coût du système.

1.3.4 Limitations des systèmes RoF

- Dispersions au niveau de la fibre optique : La dispersion est toujours une contrainte qui limite la longueur des liens. Pour la fibre monomode (SMF : Single Mode Fiber), la limitation est due à la dispersion chromatique, tandis que pour la fibre multimode (MMF : Multi Mode Fiber), c'est la dispersion intermodale qui est la plus pénalisante.
- Bruit et non-linéarité : Étant donné que l'on utilise des signaux analogiques, il faut dimensionner le système en tenant compte des imperfections propres telles que le bruit (facteur de bruit : NF (Noise Figure)) et les non-linéarités (IP3 (point d'interception du troisième ordre) ou TOI (Third- order Intercept Point)). Ces handicaps limitent la dynamique (DR : Dynamic Range) de la liaison radio sur fibre.

La dynamique caractérise la différence entre le plus fort et le plus faible des signaux circulant dans le lien tout en respectant les marges (back-off) au bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) et à la non-linéarité (déformation du signal).

1.3.5 Les applications principales de la radio sur fibre

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

- 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
- 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 es 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 (ex. projet CapilTRAM). 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.

1.3.6 Les architectures générales de la radio sur fibre

Pour l'utilisation de la technologie radio sur fibre, plusieurs possibilités d'architectures s'offrent à nous.

1.3.6.1 L'architecture point à point sur fibre optique

L'architecture d'un système radio sur fibre point à point est assez simple (voir figure 1.12). 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) pour s'immuniser aux interférences et améliorer le SNR.

Cette architecture est typiquement utilisée pour réaliser des dépôts d'antennes en raison de sa facilité de mise en œuvre pour un faible nombre d'antennes déportées.

La méthode point à point est facile à mettre en œuvre pour un nombre limité d'antennes déportées, car les pertes liées à l'optique sont compensables avec un amplificateur électrique. Dans le cas d'un partage du lien optique pour limiter les coûts d'installations, il est utile de regarder les architectures partagées [11].

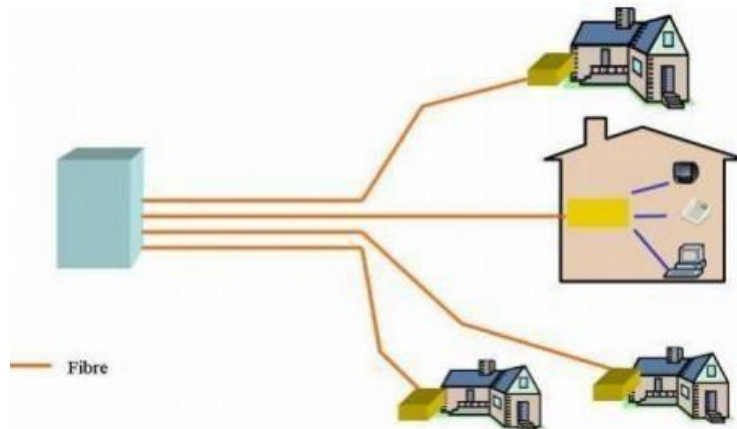


Figure 1. 12: topologie FTTH point à point (P2P)

1.3.6.2 L'architecture point à multipoints sur fibre optique

Comme pour le réseau d'accès, les architectures point à multipoints sont aussi utilisées pour la radio sur fibre. Les premières applications de ces architectures ont été réalisées dans les années 90 et utiliser pour transmettre un signal de télévision par les câblo-opérateurs. La technique employée est de transmettre le multiplex de fréquences des chaînes de télévisions sur une même longueur d'onde optique (SCM) puis de la distribuer aux abonnés via un réseau optique passif. [12] [13].

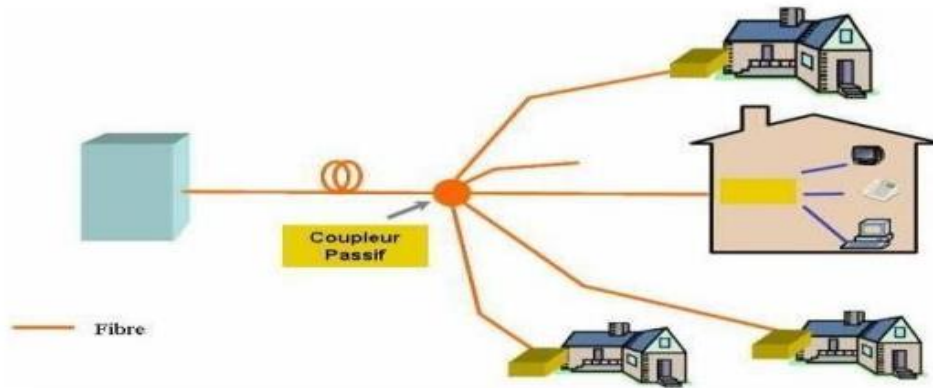


Figure 1. 13: Architecture point-multipoint (PON)

1.3.7 Les composants optoélectronique d'une liaison RoF

Comme tout système de communication, les composants d'un lien complet doit contenir: un émetteur (l'émetteur-modulateur « émetteur + modulateur externe les cas échéant »), un canal de transmission et un récepteur [14].

1.3.7.1 L'émetteur : les diodes laser DL

Les lasers à semi-conducteurs, présentent de nombreux avantages. En effet, ils ont une forte compacité, leurs dimensions étant de quelques centaines de microns de long pour moins d'une dizaine de large, ils couvrent une large gamme spectrale qui s'étend du visible au proche infrarouge selon la filière technologique. L'énergie de pompe peut être électrique, ils ont un fort potentiel d'intégration avec les autres composants semi-conducteurs sans parler de leurs fortes capacités de modulation, des puissances émises pouvant atteindre plusieurs Watts en continu, et ils ont un faible coût de fabrication [15].

La diode laser à semi-conducteur se base sur trois processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière. Ces processus sont l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée [16].

1.3.7.2 Les modulateurs

Ce sont des composants optoélectroniques permettant la conversion du signal électrique en signal optique par utilisation d'une source optique externe (la diode laser CW par exemple).

Le signal radio modifie la tension de polarisation du modulateur et donc sa transmissivité. Le signal optique de sortie est alors modulé en amplitude.

L'avantage d'utiliser un modulateur externe est d'avoir une bande passante importante ce qui permet d'utiliser des fréquences porteuses élevées. De plus cela permet d'utiliser un laser bas coût étant donné que ce dernier n'est pas modulé.

Il existe principalement deux types de modulateurs externes [17] : le modulateur à électro-absorption et le modulateur Mach-Zehnder. C'est ce dernier qui a été utilisé dans le cadre de ce travail.

1.3.7.3 L'élément de connexion : la fibre optique

Le signal optique modulé est transmis par une fibre optique du modulateur jusqu'au photodétecteur [14]. La fibre optique est un guide d'onde cylindrique qui conduit la lumière entre deux points distants.

La fibre optique est principalement composée d'un cœur de silice de haut indice de réfraction et une gaine de silice avec un indice de réfraction plus faible que celui du cœur. L'ensemble est généralement recouvert d'un revêtement protecteur (gaine en plastique) [18].

1.3.7.4 Le récepteur : la photodiode

Le photodétecteur permet de réaliser la conversion optique – électrique du signal avec une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée (choix du matériau). Le photodétecteur le plus utilisé est la photodiode PIN, constituée par trois zones : une zone intrinsèque I intercalée entre une région fortement dopée P et une autre fortement dopée N. La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque (I), où règne le champ électrique pratiquement uniforme, qui sépare les porteurs.

Une des zones traversées par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau [19].

1.3.8 Les techniques de génération des signaux RF sur fibre optique

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

A la réception, il est aussi nécessaire de réaliser le processus inverse : la conversion du signal optique en signal électrique connue sous le terme de photo détection. Principalement, il existe deux modes de génération des signaux RF. Il s'agit de modulation d'intensité avec une détection directe (IM-DD) et de la génération du signal RF par détection hétérodyne.

1.3.8.1 La modulation d'intensité avec une détection directe (IM-DD)

La méthode la plus simple pour la distribution des signaux radiofréquences dite IM-DD consiste à moduler directement l'intensité d'une porteuse optique par le signal radiofréquence lui-même et puis utiliser la détection directe par la photodiode pour récupérer le signal radiofréquence. Il existe deux façons de faire la modulation de la porteuse optique : la modulation directe et la modulation externe.

1.3.8.2 La modulation directe

Le principe de cette méthode consiste à modifier le courant de polarisation du laser avec le signal RF. L'intensité lumineuse du laser est alors modulée. L'inconvénient du laser est d'avoir une assez faible linéarité de la courbe de conversion électro-optique. Cette non-linéarité déforme le signal analogique (EVM, intermodulations...) mais qui n'a aucune incidence pour la transmission numérique.

La bande passante du laser (circuit de commande) doit être à la fréquence du signal RF, il est parfois plus favorable de le transporter sur une fréquence intermédiaire (FI) [20].

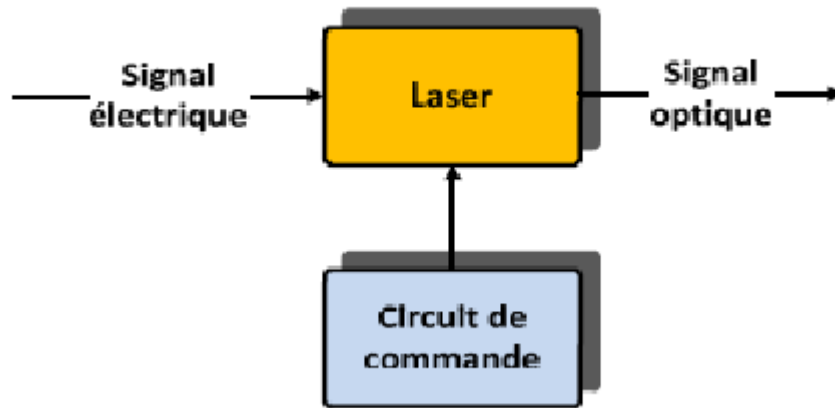


Figure 1. 14: Liaison à modulation directe.

1.3.8.3 La modulation externe

Le principe est d'injecter le laser (fixe) dans ce circuit auquel on applique le signal RF (tension) autour du point de polarisation ce qui modifiera sa transmissivité. Le modulateur externe Mach-Zehnder (MZM) est généralement utilisé pour sa linéarité. Il existe aussi des modulateurs électro absorbants mais que nous n'avons pas utilisé.

Le MZM est basé sur l'interféromètre Mach-Zehnder. Ce dernier divise la puissance optique en 2 et recombine les signaux ensuite [21]. Le déphasage est proportionnel à l'amplitude du champ présent sur chaque bras. Pour le cas des MZM à double commande, sur chaque bras on réalise en opposition (de

signe) une modulation de phase liée à l'effet Pockels ; le déphasage est proportionnel au champ électrique induit par la différence de potentiel appliquée entre les bras. Par recombinaison des champs (en fonction du déphasage) on module la puissance optique en fonction de la différence de potentiel appliqué. La caractéristique du modulateur Mach Zehnder s'écrit [22] :

$$P_{out,MZM} = P_{in,opt} \frac{1}{2(Lins)lin} \times (1 + \eta \cos\left(\frac{\pi}{V\pi,DC}(V_{DC} - V_0) + \frac{\pi}{V\pi,RF}V_{RF}\right)) \quad (I.5)$$

Où :

- $P_{out,MZM}$: la puissance optique en sortie du MZM
- $P_{in,opt}$: la puissance optique en entrée du MZM
- Lins : les pertes d'insertions (environ 5 dB)
- η : est le taux d'extinction du MZM, très proche de 1
- V_0 : la tension de polarisation pour le premier maximum de transmission
- V_{DC} : la tension de polarisation appliquée au MZM
- $V_{\pi,DC}$: la tension demi-onde de l'électrode DC, typiquement de quelques Volt
- $V_{\pi,RF}$: la tension demi-onde de l'électrode RF, aussi de quelques Volt mais dépend de la fréquence de modulation
- V_{RF} : la tension du signal de modulation appliquée au MZM

L'équation (I.5) peut être simplifiée compte tenu : $V_0 = 0$ V et $V_{\pi,DC} \approx V_{\pi,RF}$

$$P_{out,MZM} = P_{in,opt} \frac{1}{2(Lins)lin} \times tff(1 + \cos\left(\frac{\pi}{V\pi}(V_{DC} + V_{RF})\right)) \quad (I.6)$$

Où : tff : l'efficacité électrique qui est très proche de 1.

Le modulateur externe se caractérise en général par une bande passante très large. Cependant, Le signal à fréquence élevée peut induire des suppressions du signal par l'effet de dispersion de la fibre ; certaines solutions sont proposées pour améliorer la dispersion [23] [24].

Le MZM est souvent classé comme un modulateur linéaire (LM : Linear Modulation) ; ceci est vrai dans certaines zones. Pour certains points de polarisation (V_{π}) il est possible d'annuler la porteuse (DSB-SC : Double Sideband Suppressed – Carrier Transmission).

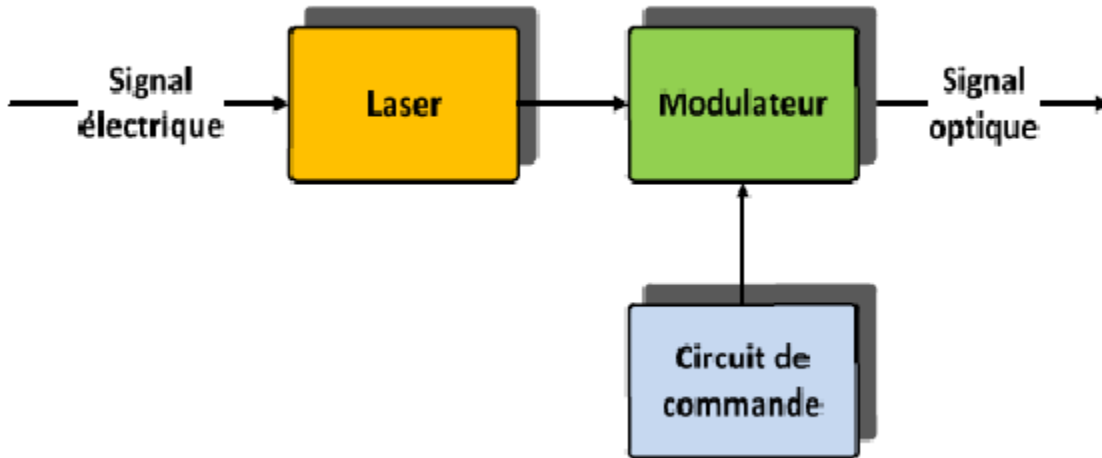


Figure 1. 15: Modulation externe avec le modulateur Mach-Zehnder.

1.4 Conclusion

La RoF est une technologie qui intègre les réseaux d'accès optique et sans fil à large bande, permettant une infrastructure de réseau capable d'un accès flexible offrant une connectivité sans fil à large bande. Cette technologie peut offrir de nombreux avantages, notamment une architecture avec la possibilité de prendre en charge de multiples services radio et normes.

On a présenté dans ce chapitre la fibre optique et l'innovation qu'elle a apporté aux différents domaines scientifiques. On a traité la technologie radio sur fibre optique, montrant les systèmes de transmission et les différents signaux RF utilisés par la fibre optique, ainsi que les techniques de modulation et de détection utilisées.

Dans le chapitre suivant on va faire une étude complète sur les ondes millimétriques.

Chapitre 2

**Les ondes millimétriques dans la radio sur
fibre**

2.1 Introduction

On a récemment observé un besoin énorme de bande passante dans les communications sans fil et câblées avec les applications exigeantes en bande passante, comme les services interactifs et les services multimédias. La congestion et le spectre de fréquences ont limité les débits de données des systèmes sans fil actuels à des mégabits par seconde (Mbps) seulement. Pour atteindre des débits de données élevés, la solution viable est l'augmentation de la largeur de bande passante et l'utilisation de fréquences d'ondes millimétriques (mm) [25].

Le cadre de transmission radio sur fibre à ondes millimétriques (MMW-RoF) est une technologie prometteuse pour relever les défis des systèmes de communication de la prochaine génération. La structure de transmission MMW-RoF aura les avantages d'utiliser à la fois une récurrence très élevée et une fibre optique pour la transmission de signal.

Ce chapitre est consacré dans un premier temps à des généralités sur l'onde millimétrique, ses avantages, ses limitations, ses applications...etc. Ensuite on présentera les caractéristiques de propagation des ondes millimétriques. Enfin, nous aborderons la technologie radio sur fibre à ondes millimétriques (MMW-RoF), et nous finissons par parler de communication MIMO massive par ondes millimétriques.

2.2 Les ondes millimétriques :

La bande millimétrique est une bande du spectre électromagnétique correspondant à des longueurs d'onde entre [1 mm-10mm] à une propagation sur la plage de fréquence de [30 GHz-300GHz]. En effet, la communication par les ondes millimétriques est une solution d'un avenir proche pour la transmission des réseaux cellulaires mobiles sans fil, les réseaux locaux sans fil, les réseaux personnels [26].

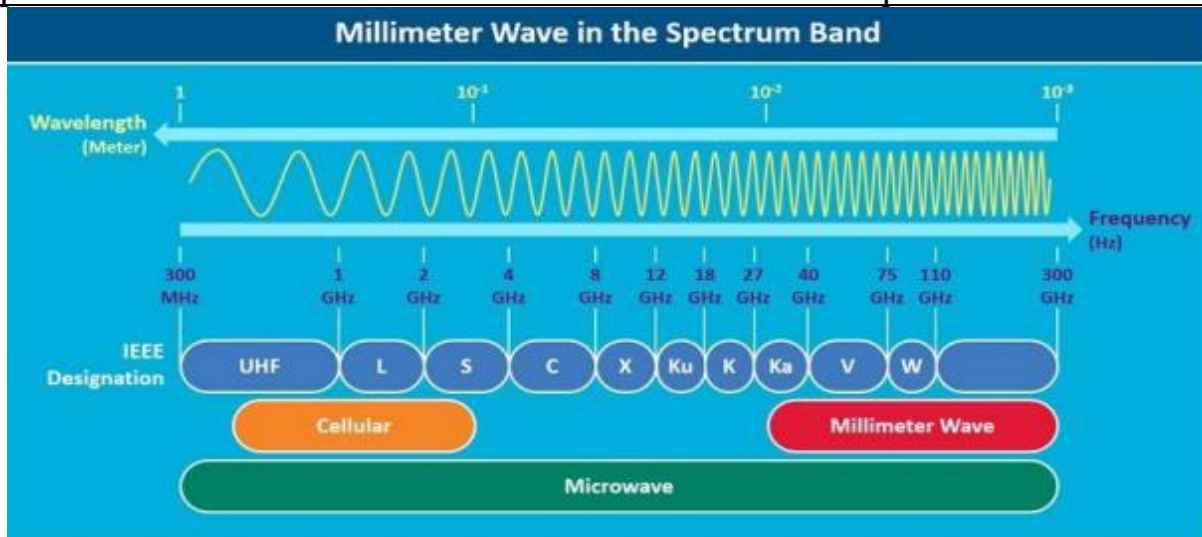


Figure 2. 1: Spectres des fréquences (ondes millimétriques).

2.3 Les avantages et les inconvénients des ondes millimétriques :

Les avantages d'une utilisation de ces bandes millimétriques :

- L'utilisation d'une large bande passante de (30 GHz-300 GHz) par rapport aux autres ondes radio des réseaux sans fil.
- Faisceaux étroits : avec la même taille d'antenne, il est possible d'emballer plus d'éléments d'antenne aux fréquences d'ondes millimétriques.
- Elle offre au moins une bande passante continue de 5 GHz au monde dans le cas de certaines bandes, comme la bande autour de 60 GHz.
- Un autre avantage majeur de la technologie des ondes millimétriques est sa petite taille de composant. Les appareils intelligents et les téléphones mobiles modernes doivent être efficace et de petite taille. Les ondes millimétriques sont complexes et permet une transmission à haute sécurité [27]

Malgré ces avantages, la bande millimétrique fait face à certains inconvénients comme :

- Une courte portée.
- Une grande atténuation.
- Les ondes millimétriques sont absorbées facilement par le feuillage et les bâtiments, les pertes de puissances sont provoquées par les matériaux comme la brique, les vitres teintées, les murs intérieurs et les cabines.

2.4 Limitation des ondes millimétriques

Les principales limites des ondes millimétriques sont : la portée limitée et la ligne de visée (LOS).

- Portée limitée : Les facteurs suivants affectent la portée de transmission des ondes millimétriques : des longueurs d'onde plus courtes allant de 1 à 10 mm, une forte atténuation atmosphérique due au brouillard, à la pluie et à l'humidité. La portée de transmission peut être augmentée en utilisant un réseau d'antennes à haut gain qui augmente la puissance effective rayonnée.
- Ligne de visée (LOS) : La communication par ondes millimétriques nécessite une ligne de visée (LOS) et les obstacles physiques dans les applications pratiques affaiblissent les signaux, réduisant ainsi la portée de transmission.

2.5 Les applications des ondes millimétriques

2.5.1 5G et concept de petites cellules

La 5G est l'une des technologies les plus discutées ces derniers temps. En raison de sa nécessité de prendre en charge un débit de données plus élevé, la 5G utilisera des ondes millimétriques (entre 24 GHz et 86 GHz). Les entreprises technologiques testent et investissent dans l'infrastructure WLAN avec le support des ondes millimétriques. Le concept des petites cellules pourrait choisir des ondes millimétriques dans sa mise en œuvre future. Les ondes millimétriques peuvent remplacer les lignes de transmission à fibre optique traditionnelles reliant les stations de base mobiles [27].

2.5.2 La bande V :

La bande V ("bande en V") est une désignation standard par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) pour une bande de fréquences dans la partie micro-ondes du spectre électromagnétique allant de 40 à 75 gigahertz (GHz). La bande V n'est pas très utilisée, sauf pour la recherche radar à ondes millimétriques et d'autres types de recherche scientifique. Il ne doit pas être confondu avec la bande V (bande cinq) de 600-1000 MHz de l'UHF gamme de fréquences [27].

La bande V est également utilisée pour les systèmes de communication terrestre à ondes millimétriques de grande capacité. Aux États-Unis, la Fédérale Communications Commission a attribué la bande de fréquences de 57 à 71 GHz aux systèmes sans fil sans licence. Ces systèmes sont principalement utilisés pour les communications à grande capacité et à courte distance (moins de 1 mile). En outre, les fréquences à 70, 80 et 90 GHz ont été attribuées comme bandes « légèrement autorisées » pour les bandes multifréquences communications sans fil gigabit. Toutes les liaisons de communication dans la bande V nécessitent une ligne de visée dégagée entre le point émetteur et le point récepteur, et l'évanouissement dû à la pluie doit être pris en compte lors de l'analyse du budget de liaison. [28].

2.5.3 WiGig :

WiGig est un autre nom pour une connexion Wi-Fi appelée 802.11ad. Il est également appelé Wireless AD (également connu sous le nom de Wi-Fi 60 GHz). Il a la possibilité de fournir des vitesses Wi-Fi qui sont sept ou huit fois folles par rapport aux débits offerts par 802.11ac, avec des vitesses de téléchargement allant jusqu'à 10 Gbps, WiGig peut télécharger un film HD en quelques secondes. Il offre une latence très faible et une réactivité presque filaire.

WiGig utilise le spectre 60 GHz au lieu des 2,4 ou 5 GHz généralement utilisés par le Wi-Fi standard. Les canaux plus larges de ce spectre peuvent emballer plus de données dans le signal. Il utilise la technologie de formation de faisceau pour un signal direct entre les appareils, éliminant ainsi les interférences.

Le signal d'onde millimétrique de 60 GHz ne peut généralement pas pénétrer les murs, mais peut propager les réflexions des murs, des plafonds, des sols et des objets en utilisant la formation de faisceaux intégré au système WiGig. Lorsque vous vous éloignez de la pièce principale, le protocole peut basculer pour utiliser les autres bandes inférieures à un taux beaucoup plus faible, les deux pouvant se propager à travers les murs.

Le nom WiGig vient de Wireless Gigabit Alliance, l'association originale étant formée pour promouvoir l'adaptation de IEEE 802.11ad, cependant, WiFi Alliance le certifie maintenant [29].

2.5.4 Communication par Satellite

Les ondes millimétriques sont des candidats parfaits pour la communication par satellite. À des altitudes plus élevées d'orbites, il fonctionne parfaitement avec un débit massif et une faible latence [27].

2.6 Potentiel des ondes millimétrique :

La pénurie de spectres millimétrique a déclenché des études et des efforts industriels pour utiliser des larges bandes de fréquences à des longueurs d'ondes très petites qui n'ont pas été utilisées auparavant ; combinées avec la technologie CMOS RF à faible puissance, permettant l'emplacement d'un grand nombre (≥ 32 éléments) d'antennes miniaturisées dans des petites surfaces [30].

La communication sans fil des ondes millimétriques souffre des caractéristiques de propagation, telles que les effets des pertes de trajet, l'effet d'ombrage, ainsi que de diverses atténuations importantes en raison d'obstructions. Pour cela les techniques associées à l'augmentation des fréquences diminuent l'impact de ces pertes, telles que les antennes directionnelles à gain élevé (formations des faisceaux,

systèmes entrés multiples sorties multiples (MIMO). Ces techniques doivent être modélisés pour garantir une transmission fiable [31].

Il existe de nombreux travaux sur les systèmes cellulaires à ondes millimétriques, notamment dans l'industrie. Les campagnes de mesures ont été lancées afin d'obtenir les caractéristiques spatiales et temporelles des bandes de fréquences des ondes millimétriques et développer des nouvelles techniques et procédures en bandes 60 GHz.

2.7 Caractéristique de propagation des ondes millimétriques

2.7.1 Une large bande passante

La gamme des ondes millimétriques dans le spectre de fréquences est comprise entre 30GHz et 300GHz, comme l'illustre la figure 1. On constate que la bande 57-64GHz est limitée par l'absorption d'oxygène et que la bande 164-200GHz ne convient pas à la propagation en raison d'une forte atténuation par la vapeur d'eau, avec des pertes maximales à 180GHz. Par conséquent, seulement environ 252GHz du spectre est disponible pour la communication mobile à large bande [32]. Si l'on suppose que seulement 40 % du spectre des ondes millimétriques est disponible pour les communications mobiles à large bande, on obtient tout de même plus de 100 % des fréquences disponibles.

Il reste plus de 100 GHz de fréquences inutilisées, soit environ 200 fois plus que les bandes de fréquences de 4 GHz actuellement déployées dans le monde [33].

2.7.2 Courte longueur d'onde

Dans la gamme du spectre électromagnétique, une fréquence élevée d'onde électromagnétique implique une longueur d'onde plus courte, ce qui signifie que plus d'informations peuvent être transmises par unité de temps. Par rapport aux signaux hyperfréquence inférieurs à 6 GHz précédemment utilisés par les systèmes cellulaires traditionnels de plus en plus encombrés et les réseaux locaux sans fil, les signaux mmWave ont des longueurs d'onde beaucoup plus courtes qui s'étendent entre 10 mm et 1 mm. Par exemple, les signaux mmWave à 28 GHz, 60 GHz et 300 GHz ont les longueurs d'onde extrêmement courtes de 10,7 mm, 5 mm et 1 mm, respectivement. En particulier, les longueurs d'onde des signaux à ondes millimétriques à 28 GHz et 73 GHz sont presque 10 ~ 30 fois plus petites que la longueur d'onde du signal hyperfréquence à 2,5 GHz [34].

2.7.3 Pertes en espace libre

La dépendance en fréquence et en distance de l'affaiblissement entre deux antennes isotropes s'exprime en chiffres absolus par l'équation suivante :

$$L_{FSL} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (\text{II.1})$$

Où : λ est la longueur d'onde de fonctionnement.

FSL est définie par la perte de puissance des signaux transmis en espace libre en dB.

R est la distance entre les antennes d'émission et de réception en km.

La FSL est donnée par [35] :

$$FSL_{[\text{dB}]} = 92.4 + 20 \log f_{[\text{GHz}]} + 20 \log R_{[\text{km}]} \quad (\text{II.2})$$

Selon l'équation (II.2), la FSL est proportionnelle aux deux valeurs distance de séparation et fréquence porteuse. Cela se traduit par une FSL élevée lorsque la fréquence porteuse entre dans la bande de fréquence d'ondes millimétriques, par rapport à la bande inférieure à 3 GHz.

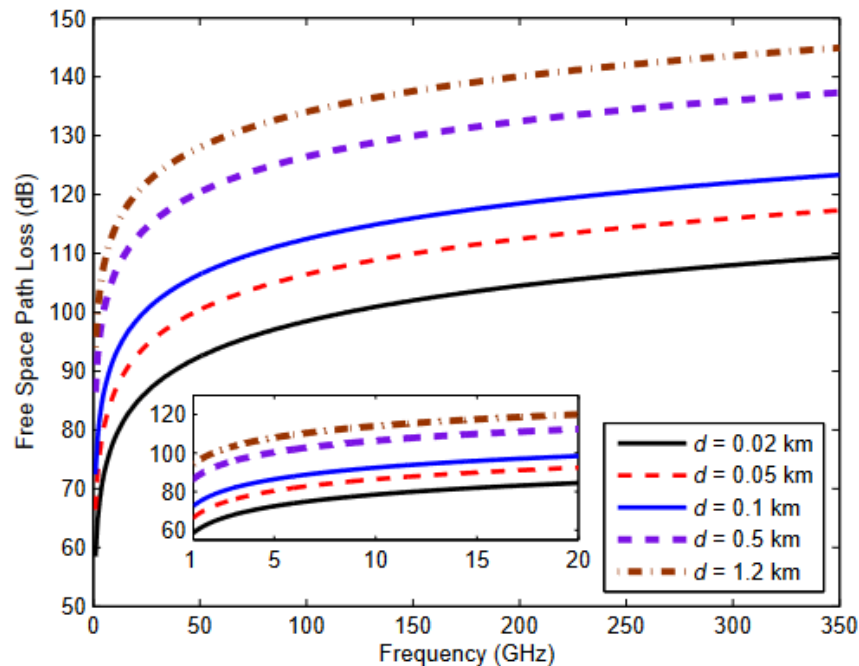


Figure 2. 2: Pertes en espace libre entre antennes isotropes.

La figure 2.2 montre la perte en espace libre, ou atténuation, subie pour plusieurs valeurs de fréquence. Pour chaque changement d'octave dans la plage, l'atténuation différentielle change de 6 dB. Par exemple, en passant d'une portée de 2 à 4 km, l'augmentation de la perte est de 6 dB. Notez que,

même sur de courtes distances, la perte d'espace libre peut être assez importante. Cela donne à penser que pour les applications dans le spectre des ondes millimétriques, seules les liaisons de communication à courte distance seront prises en charge.

2.7.4 Atténuation atmosphérique

L'atténuation atmosphérique ou bien l'atténuation gazeuse est considérée comme un effet qui perturbe la propagation des ondes millimétriques. Cet effet naturel est causé quand les ondes radio rencontrent les molécules d'airs, et une partie de l'énergie de ces ondes est absorbée par les molécules, et génère une vibration proportionnelle à la fréquence porteuse.

Les ondes millimétriques sont absorbées par deux gaz, l'oxygène (O₂) et la vapeur d'eau (H₂O). D'un autre côté l'absorption de chaque gaz est différente, elle dépend des facteurs comme : la température, la pression, l'altitude et la fréquence porteuse. L'absorption d'O₂ pour la bande de fréquence 60 GHz vaut 15 dB/Km. Dans le cas général en courte distance, l'impact de l'atténuation atmosphérique en bande millimétrique est négligeable. La figure (2.3) représente l'atténuation spécifique de O₂, H₂O en fonction de la fréquence. Les ondes millimétriques sont absorbées par deux gaz, l'oxygène (O₂) et la vapeur d'eau (H₂O). D'un autre côté l'absorption de chaque gaz est différente, elle dépend des facteurs comme : la température, la pression, l'altitude et la fréquence porteuse. L'absorption d'O₂ pour la bande de fréquence 60 GHz vaut 15 dB/Km. Dans le cas général en courte distance, l'impact de l'atténuation atmosphérique en bande millimétrique est négligeable.

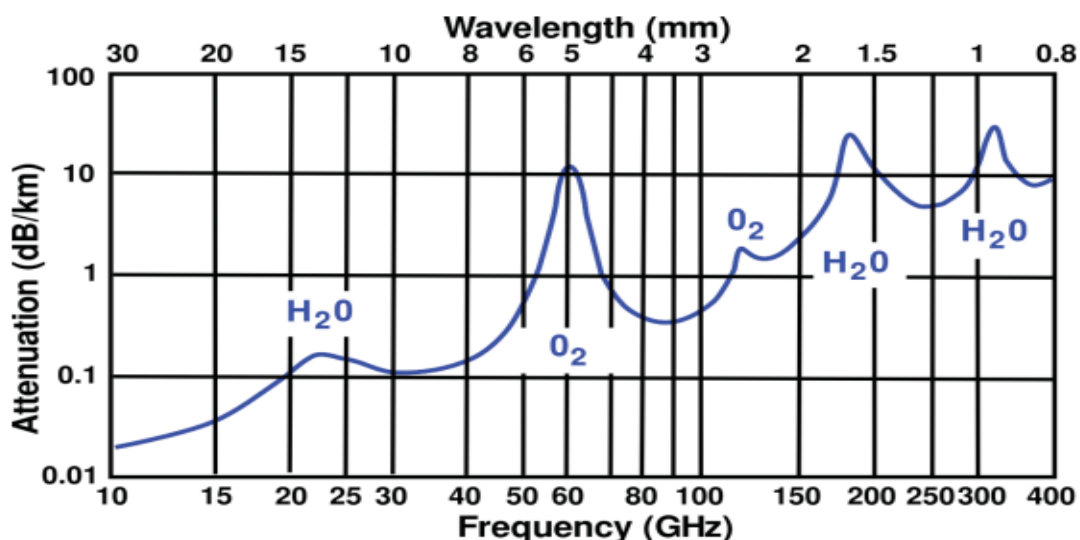


Figure 2. 3: Atténuation spécifique de O₂ et H₂O en fonction de la fréquence.

2.7.5 Atténuation de la pluie

L'atténuation des précipitations et les pertes dues à la pluie sont importantes en ondes millimétriques. Les gouttes de pluie sont à peu près de la même taille que les longueurs d'onde radio à des fréquences d'ondes millimétriques. Par conséquent, les signaux d'ondes millimétriques sont facilement bloqués par des gouttes de pluie, ce qui entraîne une dispersion de l'énergie du signal et une perte de sa force [36], [37]. Selon certains rapports, l'atténuation de la pluie dépend du taux de pluie. Il a été rapporté que pour les chutes de pluie plus fortes, la perte de pluie du signal devient plus élevée. Les données des mesures expérimentales à 70 GHz montrent que dans une situation de pluie légère à 1 mm par heure la perte de signal est d'environ 0,9 dB/km et pendant ce temps, pour un taux de pluie plus important de 50 mm par heure une augmentation exponentielle à 18,4 dB/km est enregistrée.

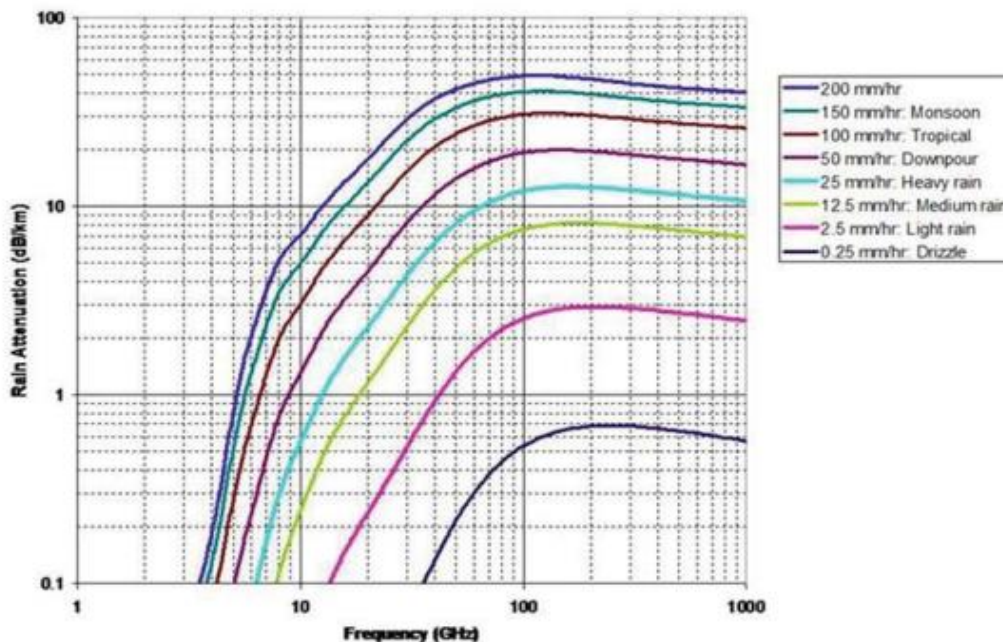


Figure 2. 4: Atténuation des ondes millimétriques par pluie

En outre, l'impact de la pluie est différent sur différentes bandes de fréquences des ondes millimétriques. Dans le même taux de pluie, les fréquences plus élevées subissent des pertes plus importantes. Par rapport aux réseaux sans fil traditionnels sur les bandes micro-ondes, l'atténuation de la pluie sur les ondes millimétriques et les bandes désignées de moins de 100 GHz pour la 5G sont plus problématiques. Cependant, avec une communication plus courte de l'ordre de 200 m, la perte de trajectoire due à l'atténuation de la pluie n'est pas significative. Ainsi, des ondes millimétriques de fréquence plus élevée sont utilisées dans des scénarios intérieurs et dans des environnements urbains denses dans une taille de cellule ne dépassant pas 200 mètres.

2.7.6 Pénétration de matériau

Les fréquences d'onde du millimètre sont également vulnérables à la perte de pénétration et, comparées aux ondes de basse fréquence, l'ondes millimétrique ne peut pas se propager correctement à travers la plupart des matériaux solides tels que les murs, les portes, les meubles de chambre [31], [38]. Ainsi, les signaux d'ondes de millimètre sont facilement obstrués, surtout dans les zones densément urbaines avec beaucoup de bâtiments et de foule. Plusieurs campagnes de mesure telles que [38], [39], [26] ont été menées dans différents environnements pour étudier la pénétrabilité et la perte de trajectoire des ondes de millimètres.

Le tableau 2.1 montre les résultats d'expériences réalisées à l'intérieur et à l'extérieur à New York en 2012[13]. Selon le tableau, l'ondes millimétrique souffre davantage de la perte de pénétration dans les environnements extérieurs. Par exemple, le verre teint d'épaisseur 3,8 cm subit une perte de pénétration de 40,1 dB à l'extérieur. Pendant ce temps, le verre transparent a la perte minimale de pénétration de 3,6 dB dans l'état intérieur.

Environnement	Location	Matériel	Épaisseur(cm)	Perte de pénétration (dB)
Extérieur	Othmer Residence Hall	Verre Teinté	3.8	40.1
	Warren Weaver hall	Brique	185.4	28.3
Intérieur	MetroTech Center	Verre Clair	<1.3	3.9
	Warren Weaver hall	Verre Teinté	<1.3	24.5
		Verre Clair	<1.3	3.6
		Mur	38.1	6.8

Tableau 2. 1: Pertes de pénétration de différentes matières en dB/cm [38]

2.7.7 Perte de propagation

La perte de trajet en espace libre est proportionnelle au carré de la fréquence porteuse selon la formule de transmission Friis [40]. L'espace libre reçoit de l'énergie à un récepteur séparé de l'émetteur par une distance dx est déterminée par :

$$P_r(dx) = \frac{P_{\Omega t \Omega r}}{A} \left(\frac{\lambda}{4\pi dx} \right)^2 \quad (\text{II.3})$$

Où : Pr et P: sont respectivement la puissance reçue et la puissance émise.

Ω_r , Ω_t : est le gain d'antenne du récepteur et de l'émetteur respectivement.

λ : est la longueur d'onde de fonctionnement de la transmission.

Le facteur sans unité A: les pertes d'antenne et de composants (perte non liée à la propagation).

D'après le modèle de l'équation (2.3), on remarque que la puissance reçue augmente proportionnellement avec la longueur d'onde. Pour voir l'effet des fréquences sur l'affaiblissement de trajet, nous comparons l'affaiblissement sur le trajet spatial entre les systèmes cellulaires qui fonctionnent à 460MHz, système WiFi à 2.4GHz, et l'ondes millimétrique fonctionnant à 60GHz, en supposant qu'il n'y ait pas de pertes supplémentaires ($A = 1$), les antennes omnidirectionnelles et le même niveau de puissance d'émission, pour une distance d'un mètre, les résultats sont montrés dans ce tableau (2.2) suivant :

Systèmes	Fréquences de fonctionnement	Path Loss (dB)
Système cellulaire	460 MHz	-25.7
WIFI	2.4MHz	-40
Systèmes mmWave	60GHz	-68

Tableau 2. 2: Mesure de PL pour les systèmes cellulaire, wifi, et système on onde millimétrique à 460MHz, 2.4GHz, et 60GHz respectivement à un mètre [41].

Pour une distance de 100m entre l'émetteur et le récepteur, les pertes en espace libre pour les mêmes systèmes précédents sont résumées dans ce tableau (2.3) [41] :

Systèmes	Fréquences de fonctionnement	Path Loss (dB)
Système cellulaire	460 MHz	-65.7
WIFI	2.4MHz	-80
Systèmes mmWave	60GHz	-108

Tableau 2. 3: Mesure de PL pour les systèmes cellulaire, wifi, et système on onde millimétrique à 460MHz, 2.4GHz, et 60GHz respectivement à un 100m [41].

L'utilisation d'une antenne directionnelle à gain élevé peut-être appliquée pour compenser les pertes de propagation, bien que la perte de trajectoire soit un des inconvénients de mmWave, le côté

positif [42], qu'on peut améliorer le signal à la réception par l'utilisation des antennes de petite taille à gain élevée [40].

2.7.8 Perte de feuillage

Les pertes de feuillage aux fréquences des ondes millimétriques sont importantes. En fait, la perte de feuillage peut être un obstacle à la propagation dans certains cas. Une relation empirique a été développée (CCIR Rpt 236-2), qui peut prédire la perte. Pour le cas où la profondeur du feuillage est inférieure à 400 mètres, la perte est donnée par :

$$L = 0.2 f^{0.3} R^{0.6} \text{ dB} \quad (\text{II.4})$$

Où : f : fréquence en MHz ;

R : profondeur du feuillage traversé en mètres, et s'applique pour $R < 400$ mètres.

Cette relation est applicable pour les fréquences comprises entre 200 et 95 000 MHz. Par exemple, l'affaiblissement du feuillage à 40 GHz pour une pénétration de 10 mètres (ce qui équivaut à peu près à un grand arbre ou à deux en tandem) est d'environ 19 dB. Il ne s'agit évidemment pas d'une valeur négligeable.

2.7.9 Directivité

Les liaisons à ondes millimétriques se propagent intrinsèquement et directionnellement. Ainsi, les réseaux d'antennes, qui sont dirigés par des signaux électriques, peuvent être obtenus sous forme de motifs métalliques sur la carte de circuit imprimé [43]. De plus, la phase de chaque signal d'émission d'antenne peut diriger électroniquement le faisceau dans n'importe quelle direction et fournit un gain très faible pour toutes les directions afin d'obtenir un gain élevé dans cette direction. La procédure d'apprentissage de faisceau est nécessaire pour permettre de diriger l'émetteur et le récepteur du faisceau l'un vers l'autre, et divers algorithmes d'apprentissage de faisceau sont également inventés pour réduire le temps d'apprentissage de faisceau [44-45].

2.7.10 Diffraction, réflexion et diffusion

La diffraction est la propagation des signaux radio autour des objectifs. Il peut supporter la communication lorsque le signal est bloqué ou lorsque les terminaux mobiles se déplacent dans les coins. Bien que la diffraction soit un mécanisme de propagation utile pour les communications par micro-ondes, elle est considérée comme un mécanisme de propagation inefficace et moins fiable pour les réseaux mobiles à ondes millimétriques en raison de la petite longueur d'onde.

De nombreux matériaux naturels et fabriqués par l'homme tels que les lampadaires, les murs de construction et les arbres peuvent refléter le signal et provoquer une propagation par trajets multiples. Cependant, certains obstacles tels que le feuillage, les murs métalliques, les puits d'ascenseur, les bâtiments externes et les fenêtres externes teintées modernes peuvent provoquer une atténuation élevée du signal et bloquer de nombreux composants à trajets multiples dans la communication mmWave [40]. Par conséquent, dans les réseaux mmWave, nous devons concevoir un processus pour trouver le chemin direct de ligne de site (LoS) et les chemins puissants réfléchis et dispersés (Non-LoS) pour créer les liens possibles dans différents environnements.

2.8 RoF basé sur les ondes millimétriques

Afin de prendre en charge les demandes croissantes de services de données et de trafic pour les communications intérieures à haut débit dans les réseaux 5G, il est nécessaire de déplacer le spectre de fréquences vers la bande des ondes millimétriques à haute fréquence allant de 30 à 300 GHz. Le spectre de fréquence millimétriques offre une énorme largeur de bande de transmission, mais souffre d'importantes pertes de propagation (les signaux de fréquence plus élevée ont plus de collisions avec les obstacles dans l'air et ont tendance à perdre leur énergie plus rapidement), telles que l'affaiblissement du trajet, la diffraction, les pertes atmosphériques, l'atténuation due à la pluie et les pertes dues au feuillage [46][47], ce qui tend à réduire la distance de transmission. Cette communication peut être mise à profit pour réduire la taille de la cellule couverte par une seule station de base, ce qui donne lieu à la technologie des petites cellules, des microcellules ou des pico cellules. Cette petite cellule, de taille très réduite et couvrant jusqu'à quelques mètres, nécessiterait un grand nombre de stations de base pour fournir des services à une zone plus large, ce qui augmenterait le facteur de réutilisation des fréquences [48] et accroîtrait le coût et la complexité du système.

Toutefois, la technologie RoF permet de surmonter les inconvénients liés à la propagation du signal car elle offre une structure simple et rentable avec une centralisation des opérations de signalisation, ce qui réduit le coût opérationnel et la latence :

- L'onde millimétriques est une bande nouvelle et moins utilisée.
- Les ondes à haute fréquence transportent beaucoup plus de données que les ondes à basse fréquence.
- Il serait en mesure de fournir une latence réduite en raison de la réduction de la taille des cellules pour la transmission des signaux en ondes millimétriques.
- Il offrirait une structure simple et rentable, car les opérations de traitement du signal seraient centralisées et effectuées par le CS plutôt que par la BS, en raison de la distribution radio par fibre.

- L'efficacité spectrale pourrait être améliorée en incorporant un schéma massif d'entrées multiples et de sorties multiples.
- Le coût opérationnel pourrait être réduit grâce au réseau de distribution par fibre.
- Une plus grande réutilisation des fréquences en raison de la petite taille de la transmission cellulaire permettant une meilleure connectivité pour les applications à haut débit.

L'un des principaux problèmes liés au système RoF basé sur les ondes millimétriques à mettre en œuvre pour les applications 5G est sa génération et sa transmission. La génération de signaux haute fréquence en ondes millimétriques peut être réalisée dans le domaine électrique et optique [49].

La méthode de génération électrique est un processus assez difficile et fastidieux, c'est pourquoi les méthodes de génération photonique/optique de signaux d'ondes millimétriques avec transmission RoF sont un sujet de préoccupation.

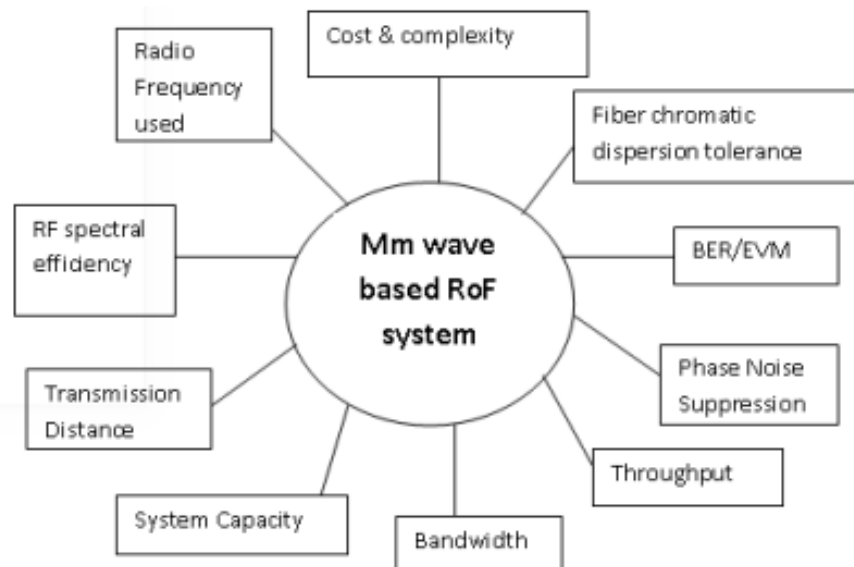


Figure 2. 5: Paramètres du réseau frontal RoF basé sur les ondes millimétriques

2.9 Génération de signaux optiques à ondes millimétriques

Il est souhaitable de transmettre des données en grande quantité en utilisant la radiofréquence (RF) en raison du facteur de mobilité. La première démonstration de système ROF remonte à 1990 [50], lorsque Cooper a transmis un service de téléphonie sans fil à 4 canaux en utilisant une technique de modulation directe dans une fibre optique monomode standard (SMF). Depuis lors, cette technologie a connu des avancées, de nombreuses autres technologies étant développées conjointement dans le but de maximiser la largeur de bande et le débit binaire pour une transmission efficace, par exemple en utilisant le multiplexage des sous-porteuses [50], le multiplexage par répartition en longueur d'onde [51-52], le

multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) [53] et la modulation par déplacement de phase (PSK) [54].

La technique de modulation directe est souvent utilisée pour moduler la RF dans la diode laser à modulation directe (LD) en raison de la simplicité de la conception du système et de son coût moindre par rapport à la technique de modulation externe utilisant le modulateur Mach-Zehnder (MZM).

Cependant, il existe une limite à la largeur de bande qui peut être modulée directement à l'aide d'une diode laser en raison du chirp qu'elle produit à une fréquence supérieure à 10 GHz [55,56]. Ce chirp est dû au phénomène non linéaire dans le milieu de la fibre optique, où une variation soudaine de la longueur d'onde centrale entraîne un élargissement du signal à des vitesses de transmission élevées, une détérioration du taux d'erreur binaire (TEB) et une baisse du rapport signal/bruit (RSB). C'est pourquoi, alors que la fréquence augmente dans la région des ondes millimétriques pour prendre en charge les transmissions sans fil de l'ordre du gigabit par seconde (Gbps), de nombreuses méthodes optiques ont été proposées pour générer un signal d'ondes millimétriques en interne dans le système optique sans injecter de signal d'ondes millimétriques dans le système [57-58].

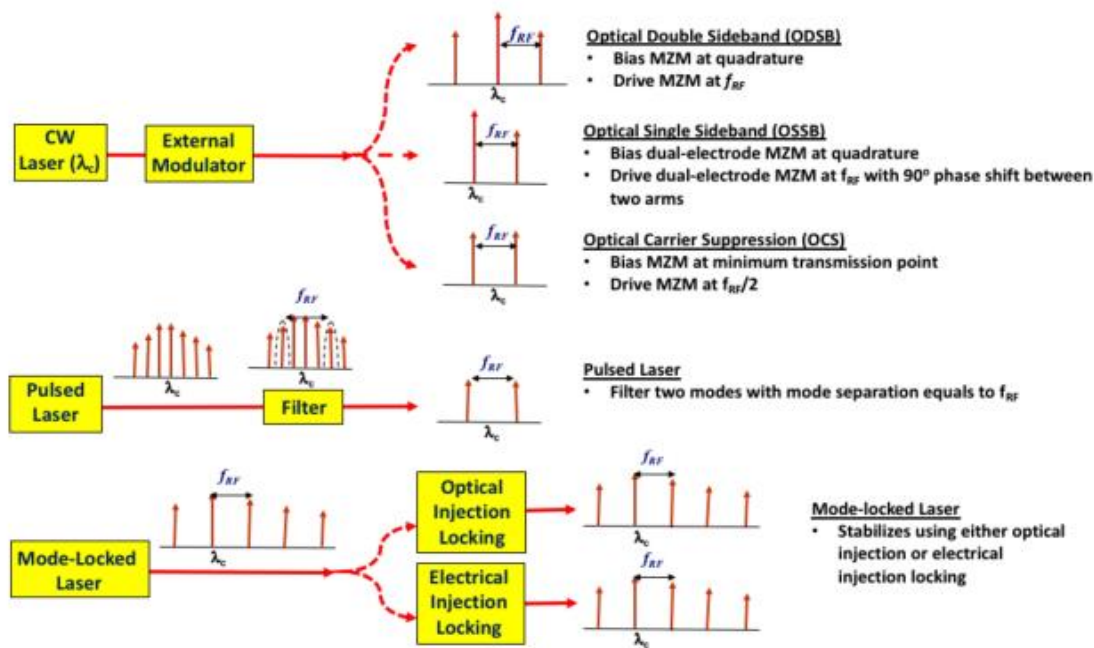


Figure 2. 6: Un résumé de la génération de signaux optiques en ondes millimétriques basée sur un modulateur externe, des lasers pulsés et à verrouillage de mode.

2.10 Communication MIMO massive par ondes millimétriques

Les technologies mmWave et MIMO massif peuvent être combinées ensemble pour répondre aux exigences des futurs réseaux 5G. Cette combinaison technologique des systèmes MIMO massifs et

mmWave a donné naissance à la technologie mmWave-massive MIMO [59], qui offre un large éventail d'avantages : (a) disponibilité des gains de multiplexage et de réseau en raison du grand nombre d'antennes d'émission et de réception, (b) débits de données extrêmes en raison de la large bande passante que l'on trouve aux fréquences millimétriques et (c) réduction des interférences en raison de la formation de faisceaux étroits.

En utilisant les fonctionnalités conjointes de l'énorme bande passante disponible dans les bandes de fréquences des sondes millimétriques et des gains de multiplexage élevés avec des réseaux d'antennes massifs, le MIMO massif mmWave a le potentiel d'améliorer le débit de l'utilisateur, d'augmenter la capacité du réseau mobile et d'améliorer l'efficacité spectrale et énergétique [60].

Le MIMO massif en ondes millimétriques est une technologie qui intègre le potentiel de l'énorme bande passante disponible en ondes millimétriques et les gains élevés des réseaux d'antennes MIMO massives. En utilisant le MIMO massif en ondes millimétriques dans le domaine du HetNet, on peut proposer aux réseaux mobiles de la prochaine génération de bénéficier d'une densification extrême de l'infrastructure, de grandes quantités de nouvelle bande passante et de beaucoup plus d'antennes à une très grande échelle.

Ces combinaisons offrent la possibilité de prendre en charge une pléthore de services à haut débit pour les applications gourmandes en bande passante [61].

La large bande passante disponible et l'efficacité spectrale élevée font du MIMO massif en ondes millimétriques une option prometteuse pour améliorer de manière significative le débit global du système pour les futurs réseaux cellulaires 5G. L'inconvénient des communications à ondes millimétriques est la perte de trajet élevée pendant la transmission. Habituellement, les systèmes de communication à ondes millimétriques utilisent la formation de faisceaux directionnels et la combinaison en utilisant de grands réseaux d'antennes pour réduire l'affaiblissement du trajet. Pour exploiter les possibilités offertes par la technologie MIMO massive en ondes millimétriques, il faut relever un grand nombre de défis dans tous les domaines de la théorie et de l'ingénierie des communications. Parmi les défis à relever, citons [61] : les questions de théorie de l'information, la modélisation des canaux, les techniques d'estimation des canaux, la conception de l'architecture des antennes et des émetteurs-récepteurs RF, les formes d'onde et les schémas d'accès multiple, la gestion des interférences, les transmissions de retour, la gestion de la mobilité, la modélisation au niveau du système, la normalisation, etc.

2.11 Conclusion

Avec l'explosion des nouveaux systèmes de communication, les bandes d'ondes millimétriques deviennent une solution prometteuse pour les réseaux mobiles de 5G. La saturation des bandes passantes a obligé les chercheurs à trouver une nouvelle bande plus large, riche par ses fréquences élevées et ses larges bandes passantes avec une longueur d'onde petite. La technologie radio sur fibre à ondes millimétriques (MMW-RoF) est la dernière technologie qui peut renforcer le taux d'information et donner une disponibilité constante dans l'organisation de communication.

Ce chapitre présente une étude complète des ondes millimétriques, de leurs applications, de leurs avantages, leurs caractéristiques et de leurs limitations dans un premier temps. Puis on a exploité les différentes techniques de génération d'ondes millimétriques dans les systèmes ROF disponibles. Enfin, nous avons parlé de la communication MIMO massive par ondes millimétriques.

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

Chapitre 3

Étude d'une liaison MMW radio sur fibre

3.1 Introduction

Les systèmes de communication optique sont de plus en plus complexes sur une base presque quotidienne. La conception et l'analyse de ces systèmes, qui comprennent normalement des dispositifs non linéaires et des sources de bruit non gaussiennes, sont très complexes et extrêmement chronophages. En conséquence, ces tâches ne peuvent désormais être exécutées de manière efficace et efficiente qu'à l'aide de nouveaux outils logiciels avancés tels que « l'OptiSystem ».

Afin d'étudier et de dimensionner les liaisons RoF, les différents composants optoélectroniques ainsi que la fibre optique seront modélisés et leurs caractéristiques seront spécifiées dans un environnement électrique à l'aide des outils de simulation disponibles sur le logiciel OptiSystem,

Dans un premier temps, nous présentons les différentes applications et caractéristiques du logiciel de simulation OptiSystem, suivi par une brève description des principaux critères de qualité. Ensuite nous allons présenter une architecture de système MMW-RoF et définir chaque bloc, et, nous allons décrire et expliquer les résultats de la simulation de ce système pour des différentes longueurs de fibre. Enfin, nous allons faire une conclusion concernant les résultats obtenus.

3.2 Présentation du logiciel OptiSystem :

Le logiciel OptiSystem développé par une société canadienne Optiwave ; Optical Communication System Design Software, il permet aux ingénieurs et aux chercheurs de concevoir, simuler et d'analyser des systèmes de transmission optique. La diversité des systèmes simulés peut être étendue par la possibilité d'insérer des fonctions réalisées par l'utilisateur et qui peuvent être ajoutées aux systèmes simulés.

Le logiciel OptiSystem permet de tester et d'optimiser pratiquement n'importe quel type de liaison optique, il est basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications par fibre optiques.

La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Construire le schéma bloc
- Analyser le schéma

L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale répartie en plusieurs parties (Figure 3.1)

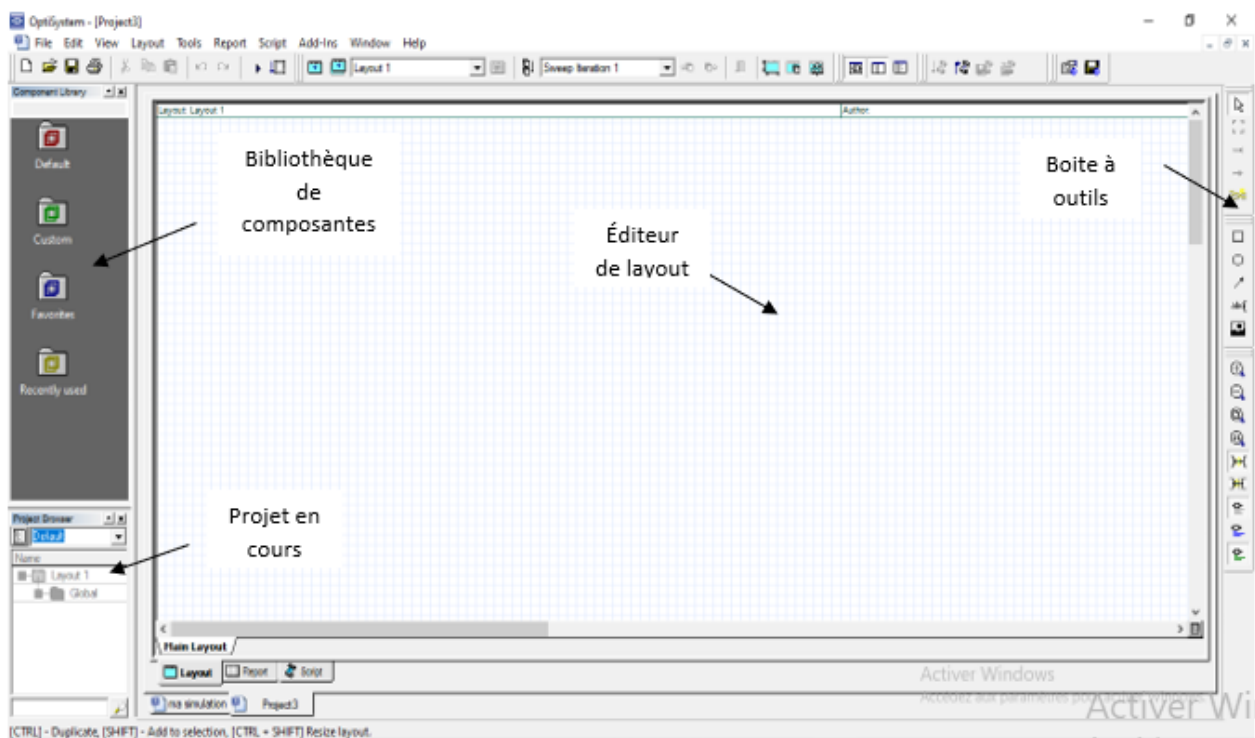


Figure 3. 1: Interface OptiSystem.

- Bibliothèque : une base de données de divers composants existants.
- Éditeur du Layout : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.
- Une boîte à outils : elle vous permet d'ajouter certaines indications (texte, rectangle, etc.) dans l'espace de travail pour plus de compréhension.
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.

3.3 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en les ajustant selon les paramètres des composants réels.
- La bibliothèque de composants permet de déduire des paramètres qui peuvent être mesurées à partir des équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation peuvent produire : le signal sonore, le diagramme de l'œil, le TEB...etc.

3.4 Avantages du logiciel OptiSystem

Parmi les avantages de ce logiciel:

- Fournir un aperçu de performances du système mondial de fibres optiques
- Évaluer les sensibilités des paramètres aidant aux spécifications de tolérance de conception
- Présenter visuellement les options de conception à des clients potentiels
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation approfondie du système
- Fournir le balayage automatique des paramètres et d'optimisation.

3.5 Applications du logiciel OptiSystem

Parmi les diverses applications d'OptiSystem nous allons citer les plus utilisées [62] :

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

3.6 Critères de qualité d'une transmission :

3.6.1 Taux d'erreur binaire (Bite Error Rate BER) :

Le taux d'erreur binaire est le rapport entre le nombre d'erreurs et le nombre de bits transmis. Statistiquement il s'agit de la somme de la probabilité qu'un bit « 1 » soit détecté comme un bit « 0 » et de la probabilité qu'un bit « 0 » soit détecté comme un bit « 1 ». En général le BER d'un système optique est inférieur ou égal à un taux de 10^{-9} [62]

$$BER = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits tranmis}} \quad (\text{III.1})$$

3.6.2 Facteur de qualité

Le facteur de qualité, ou le facteur Q, est un critère de qualité d'un signal optique. Il est obtenu à partir des statistiques du bruit des niveaux (1) et (0) du signal à détecter tel que

$$Q = \frac{I_1 - I_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (\text{III.2})$$

Où : I_1 et I_2 sont les valeurs moyennes qui représentent le signal utile et δ_1 et δ_2 sont les écarts types des densités de probabilité des symboles 1 et 0.

Q est d'habitude exprimé en dB en utilisant la formule suivante :

$$Q_{dB} = 20\log_{10}|Q| \quad (\text{III.3})$$

3.6.3 Diagramme de l'œil :

Le diagramme de l'œil est un oscilloscope spécialisé pour générer des séquences aléatoires et comparer le signal de sortie de la liaison optique avec le signal d'entrée, il est souvent utilisé pour décrire la dégradation de bruit et la dispersion du signal numérique.

Le principe général est que plus la zone centrale est grande plus on a une meilleure qualité du signal reçu.

La largeur du signal est associée à la possibilité de différencier facilement les échantillons successifs, tandis que la hauteur du lobe central exprime le rapport d'énergie entre le signal original et le bruit du canal.

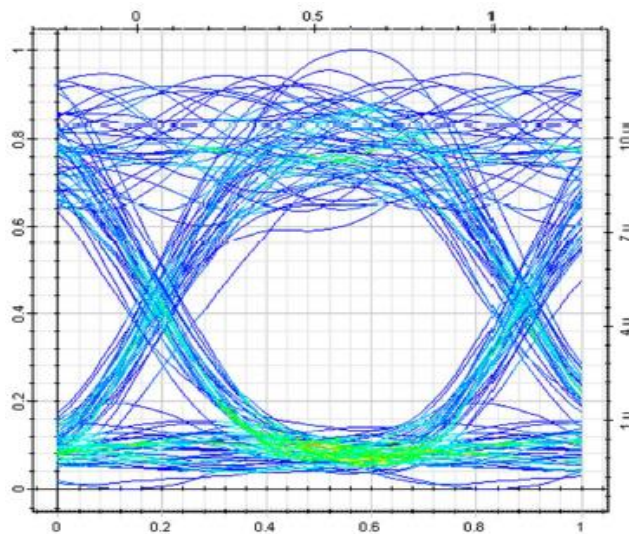


Figure 3. 2: Diagramme de l'œil.

3.7 Description de la chaine de transmission Radio sur fibre RoF

La figure 3.3 représente l'architecture générale de notre liaison RoF, simulée avec le logiciel OptiSystem. Elle comporte une partie émettrice, partie de transmission optique et une partie réception.

3.7.1 Le schéma général de la liaison Radio sur fibre

La figure suivante nous montre le schéma général de la liaison Radio sur fibre.

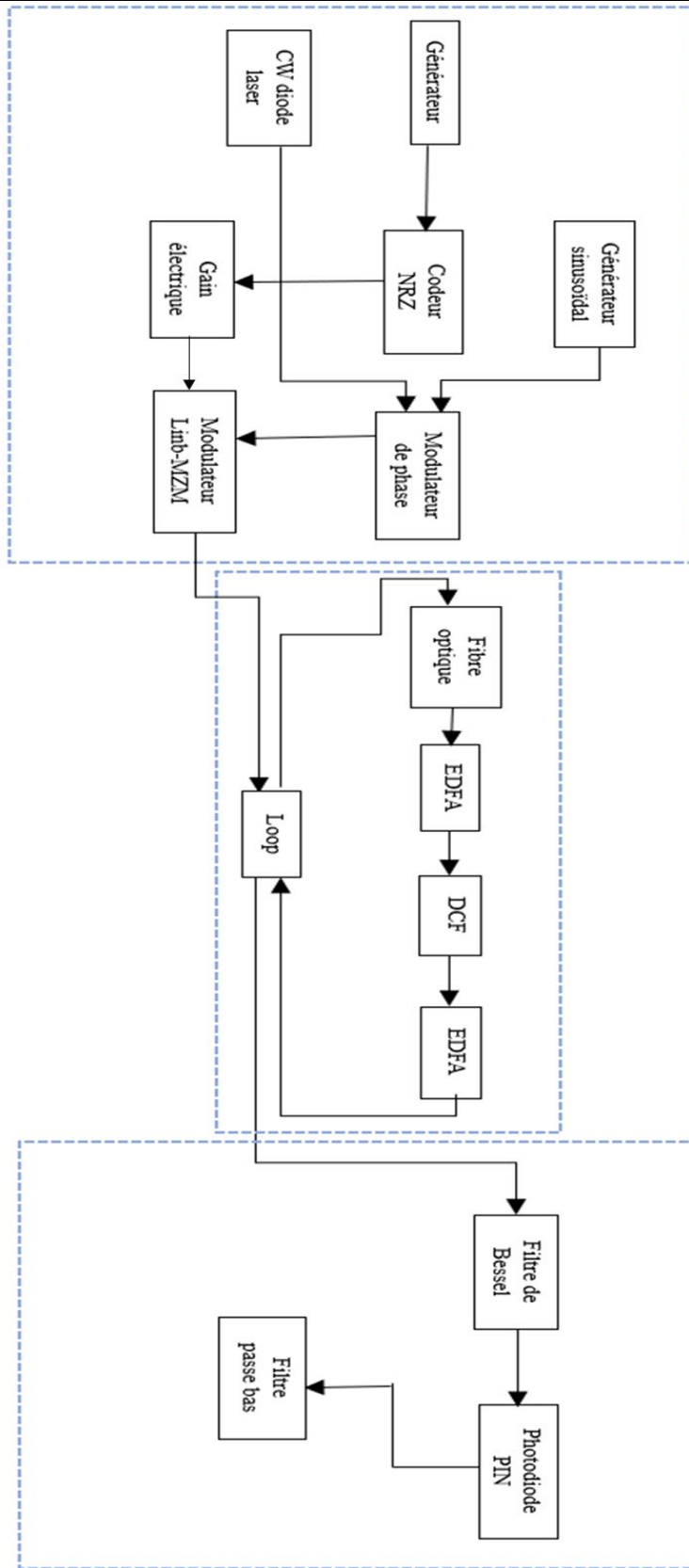


Figure 3. 3: Schéma générale de la liaison Radio sur fibre.

3.7.2 Description de partie d'émission :

Le schéma ci-dessous nous montre la partie qui compose le circuit d'émission :

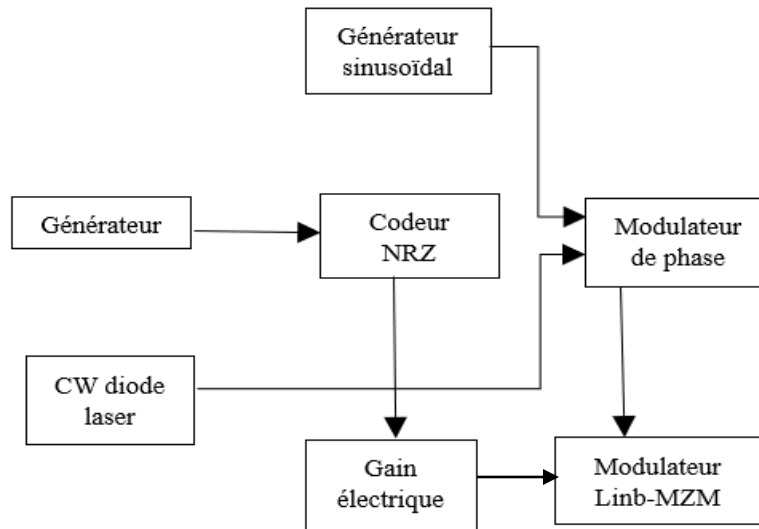


Figure 3. 4: Schéma bloc d'émission

On trouve sur ce schéma bloc les éléments suivants :

- **Un Générateur de bit** : PRBS (Pseudo-random bit séquence) génère une séquence binaire pseudo-aléatoire selon différents modes de fonctionnement. La séquence binaire est conçue pour se rapprocher des caractéristiques des données aléatoires.
 - Débit=1Gbits/s.
- **Un codeur de type NRZ** (no return to zero) génère un signal codé sans retour à zéro.
- **Un générateur de fonction Sinusoïdale** de type Sine generator : génère un signal électrique sinusoïdal.
 - Fréquence =60GHz
 - Amplitude=1 a.u
- **Une diode laser** (CW Laser) est un laser à ondes continues (ou ondes constantes) de longueur de 1550nm.
 - Fréquence =193.1THz
 - Puissance d'émission=6 dBm
 - Largeur de raie=0.1MHz

La figure suivante montre le spectre de signal en sortie de CW laser :

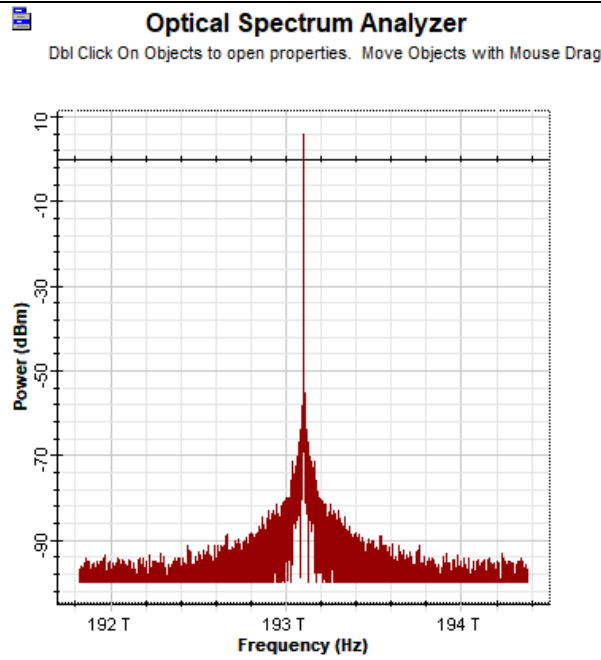


Figure 3. 5: Spectre en sortie du laser

- **Gain électrique** élément de gain idéal.
- **Modulateur Linb-MZ** ce composant simule un modulateur Mach-Zehnder en Niobate de Lithium. Le LiNb-MZ est un MZM à double électrode, généralement polarisé en quadrature. Il permet d'augmenter la fréquence du signal d'entrée par son processus de réflexion. Le LiNbO3 est un cristal qui agit comme un miroir pour réfléchir le signal lumineux à l'intérieur du dispositif et réalise une émission stimulée par la tension appliquée au modulateur. Le LiNbO3 offre le meilleur compromis entre faibles tensions de polarisation, largeur de bande élevée et faible perte d'insertion.
 - Taux d'extinction=100dB
 - Tension de modulateur=2V

3.7.3 Le canal de transmission :

Le schéma du canal de transmission est présenté sur la Figure 3.6.

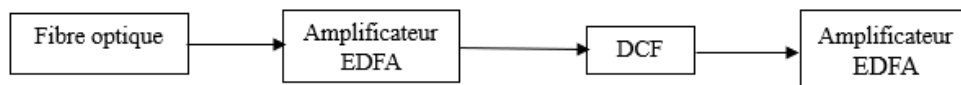


Figure 3. 6: Schéma bloc canal de transmission.

• **La fibre optique** monomode bidirectionnelle intercalé entre des amplificateurs optiques pour améliorer le rendement en puissance, avec les paramètres suivants :

- Longueur d'onde $\lambda=1550\text{nm}$
- Atténuation $\alpha=0.2\text{ dB/km}$
- Dispersion chromatique =16 ps/nm/km

• **Un amplificateur optique EDFA** de Gain 10 dB, est un amplificateur optique qui amplifie directement un faisceau laser moduler. Aucune conversion photoélectrique n'est nécessaire. Il est habituellement utilisé pour améliorer l'intensité des signaux optiques transmis par un système de communication à fibre optique.

- Gain =10 dB
- La puissance de bruit =6 dB

• **DCF** : Afin d'améliorer les performances globales du système et de réduire autant que possible les performances de transmission influencées par la dispersion, plusieurs technologies de compensation de la dispersion ont été proposées. Parmi les diverses techniques proposées dans la littérature, celles qui semblent prometteuses dans l'immédiat pour la compensation et la gestion de la dispersion : fibres à compensation de dispersion (DCF).

Dans cette technique, une fibre ayant un coefficient de dispersion négatif important est utilisée avec une fibre monomode (SMF) ayant un coefficient positif. La dispersion globale de la liaison par fibre est donc nulle. La longueur de la fibre DCF est plus courte que celle de la fibre monomode. Le placement de la fibre de compensation de dispersion dans la transmission joue un rôle important, qui décide de la qualité du signal à l'extrémité du récepteur [63].

La DCF peut être insérée soit au début (techniques de pré-compensation ou à la fin (techniques de post-compensation) entre deux amplificateurs optiques comme montre la Figure 3.6 ou en compensation de mélange mais il donne une grande empreinte et des pertes d'insertion.

- Longueur de fibre compensatif=10km

3.7.4 Description de partie réception :

La figure suivante montre le schéma en bloc de partie réception

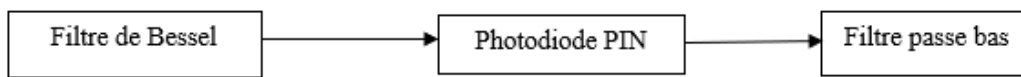


Figure 3. 7: Schéma bloc de réception.

Dans cette partie on trouve :

- **Un Filtre passe bande de Bessel** d'ordre 1 de bande passante de 160GHz, également appelé filtre Thomson, est un filtre polynôme. Il permet de minimiser la distorsion des signaux complexes pendant le fonctionnement filtre.
 - La fréquence =193.1THz
 - La bande passante =160GHz
 - Profondeur =100 dB
 - Ordre =1
- **Une Photodiode PIN** Son rôle est de convertir le signal optique en un signal électrique avec le minimum de distorsions. Les performances requises pour une photodiode sont : une rapidité de détection, une bonne sensibilité, et avec un bon rapport signal sur bruit.
 - Rendement =1 A/W
 - Courant d'obscurité = 10 nA
 - Bruit Thermique $1e-024W/Hz$
 - La fréquence centrale 193.1THz
- **Un Filtre passe bas de Bessel** filtre avec une fonction de transfert de fréquence de Bessel.
 - Profondeur =100dB

3.7.5 La modulation de phase optique PM

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

3.7.6 La modulation CSRZ

Le format de modulation à retour à zéro avec suppression de la porteuse (CSRZ) suscite de l'intérêt en raison de sa tolérance supérieure aux dégradations non linéaires et de dispersion par rapport aux formats plus conventionnels de non-retour à zéro (NRZ) et de retour à zéro (RZ) [64]. Le CSRZ réduit la composante principale de la porteuse, qui transporte la majorité de la puissance du signal pour le format RZ, et rétrécit le spectre optique, ce qui donne un format avec une efficacité spectrale plus élevée et une plus grande tolérance à la dispersion chromatique.

3.8 Résultats de simulation

Dans cette partie nous allons évaluer les performances d'une simulation du système MMW-RoF obtenus avec une modulation externe utilisant un modulateur Linb-Mach-Zhender, nous allons étudier l'influence de chaque paramètre sur la qualité de transmission. La figure (3.8) ci-dessous montre le schéma synoptique sous OptiSystem de la chaine de transmission.

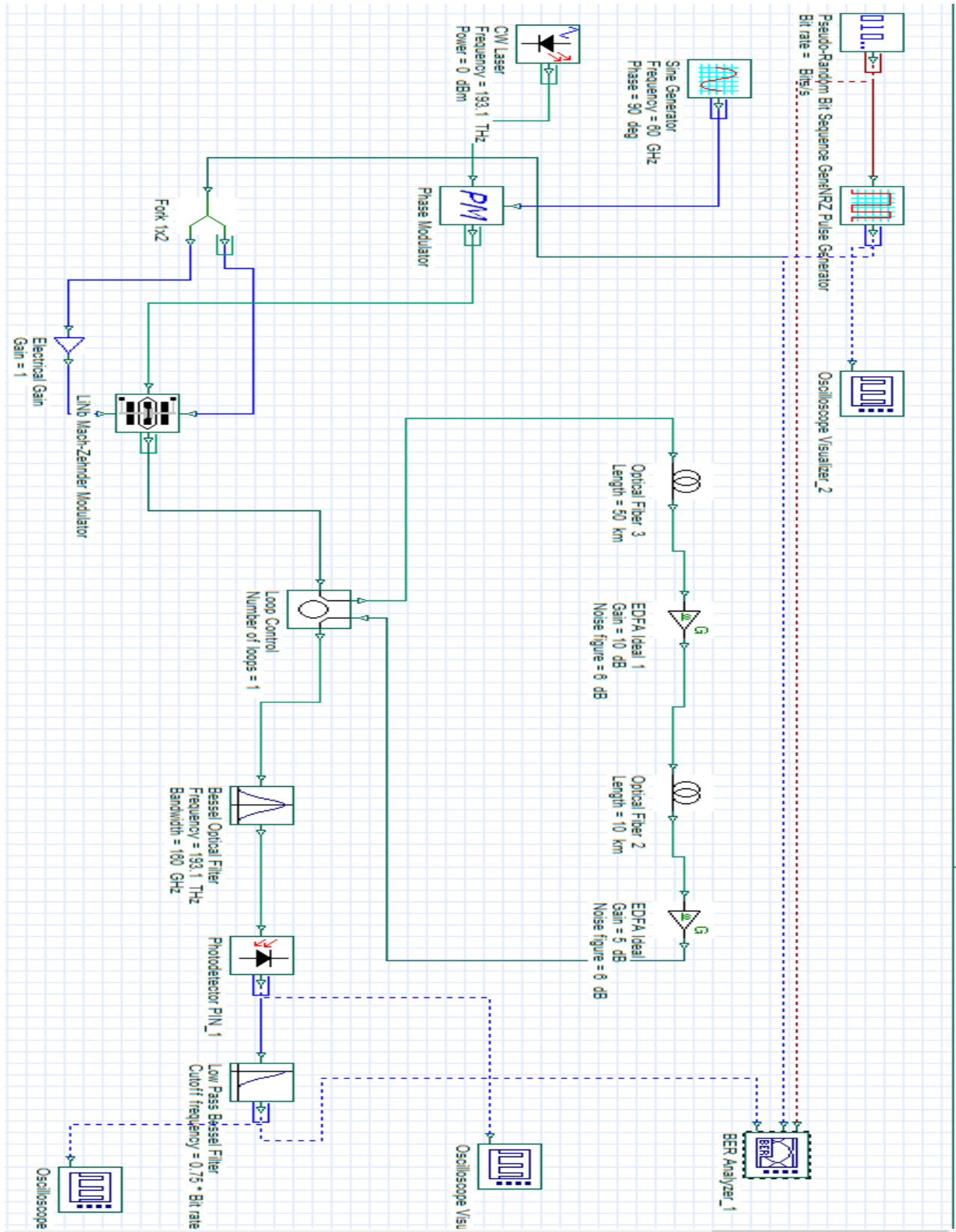


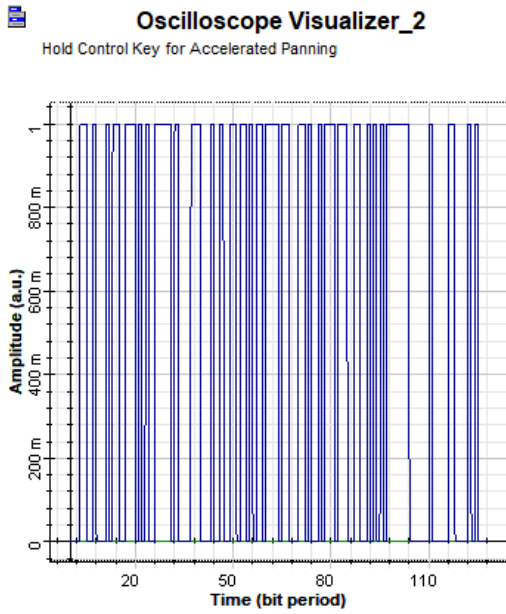
Figure 3. 8: Schéma synoptique de la liaison RoF

3.8.1 Description du système étudié

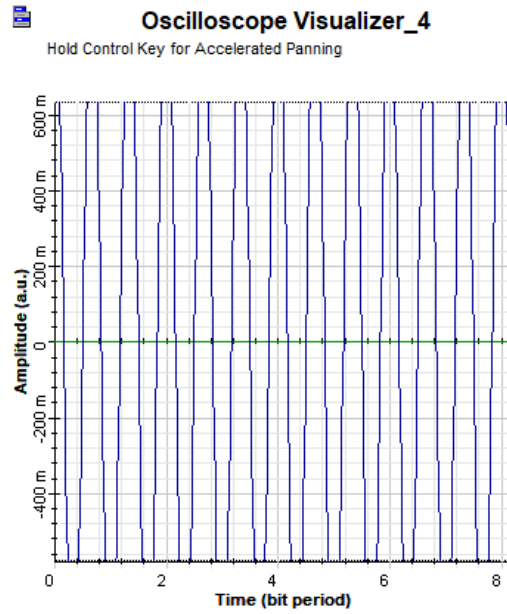
Dans cette étude, on a codé la séquence de bits générée par pseudo-générateur par un codeur NRZ, ce signal passe à travers le Linb-Mach-Zhender. La fréquence du premier laser est de 193.1THz et l'espacement entre canaux est de 0.1THz. Les signaux RF sont modulés par le modulateur de phase avec des signaux optiques provenant du laser CW ensuite sont combinés dans le modulateur LiNb- Mach-Zhender. On a fixé le débit de transmission à 40 Gb/s et la fréquence à 60GHz.

La sortie de modulateur est transmise sur une fibre monomode avec une longueur d'onde de référence de 1550 nm et une longueur de fibre de 50 km., puis amplifiée par un amplificateur à fibre dopée à l'erbium en ligne avec un gain de 10dB. Au niveau du récepteur les signaux sont filtrés à l'aide d'un filtre de Bessel d'ordre 1, une photodiode est utilisée pour récupérer le signal électrique original et le signal récupéré est envoyé au filtre passe-bas. L'analyseur de BER à l'extrémité de réception estime le BER, le facteur Q, et le taux d'erreur binaire minimum.

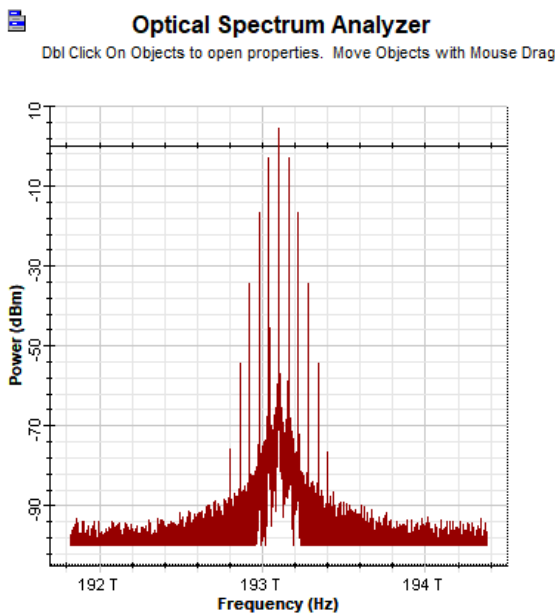
La figure 3.9 nous montre les signaux au niveau du circuit d'émission. La « Figure a » présente les données binaires fournies par la séquence de bits pseudo-aléatoire (PRBS) à un débit de 1Gbits/s qui sont converties en impulsions électriques sans retour à zéro (NRZ) pour générer un signal en bande de base. Sur la « Figure b » on voit le signal électrique modulé. La « Figure c » illustre le spectre du signal optique après modulation de phase. Le spectre du signal optique après le modulateur Linb-MZM est visible sur la « figure d ».



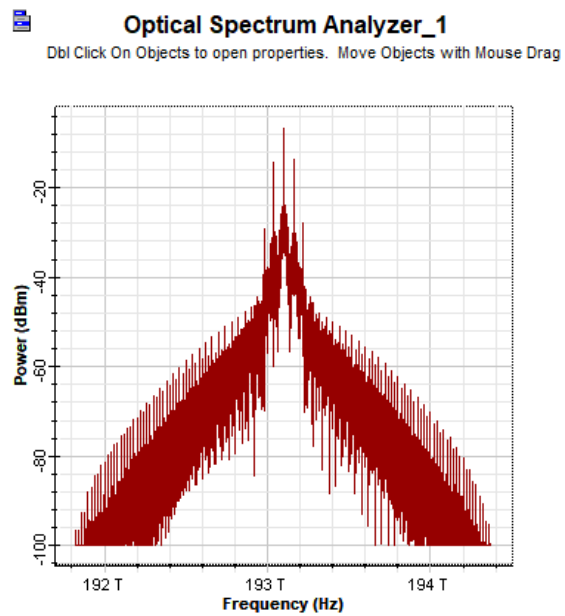
« Figure a »



« Figure b »



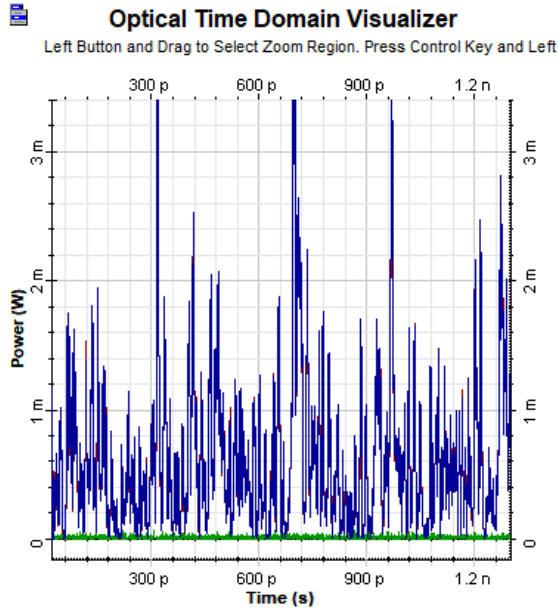
« Figure c »



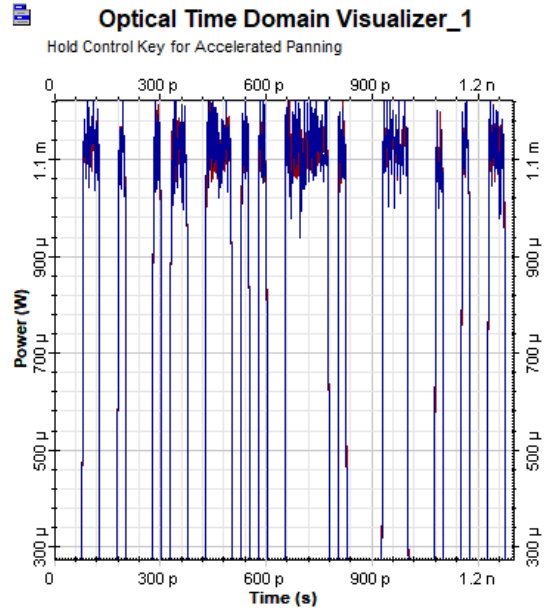
« Figure d »

Figure 3. 9: Signaux au niveau du circuit d'émission

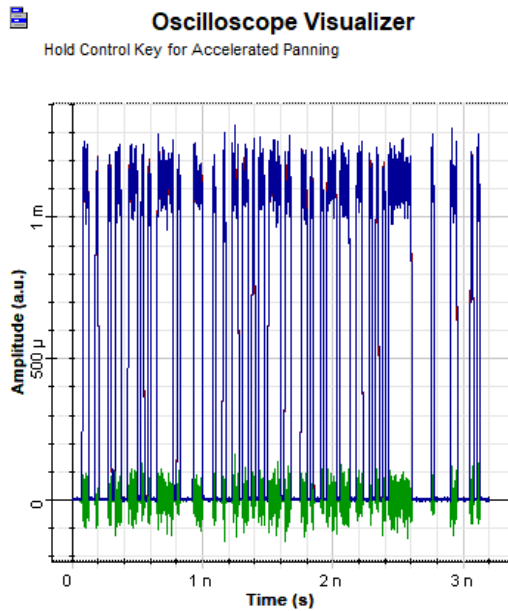
La figure 3.10 représente les différentes configurations du signal reçu. La « Figure a » présente le signal modulé après amplification. Le signal filtré par un filtre de Bessel avec une fréquence de 191.3GHz est montré sur la « Figure b ». Ensuite ce signal optique est transformé par un photodétecteur PIN en un signal électrique comme montre la « Figure c ». La « Figure d » illustre le signal après filtrage passe bas de Bessel.



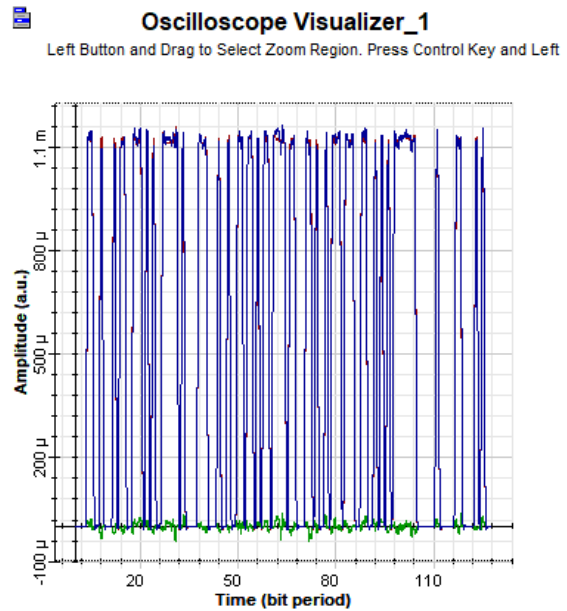
« Figure a »



« Figure b »



« Figure d »



« Figure c »

Figure 3. 10:Les signaux au niveau du circuit de réception

3.8.2 Comparaison entre les signaux d'origine :

Les figures 3.11 et 3.12 montrent le signal émis et reçu dans le domaine temporel. Nous remarquons que les deux signaux sont pratiquement identiques, mais avec une légère distorsion et une

petite quantité de perte de puissance causée par les différents éléments de la chaîne de transmission.

Mais finalement on voit que le même message binaire est récupéré en sortie.

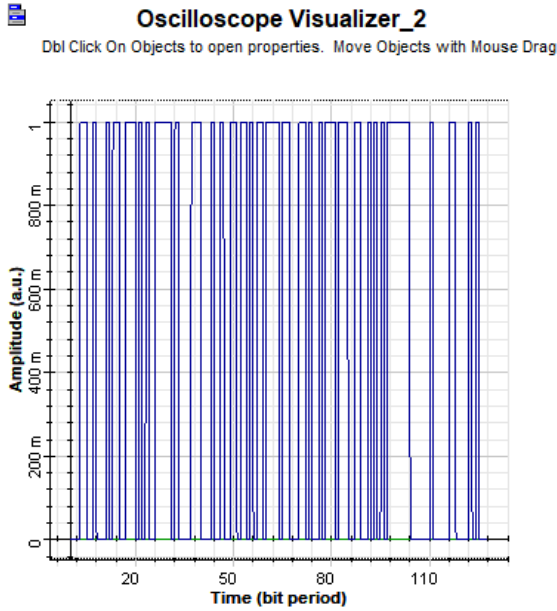


Figure 3. 11: Signal d’entrée

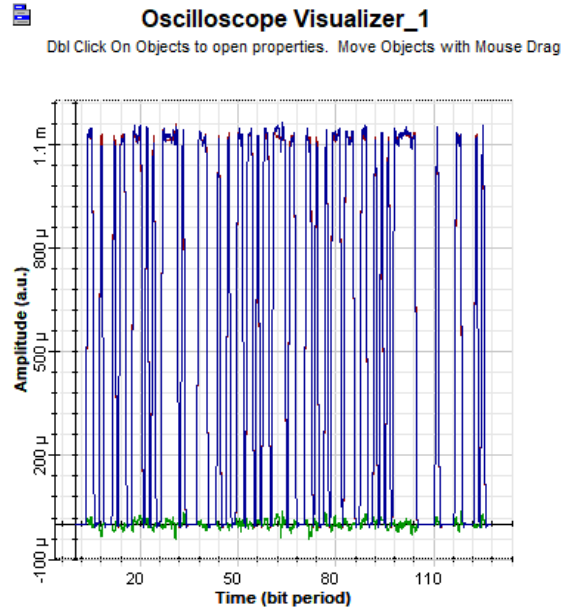


Figure 3. 12: Signal de sortie

3.8.3 Effet de variation de la longueur de la Fibre

Pour mieux étudier ce système et voir la qualité de transmission. On va faire varier la longueur de la fibre optique de 50 à 300 km, en fixant le débit à 40 Gb/s, la fréquence à 60GHz, la puissance d’émission à 6 dBm, l’atténuation de fibre à 0.2 dBm et la longueur d’onde à 1550 nm. On note à chaque fois le BER et le facteur de qualité.

Le tableau (3.1) ci-dessous montre les résultats de la simulation pour différentes longueurs de

Longueur de fibre (km)	50	100	150	200	250	300
Facteur de qualité	62.66	40.57	29.40	22.82	18.37	15.48
Taux d’erreur binaire BER	0	0	1.31 e-190	7.39 e-116	6.69 e-076	1.67 e-054

fibre :

Tableau 3.1:Résultats de simulation

Les figures 3.13 et 3.14 montrent le facteur de qualité et le BER en fonction de la longueur. On constate qu'une meilleure qualité de signal est obtenue à une distance de 50km, mais elle se dégrade au fur et à mesure que la distance augmente. On remarque que le taux d'erreur binaire est inversement proportionnel au facteur de qualité.

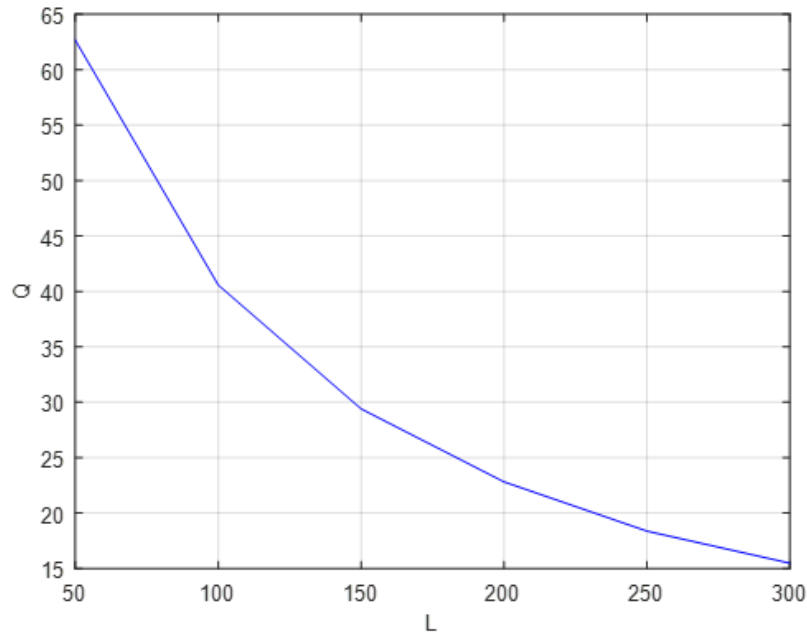


Figure 3. 13: facteur de qualité $Q = f(\text{longueur de fibre})$.

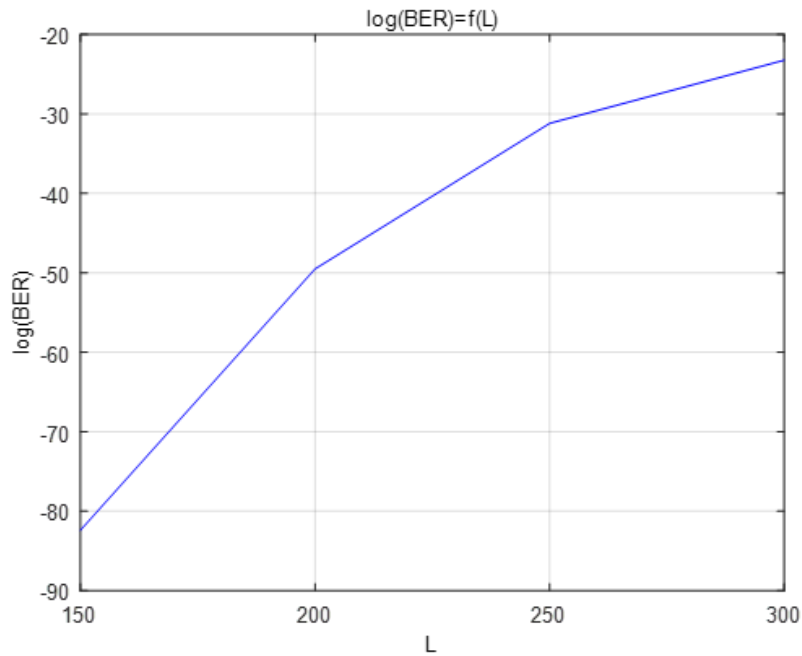
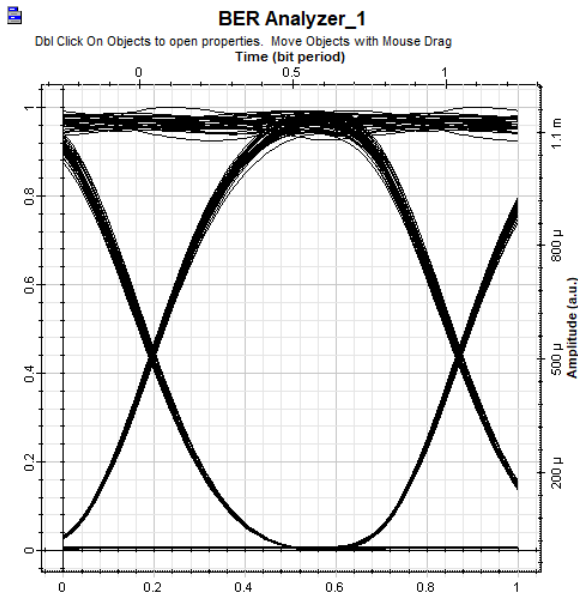


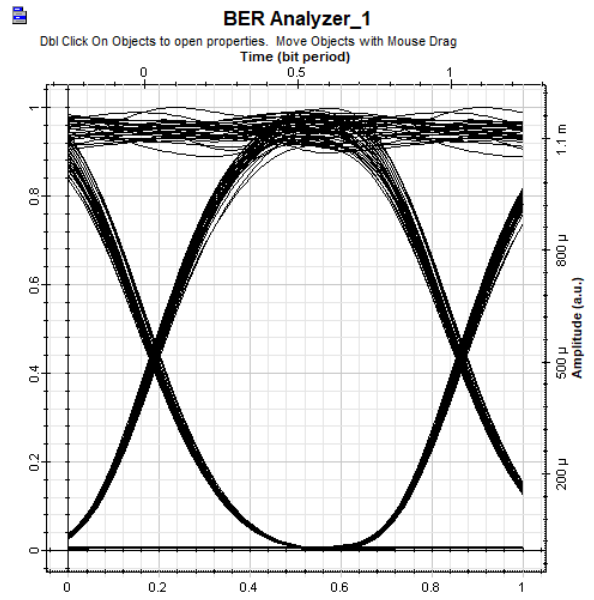
Figure 3. 14: Taux d'erreur binaire $\log(\text{BER}) = f(\text{longueur de fibre})$.

➤ La figure suivante montre le diagramme de l'œil pour les différentes longueurs de fibre.



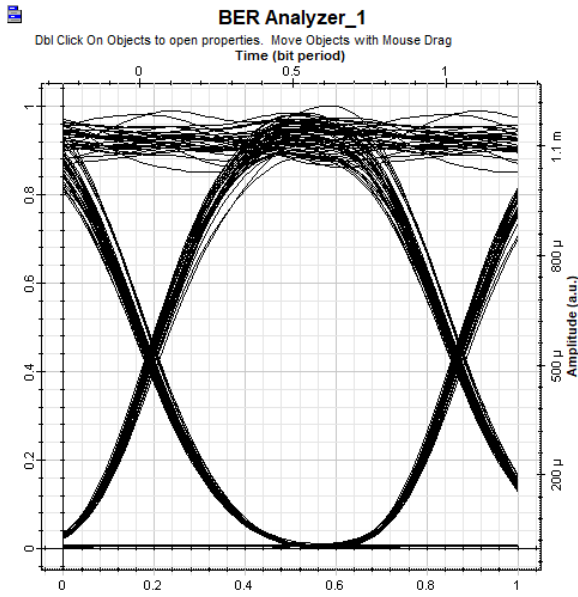
« Figure a »

Longueur de fibre = 50km



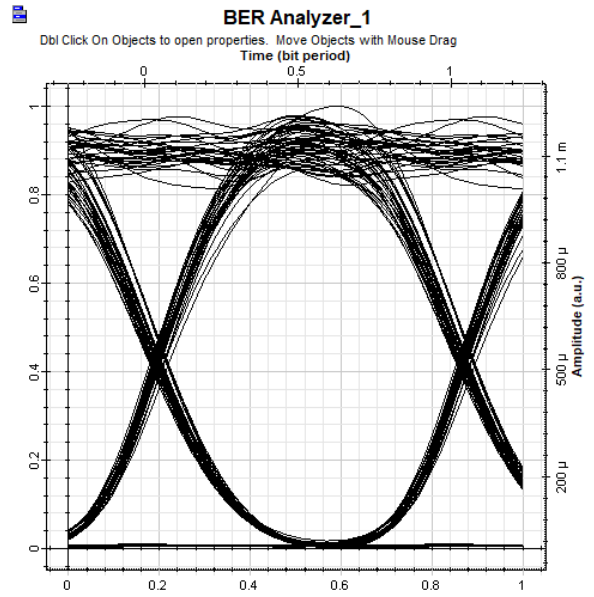
« Figure b »

Longueur de fibre = 100km



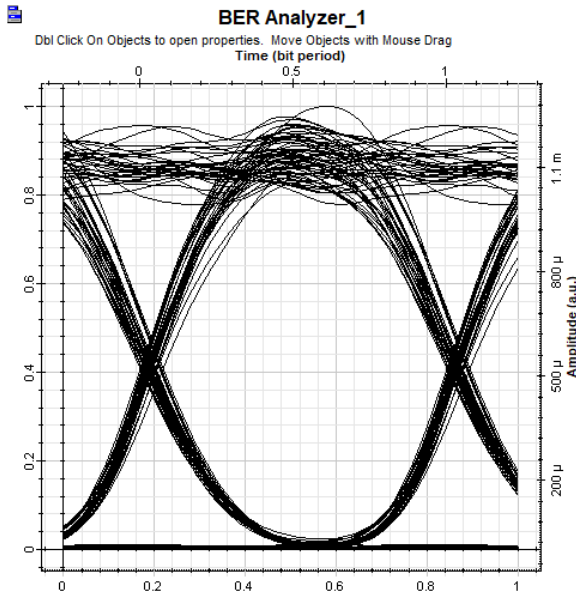
« Figure d »

Longueur de fibre = 150km



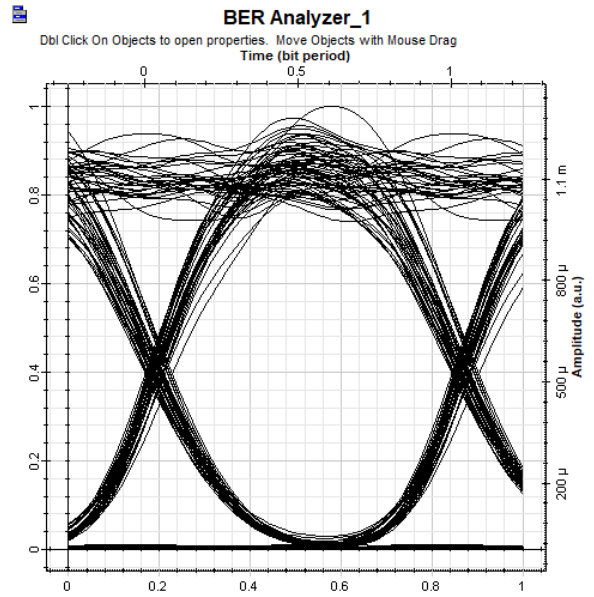
« Figure c »

Longueur de fibre = 200km



« Figure e »

Longueur de fibre =250km



« Figure f »

Longueur de fibre =300km

Figure 3. 15: Diagramme de l'œil pour différentes longueurs de fibre

D'après les figures ci-dessus, on voit bien que l'œil à une bonne ouverture comme synonyme d'une bonne qualité de transmission, on observe que plus qu'on augmente la longueur de fibre plus que la qualité de transmission se dégrade en observant l'ouverture de l'œil.

3.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons effectué nos recherches sur la variation de la qualité de transmission en agissant sur différents paramètres tel que la longueur de la fibre.

Pour cela nous avons défini les différents critères d'amélioration de la qualité du signal et de la transmission: facteur de qualité et taux d'erreur binaire. On a fixé le débit de transmission à 40 Gb/s et la fréquence millimétrique à 60GHz.

Après simulation du système MMW-RoF avec une modulation externe à base d'un modulateur Mach-Zhender en Niobate de Lithium, on peut conclure que la qualité de transmission est préservée.

Conclusion générale

Les communications sans fil ont été l'un des domaines de développement technologique les plus actifs aujourd'hui, portés par une technologie hybride appelée "radio sur fibre optique", qui est basée sur l'exploitation des avantages de l'optique pour la propagation radio des signaux de fréquence sur des liaisons optiques.

La planification du cadre de transmission MMW-RoF pose de nombreux problèmes. C'est une innovation prometteuse qui peut soutenir un taux d'information élevé et offrir une disponibilité constante dans l'organisation de la communication de pointe. L'élaboration d'un plan de transmission pour le réseau MMW-RoF, moins déroutant et financièrement avantageux, est un processus de recherche continu. Il existe quelques innovations en matière de support de transmission utilisées pour les tracés d'organisation de bandes étendues qui constituent un concurrent solide pour les systèmes de transmission radio par fibre optique.

En ce sens, notre mémoire consiste à étudier la transmission des signaux RF dans les systèmes de transport des données à ondes millimétriques à la fréquence de 60 GHz par la technique RoF.

Dans un premier temps, nous avons présenté la fibre optique et ses caractéristiques, et le défi principal exigeant l'infrastructure de la 5G devra s'appuyer sur un réseau à fibre qui nécessite des liaisons RoF. Nous avons étudié les différentes architectures RoF, les composants optiques et radiofréquences, les techniques de génération des signaux RF ainsi que les différentes limitations connues lors de la propagation du signal.

Le deuxième chapitre a été consacré pour l'étude approfondie des ondes millimétriques, on a exploité les différentes techniques de génération d'ondes millimétriques dans les systèmes ROF disponibles. Enfin, nous avons parlé de la communication MIMO massive par ondes millimétriques.

Dans le troisième chapitre nous avons proposé un système (RoF) en utilisant une modulation externe à l'aide d'un modulateur Mach-Zhender en Niobate de Lithium et testé la transmission de signaux RF de 60 GHz sur une fibre monomode standard. Comme la fréquence centrale est toujours autour de 193,1 THz, elle ne provoquera pas de déviation importante du signal reçu. Les résultats de la simulation ont montré qu'avec l'augmentation de la longueur de la fibre le facteur de qualité Q diminue et le taux d'erreur binaire minimum augmente. Une comparaison entre signal d'entrée et de sortie a été

effectuée. Un bon diagramme de l'œil et un faible BER ont été obtenus, ce qui implique une meilleure performance du système.

Références

- [1] D. Seynabou, « Transmissions radio haut débit multiservices sur fibres optiques - Application à l'optimisation de la capacité utilisateurs en emprises de transport », Thèse de doctorat pour obtenir le grade de Docteur, Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS Discipline, 23/02/2012.
- [2] A. Benammar & W. Miloudi Walid « étude d'une liaison optique WDM Radio sur Fibre », Master en fjehin Télécommunications Spécialité Technologie des Systèmes de Télécommunications, 12/06/2017.
- [3] M.Bennat, « Effet de la dispersion et de la modulation directe sur une liaison DWDM » Master en Réseaux et Télécommunication, Université de Tlemcen, 2018.
- [4] www.syscope.net/elec/B33.pdf.
- [5] P.Lecoy, « communication sur fibres optiques », Réseaux, systèmes et télécoms, Hermès – Lavoisier,2014
- [6] http://igm.univmlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/fibre.html.
- [7] C. Amari, « Optimisation des paramètres d'une liaison optique » Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia 2013.
- [8] R.Saidi, « Etude d'une Structure de Liaison par Fibre Optique : Caractérisation de la Propagation et Bilan Energétique » Magister En Electronique, Université Mohamed Kheider, Biskra, 18/03/2010.
- [9] A.Ngoma, « Radio-over-fiber technology for broadband wireless communication systems », Thèse de Doctorat, Université Technique d'Eindhoven, 2005.
- [10]M. R. Tab & D. Fersaoui, «Etude d'une liaison radio sur fibre optique»,thèse doctorat Saida,Université Dr. Tahar Moulay–Saida, 2018.
- [11]H. Le Bras,« Étude des réseaux radio sur fibre dans le contexte des réseaux d'accès et privés », thèse de doctorat en Informatique, télécommunication et électronique, Université Pierre et Marie Curie de Paris, 13 novembre 2008.
- [12]L. Hexin,« Radio sur fibre : réseaux, couvertures radio, architectures et dimensionnements matériels » Sciences de l'ingénieur [physics]. Télécom Bretagne,Université de Bretagne Occidentale, 2013.
- [13]M. A. Elaji, « Etude et modélisation d'un système de transmission radio sur fibre », Mémoire de projet de fin d'études, 2009.

- [14] G. Tesserault, « Modélisation multi-fréquences du canal de propagation », thèse doctorat, Ecole doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur & Aéronautique, 11 Décembre 2008.
- [15] B. Boudinar, « Systèmes de transport des données à 60Gb/s par RoF », Master2, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [16] H. Liu, « Radio sur fibre : réseaux, couvertures radio, architectures et dimensionnements matériels », Thèse de Doctorat, Télécom, Université européenne de Bretagne, 2013.
- [17] H. Le Bras, « Etude des réseaux radio sur fibre dans le contexte des réseaux d'accès et privés », thèse de doctorat en Informatique, télécommunication et électronique, Université Pierre et Marie Curie de Paris, 13 novembre 2008.
- [18] O. Bouchard, « Etude de diodes lasers à cavité Planaire entièrement définie par cristal photonique : nouvelle approche pour le contrôle spectral », Thèse Doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [19] Y.-D. Hamedi, « Etude D'une liaison Radio sur fibre », Université Tlemcen, 2014.
- [20] T. Kanesan, « The Experimental Design of Radio-over Fibre System for 4G Long Term Evolution », Thèse de doctorat pour obtenir le grade de Docteur, Université de Northumbria at Newcastle, Février 2013.
- [21] Configuring Software-Defined WLAN Test Systems, National Instruments, <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8551>. Site web consulté le 4 march 2012.
- [22] Clarity and Understanding the High-speed WLAN standards debate, Wi-Fi Planet. <http://www.wi-fiplanet.com/tutorials/article.php/990101>. Site web consulté le 22 août 2012.
- [23] CCDF for WiFi OFDM signal, <http://www-winson.blogspot.com/2009/07/wifi.html>. Site web consulté le 5 juin 2012.
- [24] ZVA 213, Wideband Amplifier 50 Ohm 800 MHz to 21 GHz, Mini Circuits. <http://www.alldatasheet.fr/datasheet-pdf/pdf/276092/MINI/ZVA-213.html>. Site web consulté le 5 juin 2012
- [25] J. Wells, «Faster than fiber: The future of multi-Gb/s wireless», IEEE Microwave Magn., vol. 10, no. 3, pp. 104–112, May 2009.
- [26] T. S. Rappaport & G.R. MacCartney & M.K. Samimi & S. Sun, «Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design», Pearson Education, 2015.
- [27] Rajiv, Applications of Millimetre Waves and Future, July 23, 2017.
- [28] <https://en.wikipedia.org/wiki/WiGig>.

- [29] https://en.wikipedia.org/wiki/V_band.
- [30] A. Khelil, « Etude Et Performance D'un Systeme de Communication Sans Fil à base OFDMA MiMo, », Master II, Université Ferhat Abbas – Sétif -1-, 2018.
- [31] I.A. Hemadeh , S.Katle ,M.EL Hejjar , L.Hanzo, «Millimeter-wave communications : Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget » , IEEE Communications Surveys and Tutorials, 20 (2), 870-913, 2017.
- [32] Z. Pi, F. Khan, «A millimeter-wave massive MIMO system for next generation mobile broadband»,Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), 2012.
- [33] (70), p. 9, July 1997.
- [34]S. Rangan, T. S. Rappaport and E. Erkip, «Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges», Proc. IEEE, vol. 102, no. 3, pp. 366-385, Mar. 2014.
- [35]J. Walfisch, H. L. Bertoni, «A theoretical model of uhf propagation in urban environments», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 36, no. 12, pp. 1788–1796, Dec 1998.
- [36]P. Adhikari, «Understanding millimeter wave wireless communication», Loea Corp., White paper, 2008.
- [37]M. Marcus, B. Pattan, «Millimeter wave propagation; spectrum management implications», IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 20, No.2, Jun. 2005.
- [38]H. Zhao et all, «28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city», in Proc. IEEE Int. Conf. Comm. (ICC), Budapest, Hungary, pp. 5163–5167, Jun. 2013.
- [39]Y. Azar, et all, «28 GHz Propagation Measurements for Outdoor Cellular Communications Using Steerable Beam Antennas in New York City», in IEEE ICC Wireless Communications Symposium, pp. 5143-5147, 2013.
- [40]T.S. Rappaport, R.W. Heath Jr, R.C. Daniels, J.N. Mur-dock, «Millimeter wave wireless communications», Pearson Education, 2014.
- [41]H.H. Abbas, «Beamforming Techniques for Millimeter Wave Relay Networks», Ph.D. thesis, The University of Manchester (United Kingdom), 2017.
- [42]Z. Lin, X. Du, H. Chen, B. Ai, Z. Chen, and D. Wu, «Millimeter-wave propagation modeling and measurements for 5g mobile networks», IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 1, pp. 72–77, 2019.

- [43] J. Laskar, et al, «60GHz CMOS/PCB co-design and phased array technology», in Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conf pp ,453–458.,2009.
- [44] M. D. Zoltowski, S. Noh, «Multi-Resolution Codebook and Adaptive Beamforming Sequence Design for Millimeter Wave Beam Alignment », IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 16, no. 9, pp. 5689–5701, 2017.
- [45] X. Shen, J. Qiao, «MAC-layer integration of multiple radio bands in indoor millimeter wave networks», in IEEE Wirel. Commun. And Networking Conf., WCNC, pp. 889–894,2013.
- [46] Y. Zhang, «Development of Millimeter Wave Radio over Fiber Technology». Journal of Electronic Science and Technology, 9(11):58–66 2011.
- [47] A. Prem & A. Chakrapani, « Optical millimeter wave generation using external modulation-A review», Advances in Natural and Applied Sciences,11(1):8–12, 2017.
- [48] S. Liu & P. Peng & M. Xu & D. Guidotti & Tian T & G. Chang, « A long-distance Millimeter wave ROF system with a low cost directly modulated laser», IEEE Photonics Journal, 30(15):1396–1399, 2018.
- [49] J. Zacharias & A. Krishnan & J. Joy & S. Elizabeth & V. Narayanan, « Full duplex Radio over Fiber system using optical heterodyning and self-homodyning», IEEE International Conference on Trends in Electronics and Informatics, p. 378–380 ,2017.
- [50] A.J. Cooper, «Fiber/radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network», Electron. Lett, 26 (1996).
- [51] A. Kaszubowska & P. Anandarajah & L.P. Barry, « Multifunctional operation of a fiber Bragg grating in a WDM/SCM radio over fiber distribution system», IEEE Photon, Technol Lett, 605–607.,16 (2004).
- [52] A. Stöhr, K. Kitayama, D. Jäger, «Full-duplex fiber-optic RF subcarrier transmission using a dual-function modulator/photodetector», IEEE Trans, Microwave Theory Tech. 47 (1999) 1338–1341.
- [53] V.P.G. Jimenez & M.J.F.-G. Garcia & F.J.G. Serrano & A.G. Armada, «Design and implementation of synchronization and AGC for OFDM-based WLAN receivers», IEEE Trans, Consumer Electron. 50 (2004) 1016–1025.
- [54] J. He, D. Yang, L. Chen, « A full-duplex radio-over-fiber system with differential phase-shift keying signals», Conf. Ser. 276 (2011) 1–4.
- [55] V. Alwayn, « Optical Network Design and Implementation», Cisco Press, USA, 2004.

- [56] T. Stephens & K. Hinton & T. Anderson & B. Clarke, «Laser turn-on delay and chirp noise effects in Gb/s intensity-modulated direct-detection systems», *J. Light- wave Technol.* 13 (1995) 666–674.
- [57] L.N. Langley & M.D. Elkin & C. Edge & M.J. Wale & X. Gliese & X. Huang & A.J. Seeds, «Packaged semiconductor laser optical phase-locked loop (OPLL) for photonic generation, processing and transmission of microwave signals», *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 47 (1999) 1257–1264.
- [58] J. Seo & C. Choi & Y. Kang & Y. Chung & J. Kim & W. Choi, «SOA-EAM frequency up/down-converters for 60-GHz bi-directional radio-on-fiber systems», *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.* 54 (2006) 959–966.
- [59] A. L. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydari, and F. Capolino, « Millimeter-wave massive MIMO: The next wireless revolution *IEEE Commun.* Mag, vol. 52, no. 9, pp. 56–62, Sep 2014.
- [60] Y. Sun & Q. Chenhao, « Weighted Sum-Rate Maximization for Analog Beamforming and Combining in Millimeter Wave Massive MIMO Communications» *IEEE Ccommunications Letters*, Vol. 21, NO. 8, August 2017.
- [61] S.A. Busari & M. Kazi & S Huq & S. Mumtaz & L. Dai & J. Rodriguez, «Millimeter-Wave Massive MIMO Communication for Future Wireless Systems: A Survey», *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 20, NO. 2, 2nd Quarter, 2018.
- [62] I.N. HADJERES, « Etude et simulation de la technique CDMA appliqué aux transmissions optiques utilisant les réseaux de Bragg » *Master en Systèmes de Télécommunications Université Djilali Bounaama Khemis Miliana.* 2016.
- [63] Z. ZhiQiang & T. YuLiang, «Optimum schemes of dispersion compensation transmission systems using dispersion compensation fibers», *laser technology*, Vol.24, No.5, pp.265-269 Oct.2000.
- [64] Y. Miyamoto & A. Hirano & K. Yonenaga & A. Sano & H. Toba & K. Murata & O. Mitomi & Electron. Lett, «Repetition-rate-tunable return-to-zero and carrier-suppressed return-to-zero optical pulse train generation using a polarization modulator», 35 (1999) 2041.