

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

**Technologie Radio sur Fibre pour
les applications sans fil (5G)**

Présenté par :

- **BEDDIAF Safia**
- **YAHIA Selma**

Sous la direction de :

Dr .GRAINI Leila

Juillet 2019

REMERCIEMENT

A l'issue de ce travail, au moment des dernières relectures avec quelque recule, nous mesurons tout ce que doit la présentation de ce travail au conseil de Mme GRAINI Leila notre directrice de mémoire. Qu'elle reçoit ici nos plus sincères remerciements pour la gentillesse, la compréhension et la patience dont elle a su user pour nous apprendre la rigueur intellectuelle et la ténacité nécessaire pour la réalisation de ce travail.

Nous remercions vivement les membres du jury qui ont aimablement accepté de prendre part à ce modeste travail

Certaines personnes, amis qui nous ont permis d'avancer de façon optimiste malgré les obstacles, merci à tous.

Nous pensons également aux auteurs des ouvrages ou des articles parus dont nous ont guidée de façon pertinente dans cette recherche.

DEDICACE

Mlle BEDDIAF SAFIA



Avant, je tiens à remercier celui sans qui rien ne peut se faire, je te remercie Mon Dieu de m'avoir donné le courage, l'aide, la patience ainsi que la volent pour l'accomplissement de ce modeste travail

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mes frères Walid, Ilyes et Younes, Hassen et à ma sœur Dalel, Amina, Soundous qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A tous mes petit anges MedIyed, MelissaYara, Mimosa Roya Maram ,Yousra Mayar& Louai

A mes amis et camarades de l'institut de Télécommunication de l'université du 8 Mai 1945 de Guelma notamment :

Mon Binôme de travail : Chère Selma ;

Mes amis Khadidja, Racha, Narimen, aya& Sabra

Dédicace

Mlle YAHIA SELMA

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, Laforce d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve, et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire

" Ya Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, la lumière qui jaillit dans mes jours et mes nuits, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, que je ne cesse de remercier pour tout ce qu'elle m'a donné. À ma très chère mère ...

A mon père, école de mon enfance, qui ma donne le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie, qui a toujours cru en moi et a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège.

Ames sœurs Salha et Deaa, mes plus grandes sources de bonheur j'espère que la vie vous réserve le meilleur.

A mes frères Mohcen et Salah Edinne, Seif-eddine pour son tendresse, et son soutien. Je vous souhaite une vie pleine de réussite et bonheur.

A ma petite ange Meissem

A ma grand-mère Wrida

A ma tante Rachida et son mari Amou Cherif

A mon oncle abedlhak

A mes cousine Raouia, Zahra

*A ma cousine Nina ,son mari Ameer et ses adorables enfants
Yanis et Eliene*

A mes oncles Djamel, Mostafa, Mourad, Adle

A mes coupines Narimen, Racha, Khadija

*À machère binôme Sofia, pour toute minute et tout second qu'on
a passé ensemble pour tout sourire, tout boulot, tout moment... Tu
m'oblige de te témoigner mon profond et ma loyale Considération.*

A ma copine Maha ;

A ma copine Monira ;

A mon ami du stage chez Ericsson ;

A tous ceux qui me sont chères ;

A tous ceux qui m'aiment ;

A tous ceux que j'aime.

تقنية الراديو على الألياف للتطبيقات اللاسلكية (5G)

الملخص:

يزداد الطلب على عرض النطاق الترددي في الاتصالات المتنقلة بشكل كبير يوماً بعد يوم، حيث زاد عدد المستخدمين بشكل كبير في السنوات الأخيرة، لذلك يجب أن يفى الجيل التالي (5G) من أنظمة الاتصالات اللاسلكية بمعايير أعلى لدعم مجموعة متنوعة من الخدمات اللاسلكية عريضة النطاق. تم اقتراح معايير لنطاق الموجات المليمترية للإرسال اللاسلكي. في مثل هذه الترددات، تكون الخسائر في الفضاء الحر مرتفعة للغاية ولا تعبر موجات الراديو الجدران. تستخدم تقنية الراديو على الألياف (RoF) كإزاحة ضوئية من مكان إلى آخر، فهي تتيح توزيع إشارات عالية السرعة، وبالتالي التغلب على مسافات الانتشار المنخفضة في الفضاء الحر.

في هذه الأطروحة، تمت دراسة أنظمة اتصالات (RoF) المعدلة بالموجات المليمترية باستخدام نظام تقسيم الترددات المتعامد (OFDM) نظرياً ورقمياً. يركز هذا العمل على نقل الإشارات الرقمية المعقدة OFDM بتردد 60 جيجا هرتز. حيث قمنا بدراسة جودة أداء تكنولوجيا OFDM عندما يتم إرسالها عبر القناة اللاسلكية والقناة الليفية البصرية مع تعديل التشكيل (QAM) من أجل مختلف قيم التدفق و طول الليف البصري.

تم فحص جودة الإرسال من خلال تقييم معدل الخطأ BER ونسبة الإشارة الضوئية إلى معدل الضوضاء (OSNR) و مخطط التوزيع النقطي للإشارات المستقبلية لـ QAM-16، QAM-64 و QAM-256.

الكلمات المفتاحية: موجة مليمترية، راديو على الألياف (RoF)، نظام تقسيم الترددات

المتعامد (OFDM)، التعديل QAM.

Radio over Fiber Technology for 5G-Wireless Applications

Abstract:

The demand of bandwidth in mobile communication is growing exponentially day-by-day, as the numbers of users have been increased drastically over the past few years. The next generation wireless communication systems termed as Fifth Generation (5G) therefore need to be of higher standards, so as to support various Broadband wireless services. Standards for millimeter-band wireless transmission have been proposed. At such frequencies, the losses in free space are very high and the radio waves do not cross the walls. Radio over fiber technology (RoF) used as optical deportation from one point to another allows the distribution of very high speed signals, by overcoming the drawback of low propagation distance in free space.

In this work, modified RoF-millimeter-wave communication systems using the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technique are theoretically and numerically studied. Here, we focused on the transmission of OFDM signals at the radio frequency of 60 GHZ. We have investigated how well OFDM performs when transmitted over the wireless channel and optical fiber channel with QAM (quadrature amplitude modulation) for various bit rate values and fiber length respectively.

The performances of transmission are evaluated by calculating the Bit Error Rate (BER), OSNR, and constellation diagrams of received signals for 16-QAM, 64-QAM and 256-QAM.

Keywords: Millimeter-waves, Radio-over-Fibre (RoF), Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), Modulation QAM.

Technologie Radio sur Fibre pour les applications sans fil (5G)

Résumé :

La demande de bande passante dans les communications mobiles augmente de façon exponentielle jour après jour, comme le nombre d'utilisateurs a considérablement augmenté ces dernières années. La prochaine génération (5G) de systèmes de communication sans fil doit donc répondre à des normes plus élevées, de manière à prendre en charge divers services sans fil à large bande. Des normes pour la transmission sans fil en bande millimétrique ont été proposées. A de telles fréquences, les pertes en espace libre sont très élevées et les ondes radios ne traversent pas les murs. La technologie radio sur fibre (RoF) utilisée comme déport optique d'un lieu vers un autre, permet ainsi la distribution des signaux à très hauts débit, en palliant le défaut de faible distance de propagation en espace libre.

Dans ce mémoire, les systèmes de communication RoF modifiés à ondes millimétriques utilisant la technique de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), sont théoriquement et numériquement étudiés. Ce travail est axé sur la transmission des signaux numériques complexes de type OFDM à la fréquence radio 60 GHz. Ici, nous avons étudié la qualité des performances de la technologie OFDM lorsqu'elle est transmise sur le canal sans fil et le canal à fibres optiques avec la modulation QAM (modulation d'amplitude en quadrature) pour différentes valeurs de débit binaire et longueur de fibre.

La qualité de transmission est étudiée par l'évaluation du taux d'erreur binaire (BER), de l'OSNR, et les diagrammes de constellation des signaux reçus pour 16-QAM, 64-QAM and 256-QAM.

Mots clés : Onde millimétrique, radio sur fibre (RoF), multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), modulation QAM.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT

DEDICACES

RESUME

TABLE DES MATIERES.....I

LISTE DES FIGURES IV

LISTE DES TABLEAUX..... VII

INTRODUCTION GENERALE..... I

CHAPITRE I : EVOLUTION DES RESEAUX MOBILES, VUE FUTURISTE DE LA 5G

I.1.	Introduction :	4
I.2.	Définition de réseau mobile :	4
I.3.	Evolution des réseaux mobiles :	4
I.3.1.	La Première Génération (1G) :	5
I.3.1.1.	Caractéristiques techniques :	6
I.3.1.2.	Les avantages et inconvénients :	6
I.3.2.	La deuxième génération (2G) :	6
I.3.2.1.	Les caractéristiques de 2G :	7
I.3.2.2.	GSM (2G) :	7
I.3.2.3.	GPRS (2,5G) :	10
I.3.2.4.	EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution, 2,75G) :	11
I.3.3.	La troisième génération (3G) :	12
I.3.3.1.	Le réseau UMTS :	12
I.3.4.	La quatrième génération (4G) :	15
I.3.4.1.	Architecture du réseau 4G/LTE :	16
I.3.4.2.	La caractéristique technique du LTE :	17
I.3.4.3.	Le type de multiplexage (4eme génération) :	18
I.4.	La cinquième génération (5G) :	18
I.4.1.	Les caractéristiques de la 5G :	20
I.4.1.1.	L'utilisation des fréquences des ondes millimétriques :	20
I.4.1.2.	Entrée multiple sortie multiple massif (mMIMO) :	21
I.4.1.3.	Utilisation de petites cellules :	23

I.4.1.4. Communication sans fil full-duplexe :.....	24
I.4.1.5. Le déploiement d’une nouvelle génération d’antennes « intelligentes » :	25
I.4.2. Le défi de la 5G :	25
I.5. Conclusion :	27

CHAPITRE II : LA TRANSMISSION RADIO SUR FIBRE (ROF)

II.1. Introduction :.....	28
II.2. La technologie Radio sur Fibre RoF :.....	28
II.2.1. Définition de RoF :	28
II.2.2. Le système de communication RoF :	29
II.3. Systèmes de transport des signaux RF, IF, bande de base :.....	30
II.3.1. Transport de fréquence RF sur fibre :	30
II.3.2. Transport de fréquence IF-sur-fibre :.....	31
II.3.3. Transport du signal en bande de base :.....	31
II.3.4. Les composants optoélectronique d’une liaison RoF :.....	32
II.3.4.1. L’émetteur : les diodes laser DL :.....	32
II.3.4.2. L’élément de connexion : la fibre optique.....	33
II.3.4.3. Le récepteur : la photodiode.....	34
II.3.5. Les techniques de génération des signaux RF sur la fibre optique :.....	34
II.3.5.1. Génération du signal RF par hétérodynage optique de deux lasers :.....	34
II.3.5.2. Génération du signal RF par modulation d’intensité :	35
II.3.6. Les techniques de déport radio sur fibre :	36
II.3.6.1. La détection directe :.....	36
II.3.6.2. Détection hétérodyne :	37
II.3.7. Les sources de bruits dans un système radio sur fibre :	39
II.3.7.1. Le bruit du laser :.....	40
II.3.7.2. Le bruit de la photodiode :	41
II.3.7.3. Bruit d’un amplificateur transimpédance :	42
II.3.7.4. Les sources de bruit radio :	42
II.4. Applications de la Technologie Radio-sur-Fibre :.....	43
II.4.1. Système de distribution vidéo :	43
II.4.2. Réseaux locaux sans fil :	44
II.4.3. Réseaux cellulaires :	44
II.4.4. Service mobile à haut débit :	44
II.4.5. Mobiles de 5ème génération :	44
II.5. Conclusion :	45

CHAPITRE III : SYSTEMES DE TRANSPORT DES DONNEES A 60 GHZ PAR ROF POUR LES APPLICATIONS SANS FIL 5G.

III.1	Introduction :	46
III.2	La transmission par onde Millimétrique (à 60GHz) :	46
III.3	MIMO Optique :	48
III.4	Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM) :	49
III.5	Systèmes de transport des données à 60 GHz par RoF :	55
III.5.1	Modèle 1 : Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant 2 MZM.....	55
III.5.2	Modèle 2 : Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant un mélangeur	59
III.6	Conclusion :	60

CHAPITRE IV : RESULTATS DE LA SIMULATION

IV.1.	Introduction :	61
IV.2.	Présentation du logiciel OptiSystem :	61
IV.3.	Description des principaux critères d'évaluation :	62
IV.3.1.	Diagramme de constellation :	Erreur ! Signet non défini.
IV.3.2.	Taux d'erreurs binaires :	63
IV.3.3.	Facteur de qualité :	63
IV.4.	Présentation de la liaison OFDM-RoF :	64
IV.4.1.	Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant 2 MZM :	65
IV.4.1.1.	La station centrale :	65
IV.4.1.2.	Le canal de transmission :	68
IV.4.1.3.	La station de base :	69
IV.4.1.4.	La station mobile :	70
IV.4.1.5.	Résultats de la simulation :	71
IV.4.2.	Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant un mélangeur :	86
IV.4.2.1.	Au niveau de la station central (CS) :	86
IV.4.2.2.	Au niveau de la station de base (BS) :	88
IV.4.2.3.	Au niveau du MS :	88
IV.4.3.	MIMO-OFDM-ROF :	93
IV.5	Conclusion :	96

CONCLUSION GENERALE	97
----------------------------------	----

BIBLIOGRAPHIE	99
----------------------------	----

GLOSSAIRE	
------------------	--

LISTE DES FIGURES

Figures Chapitre I :

Figure I.1: Evolution des réseaux mobiles	5
Figure I. 2: Architecture d'un réseau GSM.....	8
Figure I. 3 : La technique FDMA.....	9
Figure I. 4: La technique TDMA.	9
Figure I. 5: Architecture d'un réseau GPRS	10
Figure I. 6: Architecture d'un réseau UMTS.	13
Figure I. 7: la technique CDMA.....	14
Figure I. 8: Architecture d'un réseau LTE	16
Figure I. 9: Comparaison 4G/5G	18
Figure I. 10: Définition de la 5G	19
Figure I. 11: Atténuation en fonction de différentes fréquences.....	20
Figure I. 12: Massive MIMO exploite de grands réseaux d'antennes pour multiplexer spatialement e nombreux.	22
Figure I. 13: Système MIMO	22
Figure I. 14: Réseau à macro cellule et réseau à petites cellules	24
Figure I. 15: Illustration de full-duplex, comparé au FDD et TDD	25

Figures Chapitre II :

Figure II. 1 : Synoptique d'un système radio sur fibre classique	29
Figure II. 2 : Architecture RoF avec transport radio sur fibre optique.....	30
Figure II. 3 : Architecture RoF avec transport IF sur fibre optique.....	31
Figure II. 4 : Architecture RoF avec transport en bande de base sur fibre optique	32
Figure II. 5 : Structure de la fibre optique.....	33
Figure II. 6 : Génération en mm W par deux sources lasers.....	34
Figure II. 7 : Génération des signaux RF par modulation directe du laser (a) et modulation externe (b).....	35
Figure II. 8 : Génération des ondes mmW avec deux MZM	36
Figure II. 9: Liaison à modulation directe	37
Figure II. 10 : Schéma de principe de la détection hétérodyne.....	37
Figure II. 11 : Schéma de principe d'un déport radio sur fibre avec une détection hétérodyne	38
Figure II. 12 : Schéma d'une antenne déportée dans le cas d'une transmission d'une onde	39
Figure II. 13 : Chaîne optique du système ROF typique	39
Figure II. 14 : RIN aux hautes fréquences d'un laser DFB pour différents courants de polarisation	40
Figure II. 15 : Trois types de bruits de photo-détecteur.....	41

Figures Chapitre III :

Figure III. 1 : Spectre ULB pour la bande millimétrique entre 57 et 66 GHz.....	47
Figure III. 2 : Principe de la technologie MIMO optique.....	49
Figure III. 3: Schéma de principe d'un modulateur OFDM	51
Figure III. 4 : Modulation de phase QPSK	52
Figure III. 5 : Modulation QAM.....	53
Figure III. 6 : Architecture ROF-OFDM utilisant 2 MZM.....	55
Figure III. 7 : architecture ROF-OFDM utilisant un seul MZM	59

Figures Chapitre IV :

Figure IV. 1 : Interface du logiciel OptiSystem.....	62
Figure IV. 2 : Diagramme de constellation de 16-QAM rectangulaire.....	63
Figure IV. 3 : Principe du calcul du taux d'erreurs : (a) évolution temporelle de l'intensité du signal, (b) distributions de probabilité des niveaux 0 et 1.....	64
Figure IV. 4 : L'architecture générale de la liaison OFDM-RoF	65
Figure IV. 5 : Lastation centrale.....	66
Figure IV. 6 : Signal d'origine.....	66
Figure IV. 7 : Spectre en sortie du laser.....	68
Figure IV. 8 : Canal de transmission.....	68
Figure IV. 9 : La station de base	69
Figure IV. 10 : Station Mobile	70
Figure IV. 11 : Le signal d'origine.....	72
Figure IV. 12 : Diagramme de la constellation	72
Figure IV. 13 : Le signal OFDM.....	72
Figure IV. 14 : Signal OFDM filtré	72
Figure IV. 15 : Le spectre du signal à la sortie du modulateur en quadrature	73
Figure IV. 16: Lespectre à la sortie du 1er MZM	73
Figure IV. 17: Lespectre à la sortie du 2eme MZM.....	73
Figure IV. 18 : Signal optique à la sortie du filtre optique reçu par la PD.....	73
Figure IV. 19 : Le signal RF reçus	74
Figure IV. 20: Le signal à la sortie du démodulateur quadrature.....	74
Figure IV. 21 : Diagrammes de la constellation à la sortie du décodeur 16-QAM pour chaque valeur de débit.	75
Figure IV. 22 : BER en fonction de débit binaire	76
Figure IV. 23 : BER en fonction de la longueur de la fibre	76
Figure IV. 24 : BER en fonction d'OSNR	77
Figure IV. 25 : signal originale	77
Figure IV. 26 : diagramme de constellation.....	77
Figure IV. 27 : Diagrammes de la constellation à la sortie du décodeur 64-QAM pour différentes valeur de débit.	78
Figure IV. 28 : BER en fonction de débit	79
Figure IV. 29 : BER en fonction de la longueur de la fibre	79
Figure IV. 30: BER en fonction d'OSNR	80

Figure IV. 31 : Signal d'origine.....	80
Figure IV. 32 : Diagramme de la constellation	80
Figure IV. 33 : Diagrammes de constellation à la sortie de décodeur 256-QAM.....	81
Figure IV. 34 : BER en fonction de débit.....	82
Figure IV. 35 : BER en fonction de la longueur de la fibre	82
Figure IV. 36 : BER en fonction de débit	83
Figure IV. 37 : BER en fonction de débit	83
Figure IV. 38 : BER en fonction de la puissance optique.....	84
Figure IV. 39 : log BER en fonction d'OSNR	85
Figure IV. 40 : BER en fonction de la longueur de la fibre	85
Figure IV. 41 : la station centrale.....	86
Figure IV. 42 : le signal après la modulation OFDM.....	86
Figure IV. 43 : signal à la sortie du modulateur.....	87
Figure IV. 44 : le signal à la sortie du quadrature multiplication.....	87
Figure IV. 45 : Signal à la sortie du MZM.....	87
Figure IV. 46 : le signal à la sortie du PD	88
Figure IV. 47 : la station Mobile	88
Figure IV. 48 : Signal après démodulation en quadrature	89
Figure IV. 49 : Les constellations des signaux reçus pour débit =10Gbit/s.....	89
Figure IV. 50 : BER en fonction de débit	90
Figure IV. 51 : BER en fonction de la puissance optique.....	91
Figure IV. 52 : BER en fonction de l'OSNR	91
Figure IV. 53 : BER en fonction de la longueur	92
Figure IV. 54 : Architecture générale du système 2*2 MIMO	93
Figure IV. 55 : BER en fonction de débit pour 16-QAM	94
Figure IV. 56 : BER en fonction de débit pour 64-QAM	95
Figure IV. 57 : BER en fonction de débit pour 256-QAM	95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau Chapitre I :

Tableau I. 1 : Les avantages et les inconvénients pour 1G.....	6
Tableau I. 2 : Les avantages et les inconvénients de GSM	8
Tableau I. 3 : Les avantages et les inconvénients de GPRS	10
Tableau I. 4 : Les avantages et les inconvénients d'EDGE	11
Tableau I. 5 : Caractéristiques de la norme 2G et ses évolutions	11
Tableau I. 6 : Les avantages et les inconvénients d'UMTS.	14
Tableau I. 7 : Caractéristiques de la norme 3G et ses évolutions.	15

Tableau Chapitre II :

Tableau II. 1 : Comparaison entre les différents types de fibres optiques	33
--	----

Tableau Chapitre III :

Tableau III. 1 : Régulation de puissance mondiale dans la bande des ondes millimétriques.47	
Tableau III. 2 : Tableau de correspondances de la modulation QPSK.....	52
Tableau III. 3 : Tableau de correspondances de la modulation 16 QAM	53
Tableau III. 4 : Paramètre de configuration des standards de la bande millimétrique.	54

Tableau Chapitre IV :

Tableau IV. 1 : Caractéristique du modulateur QAM	66
Tableau IV. 2 : Caractéristique du modulateur OFDM	67
Tableau IV. 3 : Caractéristique du filtre passe bas	67
Tableau IV. 4 : Caractéristique du modulateur quadratique.....	67
Tableau IV. 5 : Caractéristique du laser	67
Tableau IV. 6 : Caractéristique du générateur en sinus	68
Tableau IV. 7 : Caractéristique du Mach-Zender	68
Tableau IV. 8 : Caractéristique de la fibre optique.....	69
Tableau IV. 9 : Caractéristique de la photodiode	69
Tableau IV. 10 : Caractéristique du filtre optique	70
Tableau IV. 11 : Caractéristique de l'amplificateur	70
Tableau IV. 12 : Caractéristique du démodulateur quadratique	71
Tableau IV. 13 : Caractéristique du demodulateur OFDM	71
Tableau IV. 14 : Caractéristique du démodulateur QAM.....	71

Introduction générale

Introduction générale :

Nous assistons depuis quelques années à une forte demande sur les services large bande mis en place pour les troisième et quatrième générations (3G / 4G) à travers les réseaux d'accès sans fils, fixes et mobiles. Face à cette demande en ressources spectrales et en flux de données, les bandes de fréquences allouées sont insuffisantes. Pour remédier à ce problème, il convient d'augmenter les fréquences des porteuses radio et d'utiliser le potentiel spectral de la bande non exploitée.

Dans les normes précédentes, un débit de données plus élevé, une fiabilité accrue et une réduction de la complexité étaient indispensables pour la réalisation de services impératifs dans la vie quotidienne. Comme la fréquence de fonctionnement actuelle est dans un spectre radioélectrique surchargé, les moyens d'augmenter ce type de services sont difficiles, de sorte que les intérêts dans les fréquences plus élevées sont fortement nécessaires, ce qui offre une plus grande largeur de bande disponible, et la bande de fréquence à ondes millimétriques (à 60 GHz) a été proposée pour les prochaines normes sans fil, appelée cinquième génération (5G).

D'un autre côté, en raison des pertes trop élevées liées à la propagation des ondes millimétriques en espace libre, une solution en « propagation guidée » à faible atténuation s'impose. Ainsi, les réseaux de distributions à fibres optiques déjà installés, apparaissent comme une solution attrayante pour le transport des signaux radio. Elle consiste à transporter, sur fibres optiques, des ondes porteuses radiofréquence (RF) millimétriques modulées. L'objectif est de combiner dans un seul réseau les atouts de la fibre optique : le haut débit et la faible atténuation, et celui des systèmes sans fils: la mobilité. Enfin, la technologie appelée radio sur fibre (RoF) peut être appliquée dans les différents réseaux fixes, radio, et mobile suivant les besoins. Pour les réseaux d'accès radio et les réseaux mobiles, cette technique permet de répondre aux problématiques des signaux radio large bande et à la multiplicité de cellules à petite puissance.

De côté sans fil, les évanouissements altèrent généralement les signaux et le retard par trajets multiples, les systèmes de communication mobiles traditionnels à une seule porteuse ne fonctionnent pas bien. Sur de tels canaux, il se produit une atténuation extrême de l'amplitude du signal et des effets de trajets multiples ISI (Interference Inter Symbol) dus à la sélectivité en fréquence du canal apparaissent côté récepteur. Cela entraîne une forte probabilité d'erreurs et la performance globale du système devient très mauvaise. Des

techniques telles que le codage de canal et l'égalisation adaptative ont été largement utilisées pour résoudre ces problèmes. Cependant, en raison du retard inhérent au processus de codage et d'égalisation et du coût élevé du matériel, il est assez difficile d'utiliser ces techniques dans des systèmes fonctionnant à des débits binaires élevés, par exemple jusqu'à plusieurs Mbps.

Une solution prometteuse consiste à utiliser un système à porteuses multiples tel que l'OFDM, un système de modulation permettant une transmission à large bande dans un environnement multi-trajets sélectif en fréquence, de manière efficace et fiable. La résilience de l'OFDM aux évanouissements par trajets multiples dans le canal RF suggère qu'elle pourrait également être tolérante à l'effet de la dispersion dans les fibres optiques, permettant ainsi l'utilisation de l'OFDM dans les canaux à fibres optiques combiner avec le multiplexage spatial peut augmenter efficacement l'efficacité spectrale et les performances des systèmes de communications sans fil à 60 GHz par la technologie MIMO (entrées multiples et sorties multiples).

L'objectif de ce mémoire est l'étude de la transmission des signaux numériques complexes de type OFDM dans les systèmes de transport des données à 60 GHz par RoF pour une infrastructure de futur réseau mobile 5G. Les réseaux 5G peut fournir la rapidité, la fiabilité et l'efficacité du réseau d'accès optique, et la flexibilité et la mobilité du réseau radio sans fil.

Ce mémoire est devisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre de ce mémoire sera consacré à l'évolution des réseaux mobiles depuis la 1^{er} génération (1G) jusqu'à la 5G, les architectures et les différentes normes des réseaux mobiles sont décrites, une comparaison entre les technologies existantes et les contraintes sont également présentées.

Dans le second chapitre, nous présenterons une étude sur la transmission Radio-sur-fibre (RoF), les différentes architectures de la technologie RoF seront décrites en considérant aussi des systèmes qui permettent également la génération des signaux RF. Puis nous allons définir les principales composantes optoélectroniques et une description de leurs différentes caractéristiques, ainsi que les différentes causes de dégradation de leurs performances.

Le troisième chapitre qui est l'axe de notre mémoire nous aborderons l'étude d'un système de transport des données à 60 GHz par RoF pour l'application sans fil 5G. Cette

étude sera consacrée dans un premier temps à la description des ondes millimétrique, et du signal OFDM défini dans les normes propres aux bandes millimétriques. Ensuite, l'étude sera étendue à la transmission des signaux OFDM dédiée aux applications en bande millimétrique. Deux systèmes de transport des données à 60 GHz seront proposées pour les réseaux sans fil 5G avec la collaboration de la technique RoF est également présentées : système à modulation directe du signal RF avec du mélangeur, et système à modulation externe avec le modulateur MZM.

Enfin, le quatrième chapitre qui fera l'objectif de la simulation sous Optisystem concernera l'étude de la qualité de transmission des signaux numériques complexes de type OFDM sur les systèmes de transport des données à 60 GHz par RoF pour l'application 5G présentés dans le troisième chapitre. Trois formats de modulation 16-QAM, 64-QAM et 256-QAM correspondant à des débits de transmission variant de 10 à 40 Gb/s seront exploités. La qualité du signal reçu sera évaluée en termes de diagramme de consultation, de BER (Bit Error Rate), et OSNR (Optical Signal to Noise Ratio).

La fin de ce chapitre sera consacrée à l'implémentation d'un système 2X2 MIMO par le multiplexage en longueur d'onde (WDM).

Une conclusion générale clôturera ce mémoire et quelques perspectives à ces travaux seront ensuite données.

**Chapitre I : Evolution des réseaux
mobiles, vue futuriste de la 5G.**

I.1 Introduction :

L'évolution de l'Internet dans les réseaux d'accès sans fil a un énorme impact sur les modes de vie des gens à travers le monde. Les services mobiles n'ont pas cessé d'évoluer depuis l'introduction de la communication cellulaire dans le début des années 80.

Cette évolution des technologies sans fil a progressivement créé divers réseaux conduisant à un environnement hétérogène de plus en plus complexes. Dans ce contexte, des utilisateurs mobiles, ayant différents profils et préférences, voudraient être toujours connectés au meilleur réseau à tout moment, sans avoir à se soucier des différentes transitions entre réseaux hétérogènes.

L'objectif de ce chapitre consiste à présenter tout d'abord l'évolution des réseaux mobiles de façon générale afin de se familiariser avec les termes et les technologies employés. Dans la première partie nous allons décrire les différentes générations (1G, 2G, 3G et 4G) avec comparaison entre eux. Ensuite on va aborder la partie du réseau mobile 5G, ses éléments constitutifs, son architecture ainsi son principe de fonctionnement. Enfin on présente quelques limites liées au déploiement du réseau 5G.

I.2 Définition de réseau mobile :

Le réseau mobile est un réseau de communication sans fil. Il est réparti sur des zones appelées cellules, chacune d'entre elles desservie par au moins un émetteur-récepteur à localisation fixe, connu par la station de base.

Cette station de base fournit à la cellule, la couverture réseau qui peut être utilisée afin d'assurer la transmission de la voix et des données.

Une cellule peut utiliser un ensemble différent de fréquences des cellules voisines, pour éviter les interférences et fournir une qualité de service garantie dans chaque cellule. [1]

I.3 Evolution des réseaux mobiles :

Les réseaux de la 1^{ère} génération (appelée aussi 1G) ont été intégrés au réseau de télécommunication dans les années 80. Ces systèmes ont cependant été abandonnés il y a quelques années laissant la place la seconde génération, appelée 2G lancée en 1991. Elle est encore active de nos jours. Nous pouvons distinguer deux autres types de générations au sein même de la seconde : la 2.5 et la 2.75. Le principal standard utilisant la 2G est GSM (Global System for Mobile Communications). A la différence de la 1G, la seconde

génération de normes permet d'accéder divers services, comme l'utilisation du WAP permettant d'accéder Internet, tant dit que pour la 3ème génération connue sous le nom de 3G permet un haut débit pour l'accès l'internet et le transfert de données. En ce qui concerne la nouvelle génération 4G ou LTE (Long Term Evolution), déployé jusque-là que par quelque pays, elle permet le très haut débit, ensuite les technologies IMT-2020 (International Mobile Telecommunications- 2020) de cinquième génération (5G) arrivent à grands pas, et elles possèdent un potentiel de transformation immense pour rendre nos vies meilleures.

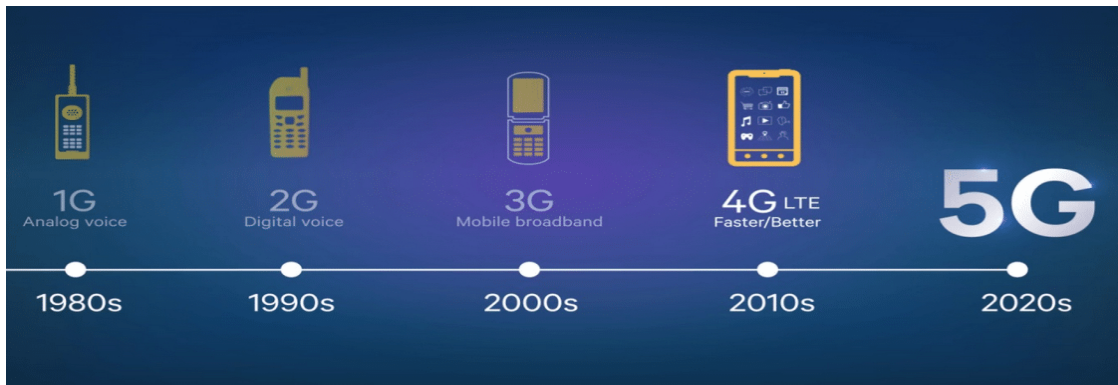


Figure I.1: Evolution des réseaux mobiles

I.3.1 La Première Génération (1G) :

La première génération de systèmes cellulaires (1G) reposait sur un système de communications mobiles analogiques et ne sont en mesure de gérer le trafic voix. Sa technologie de modulation radio est similaire à celle utilisée par les stations radio FM[2,3,4].

La qualité de la communication offerte par la première génération de téléphones mobiles, équipement très encombrant, avaient des limites évidentes liées au type de signal, tels que la mauvaise qualité du son et ne garantit pas la confidentialité lors de la communication (Un récepteur inconnu doté d'une radio toutes bandes peut écouter la conversation) et le réseau est vite saturé [3] [5].

La première génération de systèmes cellulaires (1G) utilisait essentiellement les standards suivants :

- AMPS (Advanced Mobile Phone System), lancé aux Etats-Unis, est un réseau analogique reposant sur la technologie FDMA (Frequency Division Multiple Access).

- NMT (Nordic Mobile Telephone) a été essentiellement conçu dans les pays nordiques et utilisés dans d'autres parties de la planète.
- TACS (Total Access Communications System), qui repose sur la technologie AMPS, a été fortement utilisé en Grande Bretagne [2].

Techniquement, ces systèmes étaient basés sur un codage et une modulation analogique. Ils utilisaient une technique d'accès multiples appelée FDMA (Frequency Division Multiplex Access), associant une fréquence à un utilisateur [6].

I.3.1.1 Caractéristiques techniques : [7]

- les canaux de contrôle sont des canaux de données opérant à 10 kbit /s.
- les canaux voix transportent les communications par signaux analogiques modulés en fréquence.
- bande de transmission de la station de base : 869 à 894 MHz.
- bande de transmission du mobile : 824 à 849 MHz.
- espacement entre canaux montant et descendant : 45 MHz.
- largeur de bande d'un canal : 30 KHz.
- puissance maximale du mobile : 3W.
- taille d'une cellule : 2 à 20 Km.
- débit de transmission : 10 kbits /s.

I.3.1.2 Les avantages et inconvénients :

AVANTAGES	INCONVENIENTS
1 ^{er} radiotéléphones analogiques sans fils	Taille imposante des équipements
	Pas de confidentialité de communications
	Réseaux saturés

Tableau I. 1: Les avantages et les inconvénients pour 1G [4]

I.3.2 La deuxième génération (2G) :

La deuxième génération (2G) de systèmes cellulaires repose sur une technologie numérique a été développée à la fin des années 1980.

Ce système apporte une meilleure qualité ainsi qu'une plus grande capacité à moindre coût pour l'utilisateur [2]. Elle a également permis à l'utilisateur équipé d'un terminal

mobile de transférer des données numériques de faible volume (principalement du texte, avec les SMS ou des photos, avec les MMS) [8].

I.3.2.1 Les caractéristiques de 2G :

La seconde génération (2G) a marqué une rupture avec la première génération de téléphones cellulaires grâce au passage de l'analogique (1G) vers le numérique [9].

- Débit max. de 9600 bits/s
- Mode commutation de circuit
- Repose sur une technologie numérique
- Un téléphone = un terminal + une carte à puce
- Succès international : présence dans de nombreux pays....

La deuxième génération de systèmes cellulaires (2G) utilise essentiellement les standards suivants [2] :

I.3.2.2 GSM (2G) :

Norme numérique de seconde génération (2G) mise au point par l'ETSI (european telecommunications standards institute) et commercialisée au début des années 1990 [2]. Le GSM fonctionne à 850 MHz et 1900Mhz bandes aux États-Unis, 900 Mhz et 1800 MHz dans le reste du monde [10].

Le système GSM comprend 3 sous-systèmes [8] :

- RSS (radio subsystem) : couvre tous les aspects radio
- MS (mobile station)
- BSS (base station subsystem) or RAN (radio access network)
- BTS (base transeiver station)
- BSC (base station controller)
- NSS (network and switchingsubsystem): renvoi d'appel, transfert inter cellulaire
- MSC (mobile services switching center)
- LR (location register): HLR and VLR
- OSS (operationsubsystem): gestion du réseau
- OMC (operation and maintenance center)
- AuC (authentication center)

- EIR (equipmentidentityregister)

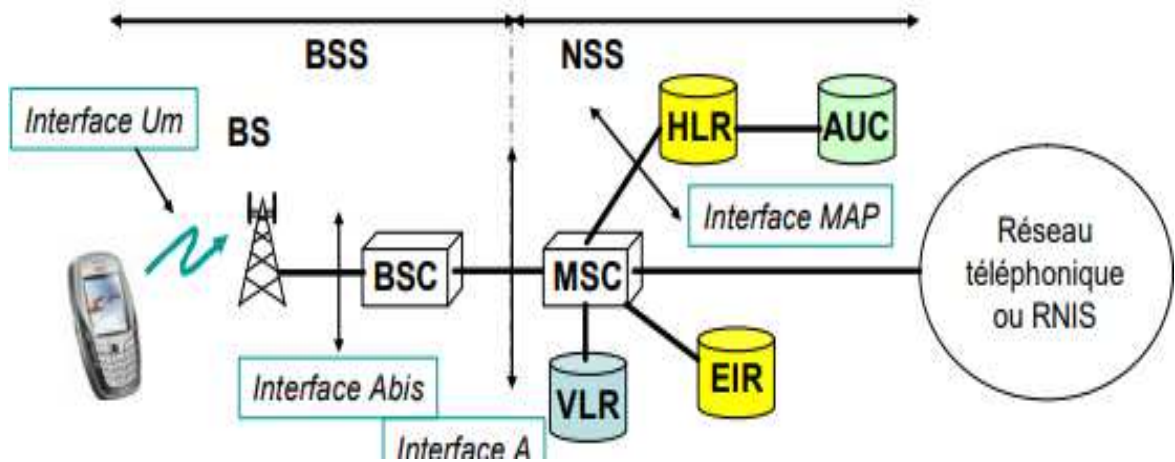


Figure I. 2: Architecture d'un réseau GSM [11]

a. Avantages et inconvénient :

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Meilleure qualité d'écoute	Débit: envoi de données lentes
Taille réduite	
Confidentialité des communications	

Tableau I. 2 : Les avantages et les inconvénients de GSM [4]

b. Le type de multiplexage (GSM) :

Pour augmenter la capacité du réseau, GSM utilise les deux techniques de multiplexage FDMA (Frequency Division Multiple Access) et TDMA (Time Division Multiple Access).

➤ **FDMA (Frequency Division Multiple Access) :**

Le multiplexage fréquentiel, appelé Frequency Division Multiple Access (FDMA) est la méthode d'accès multiple la plus utilisée. Cette technique est la plus ancienne, elle permet de différencier les utilisateurs par une simple différenciation fréquentielle. L'implémentation de cette technologie est assez simple. En effet, pour écouter l'utilisateur N, le récepteur ne considère que la fréquence F_N associée [12].

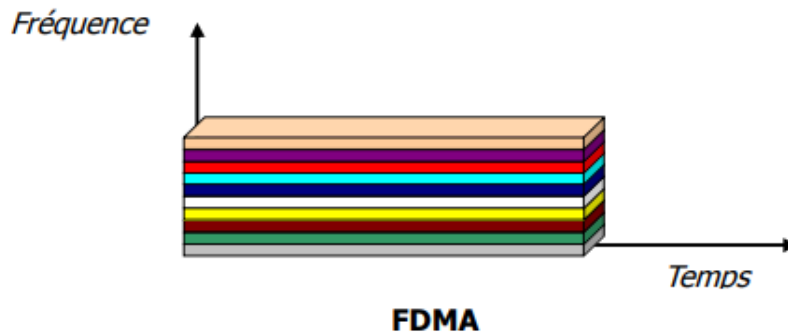


Figure I. 3 : La technique FDMA.

Un opérateur ne dédie pas pour autant une bande de fréquences par utilisateur, car cela conduirait à un gaspillage de ressources radio étant donné qu'un utilisateur émet par intermittence. De plus, avec un tel système, si une source parasite émet un bruit à une fréquence bien déterminée, le signal qui se trouve dans la bande de fréquence contenant le parasite sera perturbé. Pour résoudre ces problèmes, on combine le multiplexage en fréquence à un multiplexage temporel (Time Division Multiple Access ou TDMA) [13].

➤ **TDMA (Time Division Multiple Access):**

Est une méthode d'accès qui se base sur la répartition de ressources dans le temps. Chaque utilisateur émet ou transmet dans un intervalle de temps concret dont la périodicité est définie par la durée de la trame. Dans ce cas, pour écouter l'utilisateur N, le récepteur n'a qu'à considérer l'intervalle de temps N associé à cet utilisateur. [12].

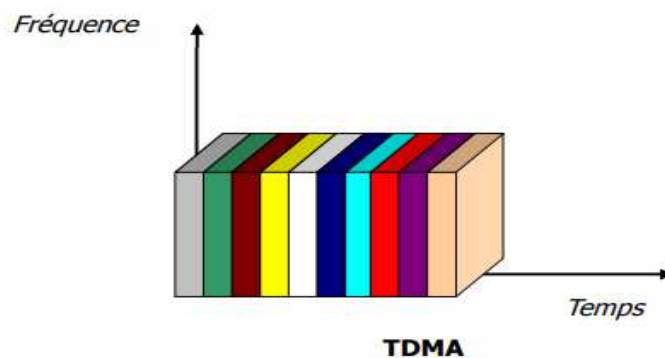


Figure I. 4: La technique TDMA.

Dans le cas du GSM, consistant à diviser chaque canal de communication en trames de 8 intervalles de temps. Ainsi, avec le TDMA, il est par exemple possible de faire parler huit utilisateurs l'un après l'autre dans le même canal. On multiplie donc le nombre de canaux disponibles par unité de temps par huit [13].

I.3.2.2 GPRS (2,5G) :

Le GPRS (General Packet Radio Service) est un système mobile intermédiaire entre la 2G et la 3G [2], il offre des débits de données élevés. De plus, les services Internet et les services par paquets conviennent parfaitement [5].

Le GPRS est basé sur la modulation GMSK (Gaussian Modulation Shift Keying) [5].

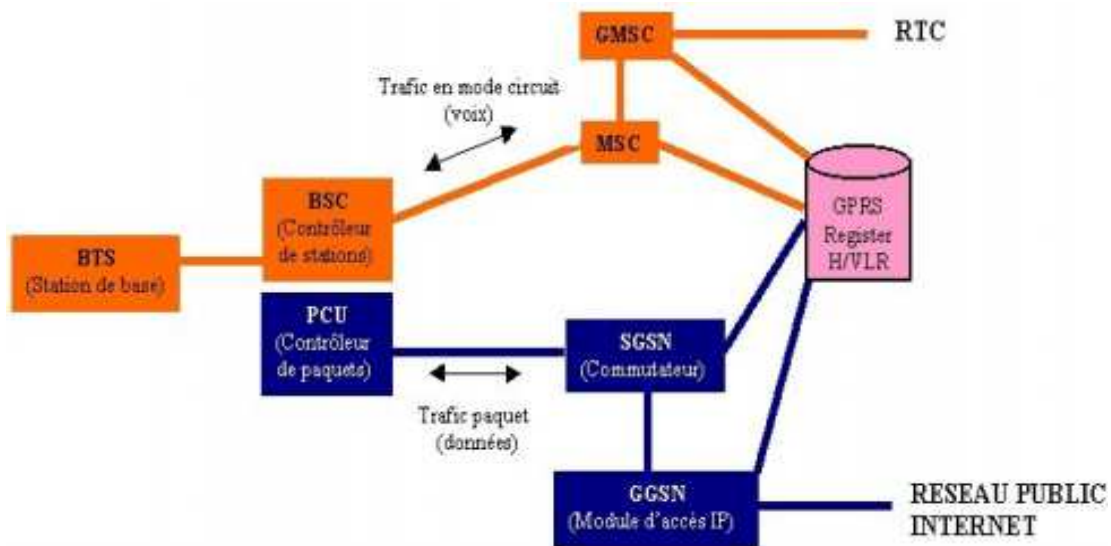


Figure I. 5: Architecture d'un réseau GPRS [14]

Éléments de réseau GPRS [15]:

- GGSN (Gateway GSN) : unité d'interfonctionnement entre GPRS et PDN (Packet Data Network).
- SGSN (Serving GSN) : prend en charge le MS (emplacement, facturation, sécurité).
- HLR (GPRS Register – GR) : conserve les informations de localisation et de sécurité.

➤ **Avantages et inconvénient :**

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Débit	Pas d'accès satisfaisant à internet
Accès WAP (Internet allégé)	Réseau GSM déjà saturés
Facturation à la donnée	Aucune application décisive pour le grand public
Connexion permanente possible	
Support de plusieurs niveaux de qualité de service	

Tableau I. 3 : Les avantages et les inconvénients de GPRS [4]

I.3.2.3 EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution, 2,75G):

Norme dérivée du GSM permettant un débit de données plus élevé pour un utilisateur stationnaire. On le qualifie souvent de 2,75G car c'est l'évolution du GPRS développé au cours de l'année 2005 [2], il introduit une nouvelle modulation 8-Phase Shift Keying (8-PSK) [4].

Les appareils sont devenus à la fois une télévision et un lecteur de musique, les gens devaient pouvoir regarder en streaming vidéo et télécharger des fichiers mp3 plus rapidement - c'est précisément ce que permet EDGE [10].

➤ **Avantages et inconvénients :**

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Solution alternative moins onéreuse que la 3G	Obligation de changer de terminal
Débit plus élevé que le GPRS	

Tableau I. 4 : Les avantages et les inconvénients d'EDGE [4].

Le tableau suivant montre les caractéristiques de la norme 2G et ses évolutions .

Technologie	GSM	GPRS	EDGE
Génération	2G	2,5G	2,75G
Fréquences (MHz) Tx : Transmission Rx : Réception	GSM 450 450,4-457,6 (Tx) 460,4-467,6 (Rx) GSM 480 478,8-486 (Tx) 488,8-496 (Rx)	GSM 900 880-915 (Tx) 925-960 (Rx) GSM 1800 (DCS) 1710-1785 (Tx) 1805-1880 (Rx)	GSM 1900 (PCS) 1850-1910 (Tx) 1930-1990 (Tx)
Mode de duplexage	FDD		
Méthode d'accès	TDMA/FDMA		
Largeur d'un canal	200 KHz		
Type de modulation	GMSK	GMSK	GMSK, 8PSK
Type de commutation	circuit	paquet	paquet
Débit maximum théorique	14,4 kbit/s	171,2 kbit/s	384 kbit/s
Débit généralement constaté	-	35 à 40 kbit/s	110 à 130 kbit/s

Tableau I. 5: Caractéristiques de la norme 2G et ses évolutions [4]

I.3.3 La troisième génération (3G) :

Est une génération de systèmes mobiles labellisés IMT- 2000 par l'UIT. Ce système permet des services de communications plus rapides notamment pour la voix, la télécopie, l'Internet de n'importe quel endroit et à tout moment [2]. Les fréquences utilisées pour la 3G sont dans les bandes 900 MHz et 2100 MHz [8].

La troisième génération de systèmes cellulaires (3G) utilise notamment les standards suivants [16] :

- UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) : solution européen-japonaise pour les systèmes 3G
- une interface radio basée sur le WCDMA avec du FDD : UTRA-FDD
- une interface radio basée sur le TDMA-CDMA avec du TDD : UTRA-TDD
- L'UMTS se caractérise par des débits théoriques de l'ordre de 2 Mbit/s et pratiques de l'ordre de quelques centaines de kbit/s.
- CDMA 2000, qui existe notamment aux Etats-Unis dérivée d'IS-95.

Ces technologies permettent des débits beaucoup plus rapides que ceux de la génération précédente, et permettent des usages multimédias tels que la transmission de vidéos, la TV mobile, la visiophonie ou l'accès à internet haut débit [8].

I.3.3.1 Le réseau UMTS :

L'architecture du réseau UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) est similaire à celle du GSM. L'ensemble des constituants et des interfaces du réseau GSM a été reprise dans l'architecture du réseau UMTS [17].

Le réseau comporte deux domaines principaux :

- Le domaine de l'équipement de l'utilisateur
- le domaine de l'infrastructure :
- le réseau d'accès universel UTRAN
- le réseau cœur CN

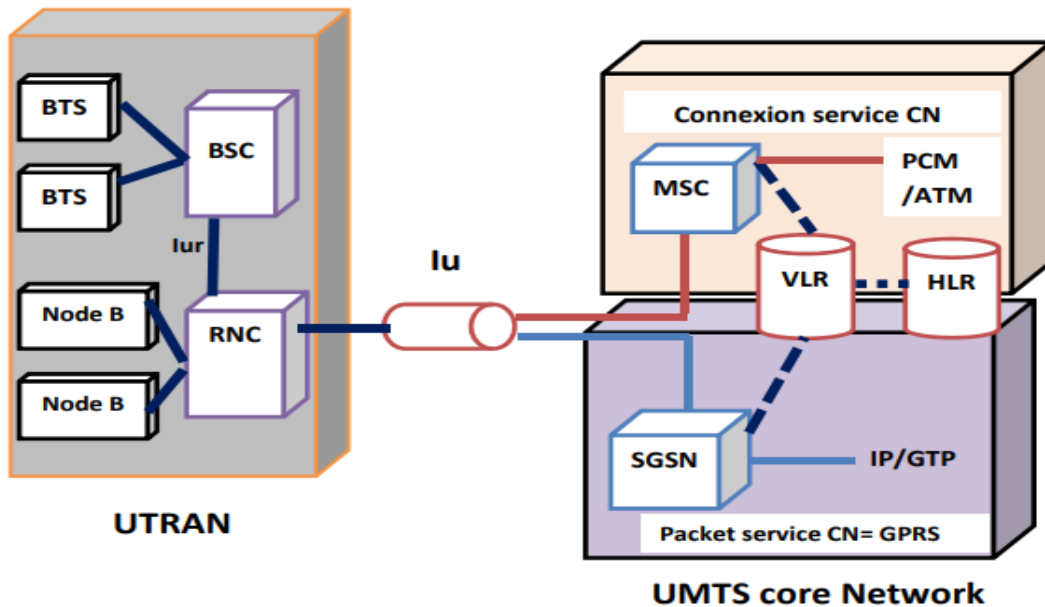


Figure I. 6: Architecture d'un réseau UMTS [17].

a. Les caractéristiques techniques d'UMTS :

- Garantir des services à haut débit avec un maximum de 144 Kbps dans tout type d'environnement et jusqu'à 2 Mbps dans des environnements intérieurs et avec une mobilité réduite.
- Transmettre des données symétriques (même débit montant et descendant) et asymétriques.
- Fournir des services à commutation de circuits (idéal pour la voix) et à commutation de paquets (idéal pour la transmission de données).
- Qualité de parole comparable à celle des réseaux câblés.
- Capacité et efficacité spectrale doivent être supérieures à celles des systèmes cellulaires de deuxième génération.
- Possibilité d'offrir des services multimédias lors d'une même connexion avec des qualités de services différentes (débit, taux d'erreurs, ...) pour les différents types de médias (voix, audio, données)
- Compatibilité avec les réseaux d'accès radio de deuxième génération. Itinérance entre les différents systèmes de troisième génération, c'est-à-dire la compatibilité entre eux.
- Couverture universelle en associant des satellites aux réseaux terrestres [12].

b. Avantages et inconvénients :

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Accès internet haut-débit depuis un équipement mobile ou un ordinateur	coût
Visiophonie	Changement des équipements usagers
Télévision	

Tableau I. 6: Les avantages et les inconvénients d'UMTS [4].

En quelques années, des extensions ont été mises au point afin d'améliorer les débits proposés. On observe notamment trois sous-technologies 3G [8] :

- Le HSPA (High Speed Packet Access), parfois appelé génération 3,5G, qui se caractérise par une évolution de l'UMTS pour un débit maximum théorique de 14,4 Mbit/s et pratique d'environ 3,6 Mbit/s).
- Le HSPA+ (High Speed Packet Access +), parfois appelé génération 3,75 G, qui se caractérise par un débit maximum théorique de 21Mbit/s et pratique d'environ 5 Mbit/s).
- Le DC-HSPA+ (Dual-Cell High Speed Packet Access+), également appelé génération 3,75 G, qui se caractérise par un débit maximum théorique de 42Mbit/s et pratique de plus de 10 Mbit/s.

c. Le type de multiplexage (3eme génération) :

➤ **Techniques de multiplexage CDMA (Code Division Multiple Access)**

- Plusieurs stations utilisent une même bande de fréquence et peuvent transmettre en même temps.
- Chaque station utilise son code propre pour transmettre (Code = une suite de n bits connue de l'émetteur et récepteur. Chaque bit (1 ou 0) à transmettre est multiplié par le code et on transmet n bits. On parle d'étalement de spectre.

La « QUASI-TOTALITÉ » des réseaux 3G ont adopté CDMA [18].

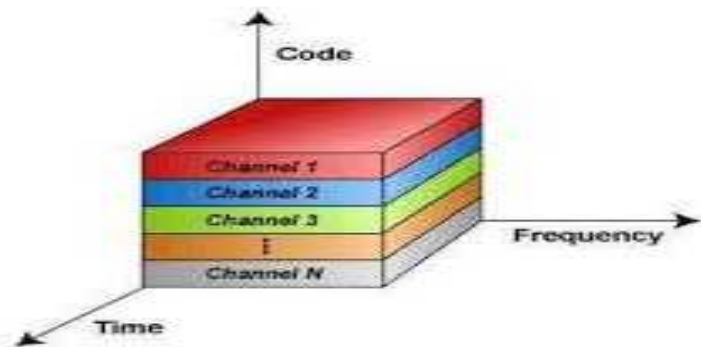


Figure I. 7 : La technique CDMA

Le tableau suivant montre les caractéristiques de la norme 3G et ses évolutions .

Technologie	W-CDMA	HSDPA	TD-CDMA	TD-SCDMA
Génération	3G	3,5G	3G	3G
Fréquences (MHz) Tx: Transmission Rx : réception	IMT-2000 : 1920-1980 (Tx) 2110-2170 (Rx) Bande 1900 : 1850-1910 (Tx) 1930-1990 (Rx)	Bande 1800 : 1710-1785 (Tx) 1805-1880 (Rx)	IMT-2000 : 1900-1920 2010-2025 2300-2400	1785-1805 1880-1900
Méthode de duplexage	FDD		TDD	
Méthode d'accès	CDMA			
Largeur d'un canal	5 MHz		5 MHz	1.6 MHz
Type de modulation	QPSK	QPSK, 16QAM	QPSK	
Type de commutation	circuit et paquet	paquet	paquet	circuit et paquet
Débit maximum théorique	384 kbits/s à 2 Mbits/s	14,4 Mbits/s	12 Mbits/s	128 kbits/s à 2 Mbits/s
Débit constaté	384 kbits/s	2 Mbits/s	128 kbits/s à 2 Mbits/s	-

Tableau I. 7: Caractéristiques de la norme 3G et ses évolutions [4].

I.3.4 La quatrième génération (4G) :

Les réseaux LTE (Long Terme Evolution), appelés commercialement 4G, représentent une évolution importante par rapport aux réseaux GSM et UMTS.

Les normes spécifiant les réseaux LTE sont issues du 3GPP comme les normes UMTS, mais elles introduisent de nombreuses modifications et améliorations [2].

Les évolutions principales de la 4G résident dans l'augmentation des débits maximum théoriques (meilleur débit réel et meilleure capacité des réseaux à écouler le trafic) et des délais de latence plus réduits (temps de réaction réduit permettant une meilleure interactivité). L'utilisateur dispose ainsi d'une connexion environ 3 fois plus rapide qu'en 3G [8].

Les fréquences utilisées pour la 4G sont dans les bandes 800 MHz, 1800 MHz et 2600 MHz comme l'UMTS [8], le LTE est une technologie cellulaire qui offre la possibilité de réutiliser les mêmes fréquences hertziennes dans des cellules radio mitoyennes, grâce aux

codages radio OFDMA et SC-FDMA et à un encodage permettant d'identifier les cellules. Cela permet d'affecter à chaque cellule une largeur spectrale variant de 5 à 20 MHz et donc d'avoir une bande passante plus importante et plus de débit dans chaque cellule [2].

I.3.4.1 Architecture du réseau 4G/LTE :

Comme tous les réseaux pour mobiles, celui de la 4G LTE se compose de trois parties comme le montre la figure suivante :

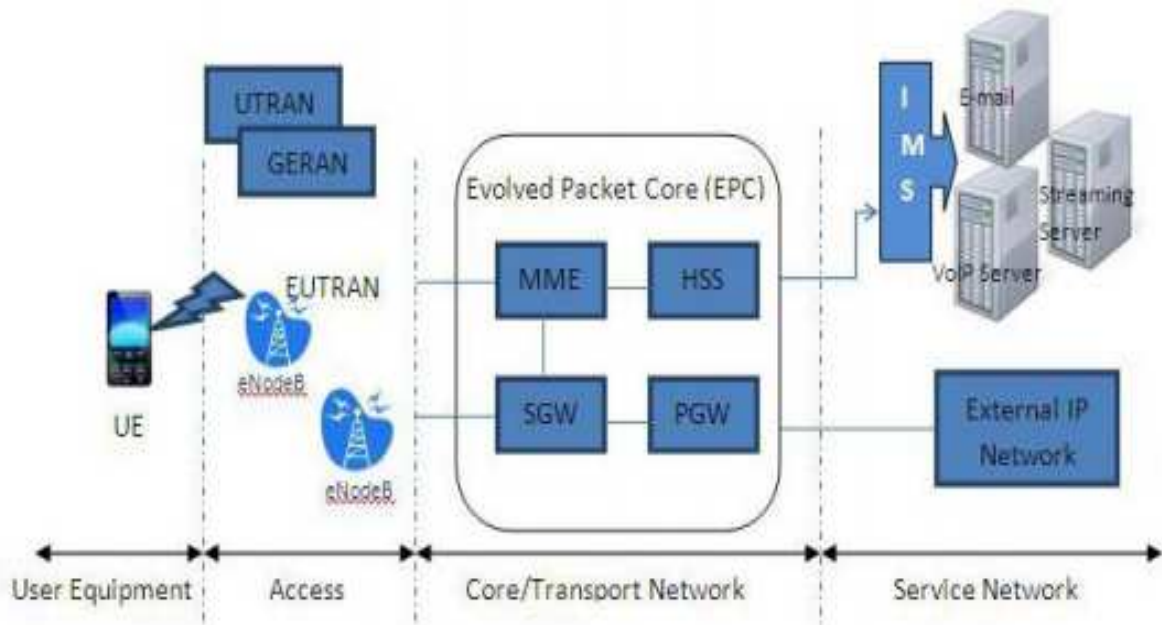


Figure I. 8: Architecture d'un réseau LTE [6]

- L'UE: Les équipements mobiles (smartphone, tablette, laptop) doivent être compatibles au réseau 4G qui permet un débit théorique de 100 Mbits/s.
- L'accès radio eUTRAN (evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) : Il ne contient que des eNodeB qui assurent l'échange radio avec l'E-UTRAN
- Le cœur de réseau l'EPC (Evolved Packet Core) tout IP: utilise des technologies « full IP»

C'est un réseau « plat », dans lequel tous les équipements IP communiquent directement entre eux sans avoir besoin d'effectuer des allers et retours avec les équipements de niveau supérieur.

L'EPC comporte quatre blocs fonctionnels :

- Entité MME (Mobility Management Entity) : parmi ces fonctionnalités.

Signalisation, Authentification, et Gestion de la liste de Tracking Area.

- Entité Serving GW (Serving Gateway): parmi ces fonctionnalités

Point d’ancrage pour le handover inter-eNodeB, Point d’ancrage pour le handover LTE et les réseaux 2G/3G. et Routage et relai des paquets.

- Entité PDN GW (Packet Data Network Gateway) : parmi ces fonctionnalités

Interface vers les réseaux externes (Internet et intranet), Allocation de l’adresse IP de l’UE, et Marquage des paquets dans les sens montant et descendant.

- Entité HSS (Home Subscriber Server) : Le HSS est un HLR évolué et contient l’information de souscription pour les réseaux GSM, GPRS, 3G, LTE et IMS.

I.3.4.2 La caractéristique technique du LTE :

- Amélioration de l’interface radio afin d’augmenter le débit montant/descendant et la capacité.
- Réduction du délai d’accès : le délai d’aller-retour est inférieur à moins de 10ms et d’initialisation est inférieur à 100 ms afin de supporter des services interactifs et temps réel.
- Mobilité : la performance de LTE est optimisée dans le cas où la vitesse est inférieur à que 15km/h. LTE supporte la vitesse de 120 à 350 km/h (voire 500 km/h, selon la bande utilisée)
- Flexibilité du spectre radio : LTE peut-être déployé dans des bandes allant de 1,25 MHz à 20 Mhz, et la bande appariée et non appariée de la 3G. Cela permet à l’opérateur de déployer LTE sur la bande existante, de ne pas demander le permis de nouvelle bande. LTE supporte FDD et TDD.
- Architecture « tout IP », il y a une partie significative du travail de 3GPP pour convertir l’architecture réseau du cœur vers une architecture tout IP qui est envisagée pour simplifier l’interfonctionnement avec les réseaux filaires et les réseaux sans fils non-3GPP.
- Architecture simplifiée permet d’améliorer l’extensibilité des réseaux.
- Compatibilité avec les réseaux 3G existants. Il faut que LTE supporte le handover avec les réseaux existants tels qu’UMTS/HSPA et GSM/GPRS/EDGE. De plus, il faut supporter le handover inter-domaines entre sessions de commutation de paquets et de circuits [19].

I.3.4.5 Le type de multiplexage (4eme génération)

La technologie LTE repose sur une combinaison de technologies sophistiquées a même d'élever nettement le niveau de performances (très haut débit et latence) par rapport aux réseaux 3G existants. Le multiplexage OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences. Le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le Wi-Fi ou le WiMax) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée [20].

I.4 La cinquième génération (5G) :

La 5G est la prochaine génération de normes de téléphonie mobile que l'UIT s'emploie à définir. Les systèmes, composants et éléments connexes prenant en charge des capacités plus poussées que celles des systèmes IMT-2000 (3G) et IMT évolués (4G) sont connus sous le nom d'IMT-2020 ou (5G) [21].

Malgré son nom, la 5G ne consiste pas en une amélioration des normes précédentes de télécommunications. Il s'agit plutôt d'une innovation de rupture qui va révolutionner les télécommunications et qui est susceptible d'apporter des changements radicaux dans les modèles commerciaux ayant cours chez les opérateurs [22].

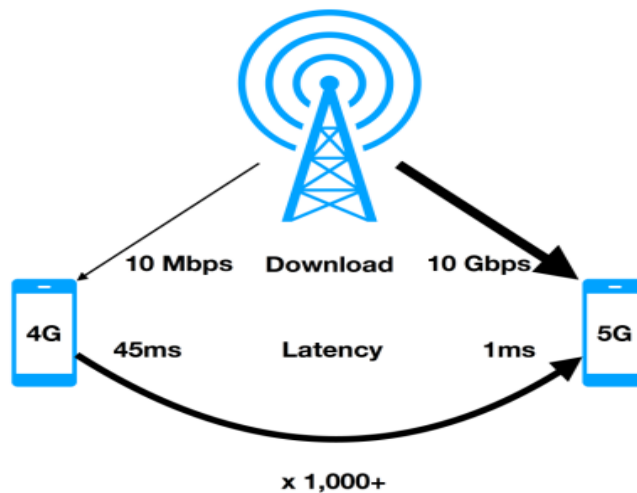


Figure I. 9: Comparaison 4G / 5G [22]

Les réseaux de 5 G devraient fournir des améliorations telles que [23] :

- 10 fois plus de débits expérimenté : l'ère des débits de pointe plus uniformes et multi Gbps.

- 10 fois moins de temps de latence : les niveaux de latence devraient être aussi bas que 1 ms.
- 10 fois plus de densité de connexion : activation de la connectivité Internet of Things (IoT) avec peu de complexité et de surcharge de signalisation.
- Augmentation de 3 fois dans l'efficacité spectrale : une utilisation plus efficace de la bande passante.
- 100 fois plus de capacité de trafic : réseaux très densifiés avec plus de points d'accès partout.
- 100 fois plus d'efficacité du réseau : réseaux énergétiquement efficace avec traitement de signal et matériels efficaces.

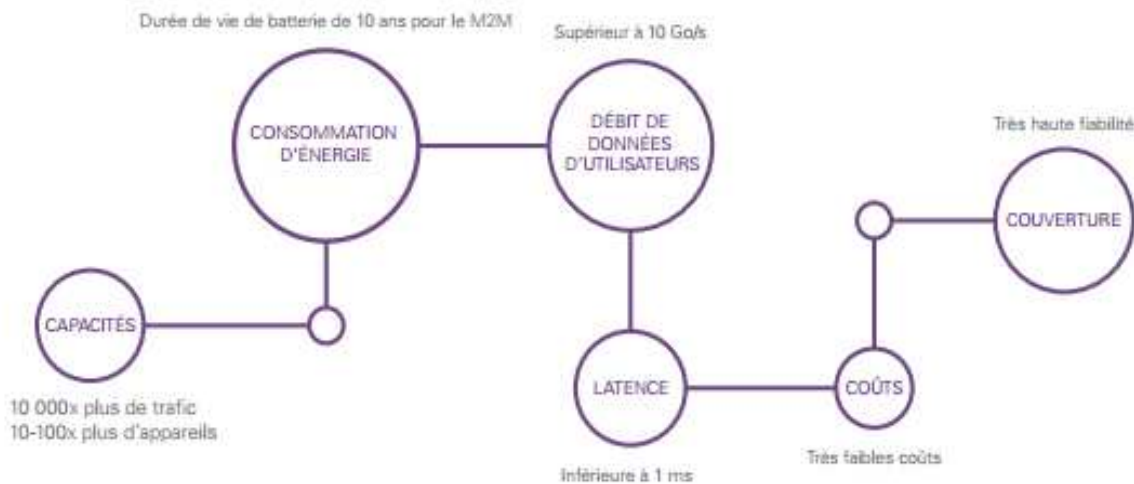


Figure I. 10 : Définitions de la 5G [1]

Répondre aux exigences mentionnées nécessite des changements radicaux dans le paradigme du réseau en plus d'innovations perturbatrices. Les réseaux 5G peuvent faire appel à un large éventail de nouvelles technologies. Cela permet un saut dans les performances qui éclipse ses prédécesseurs. Ces innovations toucheront la transmission et la conception de la couche physique en plus d'introduire des bouleversements dans les couches supérieures du réseau [23].

Parmi ces technologies :

- Communications dans la plage des ondes millimétriques.
- Entrée multiple sortie multiple massif (mMIMO).
- Mini-cellules et réutilisation du spectre électromagnétique.
- Communications sans fil full-duplex.
- Le déploiement d'une nouvelle génération d'antennes « intelligentes ».

I.4.1 Les caractéristiques de la 5G :

I.4.1.1 L'utilisation des fréquences des ondes millimétriques :

L'évolution technologique et culturelle dépendrait considérablement des systèmes de communication sans fil. Au cours des dernières années, les communications sans fil sont omniprésentes et sont déployées dans de nombreuses applications différentes. Les débits de données extrêmement élevés et l'amélioration des performances des réseaux sans fil sont des sujets de préoccupation importants pour satisfaire les futurs besoins des clients.

De manière inhérente, un système nécessitant un débit de données élevé se traduit directement par une demande de bande passante disponible élevée, l'utilisation de fréquences de porteuse beaucoup plus élevées a été proposée comme solution pour une bande passante plus large disponible [24].

La bande de fréquence à ondes millimétriques (onde mm) et au-delà a fait l'objet de nombreuses recherches pour surmonter la saturation des ressources spectrales [24] .

Ces fréquences correspondent à des fréquences de 30 GHz à 300 GHz, associées à une longueur d'onde de 10 mm à 1 mm, respectivement. Le principe derrière les ondes millimétriques est d'offrir une bande passante disponible élevée et une puissance transmise élevée [25].

Ce qui distingue ces bandes à haute fréquence des autres est leur vitesse. Si le codage des signaux radio est approprié, les vitesses 5G seront mille fois plus rapides que celles des générations précédentes de téléphonie mobile [22].

Cependant, ces fréquences plus élevées ont des problèmes de propagation du signal sur une grande distance (figure I.11).

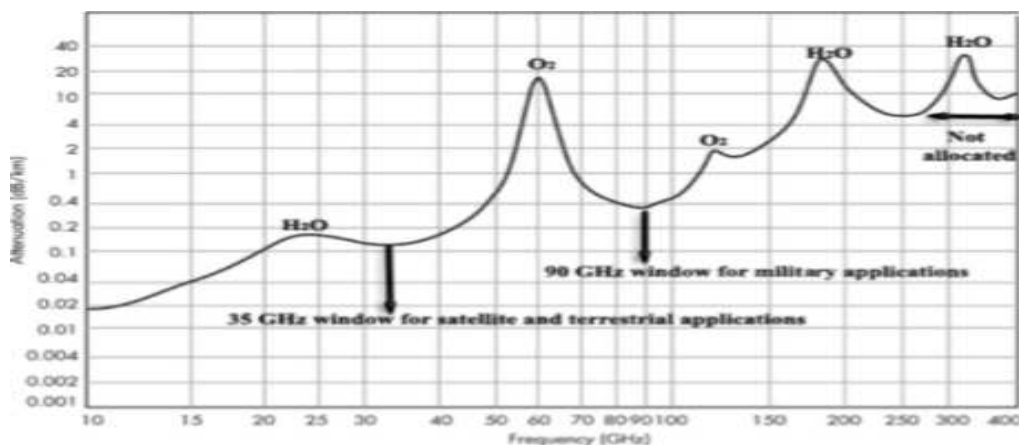


Figure I. 11 : Atténuation en fonction de différentes fréquences [24]

À partir de la figure (I.11), ces pics divisent le spectre en quatre fenêtres : 35, 90, 140 et 220GHz, ce qui permet de surmonter la limitation des ondes radio. Les spécifications de ces fenêtres en fonction de la valeur d'atténuation inférieure et de la largeur de bande large peuvent être adaptées à ces fenêtres pour les communications sans fil avec un débit binaire élevé [24].

Il y a plusieurs facteurs impliqués dans cette atténuation [25] :

- Tout d'abord, les signaux naturellement atténués sur les distances parcourues par la transmission aérienne. Cette atténuation est proportionnelle au carré de la fréquence du signal
- Des facteurs supplémentaires rendent ces fréquences encore pire :
- Les gaz atmosphériques communs, tels que l'oxygène et la vapeur d'eau, absorbent fortement les signaux de fréquences de 60 GHz.
- La pluie est un obstacle encore plus grand que les gaz, provoquant une atténuation de près de 10 dB / km à toutes les très hautes fréquences et au-dessus.
- Les matériaux les plus dommageables pour la propagation de fréquence sont les matériaux solides. Même voyager sur de courtes distances, les signaux gigahertz perdent beaucoup de puissance lorsqu'ils voyagent dans les matériaux comme la brique, les vitres teintées, les murs intérieurs et les cabines. Les pertes de puissance pourraient facilement être plus de 40 dB d'atténuation.

I.4.1.2 Entrée multiple sortie multiple massif (mMIMO) :

Massive MIMO est la technologie de couche physique inférieure à 6 GHz la plus convaincante pour un futur accès sans fil. Le concept principal consiste à utiliser de grands réseaux d'antennes au niveau des stations de base servir simultanément de nombreux terminaux autonomes comme illustré la figure (I. 7) [26] .

La communication dans MIMO se déroule sous deux formats appelés diversité spatiale et multiplexage spatial.

Dans la diversité spatiale, les mêmes données sont transmises par des chemins différents. Les données sont reçues au plusieurs antennes et traitées. En multiplexant dans l'espace, nous pouvons améliorer la fiabilité du lien.

Le multiplexage spatial, où les données sont divisées en petites parties et différentes transmises par différents chemins, nous augmentons ainsi la vitesse, mais la fiabilité est moindre [27].

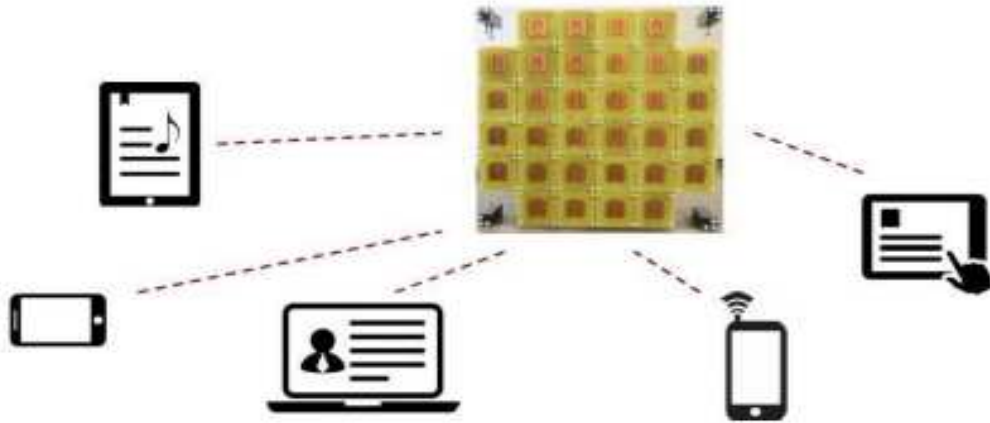


Figure I. 12: Massive MIMO exploite de grands réseaux d'antennes pour multiplexer spatialement de nombreux terminaux. [26]

Un système MIMO se compose d'un certain nombre d'antennes émettrices et réceptrices et d'un canal en atténuation progressive à travers lequel les données seront envoyées.

Considérons que nous avons M , nombre d'antennes d'émission et N , nombre d'antennes réceptrices, L'équation de base pour le système MIMO est donnée par [27].

$$Y = H.X + W$$

Où, $Y = N \times 1$ Matrice du récepteur

$H = N \times M$ Matrice de canaux

$X = M \times 1$ Matrice de transition

$W =$ bruit

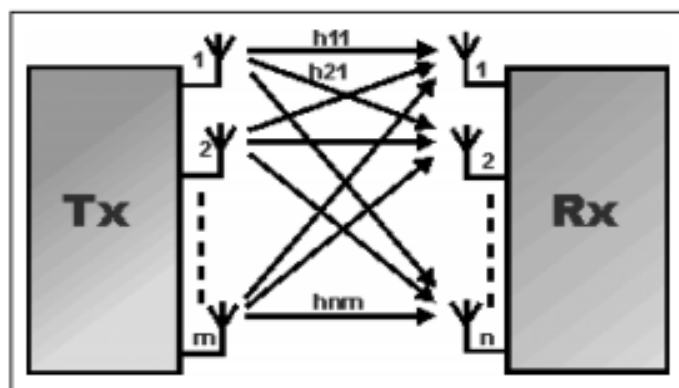


Figure I. 13: Système MIMO

Les matrices MIMO contiennent plusieurs antennes pouvant être utilisé pour former le faisceau et diriger les signaux transmis (et obtenir les signaux reçus) vers une direction spécifique.

Cette technologie peut augmenter l'efficacité du canal, en augmentant les données ainsi que la réduction de la consommation d'énergie car des signaux de faible puissance peuvent être transmis et reçus [25].

Nous pouvons réduire le taux d'erreur. Si nous pouvons transmettre plusieurs versions de notre message par différents canaux, la probabilité que tous les signaux soient affectés est la même. Au destinataire ces multiples copies, sont reçues et traitées pour recevoir notre message original [27].

Massive MIMO aura des dizaines ou des centaines d'antennes et pas seulement à la station de base mais dispersée dans toute la cellule. Ces réseaux multi-antennes seront placés dans des endroits bien conçus et en visibilité directe afin de mieux utiliser leurs propriétés.

Les réseaux d'antennes peuvent orienter les faisceaux vers un appareil connecté, ce qui réduit la puissance nécessaire pour communiquer tout en produisant un signal à faible interférence [25].

Massive MIMO peut être utilisé pour atteindre directement les objectifs de la 5G en augmentant le débit de données et latence décroissante. Il répond aussi indirectement aux objectifs en permettant aux fréquences des ondes millimétriques ont une utilité pratique malgré leurs caractéristiques d'atténuation et faible diffraction [25].

I.4.1.3 Utilisation de petites cellules :

La 5G, verra encore probablement une forte augmentation des volumes de données échangés, et qui utilisera des bandes millimétriques, aux faibles capacités de propagation, nécessitera probablement la généralisation de la mise en place d'émetteurs radioélectriques de faible puissance (small-cells).

Des estimations évoquent, pour satisfaire la demande et permettre l'introduction de la 5G, un nombre d'au moins 10 small-cells par site macro en milieu urbain, milieu dans lequel les cellules sont déjà relativement resserrées pour faire face à la densité des usages[28].

En déployant de petites cellules (micro, pico). Bien qu'elles couvrent une zone géographique beaucoup plus petite que les macros cellules, les petites cellules améliorent la couverture, les capacités et la qualité de service des réseaux (Figure I.14).

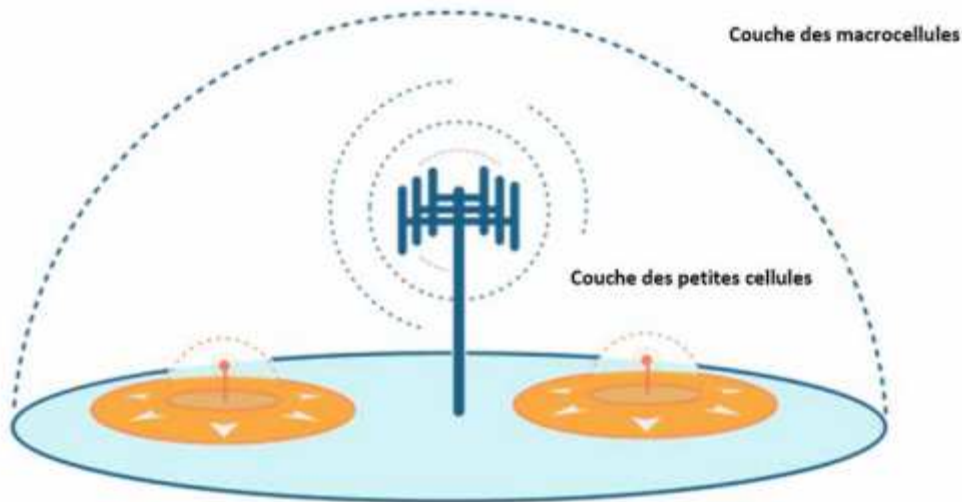


Figure I. 14 : Réseaux à macro cellules et réseaux à petites cellules

Le déploiement de petites cellules est un moyen d'améliorer les capacités et la qualité des réseaux.

Certains opérateurs de réseaux hertziens utilisent déjà les petites cellules pour améliorer les capacités et la couverture de leurs réseaux, en particulier dans des environnements urbains à forte densité [21].

I.4.1.4 Communication sans fil full-duplexe :

La normalisation en cours des spécifications de la 5G n'empêche pas les constructeurs d'équipement d'anticiper sur les futurs besoins de la prochaine génération de réseau mobile. Ou d'exploiter la tendance pour introduire de nouvelles solutions.

La technologie sans fil permet de doubler les capacités de transfert d'une smallcell traditionnelle. Cette technologie est présentée « *comme une étape vers 5G* »[29].

Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception se font soit sur des bandes de fréquences différentes (duplexage en fréquences dit FDD, frequency division duplexing), soit à des instants différents (duplexage temporel dit TDD, time division duplexing) [28] .

« full-duplex » utilise une seule fréquence pour assurer simultanément l'envoi et la réception des données au lieu d'utiliser deux fréquences (half-duplex), chacune étant dévolue à un flux montant ou descendant, un émetteur-récepteur de séparation des communications full-duplex permet de limiter grandement les interférences entre les stations radio, macro et small, et les terminaux [29].

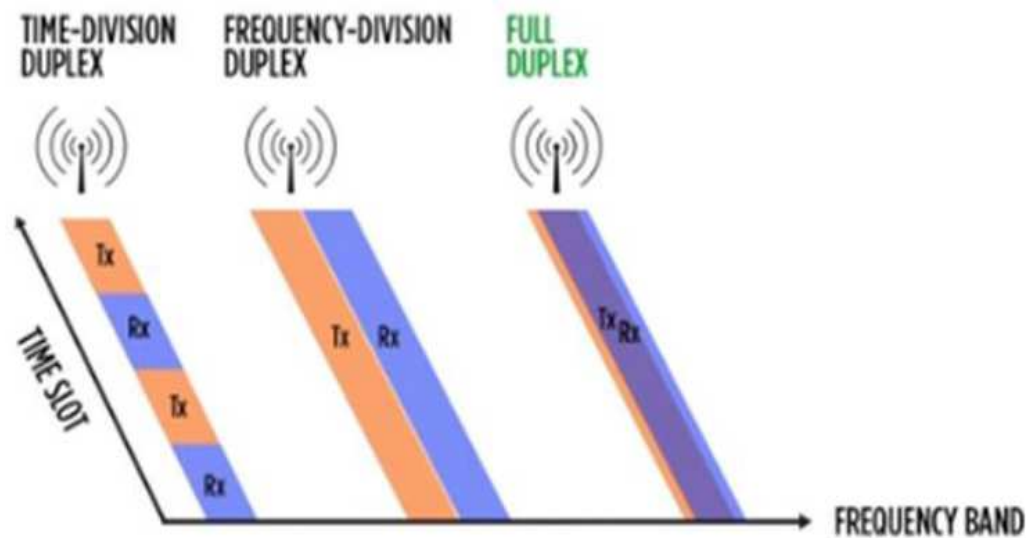


Figure I.15: Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD

I.4.1.5 Le déploiement d'une nouvelle génération d'antennes « intelligentes » :

Ces antennes intelligentes constituées d'un grand nombre d'antennes miniaturisées permettent d'atteindre des débits et une capacité de transmission inaccessibles aujourd'hui.

La technologie des antennes intelligentes permettra deux choses : L'augmentation du nombre d'utilisateurs que pourra desservir un système cellulaire donné.

L'accroissement de l'éventail des services offerts par le système cellulaire En faisant circuler l'énergie directement entre la station et le téléphone cellulaire de l'utilisateur on produit :

- Une réduction des bruits ambiants
- Une élimination des interférences provenant d'autres utilisateurs et obstacles Cette amélioration de qualité et l'augmentation du nombre d'utilisateurs et de services sont des atouts pour les futurs systèmes sans fil de troisième génération [30].

I.4.2 Le défi de la 5G:

Le déploiement des réseaux mobiles actuels est essentiellement basé sur l'utilisation de stations de base dites « macro » ; des sites dotés d'antennes de forte puissance sont installés pour garantir la couverture d'une zone relativement large, avec une qualité de service suffisante. L'architecture du réseau est en constante évolution : de nouvelles stations radioélectriques sont régulièrement installées afin d'augmenter la capacité des

réseaux en vue de mieux répondre aux préoccupations des utilisateurs, en ce qui concerne la couverture indoor et outdoor ainsi que la qualité de service. Néanmoins, l'augmentation continue des demandes capacitaires impose aux opérateurs, déjà aujourd'hui, de densifier leurs réseaux avec des cellules toujours plus petites. La 5G, qui verra encore probablement une forte augmentation des volumes de données échangés, et qui utilisera des bandes millimétriques, aux faibles capacités de propagation, nécessitera probablement la généralisation de la mise en place d'émetteurs radioélectriques de faible puissance (small-cells). Des estimations évoquent, pour satisfaire la demande et permettre l'introduction de la 5G, un nombre d'au moins 10 small-cells par site macro en milieu urbain, milieu dans lequel les cellules sont déjà relativement resserrées pour faire face à la densité des usages.

Pour qu'un déploiement puisse avoir lieu les opérateurs de téléphonie mobile ont traditionnellement besoin d'installer leurs sites sur des « points hauts » (pylônes, toitures, etc...). Ce besoin restera avéré pour les réseaux 5G, mais sera encore plus sensible pour deux raisons principales :

- Les antennes 5G seront probablement beaucoup plus volumineuses (de l'ordre du m² pour certaines) que les antennes actuelles 2G, 3G ou 4G, du fait des traitements massive MIMO susmentionnés, qui nécessiteront l'utilisation de très nombreux éléments rayonnants. En outre, il sera probablement nécessaire de déployer des antennes supplémentaires, à même d'utiliser les nouvelles bandes 5G. La réutilisation des mats actuels risque donc de s'avérer problématique et il conviendra de trouver de nouveaux sites (éventuellement colocalisés).

- Cette recherche de nouveaux sites devra également être menée pour l'implantation de petites cellules sur des points « semi-hauts », mais avec une attention d'autant plus forte que la densité de ces sites devra être élevée : les opérateurs devront dès lors déployer leurs équipements sur des infrastructures urbaines comme les abribus, les éclairages ou les bâtiments publics, les panneaux publicitaires, etc...

En outre, le raccordement au réseau des sites 5G posera la question du coût de leur raccordement en fibre optique, dans la mesure où celle-ci sera vraisemblablement nécessaire dans la majorité des cas pour assurer la qualité de service attendue [28].

Les fibres optiques pouvant être utilisés comme moyen de transmission pour distribuer des signaux millimétriques dans le réseau d'accès avec de faibles pertes et une bande passante disponible illimitée. Alors L'intégration entre les composants radio et optiques est

réalisée pour la fourniture d'une technologie répandue connue sous le nom de Radio over-Fibre (RoF) une solution innovant pour surmonte le problème rencontré par ce réseau en utilisant la technologie de distribution de données sans fil à ondes radios sur voie optique.

On mettra dans le deuxième chapitre une étude détaillée, dont on tâchera de décrire le principe de la transmission RoF.

I.5 Conclusion:

Nous avons commencé notre chapitre par les concepts généraux tel que les réseaux mobiles et leurs évolutions et les différentes infrastructures 2G, 3G et 4G, leurs fonctionnalités et leurs caractéristiques, suivies par les réseaux mobiles 5G, ainsi que ses composantes, son architecture et ses caractéristiques, et on a fini par le défi majeur de la 5G et les solutions envisagées pour assurer la couverture et la qualité de service attendues.

**Chapitre II : *La Transmission Radio sur
Fibre (Rof)***

II.1 Introduction:

Le mélange de deux techniques, radio et optique, a attiré beaucoup l'attention suivant l'essor du développement des communications mobiles et sans fil. Aujourd'hui, des appareils intelligents, tels que le mobile, le PC ou une tablette, permettent de fournir des services très évolutifs, notamment les services multimédias enrichis comme ceux fournis par le réseau fixe. En conséquence, les futurs réseaux d'accès devront être capables de transporter des flux de données pouvant atteindre le gigabit par seconde pour des terminaux mobiles sans fil.

Cette demande de haut débit peut être satisfaite par l'utilisation de la technique millimétrique (30 – 300 GHz), mais la portée est courte par rapport aux signaux micro-ondes. Pour résoudre cette limitation, la technique optique s'est introduite dans le monde radiofréquence. Cette solution se base sur des technologies hybrides dites radio sur fibre (RoF : radio on fiber).

Ce chapitre définit dans un premier temps la notion et les composants de la technologie radio sur fibre, ainsi les différentes techniques utilisées pour sa transmission et détection, et enfin l'application de la radio sur fibre.

II.2 La technologie Radio sur Fibre RoF :

II.2.1 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 [31].

La RoF est consacrée à la transmission optique de signaux analogiques micro-ondes. Par conséquent, la liaison RoF exploite l'efficacité des fibres optiques pour la distribution des signaux radio vers plusieurs points d'accès sans fil qui offrent l'avantage de la mobilité [32].

En effet, au lieu de distribuer des signaux numériques tels que l'Ethernet (IEEE 802.11ad) ou HDMI (Wireless HD) pour communiquer entre chaque point d'accès, ce qui nécessite des processus de traitement du signal tel que des conversions de signaux analogique/numérique et numérique/analogique, les systèmes RoF distribuent les signaux radio dans leur format analogique initial. Les signaux radio sont transposés sur une porteuse optique par modulation de l'intensité ou phase de la lumière d'une source laser sans changer le format de modulation. Ceci est possible par l'utilisation de fibres optiques en silice qui offrent une large bande passante et une faible atténuation [32].

II.2.2 Le système de communication RoF :

Les technologies Radio-sur-Fibre s'appuient sur des technologies de transmission par fibre optique pour distribuer des signaux RF entre une station centrale (CS ou Central Station) et des modules d'antennes distribués (Remote Antenna Units : RAUs ou Stations de Bases (SB ou Base Station). Ces dernières communiquent par signaux radio avec les stations des abonnés (MS : Mobile Station) [24].

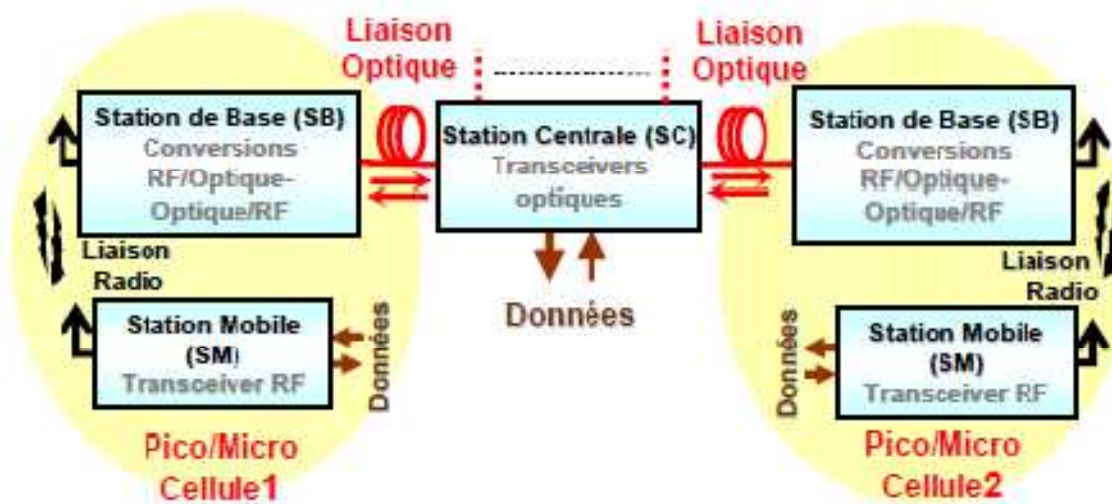


Figure II. 1 : Synoptique d'un système radio sur fibre classique

Généralement, la génération optique est implémentée dans la station centrale (CS) tandis que les signaux optiques portant des données sont transmis de la CS à la station de base (BS) par une fibre optique, où les signaux en bande de base ou à fréquence intermédiaire (IF) peuvent être transmis à BS pour d'autres applications utilisées [24].

La fréquence radio (RF) est l'étape de conversion vers le haut débit. Cette fréquence est appliquée à la liaison optique à l'aide du convertisseur électronique-optique (généralement un type de transmetteur laser). A l'extrémité de la réception, le signal RF est récupéré à partir du convertisseur optique-électronique (photodiode) [33].

Dans les systèmes de communication à bande étroite et WLAN, les fonctions de traitement de signaux RF, telles que la conversion ascendante de fréquence, la modulation de porteuse et le multiplexage, sont exécutés au niveau du BS, et immédiatement intégrées dans le module d'antenne. La technologie RoF permet de centraliser les fonctions de traitement du signal RF dans un emplacement partagé en utilisant la fibre optique afin de distribuer les signaux RF [34].

Ainsi, la station de base dans un système RoF devient beaucoup plus simple par rapport au système traditionnel : l'adaptation aux niveaux désirés et la conversion entre le signal RF et le signal optique sont ses fonctionnalités [35].

II.3 Systèmes de transport des signaux RF, IF, bande de base :

Les systèmes radio-sur-fibre sont généralement classés selon trois principaux types d'architecture de transport : Radio Fréquence (RF), fréquence intermédiaire (IF) et bande de base. Le choix de l'architecture détermine le matériel nécessaire au niveau de la BS et sa complexité. Un système duplex complet peut utiliser des architectures de transport différentes sur la liaison montante et sur la liaison descendante [36].

II.3.1 Transport de fréquence RF sur fibre :

Principe : La solution "radio sur fibre" consiste à transporter directement sur fibre une porteuse optique modulée par un signal radiofréquence contenant les données [37].

Cette approche présente l'avantage que les signaux ne subissent aucune transposition de fréquence au niveau des stations de bases qui bénéficient d'une architecture simple nécessitant uniquement des conversions électro-optique et opto-électrique, amplification RF, et émission/réception RF.

En outre, un contrôle centralisé de traitement des signaux permet de faciliter l'évolutivité du système.

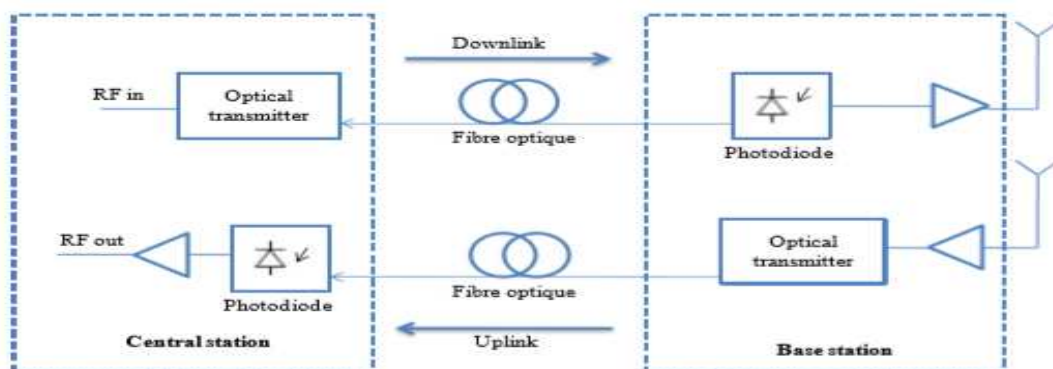


Figure II. 2 : Architecture RoF avec transport radio sur fibre optique [33]

Toutefois, la transmission directe des signaux RF s'avère d'autant plus difficile que la fréquence RF est élevée en raison des effets néfastes de la dispersion chromatique. Par ailleurs, dans le domaine millimétrique (30-300 GHz), les prix des composants optoélectroniques demeurent élevés. Des photodiodes à large bande passante avec un bon rendement de conversion sont nécessaires tant au niveau du CS (station de contrôle) que de

chaque BS (station de base). La modulation externe est effectuée à l'aide des modulateurs ultra-rapides permettant d'atteindre des vitesses de modulation élevées (> 40 GHz) comme le modulateur Mach-Zehnder (MZM) ou le modulateur à électro-absorption (EAM) [36].

II.3.2 Transport de fréquence IF-sur-fibre :

Principe : L'architecture IF-sur-Fibre permet le transport des signaux RF en réduisant fortement l'effet de la dispersion chromatique des fibres par le fait de transmettre des signaux radio sur fibre par le biais des fréquences intermédiaires (IF) avec une transposition de fréquence effectuée à la BS [31].

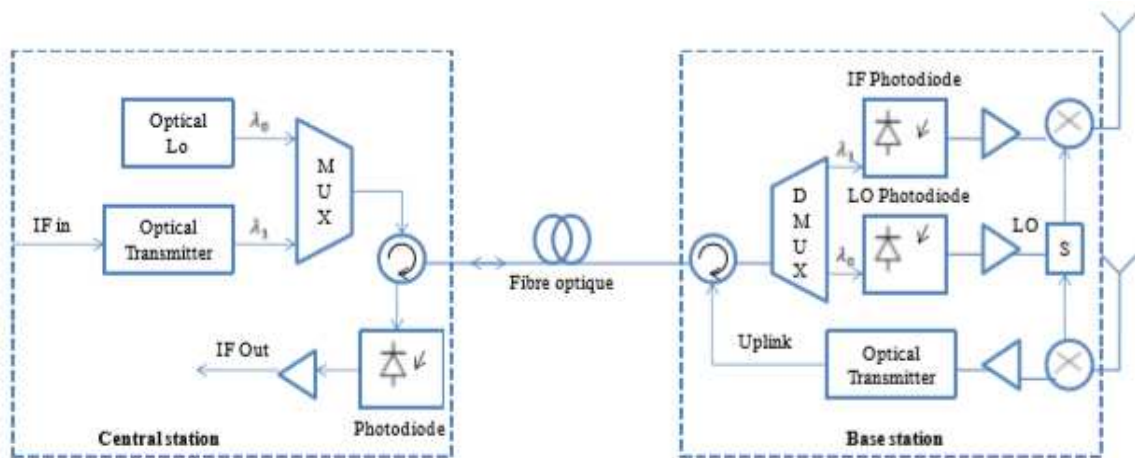


Figure II. 3 : Architecture RoF avec transport IF sur fibre optique [33]

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

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

Toutefois, cette architecture reste compliquée par rapport à l'architecture RF-sur-Fibre, dans la mesure où des oscillateurs locaux et des mélangeurs sont nécessaires au niveau de chaque BS pour effectuer les transpositions de fréquence, ces oscillateurs pouvant être partagés entre les liens montant et descendant [36].

II.3.3 Transport du signal en bande de base :

Principe : Dans cette architecture, un signal en bande de base est généré et transmis à travers la fibre optique depuis la station de contrôle jusqu'aux stations de base [31].

Il consiste à moduler directement de laser avec un signal électrique en bande de base et à acheminer ensuite le signal optique résultant ("signal optique en bande de base") par fibre[35].

Sur le lien descendant, le signal en bande de base détecté au niveau de la station de base est transposé sur une porteuse RF (i.e. onde millimétrique) avant qu'il soit rayonné par l'antenne. Réciproquement sur le lien montant, le signal RF reçu par l'antenne doit être converti en bande de base avant d'être acheminé vers la station centrale [31].

L'avantage de cette technique est qu'elle permet de réduire considérablement les effets de la dispersion du fait d'une transmission en bande de base, mais elle exige des équipements électro-optiques à haute fréquence coûteux (mélangeurs) [33].

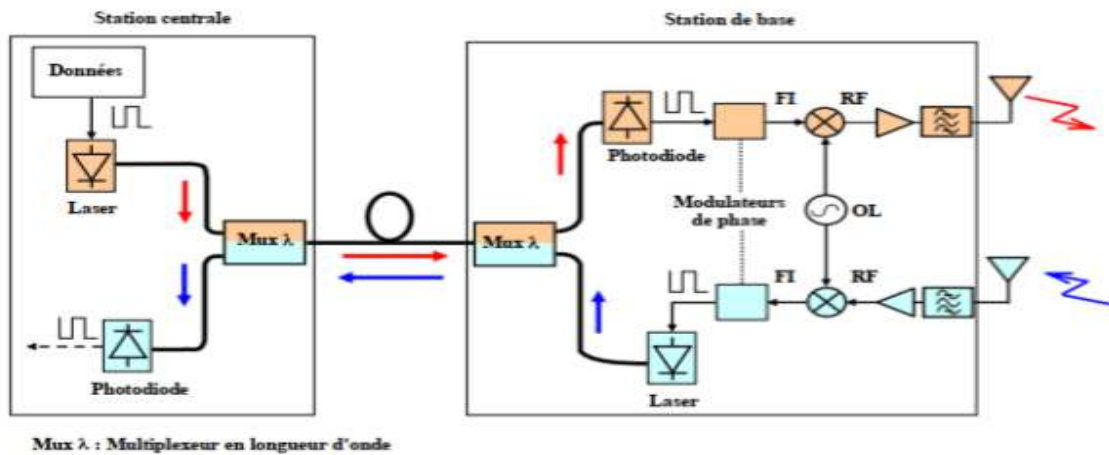


Figure II. 4 : Architecture RoF avec transport en bande de base sur fibre optique [35]

II.3.4 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 [37].

II.3.4.1 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 [38].

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 [39].

II.3.4.2 L'élément de connexion : la fibre optique

Le signal optique modulé est transmis par une fibre optique du modulateur jusqu'au photodétecteur [37]. 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) [40].

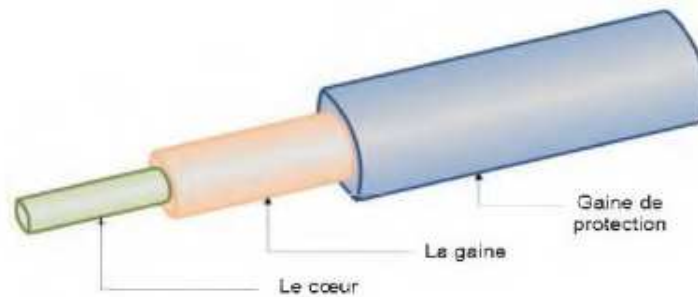


Figure II. 5 : Structure de la fibre optique

Il existe deux types de fibres optiques : la fibre monomode (SMF : Single Mode Fiber) et la fibre multimode (MMF : Multi Mode Fiber), ce dernier peut être distingué en deux sous-types: la fibre multimode à saut d'indice (si le changement d'indice entre cœur et gaine est brusque) et à gradient d'indice (si l'indice de réfraction décroît graduellement du cœur vers la gaine) [40].

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

Tableau II. 1 : Comparaison entre les différents types de fibres optiques

II.3.4.3 Le récepteur : la photodiode

Le photo-détecteur permet de réaliser la conversion optique – électrique du signal avec une sensibilité importante pour la longueur d’onde utilisée (choix du matériau). Le photo-détecteur 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 traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d’une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau [33].

II.3.5 Les techniques de génération des signaux RF sur la fibre optique :

II.3.5.1 Génération du signal RF par hétérodynage optique de deux lasers :

La méthode la plus simple et la moins chère de générer des signaux millimétriques consiste à battre deux lasers monomodes indépendants sur une photodiode à haute vitesse. La Figure II.6 montre une configuration pour la génération des ondes mmW par hétérodynage optique utilisant deux sources lasers incohérentes. La fréquence du signal RF après la photodiode est égale à la différence entre les deux fréquences des ondes émises par les deux sources lasers [24] [41].

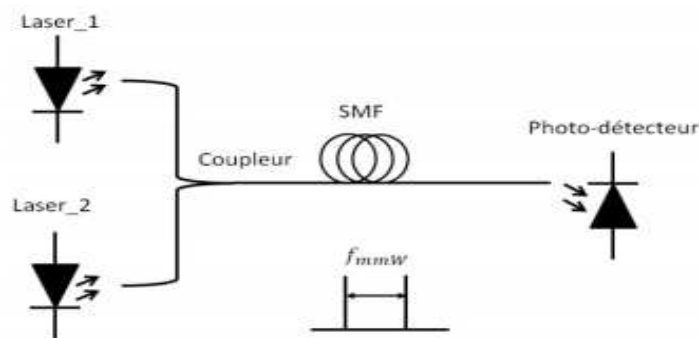


Figure II.6: Génération en mmW par deux sources lasers [41]

On utilise donc deux lasers émettant aux fréquences f et $f + f_{RF}$, les puissances respectives P_1 et P_2 .

Le photo-courant est alors :

$$I_{PD} = \delta_{PD} \{ (P_1 + P_2) + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos(2\pi f_{RF} t + \phi_2(t) - \phi_1(t)) \} \quad \text{éq : II.1}$$

Où :

« δ_{PD} » est la sensibilité du photo-détecteur

« ϕ_1, ϕ_2 » Les phases des lasers 1 et 2 [36].

En termes de bilan de puissance, on remarque que c'est la puissance optique continue qui est convertie en puissance micro-onde, par conséquent avec deux lasers de 40 mW il est possible d'obtenir près de 80 mW de puissance radio dans une charge 50 ohm. La limite vient maintenant du photo-détecteur qui doit être capable de pouvoir recevoir de fortes puissances optiques et de générer de fortes puissances électriques sans saturation [36].

Dans ce cas les deux sources lasers sont indépendantes ce qui implique que les deux tons soient aussi indépendants. Pour générer un signal RF à faible bruit de phase, les phases des deux lasers sont généralement verrouillées par injection optique ou par une boucle à verrouillage de phase optique ou électro-optique [41].

II.3.5.2 Génération du signal RF par modulation d'intensité:

La modulation optique est le principe fondamental pour la transmission du signal radiofréquence sur le domaine optique. Pour les liaisons optiques micro-ondes, les diodes lasers peuvent être modulées directement comme illustré sur la Figure II.7, ou en utilisant un modulateur externe, tel qu'un modulateur Mach-Zehnder (MZM). Les deux cas présentés permettent de réaliser une modulation d'intensité [41].

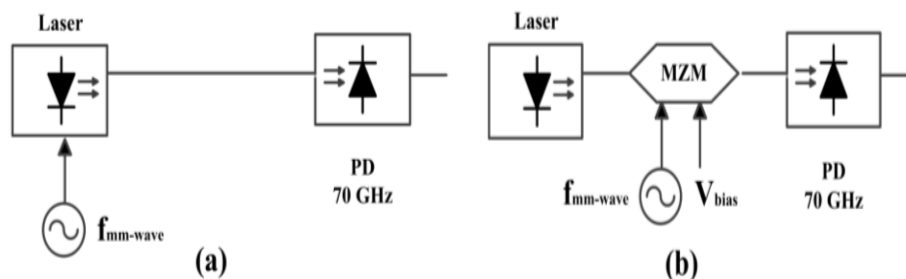


Figure II. 7 : Génération des signaux RF par modulation directe du laser (a), et modulation externe (b) [24]

Un laser monomode et une modulation d'intensité peuvent être utilisés pour générer une onde millimétrique souhaitée et pour minimiser également le bruit de phase [24]. Dans cette approche, les signaux optiques cohérents sont générés à partir d'une modulation optique directe ou externe de l'intensité du laser en utilisant un signal RF. Par conséquent, les doubles bandes latérales (DSB) autour de la fréquence optique sont exclues à la fréquence désirée.

Le premier schéma de la Figure II.7 (a) présente une modulation directe en modulant simplement le courant de polarisation du laser par une source RF. La configuration de cette technique est très simple, mais la largeur de bande de modulation est limitée à 10 GHz. Cette technique est exploitée sur la transmission optique en bande de base, mais cela induit

également des chirp [24]. Les effets de la dispersion chromatique combinée au « chirp » engendré par la modulation directe, limitent, par exemple, le débit de transmission [41].

Le deuxième schéma de la Figure II.7 (b) présente une modulation externe via un modulateur électro-optique (EOM), tel qu'un modulateur de Mach-Zehnder (MZM), est appliquée sur le champ optique à partir d'un laser. Le spectre optique en sortie de l'EOM contient la porteuse optique et le DSB séparés avec la fréquence d'onde millimétrique souhaitée, ce qui entraîne la dispersion chromatique de la puissance d'onde millimétrique. Cette technique souffre également d'une perte d'insertion élevée.

La génération optique des micro-ondes basée sur la technique de modulation externe est généralement implantée en cascade de deux modulateurs EOM (Modulateur Electro-Optique). Comme la montre la Figure II.8, deux EOM en configuration Modulateur Mach Zehnder sont utilisés, le premier, commandé par un oscillateur local à 30 GHz, est à l'origine de la conversion optique de fréquence, ce MZM est polarisé à son minimum de transmission afin de doubler la fréquence de l'oscillateur local (OL) [41].

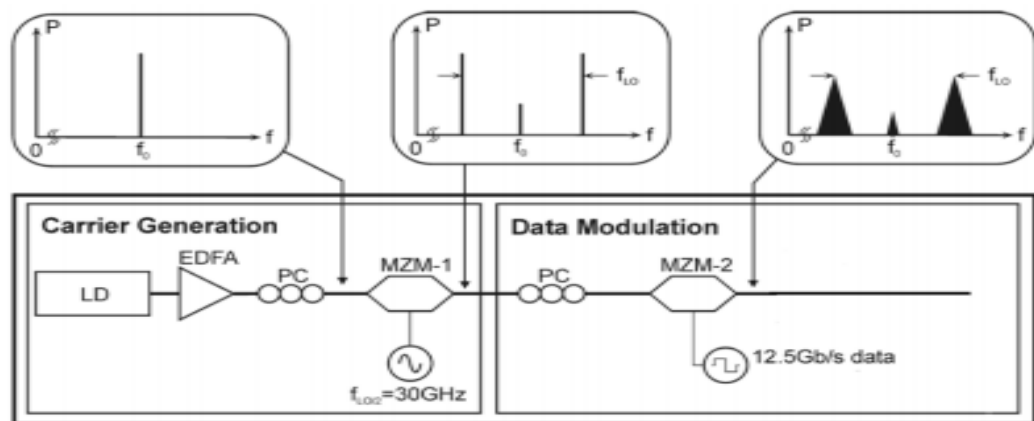


Figure II. 8: Génération des ondes mmW avec deux MZM

II.3.6 Les techniques de déport radio sur fibre :

Les techniques de modulation permettant de réaliser un déport radio sur fibre sur une fréquence porteuse ou intermédiaire peuvent se classer en deux catégories. Une catégorie est la détection directe et la détection hétérodyne [42].

II.3.6.1 La détection directe :

Dans ce cas une photodiode est utilisée pour recevoir le signal, elle convertit la puissance optique en courant électrique, Ces modulations avec une détection directe conviennent bien pour des signaux dont les fréquences porteuses sont inférieurs à 10 GHz.

Cependant pour des signaux ayant des fréquences plus élevées, trouver des composants capables d'être modulés suffisamment rapide devient plus difficile. Les composants qui génèrent un signal radio sur fibre pour un système à détection directe sont, soit un laser dont le courant de polarisation est modulé, soit un laser continu couplé à un modulateur externe (électro-absorption ou Mach-Zehnder) [42].

La Figure II.9 décrit la première liaison appelée "liaison à modulation directe" où l'enveloppe du signal optique généré par une diode laser est modulée par le signal RF portant les données à transmettre, ce signal RF est appliqué sur le courant de polarisation du laser [32].

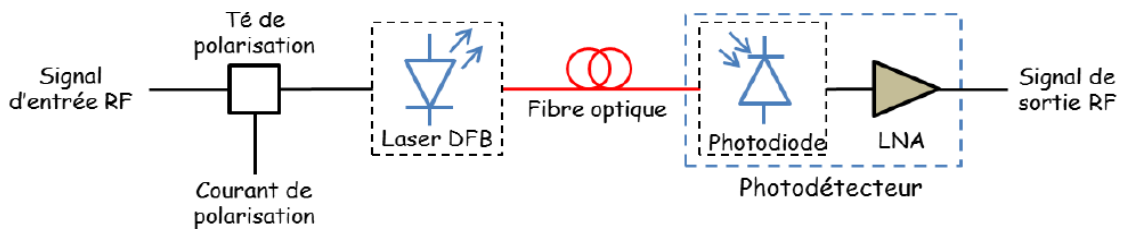


Figure II. 9: Liaison à modulation directe

II.3.6.2 Détection hétérodyne :

La technique de détection hétérodyne consiste à détecter sur une photodiode deux longueurs d'ondes proches l'une de l'autre (λ_1 et λ_2). La photodiode détecte le signal optique aux fréquences optiques f_1 et f_2 associées à λ_1 et λ_2 respectivement qui sont élevées et génère alors un courant continu. Cependant la photodiode détecte un autre courant de signal dit hétérodyne. La fréquence f_3 de ce courant correspond à la différence de fréquence entre les deux lasers. La Figure II.10 donne le principe de la détection hétérodyne [43].

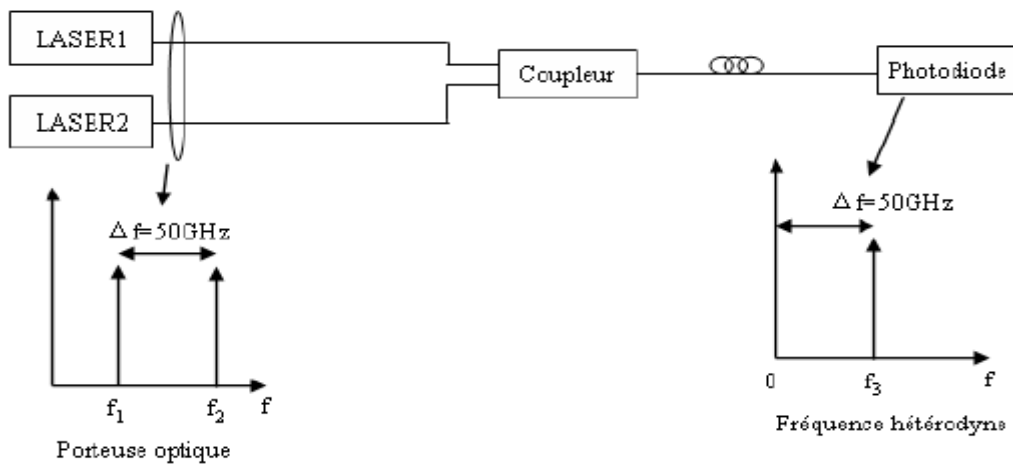


Figure II. 10 : Schéma de principe de la détection hétérodyne

Sur la Figure II.11 deux lasers sont utilisés pour générer le signal radio sur fibre. Pour transmettre l'information, un seul laser est modulé avec un signal en bande de base ou signal IF [44]. L'intérêt d'une telle méthode est de pouvoir transmettre le signal en bande de base d'un côté et la porteuse RF de l'autre. Cela permet aussi de générer des oscillateurs hyperfréquences [42].

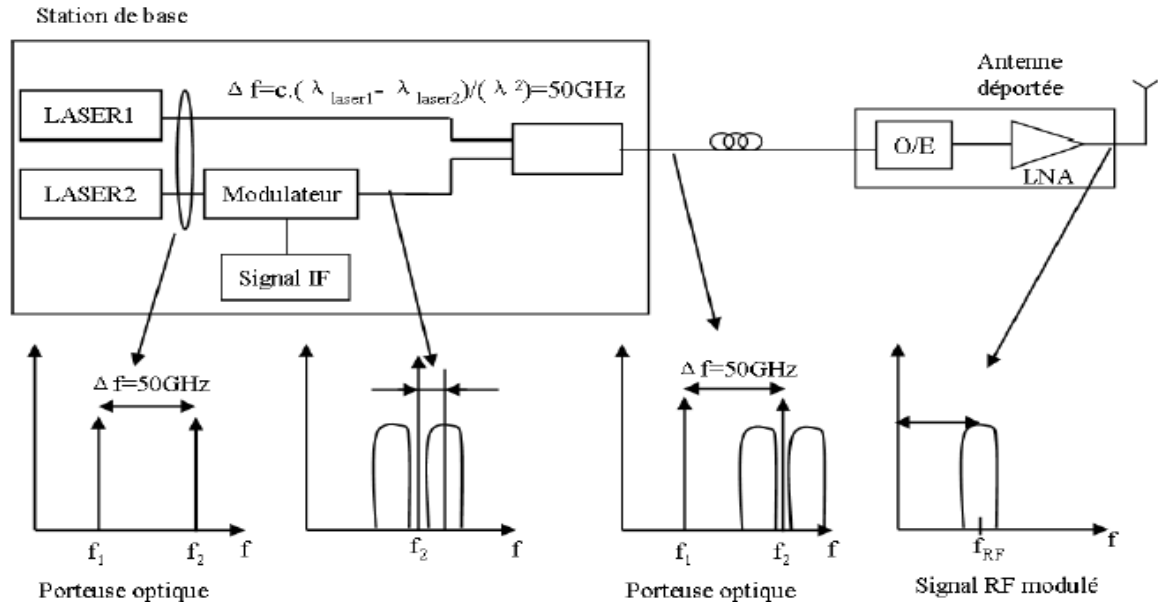


Figure II. 11 : Schéma de principe d'un déport radio sur fibre avec une détection hétérodyne [42]

La figure II.12 montre le schéma de réception d'un oscillateur local déporté généré avec la radio sur fibre. L'oscillateur local est produit par deux lasers espacés de la fréquence voulue. Ces lasers sont détectés avec une photodiode qui donne un signal hyperfréquence.

Sur un troisième laser, un signal en bande de base est transmis. Au niveau de l'antenne déportée, le signal hyperfréquence et le signal en bande de base sont mélangés pour donner un signal radio. Pour la voie descendante, le signal radio reçu par l'antenne est transposé à une fréquence intermédiaire plus basse à l'aide de l'oscillateur généré optiquement [35] millimétrique avec déport de l'oscillateur local [42].

Néanmoins la création d'un signal hyperfréquence à l'aide de l'optique présente aussi des inconvénients. Le principal désavantage de cette méthode est le bruit de phase. Il existe plusieurs moyens pour contrôler les dérives fréquentielles, les boucles à verrouillage déphase optique (OPLL : Optical Phase-Locked Loop) [35].

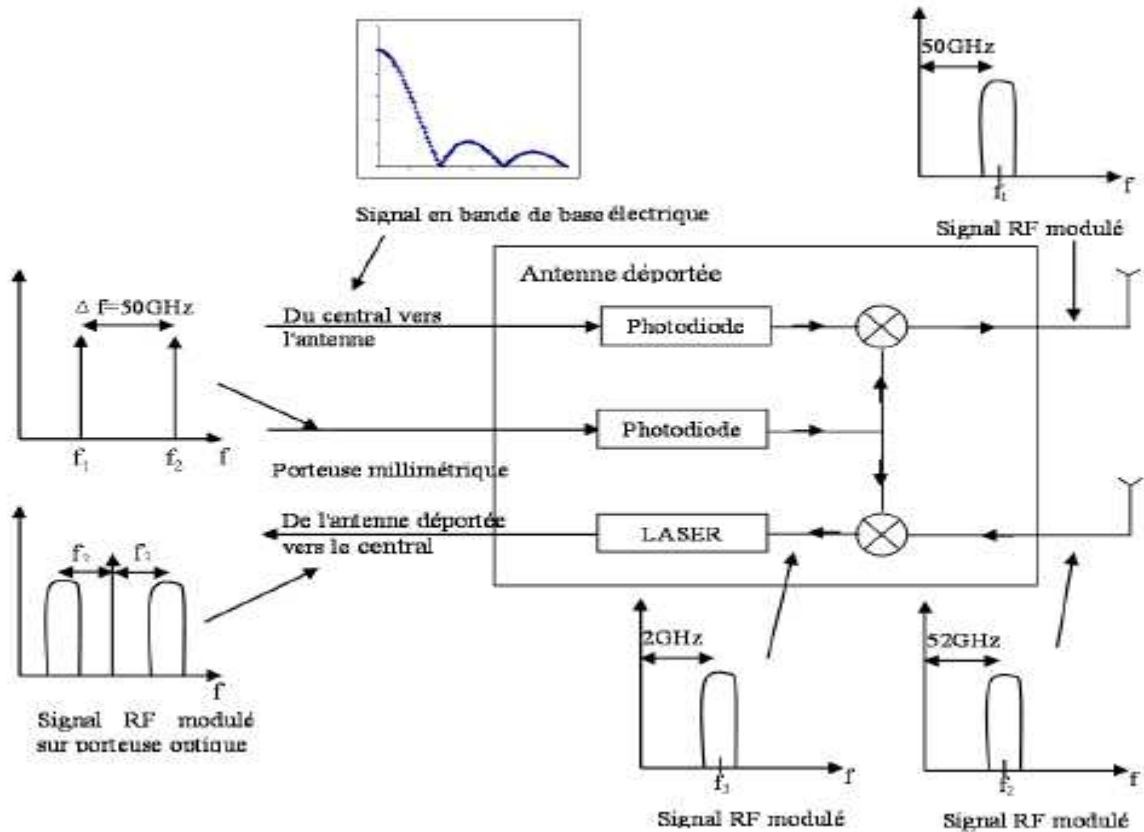


Figure II.12: Schéma d'une antenne déportée dans le cas d'une transmission d'une onde

II.3.7 Les sources de bruits dans un système radio sur fibre :

Dans un système RoF, les bruits additifs dus aux différents composants peuvent réduire considérablement la dynamique de la liaison. Autrement dit, cela peut réduire le rapport signal sur bruit (SNR) et dégrader la qualité du signal reçu [37].

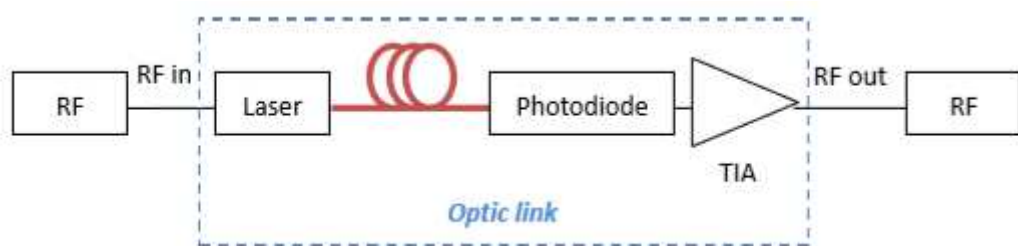


Figure II.13 : Chaîne optique du système RoF typique

Les sources de bruits d'une liaison optique sont variées. Quatre types de bruits peuvent être définis (Figure II.13) : Les bruits provenant des amplificateurs avant la transmission, le bruit du laser, les bruits de la photodiode et les bruits provenant des amplificateurs après la réception [42].

II.3.7.1 Le bruit du laser :

Les fluctuations de l'intensité optique générée par la diode laser représentent une des principales sources contribuant au bruit total de la liaison [32].

A cause de l'émission spontanée et de la recombinaison électron-trou, le signal optique émis par la diode laser est bruité en amplitude et en fréquence [37].

Cette fluctuation est gênante dans le cas d'une détection directe lorsque le taux de modulation du laser est faible [35]. Le paramètre de bruit du laser est le bruit d'intensité relatif (RIN : Relative Intensity Noise) qui est le rapport entre la puissance de bruit ($\langle \Delta P^2(f) \rangle$) et le carré de l'intensité moyenne (P^2) [42].

Le RIN est souvent décrit en dB dans une bande fréquentielle de mesure Δf

$$RIN = \frac{\langle \Delta P^2(f) \rangle}{P^2} \quad (\text{eq : II.2})$$

L'unité est 1/Hz.

En dB l'équation devient :

$$RIN_{dB} = 10 \log \left(\frac{\langle \Delta P^2(f) \rangle}{P^2} \right) \quad (\text{eq : II.3})$$

L'unité est alors dBc/Hz [42].

Le RIN du laser possède deux termes indépendants : le RIN basse fréquence et le RIN haute fréquence [37].

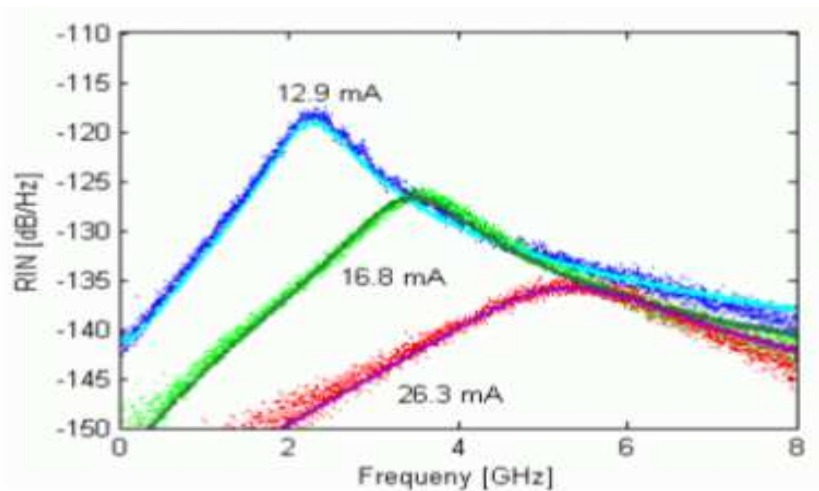


Figure II. 14 : RIN aux hautes fréquences d'un laser DFB pour différents courants de polarisation

Ces deux types de RIN sont tous diminués quand le courant de polarisation augmente [37].

$$RIN(f) \propto \left(\frac{I_{polarisation}}{I_{th}} - 1 \right)^{-3} \quad (\text{eq : II.4})$$

II.3.7.2 Le bruit de la photodiode :

Les bruits du photo-détecteur (Figure II. 15) contiennent [37] :

- Bruit de grenaille ou Schottky (Shot Noise)
- Bruit de courant d'obscurité. On néglige ici le bruit en 1/f.
- Bruit thermique

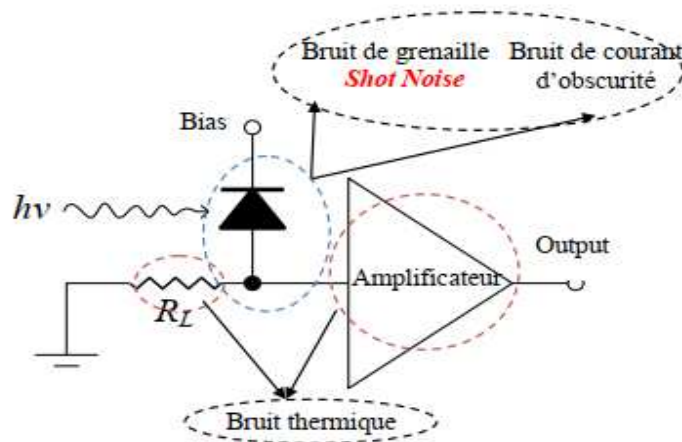


Figure II. 15 : Trois types de bruits du photo-détecteur

- **Le bruit de grenaille** (Shot Noise en anglais) est lié à la distribution aléatoire instantanée des photons émis par la source lorsque le signal arrive sur la photodiode.

Dès que la photodiode est polarisée, un courant d'obscurité (I_{dark}) apparaît. Il est dû à l'émission aléatoire des paires électron-trou [42].

Sa densité spectrale de courant de bruit est définie par :

$$i_{ShotNoise} = \sqrt{2qI_{ph}} \quad (\text{eq : II.5})$$

Où I_{ph} représente le photo-courant.

- **Le courant d'obscurité** I_{obs} de la photodiode peut être négligé devant le photocourant détecté [32].

La densité de bruit de courant d'obscurité est défini par :

$$i_{obs} = \sqrt{2qI_{obs}} \quad (\text{eq : II.6})$$

Où I_{obs} est le courant moyen d'obscurité.

- **Le bruit thermique** est lié à la résistance de charge. Sa densité spectrale est donnée par l'équation ci-dessous [37] :

$$i_{th} = \sqrt{4kT/R_L} \quad (\text{eq : II.7})$$

Où :

- ✓ k : la constante de Boltzmann, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$
- ✓ T : la température en Kelvin
- ✓ R_L : la charge

Le courant de bruit de la photodiode s'écrit :

$$i_{total} = \sqrt{4kT/R_L + 2q(I_{ph} + I_{obs})} \quad (\text{eq : II.8})$$

II.3.7.3 Bruit d'un amplificateur transimpédance :

Un amplificateur transimpédance est souvent placé après une photodiode. Il a pour fonction de transformer une variation de courant en sortie de la photodiode en une variation de tension tout en adaptant l'impédance de sortie afin de compenser les pertes liées aux conversions électrique-optique et optique-électrique.

Cependant, l'ajout d'un amplificateur augmente aussi la puissance de bruit. Les paramètres habituellement fournis sont soit le courant de bruit entre la sortie de la photodiode et l'entrée de l'amplificateur transimpédance (i_{ENC}) (A/ $\sqrt{\text{Hz}}$) ou bien la puissance de bruit en sortie de la photodiode (NEP), dont l'unité est le W/Hz [42].

II.3.7.4 Les sources de bruit radio :

a. Bruit thermique :

Le bruit thermique est provoqué par les différents étages électroniques de la liaison. Il est lié à la fluctuation thermique de la vitesse des porteurs et sa puissance est équivalente à un bruit blanc [32].

L'agitation thermique des électrons dans les résistances se traduit par une tension de bruit de valeur :

$$E^2 = 4k_B \times T \times \Delta F \times R \quad (\text{eq : II.9})$$

Où :

- R est la valeur de la résistance
- k_B est la constante de Boltzmann
- T est la température absolue en °K
- ΔF est la bande passante du système.

La puissance de bruit thermique dans une bande de fréquence ΔF est donnée par :

$$P = k_B \times T \times \Delta F \quad (\text{eq : II.10})$$

b. Bruits radioélectriques :

Les bruits radioélectriques sont tous les bruits provenant des systèmes extérieurs au système étudié. Ces bruits peuvent provenir des équipements domestiques ou industriels, ou bien d'un système radio utilisant la même fréquence aux abords du système étudié. Ces sources de bruit sont difficiles à quantifier étant donné qu'elles sont aléatoires et dépendent de l'environnement dans lequel nous nous trouvons [42].

Les origines du bruit radioélectrique extérieur capté par un système de réception radioélectrique sont les suivantes [35] :

- signaux émis par les éclairs (bruit atmosphérique dû à la foudre) ;
- rayonnements parasites des machines électriques, des équipements électriques et électroniques, des lignes électriques ou bruit des systèmes d'allumage de moteurs à combustion interne (bruit artificiel) ;
- émissions des gaz atmosphériques et des hydrométéores ;
- bruit dû au sol ou aux autres obstacles se trouvant dans le faisceau de l'antenne ;
- rayonnements des sources radioélectriques célestes.

II.4 Applications de la Technologie Radio-sur-Fibre :

La technologie RoF peut être exploitée dans différents systèmes de télécommunication pour des applications à courte ou longue distance [32].

II.4.1 Système de distribution vidéo :

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

Les fréquences attribuées à ce service appartiennent à une bande spectrale centrée autour de 40 GHz. A ces fréquences, la taille maximale des cellules est d'environ 5 km. Pour étendre la couverture, des stations relais sont nécessaires, d'où le recours à la technologie RoF [33].

II.4.2 Réseaux locaux sans fil :

Comme les terminaux mobiles deviennent de plus en plus répandus, (ordinateurs, téléphones, assistants personnels numériques), la demande en haut débit mobile pour l'accès aux réseaux locaux est également à la hausse. Cela entraînera une fois de plus l'utilisation de fréquences porteuses élevées dans le but de répondre à la demande de capacité [33].

La technique radio sur fibre est une solution de manière à répondre à cette demande en utilisant la conception de réseaux pico-cellulaires afin d'optimiser la couverture tout en transmettant les signaux au plus près de l'utilisateur [37].

II.4.3 Réseaux cellulaires :

Les réseaux mobiles représentent un domaine d'application important de la technologie radio sur fibre « RoF », En exploitant les avantages de la fibre optique, les signaux transmis entre la station de contrôle et la station de base peuvent être efficacement acheminés. Grâce à la très grande bande passante, la technologie RoF devient un bon choix pour les réseaux mobiles qui continuent à voir s'accroître le nombre d'abonnés ainsi que la demande des services à large bande passante [41].

II.4.4 Service mobile à haut débit :

Le service mobile large bande (Mobile Broadband System : MBS) est destiné à étendre les services fixes à large bande aux utilisateurs des téléphones portables de tous types [41].

Ainsi un très haut débit de l'ordre de quelques Gbps par utilisateurs doit être fourni et des bandes de fréquences dans la gamme de 57 GHz à 63 GHz ont été allouées. Les cellules ont un diamètre de plusieurs centaines de mètres (microcellules). Les microcellules peuvent être connectées à la station de base par fibre optique. L'utilisation de la technologie RoF pour générer les ondes millimétriques permettrait de simplifier l'architecture des stations de base et donc de réduire leurs coûts (fabrication et maintenance), rendant ainsi le déploiement des réseaux MBS économiquement viable [41][33].

II.4.5 Mobiles de 5ème génération :

Il s'agit de la prochaine génération de communication mobile (5G) qui est toujours confrontée à un grand nombre de problèmes techniques. La technologie RoF est l'une des meilleures solutions pour la réduction de la taille des cellules de couverture. Grâce à

l'utilisation de la fibre optique qui possède une ultra-large bande passante, il est possible de transférer les fonctions de traitement du signal à une station de contrôle centralisée. La centralisation des équipements coûteux et complexes au niveau de cette station rendue possible par la technologie RoF devrait permettre une mise en œuvre compacte et économique des unités d'accès à distance (RAU : Remote Access Unit). Par conséquent, la technologie RoF offre l'accès à une grande variété de systèmes sans fil, y compris 3G, 4G, WLAN, systèmes de diffusion multimédia numérique et B3G (Beyond 3G system) [41].

Le troisième chapitre mis l'accent sur les recherches en cours porte sur de nouvelles applications de la RoF dans les réseaux 5G.

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, l'état de l'art sur la Radio sur Fibre ont été abordé, les systèmes de transport et les différents signaux RF qu'utilisent la fibre ainsi que les techniques de modulation et de détection exploitées ont été montré, ainsi que les sources du bruit qui existe dans la radio sur fibre et enfin les applications de cette technologie.

Chapitre III : Systèmes de transport des données à 60 GHz par RoF pour les applications sans fil 5G.

III.1 Introduction :

La croissance accélérée de la demande de services sans fil à haut débit par les utilisateurs et la limitation de la bande centimétrique en termes de bande passante et de bandes non licenciées, a conduit naturellement au passage à la bande millimétrique centrée autour de 60 GHz, offrant une très large bande passante à très haut débit. Cependant, la couverture radio pour de telles fréquences est très limitée d'où le besoin d'intégrer des liaisons optiques analogiques grâce à la technologie Radio-sur-Fibre (RoF) aux fréquences d'onde millimétriques, pour fournir des services à large bande passante et permettant d'étendre le réseau sans fil 5G avec fiabilité et efficacité.

Du côté sans fil, la technologie d'antenne à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) est largement utilisée dans pratiquement tous les systèmes de communication sans fil actuels, y compris les technologies WiFi (IEEE 802.11n) et LTE - 4G. La technologie MIMO peut considérablement améliorer la capacité de données grâce au multiplexage spatial.

Dans ce chapitre, Nous allons tout d'abord abordé la transmission par les ondes millimétriques à 60 GHz, et en passant par une brève description sur la technique MIMO. On présentera par la suite, une étude théorique des deux systèmes de transmission RoF à ondes millimétriques à la fréquence 60 GHz pour montrer les altérations de chaque système. Deux architectures différentes de conversion RF, électrique et optique sont appliquées au niveau de la station centrale (SC). Ces architectures sont construites caractérisées étape par étape sur la base d'une modulation OFDM avec la contribution de la modulation QAM conforme aux standards radios à 60 GHz.

III.2 La transmission par onde Millimétrique (à 60 GHz) :

Le terme ondes millimétriques (mm) concerne la gamme des fréquences comprises entre 30 GHz et 300 GHz. Au sein de ces fréquences, celles situées au voisinage de 60 GHz trouvent de plus en plus d'applications en communications sans fil à haut débit [45] c'est le candidat le plus authentique à la future technologie 5G.

La bande des 60 GHz présente une forte atténuation lors de la propagation dans l'espace libre, cette atténuation correspond à un pic d'absorption atmosphérique visible sur la Figure I.11 qui est de l'ordre de 15 dB/km. Ce pic d'absorption limite les distances de propagation de l'onde. Un autre inconvénient majeur de cette bande de fréquence, réside

dans la forte atténuation des signaux lors de la traversée d'une cloison: phénomène de blocage, leur propagation étant en grande partie empêchée par presque tout objet physique ce qui réduisant, de ce fait, leur zone de couverture à la taille d'une pièce [46][47].

Néanmoins, les systèmes à ondes millimétriques offrent plusieurs avantages par rapport aux systèmes de communication existants grâce à une large bande sans licence allant de 57 à 66 GHz. De plus, comme la largeur de bande est supérieure à celle de la bande centimétrique, la bande millimétrique est plus attrayante car elle est largement disponible dans le monde et n'est pas encore massivement utilisée. Son spectre, représenté sur la Figure III.1, a été divisé en 4 canaux de largeur de 2,16 GHz, contre 528 MHz pour le signal ULB en bande centimétrique [32].

Les fréquences porteuses en ondes millimétriques permettent des attributions de bande passante plus importantes, qui se traduisent directement par des taux de transfert de données plus élevés.

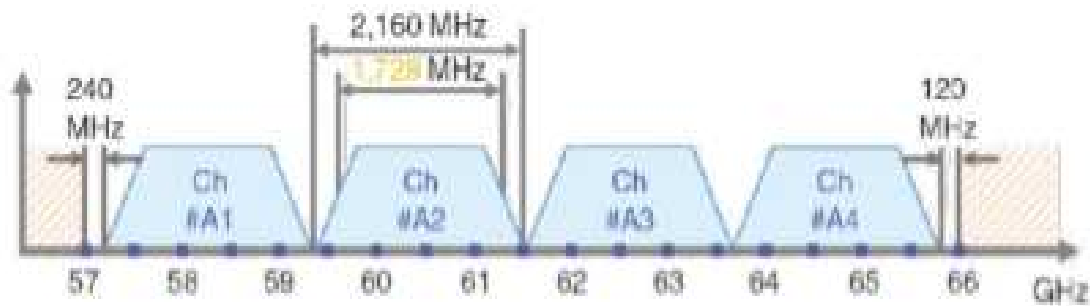


Figure III. 1 : Spectre ULB pour la bande millimétrique entre 57 et 66 GHz

Avec des puissances émises moins limitées que décrit dans le tableau III.1. Un dernier facteur clé est la miniaturisation des antennes à de telles fréquences : cela permet une intégration avancée dans les terminaux radio tels que les téléphones portables ou les ordinateurs portables [48].

Region	Unlicensed band	Max. Tx power	EIRP	Antenna gain
USA	57.05-64 GHz	27dBm	40dBm average / 43dBm peak	-
Canada	57.05-64 GHz	27dBm	40dBm average / 43dBm peak	-
South Korea	57.0-64.0 GHz	10dBm	27dBm	-
Europe	57.0-66.0 GHz	13dBm	57dBm peak	37dBi
Australia	59.4-62.9 GHz	10dBm	57dBm	-
Japan	59.0-66 GHz	10dBm	57dBm	47dBi max

Tableau III. 1: Régulation de puissance mondiale dans la bande des ondes millimétriques

En augmentant la largeur de bande des canaux RF pour les canaux radio mobiles, la capacité de données est considérablement accrue, tandis que la latence du trafic numérique est considérablement réduite, permettant ainsi un meilleur accès basé sur Internet et des applications nécessitant une latence minimale. Les fréquences d'onde millimétriques, en raison de la longueur d'onde beaucoup plus petite, pourraient exploiter la polarisation et les nouvelles techniques de traitement spatial, telles que la MIMO massive et la formation de faisceaux adaptative. Compte tenu de cette augmentation importante de la bande passante et des nouvelles fonctionnalités offertes par les ondes millimétriques, les liaisons de station de base à périphérique, ainsi que les liaisons entre les stations de base, seront en mesure de gérer une capacité bien supérieure à celle des réseaux 4G actuels dans les zones à forte densité de population [49].

III.3 MIMO Optique:

Dans un système mono-antenne, l'augmentation de la taille de la modulation ou de la bande de fréquence utilisée est les seules solutions pour augmenter le débit de données, avec tous les problèmes de complexité ou d'encombrement que cela entraîne ils ont montré que la capacité des systèmes multi-antennes augmentait linéairement avec le nombre d'antennes émettrices, dépassant de manière significative la limite théorique de Shannon [50]. L'aptitude des systèmes multi-antennes à résister aux évanouissements et aux interférences constitue par ailleurs un avantage supplémentaire indéniable. Ces découvertes ont fait des systèmes MIMO un des domaines les plus attractifs pour les industriels, qui y voient une des technologies susceptibles de résoudre les problèmes d'encombrement et de limitation de capacité des réseaux sans fil large bande [51].

Avec sa bande passante énorme, la fibre optique multimode MMF présente un média capable d'offrir un système multi-services à hauts débits dans les réseaux d'entreprises et "in-door". Un réseau MMF peut constituer l'épine dorsale du réseau qui alimente les services fixe-filaire, ainsi que les services sans-fil (IEEE 802.x par exemple) dans l'ensemble du bâtiment par une technique de multiplexage par diversité de groupe de mode (MGDM). Au cours duquel plusieurs flux de données indépendants sont simultanément multiplexés dans un canal spectral. Le multiplexage par division spatiale SDM (Spatial Division Multiplexing) peut améliorer le débit de façon significative, car le nombre de données spatiales résolues est plus important. Chaque flux spatial doit disposer de sa propre paire d'antennes de transmission/réception à chaque extrémité du lien radio. Il est

important de noter qu'une chaîne de radio-fréquences RF et qu'un convertisseur analogique-numérique distincts sont nécessaires pour chaque antenne du système MIMO. Les configurations qui nécessitent plus de deux chaînes d'antennes RF doivent être conçues avec attention pour maintenir des coûts peu élevés tout en répondant aux attentes en matière de performances [52].

En outre, les signaux RoF indépendants pourraient être transmis simultanément sur la même fibre optique par le multiplexage par division de polarisation (PDM) ou par multiplexage par division en longueur d'onde (WDM) [53]. L'optimisation de ces systèmes nous intéresse également, à savoir : allocation de fréquence optique et décompositions du canal MIMO optique, en vue d'une meilleure capacité et/ou qualité.

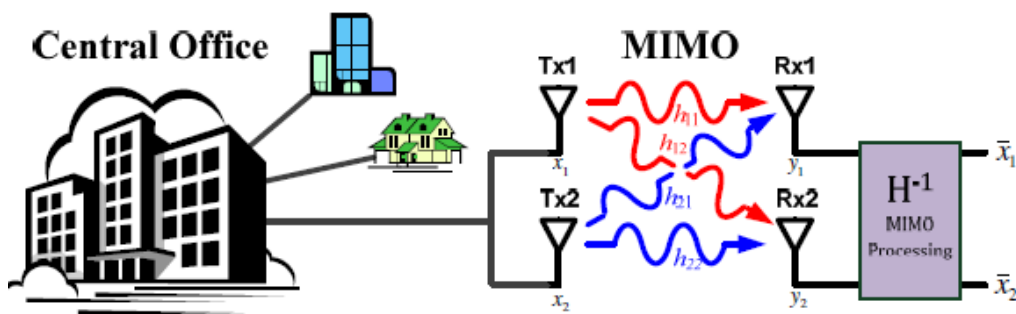


Figure III. 2 : Principe de la technologie MIMO optique [53]

Récemment, plusieurs études concernant la technologie MIMO pour les systèmes RoF à 60 GHz ont été rapportées [54]. Cependant, les débits de données des résultats rapportés sont inférieurs à 10 Gb/s, en raison de l'utilisation de formats de modulation à faible efficacité spectrale, tels que la modulation on-off traditionnelle (OOK). Par conséquent, il a été nécessaire de trouver un format de modulation complexe pour communiquer efficacement à haut débit. Afin d'être robuste aux multiples trajets des liaisons sans fil causés par les réflexions des ondes sur les murs et objets, des solutions basées sur le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence telle que l'OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) est proposée.

III.4 Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM) :

L'OFDM est largement utilisé dans les systèmes de communication sans fil parce qu'il présente une solution efficace contre les interférences intersymboles (ISI, Inter Symbols Interference) causée par un canal dispersif.

Le principe de l'OFDM consiste à diviser sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique à transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission indépendants, de fréquences porteuses différentes.

L'OFDM utilise des fréquences porteuses orthogonales. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent, mais grâce à l'orthogonalité elles n'interfèrent pas entre elles. L'orthogonalité permet également une haute efficacité spectrale, en effet la bande passante étant quasiment utilisée dans son intégralité. Ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système OFDM sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites [55].

En OFDM, les spectres de sous-porteuses individuelles se chevauchent. Toutefois, en raison de la propriété d'orthogonalité, les sous-porteuses peuvent être démodulées sans interférence. En émission, la modulation et le multiplexage sont réalisés numériquement en utilisant une transformée de Fourier inverse rapide (IFFT) et, par conséquent, les signaux orthogonaux nécessaires peuvent être générés avec précision. En réception, la démodulation et le démultiplexage sont réalisés par une transformée de Fourier rapide (FFT).

Le schéma bloc de la transmission et réception du signal OFDM est donné sur la Figure III.2 [32]:

- En transmission, la séquence de bits de données est modulée par un modulateur QAM/PSK (Quadrature Amplitude Modulation /Phase Shift Keying) et forme une constellation complexe. Chaque symbole de cette constellation est ensuite porté par une sous-porteuse du signal OFDM formé par le bloc IFFT.
- Le préfixe cyclique (CP) est rajouté au signal OFDM après la conversion parallèle vers série de ce signal.
- Une transposition en fréquence est réalisée avant l'émission.
- En réception, une transposition de fréquence vers la bande de base est effectuée.
- L'opération inverse à celle de la transmission est ensuite employée afin de démoduler le signal OFDM et extraire la séquence de données transmises.

Dans un système OFDM, les bits d'informations pour chaque sous-porteuse sont modulés par la modulation QPSK (Quaternary Phase Shift Keying), ou QAM (Quadrature Amplitude Modulation). On peut augmenter le débit binaire en augmentant le nombre

d'états dans une constellation, entraînant une diminution de distance entre les points de la constellation, ce qui accroît la sensibilité du système au bruit [56].

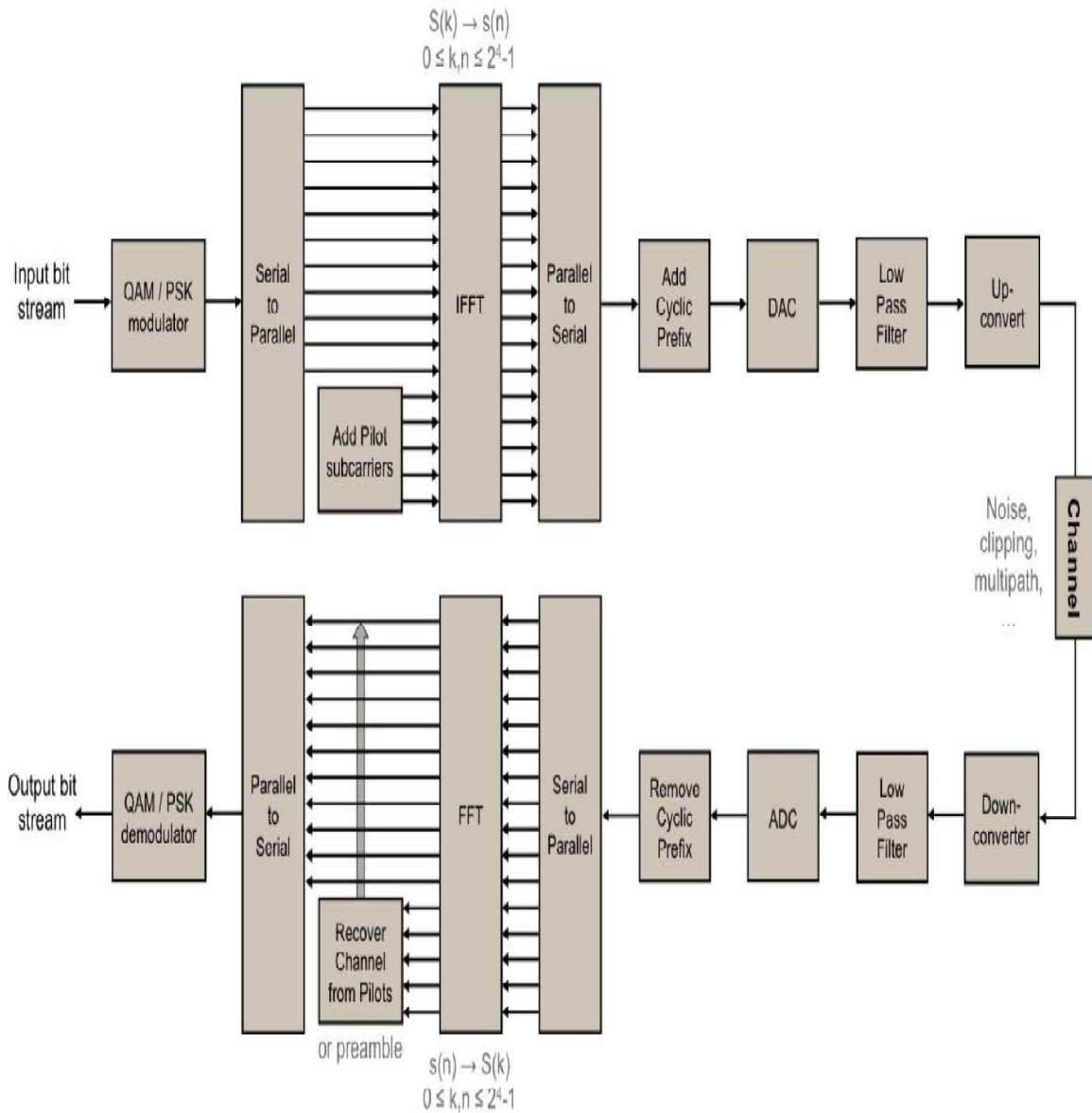


Figure III. 3: Schéma de principe d'un modulateur OFDM [32]

En général, la constellation de chaque sous-porteuse montre un changement aléatoire d'amplitude et de phase provoqué par l'environnement par trajets multiples. Parmi les modulations utilisées dans un système OFDM, la plus robuste est la modulation QPSK qui code 2 bits par symbole [57].

➤ **Modulation QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) [58]**

La modulation QPSK code deux bits par symbole. La figure III.3 montre le diagramme de constellation et les signaux temporels $i(t)$, $q(t)$, $R(t)$ et $\phi(t)$.

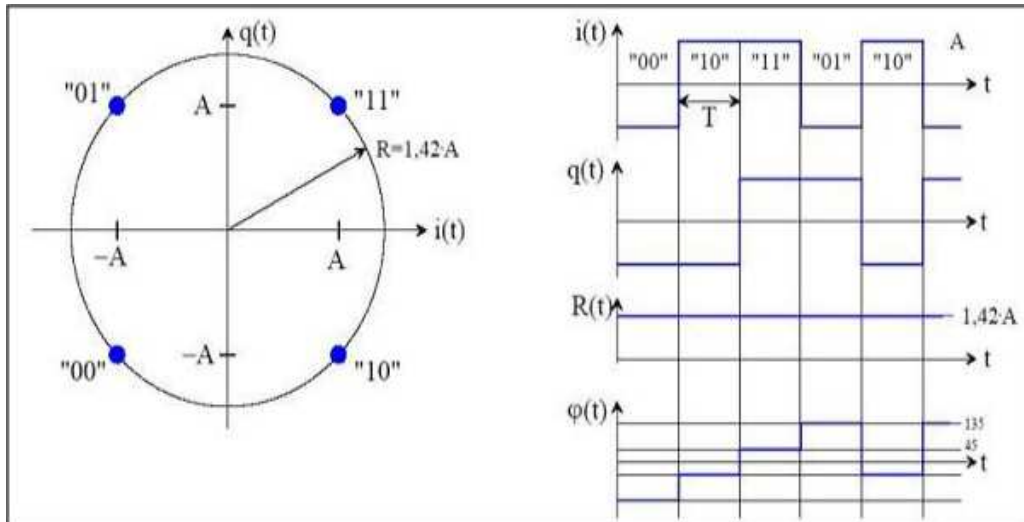


Figure III. 4 : Modulation de phase QPSK

La bande passante du signal QPSK vaut $B = 2/T$ autour de la porteuse. L'efficacité spectrale est : $\eta = \log_2(M) = 2$ (M est la taille des mots à transmettre, ici $M = 2$). Voici le tableau de correspondances :

	$i(t)$	$q(t)$	$R(t)$	$\phi(t)$
"00"	-A	-A	$A\sqrt{2}$	$5\pi/4$
"01"	-A	A	$A\sqrt{2}$	$3\pi/4$
"10"	A	-A	$A\sqrt{2}$	$7\pi/4$
"11"	A	A	$A\sqrt{2}$	$\pi/4$

Tableau III. 2: Tableau de correspondances de la modulation QPSK

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

➤ **Modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) [58]**

La QAM ou Modulation d'amplitude en quadrature résulte de la combinaison de deux fréquences porteuses sinusoïdales déphasées l'une de l'autre de 90° (d'où le nom de quadrature). Elle peut aussi être vue comme une modulation de phase et d'amplitude. Elle permet des débits élevés avec une rapidité de modulation relativement faible. La QAM 16 utilise 4 bits par symbole.

La figure III.5 montre le diagramme de constellation et les signaux temporels $i(t)$, $q(t)$, $R(t)$ et $\phi(t)$:

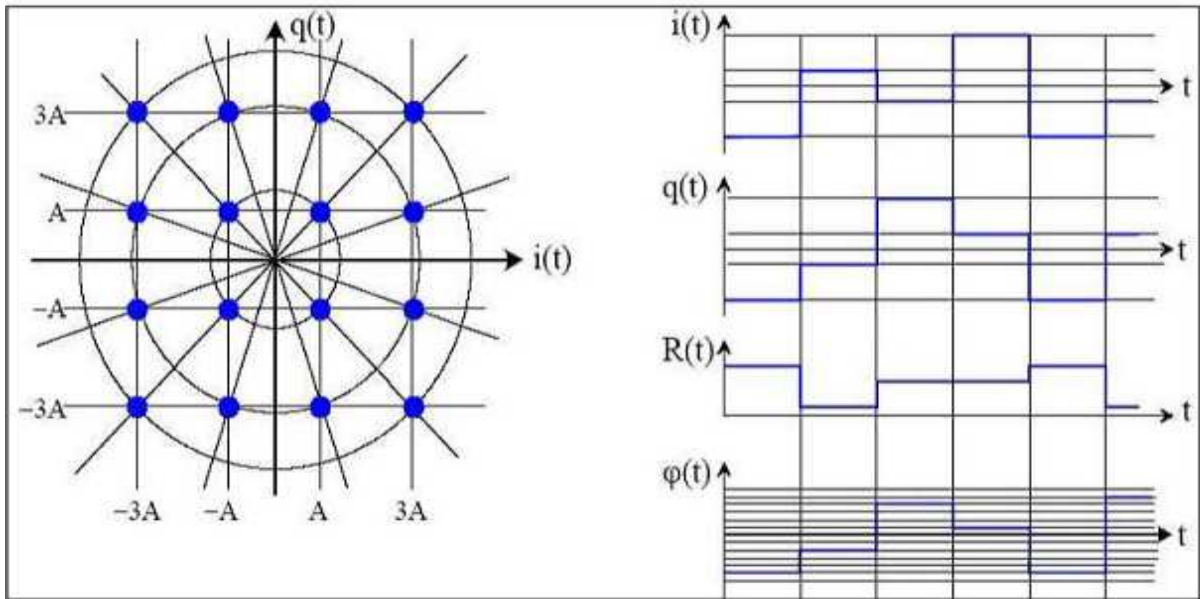


Figure III. 5 : Modulation QAM

Si on veut une modulation 32 QAM, il faut doubler le nombre d'états (pour gagner un bit par rapport à 16 QAM). La sensibilité au bruit devient beaucoup plus forte.

Voici une possibilité de tableau de correspondance parmi d'autres :

	$i(t)$	$q(t)$	$R(t)$	$\varphi(t)$
"0000"	$-3A$	$-3A$	$2\sqrt{2}.A$	$5\pi/4$
"0001"	$-3A$	$-A$	$3,16.A$	$9\pi/8$
"0010"	$-3A$	A	$3,16.A$	$7\pi/8$
"0011"	$-3A$	$3A$	$2\sqrt{2}.A$	$3\pi/4$
"0100"	$-A$	$-3A$	$3,16.A$	$11\pi/8$
"0101"	$-A$	$-A$	$\sqrt{2}.A$	$5\pi/4$
"0110"	$-A$	A	$\sqrt{2}.A$	$3\pi/4$
"0111"	$-A$	$3A$	$3,16.A$	$5\pi/8$
"1000"	A	$-3A$	$3,16.A$	$13\pi/8$
"1001"	A	$-A$	$\sqrt{2}.A$	$7\pi/4$
"1010"	A	A	$\sqrt{2}.A$	$\pi/4$
"1011"	A	$3A$	$3,16.A$	$3\pi/8$
"1100"	$3A$	$-3A$	$2\sqrt{2}.A$	$7\pi/4$
"1101"	$3A$	$-A$	$3,16.A$	$15\pi/8$
"1110"	$3A$	A	$3,16.A$	$\pi/8$
"1111"	$3A$	$3A$	$2\sqrt{2}.A$	$\pi/4$

Tableau III. 3: Tableau de correspondances de la modulation 16 QAM

Les signaux $i(t)$ et $q(t)$ sont deux signaux à quatre états. Dans la pratique, on les met en forme pour limiter la bande passante.

- Avantages et inconvénients (QAM) :
 - 2 fois plus d'info sur la même bande.
 - Plus sensible que la DSB-SC aux erreurs de porteuse générée au récepteur.
 - Erreur de fréquence ou de phase produit de la diaphonie (crosstalk) [58].

Les paramètres des trois principales normes occupant la bande millimétrique sont donnés dans le Tableau III.4. [32].

Paramètres	IEEE 802.15.3c HSI mode	ECMA-387 Type A	IEEE 802.11ad OFDM PHY
Largeur de bande occupée	1.815 GHz	~1.904 GHz	1.815 GHz
Taux d'échantillonnage	2.640 GSa/s	2.592 GSa/s	2.640 GSa/s
Nombre de sous-porteuses	512	512	512
Durée de la FFT/IFFT	193.9 ns	197.53 ns	193.9 ns
Durée de préfixe cyclique	24.24 ns	24.70 ns	48.5 ns
Longueur de préfixe cyclique	64	64	128
Durée du symbole OFDM	218.18 ns	222.23 ns	242.4 ns
Nombre de sous-porteuses de données	336	360	336
Nombre de sous-porteuses pilotes	16	16	16
Nombre de sous-porteuses DC	3	3	3
Nombre de sous-porteuses nulles	141	133	0
Nombre de sous-porteuses inutilisées	16	0	157
Type de modulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM	SQPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM

Tableau III.4 : Paramètre de configuration des standards de la bande millimétrique.

Dans notre étude, nous réaliserons les différentes analyses avec la norme IEEE 802.11ad utilisant l'OFDM avant de l'étendre pour la bande millimétrique. La bande de travail choisie est la deuxième bande située entre les fréquences 57 et 66 GHz, la transmission multi-bandes se fait pour la porteuse centrée à 60 GHz. Des formats de modulation QAM seront utilisés.

III.5 Systèmes de transport des données à 60 GHz par RoF :

Pour les cas d'applications sans fil 5G sur fibre optique nous considérons des architectures correspondants à un déport d'antenne pour les ondes millimétriques.

Les réseaux RoF conventionnels utilisent une transmission de signal numérique à modulation d'amplitude OOK (pour On/Off Keying) de type NRZ (non retour à zéro). Cependant, Par la différence de format de modulation tel que l'OFDM, il y a deux configurations de la station centrale (SC). L'une est que la conversion d'ondes millimétriques RF à 60 GHz est optique, c.-à-d. à l'aide de 2 modulateur Mach-Zehnder (transmission RoF en band de base), et l'autre est que le la conversion d'ondes millimétriques RF est électrique, c.-à-d. à l'aide du mélangeur (transmission RoF en RF). Ce choix est pour avoir un système RoF-OFDM avec station de base (BS) simple, rentable, réduit la maintenance, et permet d'utiliser des composants actifs peu onéreux.

➤ **Modèle 1** : Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant 2 MZM

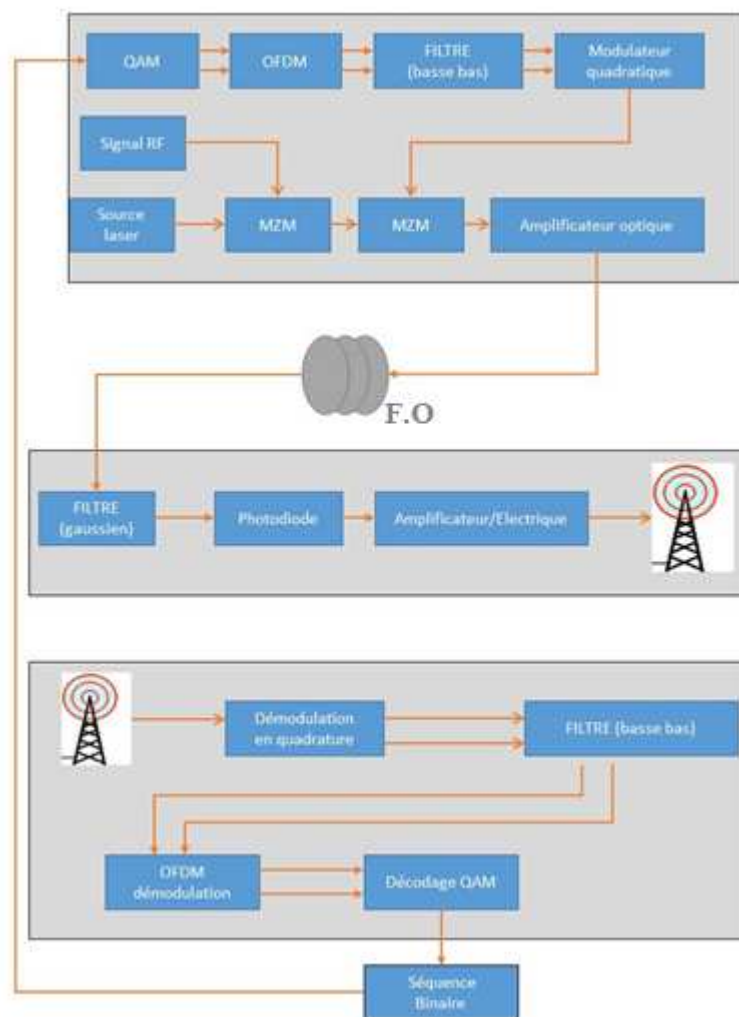


Figure III. 6: Architecture ROF-OFDM utilisant 2 MZM

Le système de la figure III.6 montre l'architecture ROF-OFDM avec la conversion d'onde millimétrique de 60 GHz à l'aide de 2 modulateur Mach-Zehnder (MZM).

Dans la station centrale (CS), une séquence de bits est générée à l'aide d'un générateur de séquence de bits PRBS interne. La séquence de bits est scindée en deux sous-séquences parallèles, chacune pouvant être transmise dans deux porteuses en quadrature lors de la construction d'un modulateur QAM [59].

Lors de la transmission d'informations, nous pouvons faire varier l'amplitude d'un signal en fonction des symboles de la source.

Pour chaque port de sortie, l'amplitude prend l'une des valeurs de l'ensemble d'amplitudes [60] :

$$a_i = (2i - 1 - M), i = 1, 2, \dots, M \quad (\text{eq III.1})$$

Où : M est le nombre de séquences possibles de chiffres binaires, calculé selon :

$$M = 2^{h/2} \quad (\text{eq III.2})$$

Où : h est le nombre de bits par symbole. L'ensemble QAM équivalent est donné par le carré de M .

Cela signifie si :

- $h = 2, M = 2$ alors nous avons un 4-QAM
- $h = 4, M = 4$ alors nous avons un 16-QAM.
- $h = 6, M = 8$ alors nous avons un 64-QAM
- $h = 8, M = 16$ alors nous avons un 256-QAM

Après un modulateur OFDM qui divise le spectre disponible en plusieurs sous-porteuses orthogonales, chacune étant modulée par un flux de données à faible débit. Ce format a pour objectif de réduire de manière significative les interférences inter-porteuses et inter-symboles (ICI et ISI) [61].

Les données d'information entrent dans un bloc série-parallèle, suivi d'un remplissage nul, puis sont soumises à une opération de pré codage DFT qui précède l'opération IFFT. Le préfixe cyclique (CP) est facultatif, suivi du fenêtrage et du filtre passe-bande, qui est ensuite soumis à la radiofréquence (RF) [62].

Le taux d'échantillonnage de Nyquist du signal OFDM en bande de base est calculé en utilisant [63]:

$$R = 2 \times NFFT \times \frac{1}{T_{sym}} \times (1 + \eta) \quad (\text{eq III.3})$$

Où :

- NFFT : est la taille de la FFT
- T_{sym} est le temps du symbole OFDM incluant l'intervalle de garde.
- η : est le rapport du nombre d'échantillons utilisés en tant que CP (N_{cp}), et la taille de FFT :

$$\eta = \frac{N_{\text{CP}}}{N_{\text{FFT}}} \quad (\text{eq III.4})$$

Le modulateur en quadrature implémente un modulateur d'amplitude analogique en quadrature. Le signal de sortie est modulé selon [60] :

$$v_{\text{out}}(t) = G[I(t)\cos(2\pi f_c t + \phi_c) - Q(t)\sin(2\pi f_c t + \phi_c)] + b \quad (\text{eq III.5})$$

Où :

- I et Q : sont les signaux électriques d'entrée, G est le paramètre Gain, b est le Bias,
- F_c : la fréquence porteuse
- Φ_c : est la phase.

Le MZM-1 est piloté par un signal RF de 60 GHZ ce dernier sera transposé sur une porteuse optique générée par une source laser, la sortie du MZM-1 est l'entrée du 2^{ème} MZM-2 qui est commandé par le signal informatif via du modulateur en quadrature.

Pour un modulateur de Y-branche d'entrée et de sortie, le signal de sortie est [64] :

$$E(V_1, V_2) = \frac{E_0}{1 + SR} \left[SR \cdot \exp\left(-\left(\frac{\Delta\alpha_a(V_1)}{2} + j \cdot \Delta\beta(V_1)\right)L\right) + \exp\left(-\left(\frac{\Delta\alpha_a(V_2)}{2} + j \cdot \Delta\beta(V_2)\right)L - j \cdot \phi_0\right) \right] \quad (\text{eq III.6})$$

Où :

- $\Delta\alpha_a/2$: est la constante d'atténuation.
- $\Delta\beta$: est la constante de phase.
- L : est la longueur d'interaction du bras modulateur.
- ϕ_0 : est 0 radian pour un modulateur conventionnel et π radians pour un modulateur à déphasage.
- $V_1 V_2$: sont les tensions appliquées aux bras 1 et 2, respectivement.
- I : est l'intensité du signal optique.
- Φ : est la phase.

Le signal modulé est amplifié et ensuite transmis via une fibre optique à la section de réception [65].

Au niveau de la station de base (section de réception) un filtre est utilisé pour supprimer l'une de bande latérale. Sa fonction de transfert est donnée par [66] :

$$H(f) = \alpha e^{-\ln(\sqrt{2})\left(\frac{f-f_c}{B/2}\right)^{2N}} \quad (\text{eq III.7})$$

Où :

- $H(f)$: est la fonction de transfert du filtre,
- α : le paramètre Affaiblissement d'insertion,
- f_c : la fréquence centrale du filtre définie par le paramètre Fréquence,
- B : la Largeur de bande, N le paramètre Ordre et f la fréquence.

Ensuite une photo diode PIN qui est utilisé pour convertir un signal optique en un courant électrique. Le signal résulte de la photodiode sera amplifier et transmettre via une antenne émettrice à l'antenne réceptrice de la station mobile (MS).

Au niveau du MS (chez utilisateur) : le démodulateur en quadratique implémente un démodulateur analogique utilisant un générateur de porteuse pour les composants en quadrature Q et I. Le signal de sortie est démodulé selon :

$$v_I(t) = [Gv_{in}(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_c)] * h_{low}(t) \quad (\text{eq III.8})$$

$$v_Q(t) = [-Gv_{in}(t) \sin(2\pi f_c t + \phi_c)] * h_{low}(t) \quad (\text{eq III.9})$$

Ou :

- V_{in} : est le signal électrique d'entrée
- G : le paramètre gain
- f_c : la fréquence porteuse
- Φ_c est la phase de la porteuse
- H_{low} : la réponse temporelle du filtre passe-bas.

Au niveau du MS, les données sont captées par une antenne, et exécutés avec une démodulation en quadrature, et ensuite par demultiplexage OFDM suivie par décodeur QAM afin de récupérer les données transmettre.

➤ **Modèle 2** : Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant un mélangeur

Le système de la figure III.7 montre l'architecture ROF-OFDM avec la conversion d'onde millimétrique de 60 GHz à l'aide du mélangeur.

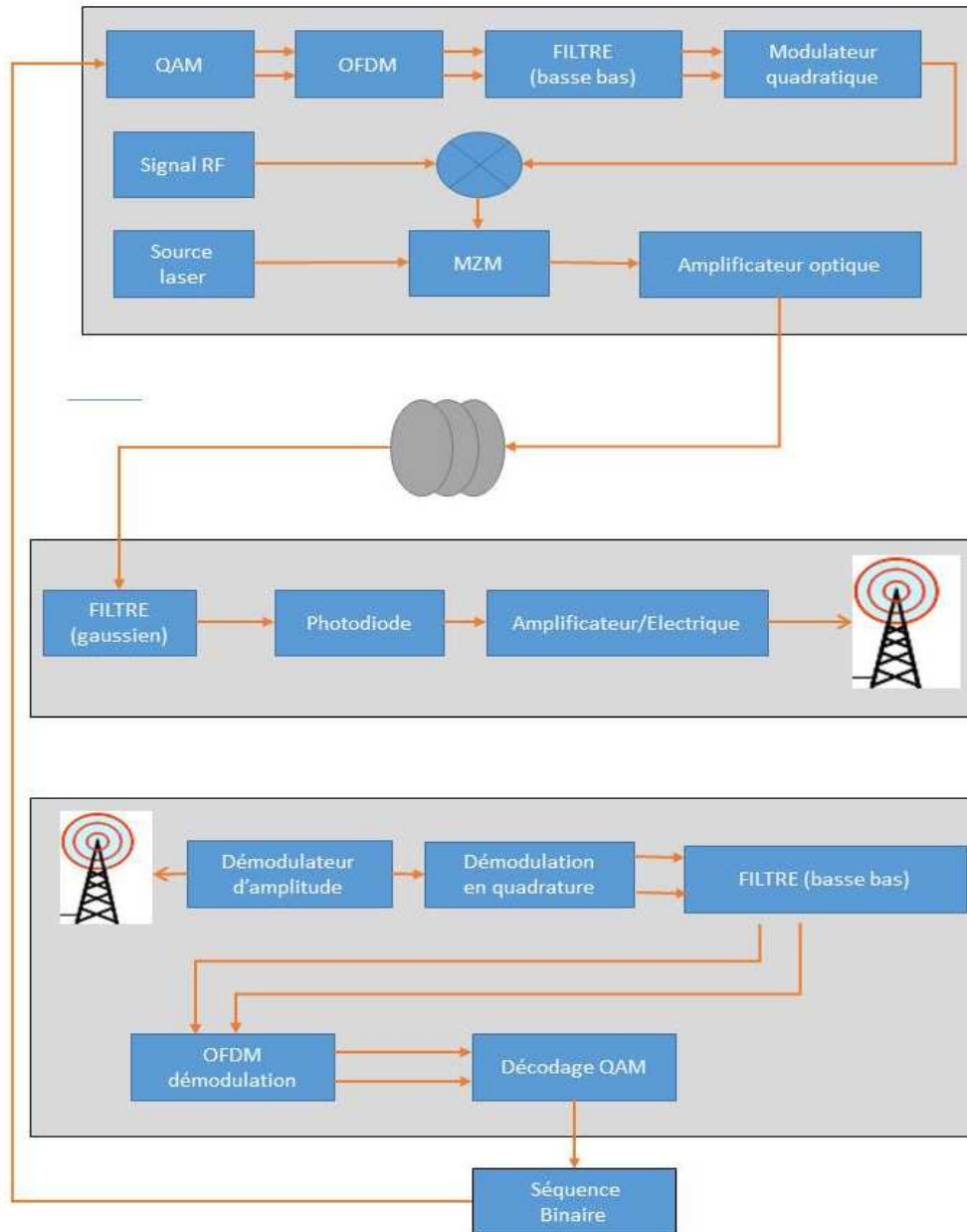


Figure III. 7: Architecture ROF-OFDM utilisant un seul MZM

Dans la station centrale (CS), cette mise en œuvre module d'abord les données via un traitement OFDM avec exécution de la séquence PRBS, QAM génération (par exemple, 64-QAM) à l'avance. Ensuite, un mélangeur RF-IQ est utilisé pour traiter le signal OFDM vers un signal analogique RF avec une modulation en quadrature appropriée.

Le signal de sortie est transposé sur une porteuse analogique de 60 GHz par une opération de multiplication qui pilotera le MZM avec une porteuse optique générée par une source laser, puis envoyé dans la fibre optique via EDFA pour amplifier le signal.

Au niveau de la station de base les signaux de la fibre sont reçus par une photodiode (PD), cela sera amplifié par le biais d'un amplificateur électrique et envoyé par une antenne à la station mobile (MS).

Au niveau du MS, les données sont captées par une antenne, et exécutés avec une démodulation RF suivie par démodulateur en quadrature, ensuite par démultiplexage OFDM suivie par décodeur QAM afin de récupérer les données transmette.

Dans le chapitre suivant, Nous allons évaluer les performances des deux systèmes présentés par les figures III.6 et figure III.7 respectivement, montrent le transport des données à 60 GHz par RoF pour l'application sans fil 5G utilisant deux architectures de conversion différentes de la porteuse RF.

III.6 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'étude des systèmes de transport des données par onde millimétrique de 60 GHz utilisant d'avantage la technologie ROF pour les applications sans fil 5G. Nous avons présenté deux architectures différentes; une architecture électrique intégrant oscillateur RF et étage de conversion, et une architecture optique par mélange de deux signaux optiques à l'aide de deux MZM. Afin d'augmenter l'efficacité spectrale, le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM) avec la contribution de la modulation QAM est utilisé. Les blocs constituant chaque système ainsi que le traitement que subit le signal transmis sont également présentés en détail.

Chapitre IV : Résultats de la simulation

IV.1. Introduction:

Dans ce chapitre nous allons présenter l'ensemble du travail de simulation de système de la radio sur fibre pour les applications sans fil 5G, dont le but d'évaluer ces performances pour liaison descendante à l'aide de logiciel de simulation OptiSystem [68]. Dans ce système, la technique de multiplexage OFDM en collaboration à la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est intégrée au système RoF ou la porteuse radio est une onde millimétrique de fréquence 60 GHz.

Dans un premier temps, nous présentons une présentation des différentes applications et caractéristiques du logiciel de simulation OptiSystem, suivi par brève description des principaux critères de qualité. Ensuite nous allons présenter les deux architecture OFDM-RoF à 60 GHz à simulé par le logiciel et définir chaque bloc, et, nous allons décrit et expliquer les résultats de la simulation des deux systèmes OFDM-RoF pour 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM pour toutes les parties du système à des débits de transmission variant de 10 à 40 Gb/s respectivement. Enfin, nous allons présenter l'implémentation d'un système 2X2 MIMO par le multiplexage en longueur d'onde (WDM).

IV.2. Présentation du logiciel OptiSystem : [68]

OptiSystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication. OptiSystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale.

La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Construire le schéma bloc,
- Analyser le schéma

Interface OptiSystem : L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale repartit en plusieurs parties (Figure IV.1).

- Bibliothèque : une base de données de divers composants existants.
- Editeur du lay-out : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.

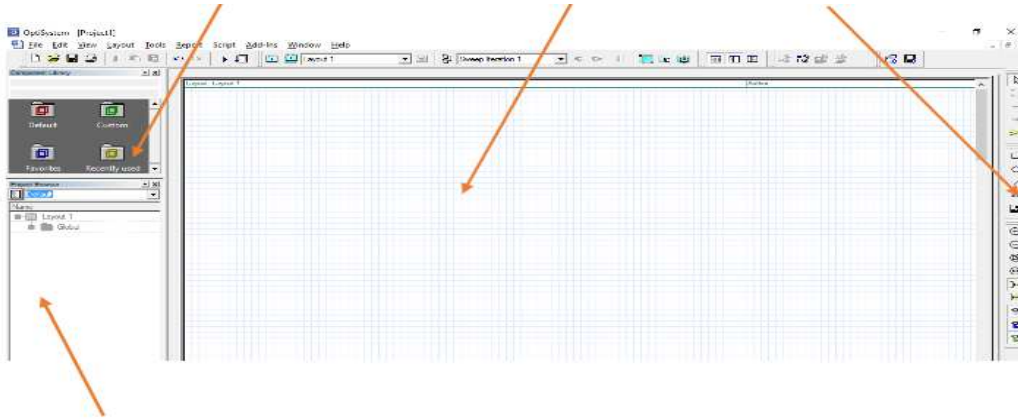


Figure IV. 1: Interface du logiciel OptiSystem

❖ Avantages du logiciel

- Fournir un aperçu de performances du système mondial de fibres optiques.
- Evaluer 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.

OptiSystem permet l'automatisation et la conception de pratiquement n'importe quelle liaison optique dans la couche physique et analyse un large éventail de réseaux optiques.

OptiSystem permet aux utilisateurs de planifier, tester et simuler :

- WDM/ TDM ou la conception du réseau CATV (Câble Télévision).
- Conception d'anneaux SONET/ SDH.
- Conception de cartes de dispersion.
- Estimation des pénalités BER des systèmes avec différents modèles de récepteurs.

IV.3. Description des principaux critères d'évaluation :

IV.3.1. Diagramme de constellation [69] :

Un diagramme de constellation est la représentation d'un signal modulé par une modulation numérique comme la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) ou la modulation par sauts de phase (PSK). La représentation se situe dans un diagramme bi-dimensionnel dont les axes délimitent le plan complexe aux instants d'échantillonnage des symboles. Les points dans le plan complexe sont les images des symboles présents à cet

instant donné résultant de la modulation. Les diagrammes de constellation peuvent être utilisés pour identifier le type des interférences ou de la distorsion dans un signal. À la réception le démodulateur examine les symboles reçus. Ces symboles peuvent avoir été perturbés par le canal ou le récepteur lui-même (bruit blanc gaussien additif, distorsion, bruit de phase, interférences).

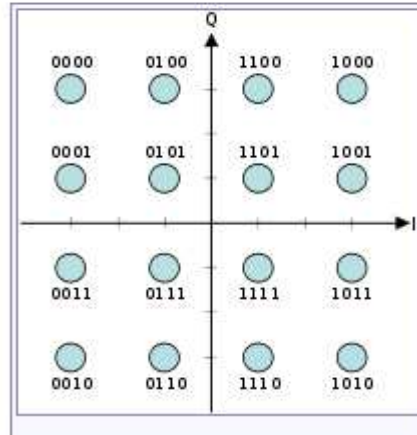


Figure IV. 2: Diagramme de constellation de 16-QAM rectangulaire.

IV.3.2. Taux d'erreurs binaires :

Le taux d'erreurs binaires (BER :Bit Error Rate) permet d'évaluer la qualité d'une transmission optique. Il peut être déterminé en comparant la séquence de données binaires émise et celle reçue car il est défini par le rapport du nombre de bits erronés sur le nombre total de bits transmis :

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bits transmis}} \quad (\text{eq IV.1})$$

IV.3.3. Facteur de qualité :

Considérons la transmission d'une suite de 0 et 1 et que les erreurs de transmission sont causées par la présence dans la fibre de transmission d'un bruit blanc gaussien d'écart-types σ_0 et σ_1 pour les niveaux des symboles 0 et 1.

En notant les intensités moyennes des niveaux 1 et des niveaux 0 respectivement par I_1 et I_0 , une erreur survient lorsqu'un 0 est détecté alors que l'intensité du signal I est supérieure à I_s ou un 1 est détecté alors que $I < I_s$ (voir Figure IV.3 (a)). I_s est une intensité seuil fixée pour prendre une décision sur les bits 0 et 1. Les fluctuations d'intensité sur la Figure IV.3 (a) sont dues au bruit. Nous supposons ici le cas d'une modulation d'amplitude « tout ou rien ». La probabilité de recevoir un 1 alors qu'un 0 a été transmis ainsi que la probabilité

de recevoir un 0 alors qu'on a transmis un 1 sont notées respectivement P (1/0) et P (0/1) et sont représentées sur la Figure IV.3 (b). Dans cette configuration le facteur Q est donné par la relation suivante :

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

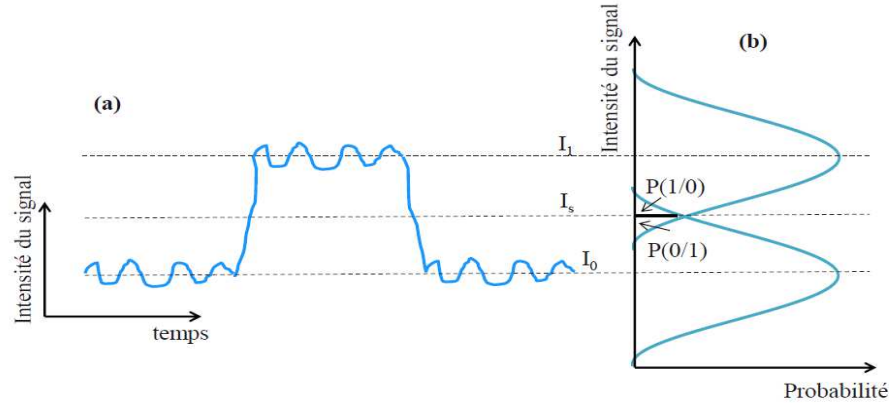


Figure IV. 3:Principe du calcul du taux d'erreurs : (a) évolution temporelle de l'intensité du signal, (b) distributions de probabilité des niveaux 0 et 1.

Après quelques étapes de calcul que nous ne détaillerons pas ici, nous pouvons montrer que le facteur de qualité Q est relié au BER par la relation :

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (\text{eq IV.3})$$

Où la fonction erfc est définie par :

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-y^2} dy \quad (\text{eq IV.4})$$

IV.4. Présentation de la liaison OFDM-RoF:

La figure IV.4 représente l'architecture générale de notre liaison OFDM-RoF simulée avec le logiciel OptiSystem14. Comme toute architecture de communication, la nôtre comporte une partie émettrice (la station centrale (CS) dans notre cas), un canal de propagation (la fibre optique) et une partie réception. La partie réception est constituée d'une station de base (BS) et d'un récepteur radio connecté via un lien radio (MS).

Le principe de cette architecture est d'envoyer sur une fibre optique monomode, des données à la porteuse analogique de 60GHz. Les données binaires émises sont générées à un débit de 10 à 40 Gb/s par le composant PRBS ou générateur de données. Le format de modulation ici considéré, est le QAM, OFDM et les modulateurs optiques, de type Mach-Zehnder (MZM).

Le signal après la modulation sera injecté dans la fibre, pour être détecté en sortie par une photodiode PIN. A ce stade, le signal électrique obtenu est amplifié puis filtré avant d'être émis à travers une antenne radio à haute fréquence.

Au niveau d'utilisateur (MS), c'est le traitement inverse effectué au niveau de CS.

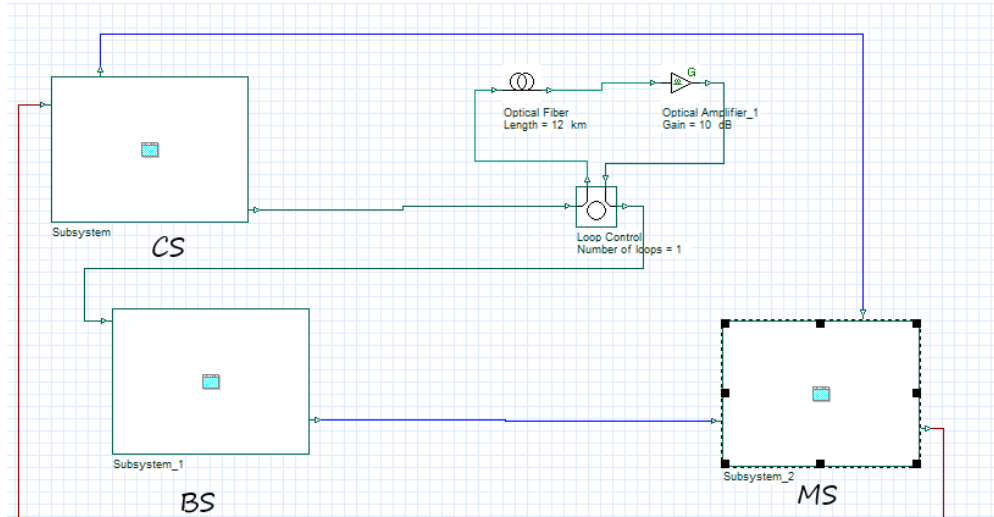


Figure IV. 4 : L'architecture générale de la liaison OFDM-RoF

IV.4.1. Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant 2 MZM:

Le principe de cette architecture est d'envoyer sur une fibre optique monomode, un signal OFDM porté sur une porteuse de 60GHz à l'aide de 2 modulateur Mach-Zehnder (MZM).

IV.4.1.1. La station centrale :

La figure IV. 5représente le schéma de la station centrale. Elle permet de distribuer et de contrôler les données à la porteuse RF. , elle comporte un générateur de bit ; qui génère une séquence de bits de 0 et 1 avec une probabilité égale. Dans cette simulation, la séquence de longueur est de 16 384 bits, un modulateur QAM qui doit générer les bits par symbole pour toutes les formes de QAM utilisées dans la simulation de cette mémoire (16-QAM, 64-QAM et 256-QAM) , blocs de modulation OFDM, composé de paramètres importants tels que le nombre de sous-porteuses , un modulateur en quadrature, qui est utilisé pour convertir le signal à une fréquence RF élevée, on utilise dans ce système la fréquence de 2.6 GHz.

Un laser délivre une puissance de 0.630 mW (-2 dBm),à longueur d'onde de 1552.5nm ; un

générateur de porteuse RF de 60 GHz, 2 modulateurs Mach-Zehnder : l'un est piloté par le signal RF de 60GHz et l'autre est commandé par le signal informatif via du modulateur en quadrature et des filtres passe bas.

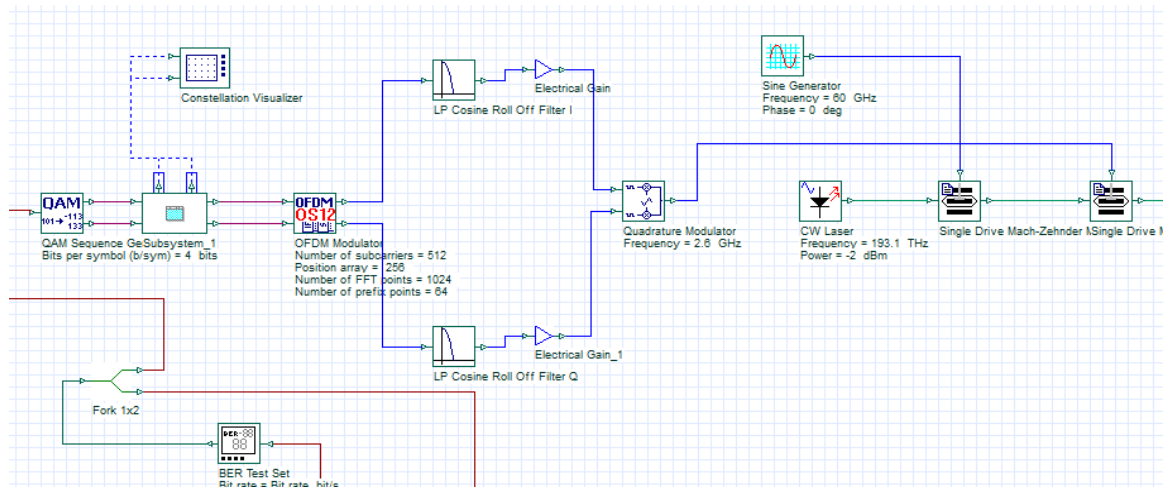


Figure IV. 5 : La station centrale

La CS comporte les blocs suivants:

➤ **Le modulateur QAM :** Il Génère deux séquences de symboles M-aires parallèles à partir de signaux binaires, on utilise un modulateur de 16, 64,256 états. Les paramètres de ce modulateur sont résumés dans le tableau ci-après.

Nombre des bites par symbole (bit/sym)	4 ,6,8 bit
Type de constellation	Double

Tableau IV. 1: Caractéristique du modulateur QAM

L'amplitude d'entrée vaut 1 pour le niveau haut et -1 pour le niveau bas, comme montré sur la figure suivante :

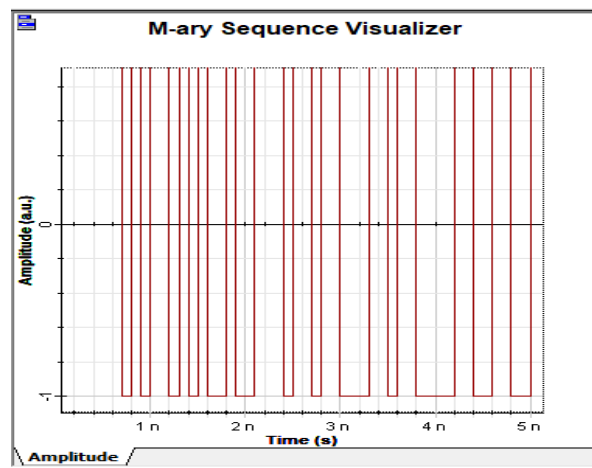


Figure IV. 6 : Signal d'origine

➤ **Le modulateur OFDM :** Cette composante module un signal numérique en plusieurs sous-porteuses orthogonales .Les paramètres caractéristiques du modulateur OFDM sont résumés au tableau IV.2.

Nombre de sous-porteuses	512sous-porteuse
Numéro de point de préfix	64
Nombre de FFT point	1024
Position array	256

Tableau IV. 2: Caractéristique du modulateur OFDM

La visualisation du spectre fréquentielle en sortie des modulateurs, nous permet de connaitre la largeur spectrale pour le I et le Q.

➤ **Filtre passe bas :** Le filtre passe-bas est utilisé pour rejeter le bruit et les interférences des composants qui se situent en dehors des informations du spectre du signal dont ces caractéristiques sont donnée par le tableau IV.3 :

fréquence de coupure	Symbol rate Hz
La profondeur	100 dB
Le facteur de roll	0.2

Tableau IV. 3: Caractéristique du filtre passe bas

➤ **Modulateur en quadrature :**Le modulateur en quadrature implémente un modulateur d'amplitude analogique en quadrature ces caractéristique sont

La fréquence	2.6 GHz
Le gain	0.01

Tableau IV. 4: Caractéristique du modulateur quadratique

➤ **Laser :**Nous utilisons le modèle de laser de la bibliothèque OptiSystem (type laser CW). Les paramètres de ce laser sont résumés dans le tableau ci-après.

Fréquences (longueur d'onde)	193.1THz (1552.52 nm)
Puissance d'émission	0.630 mW (-2 dBm)
Largeur de raie	40 MHz

Tableau IV. 5: Caractéristique du laser

La visualisation du spectre fréquentielle en sortie des lasers, permet de mettre en évidence la largeur spectrale du laser ainsi que le niveau de puissance optique en sortie (0.630 mW).

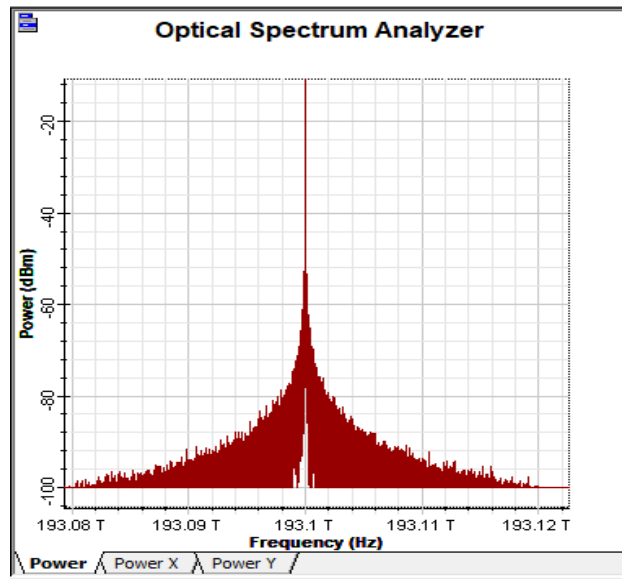


Figure IV. 7: Spectre en sortie du laser

➤ **Générateur de sinus** :Génère un signal électrique sinusoïdal, ces paramètres sont :

Fréquence	60 GHz
Amplitude	1 a.u

Tableau IV. 6: Caractéristique du générateur en sinus

➤ **Les modulateurs Mach-Zender** :Les paramètres caractéristiques du MZM sont résumés au tableauIV.7.

taux d'extinction	30
tension de modulateur	1.6 V

Tableau IV. 7: Caractéristique du Mach-Zender

IV.4.1.2. Le canal de transmission :

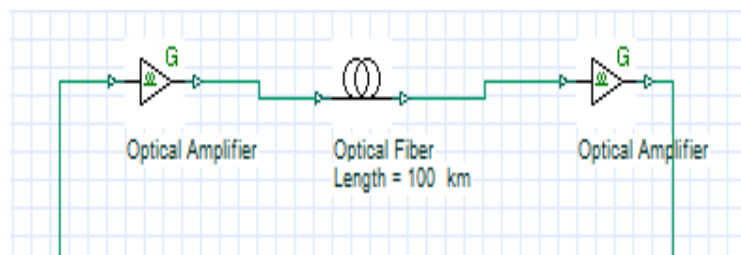


Figure IV. 8: Canal de transmission

La sortie du modulateur est connectée à une fibre optique monomode intercalé entre des amplificateurs optiques pour améliorer le rendement en puissance, dont les paramètres de la fibre sont résumés dans le tableau suivant :

Longueur	de 25 Km à 100 Km
Atténuation	0.2 dB/km
Dispersion	16ps/nm/km
Longueur d'onde de référence	1552.52 nm

Tableau IV. 8: Caractéristique de la fibre optique

IV.4.1.3. La station de base :

La figure IV.9 représente le schéma du module BS permettant de détecter le signal RF en sortie de la fibre et de passer de l'optique à l'électrique. Ce module est placé sur le pylône supportant l'antenne. Ce bloc est constitué d'un filtre optique passe bande, photodétecteur, et d'un amplificateur pour le cas de la simulation.

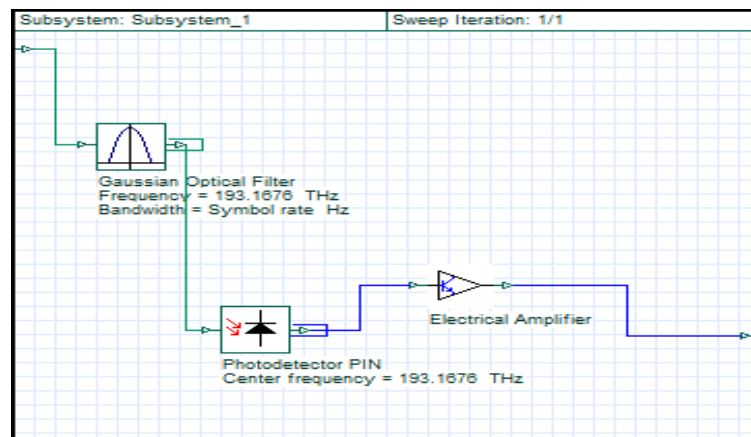


Figure IV. 9 : La station de base

➤ **Le photodétecteur :** Le photodétecteur utilisé est une photodiode PIN. Les paramètres utilisés sont résumés dans le tableau suivant :

Rendement	1 A/W
Courant d'obscurité	10 nA
Bruit Thermique	100e-024W/Hz
largeur de bande de modulation	2 GHz
La fréquence centrale	193.1THz

Tableau IV. 9: Caractéristique de la photodiode

➤ **Le filtre optique** : Est un Filtre optique avec une fonction de transfert de fréquence gaussienne. Les paramètres utilisés sont résumés dans le tableau suivant :

La fréquence	193.1THz
La bande passante	Symbol rate Hz
Profondeur	100 dB
Ordre	2

Tableau IV. 10: Caractéristique du filtre optique

➤ **L'amplificateur** :Le signal sortant de la photodiode est souvent atténué. L'amplificateur sert à amplifier le signal avec un rapport de bruit thermique additionnel.

Gain	16 dB
La puissance de bruit	-50 dBm (10^{-6} mW)

Tableau IV. 11:Caractéristique de l'amplificateur

IV.4.1.4. La station mobile :

La figure IV.10 représente le schéma de la station mobile. Une fois le signal optique converti en signal électrique et le bruit éliminé, le signal est démodulé à la même fréquence RF modulée, puis le signal est démodulé avec un démodulateur OFDM pour extraire les symboles. Puis décodé avec décodeur QAM pour obtenir les bits d'origine.

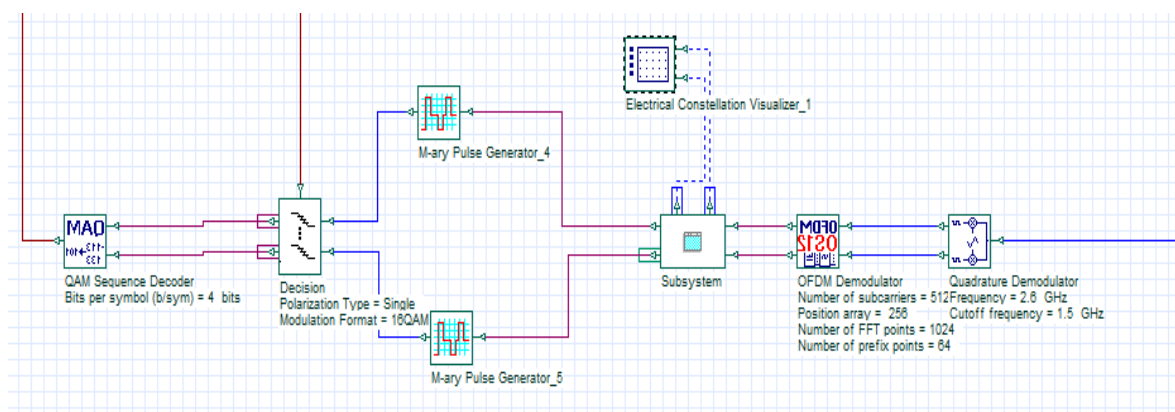


Figure IV. 10 : Station Mobile

➤ **Démodulateur en quadrature** : est un Démodulateur à amplitude cohérente pour les composantes en quadrature (I et Q). Les paramètres utilisés sont résumés dans le tableau IV.12.

La fréquence	2.6 GHz
Le gain	1
fréquence de coupure du filtre	1.5 GHz

Tableau IV. 12 :Caractéristique du démodulateur quadratique

➤ **Démodulateur OFDM** :Ces caractéristiques sont :

nombre de sous-porteuses possibles	512 sous-porteuses
Référence bit rate	Bit rate / m (2,4,6)
Nombre de FFT	1024

Tableau IV. 13:Caractéristique du demodulateur OFDM

➤ **Démodulateur QAM** :Il Décode deux séquences de symboles M-aires QAM parallèles en un signal binaire. Ces paramètres sont :

Nombre de préfix point	64
Gain	10

Tableau IV. 14: Caractéristique du démodulateur QAM

IV.4.1.5. Résultats de la simulation :

a. Système 16QAM-OFDM RoF:

Dans le système 16QAM-OFDM RoF, le générateur de bits génère une séquence de 0 et 1 avec une longueur de séquence de 16 384bits, puis ces bits codés avec un encodeur 16-QAM, qui utilisent 4 bits par symbole. Toutes les figures ci-dessous de la Figure IV.11à la Figure IV.20 décrivent les résultats de simulations pour un signal OFDM de 512 sous-porteuses.

La figure IV.11 et la Figure IV.12 ci-dessus montrent le signal binaire d'origine et le diagramme de constellation du signal codé 16-QAM, le diagramme de constellation 16-QAM montre le nombre de 4 bits par symbole pour générer le signal OFDM.

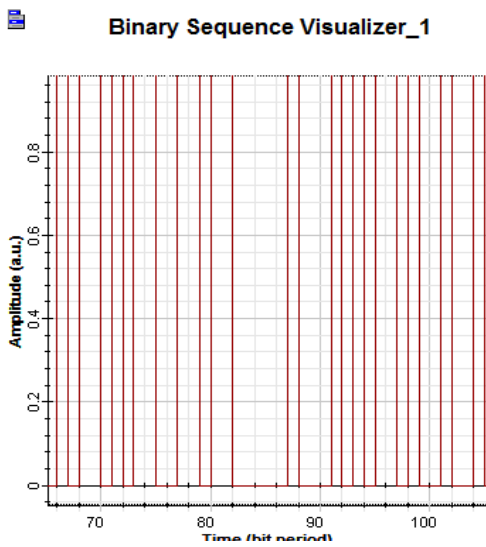


Figure IV. 11 : Le signal d'origine

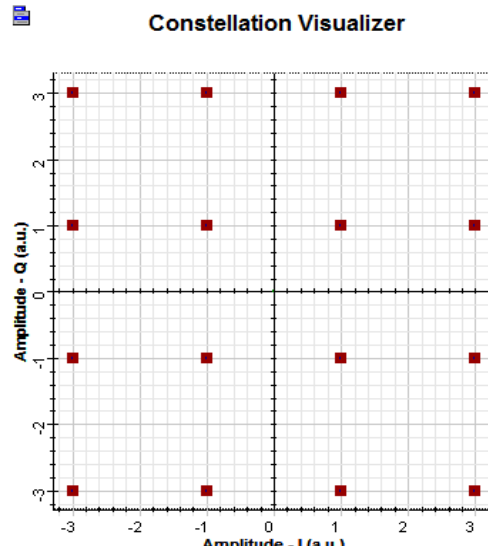


Figure IV. 12 : Diagramme de la constellation

Une fois le signal OFDM généré, il sera modulé par un modulateur en quadrature. Avant la modulation, le signal OFDM est filtré par un filtre passe-bas pour atteindre la fréquence RF de 2,6 GHz, comme illustré par la Figure IV.13, et la Figure IV. 14, respectivement.

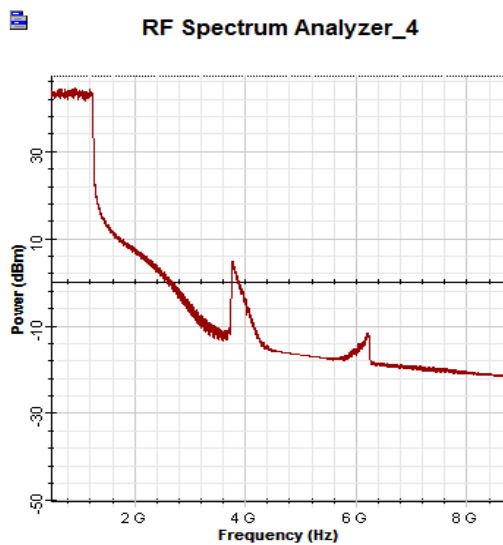


Figure IV. 13 : Le signal OFDM

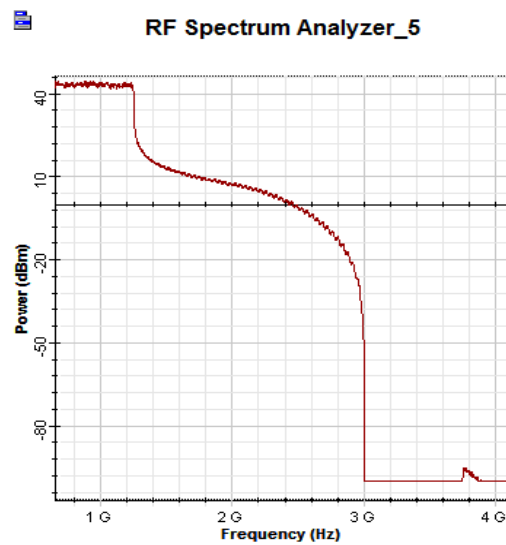


Figure IV. 14 : Signal OFDM filtré

La prochaine opération consiste à convertir le signal RF OFDM en signal optique dans une fenêtre de 1552.52 nm (193,1 THz) à l'aide de 2 modulateurs externe MZM, l'un est commandé par un signal RF de 60 GHz et l'autre par le signal informatif OFDM. Avec une valeur de puissance faible de -2 dBm. Le signal obtenu dans le domaine fréquentiel est présenté à la Figure IV.15, Figure IV.16, respectivement.

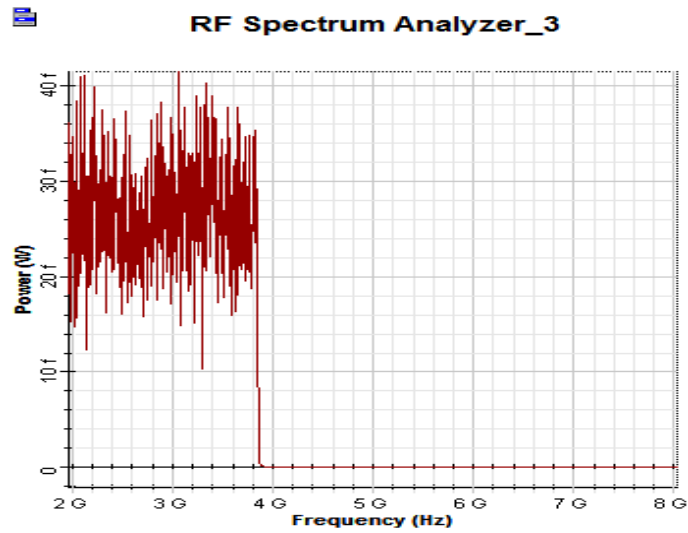


Figure IV. 15 :Le spectre du signal à la sortie du modulateur en quadrature

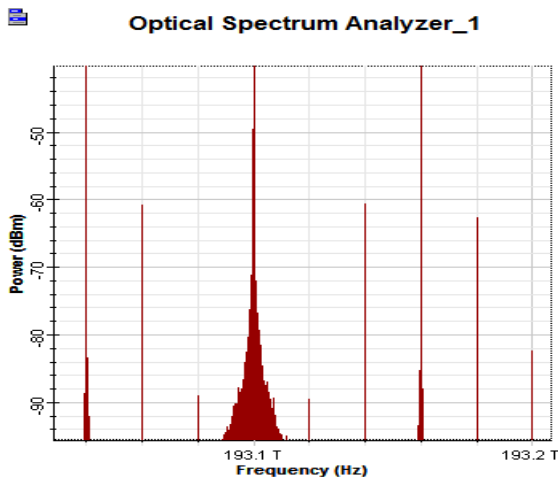


Figure IV. 16: Le spectre à la sortie du 1er MZM

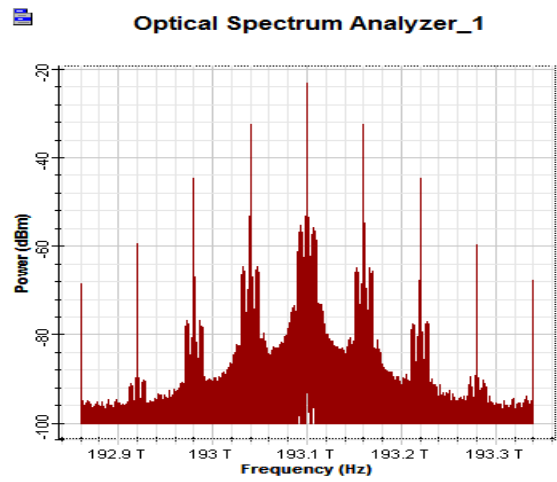


Figure IV. 17: Le spectre à la sortie du 2eme MZM

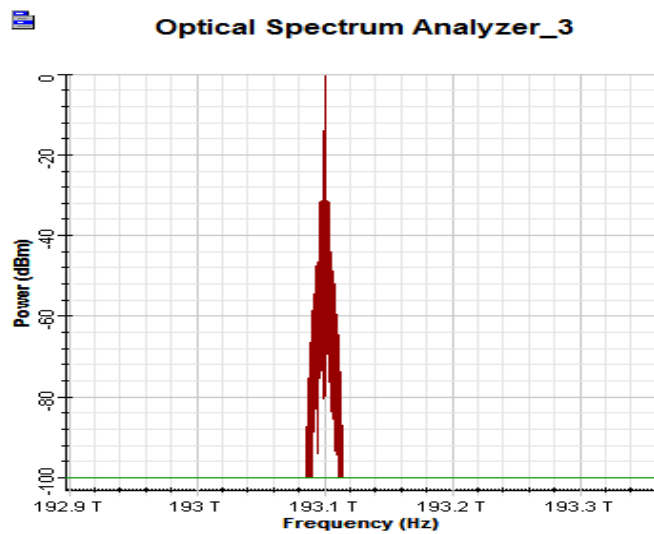


Figure IV. 18 : Signal optique à la sortie du filtre optique reçu par la PD

Après que le signal soit transmis sur la fibre de 25 km de longueur pour être reçu, le signal optique reçu sur PD est représenté à la Figure IV.18.

Du côté du récepteur, il y a deux parties pour analyser le signal optique reçu. La première partie est le récepteur optique qui consiste en PD, à la figure IV.19, le signal RF après la conversion optique- électrique, qui est dans le domaine fréquentiel.

Le signal après le démodulateur quadrature est donné par figure IV.20 :

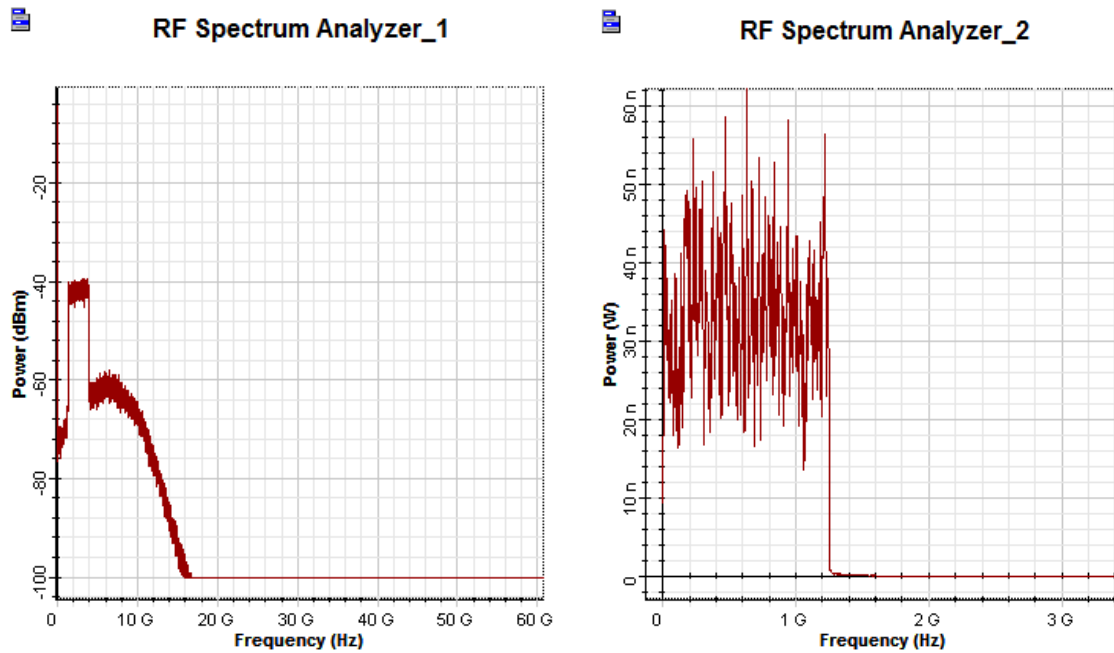


Figure IV. 19 : Le signal RF reçus *Figure IV. 20: Le signal à la sortie du démodulateur quadrature*

❖ **Etude de performance du système 16QAM-OFDM ROF :**

Une fois que le signal RF OFDM clarifié est atteint sur le démodulateur OFDM et que l'opération de démodulation est effectuée, la sortie du démodulateur est analysée pour atteindre la valeur de BER.

Les diagrammes de constellations à la sortie du décodeur 16-QAM sont présentés à la Figure IV.21. On constate de cette figure et comparé à la figure IV.21, que lorsqu'on augmente le débit la qualité de signal se dégrade .Cette dégradation est due à l'atténuation, la dispersion chromatique et le bruit .Les cercles bleus représentent le bruit de la source laser, de la photodiode, et de l'amplificateur optique, ainsi que la dispersion de fibre. Cette dernière est plus drastique lorsque le débit binaire augmente.

Les résultats de la Figure IV.22 sont en bien accord avec les résultats de la Figure IV.21 qui représente la variation de BER en fonction de débit binaire. Cette figure montre bien la dégradation de qualité de signal lorsque le débit binaire augmente. Ainsi, pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , le débit binaire doit être inférieur à 20 Gb/s.

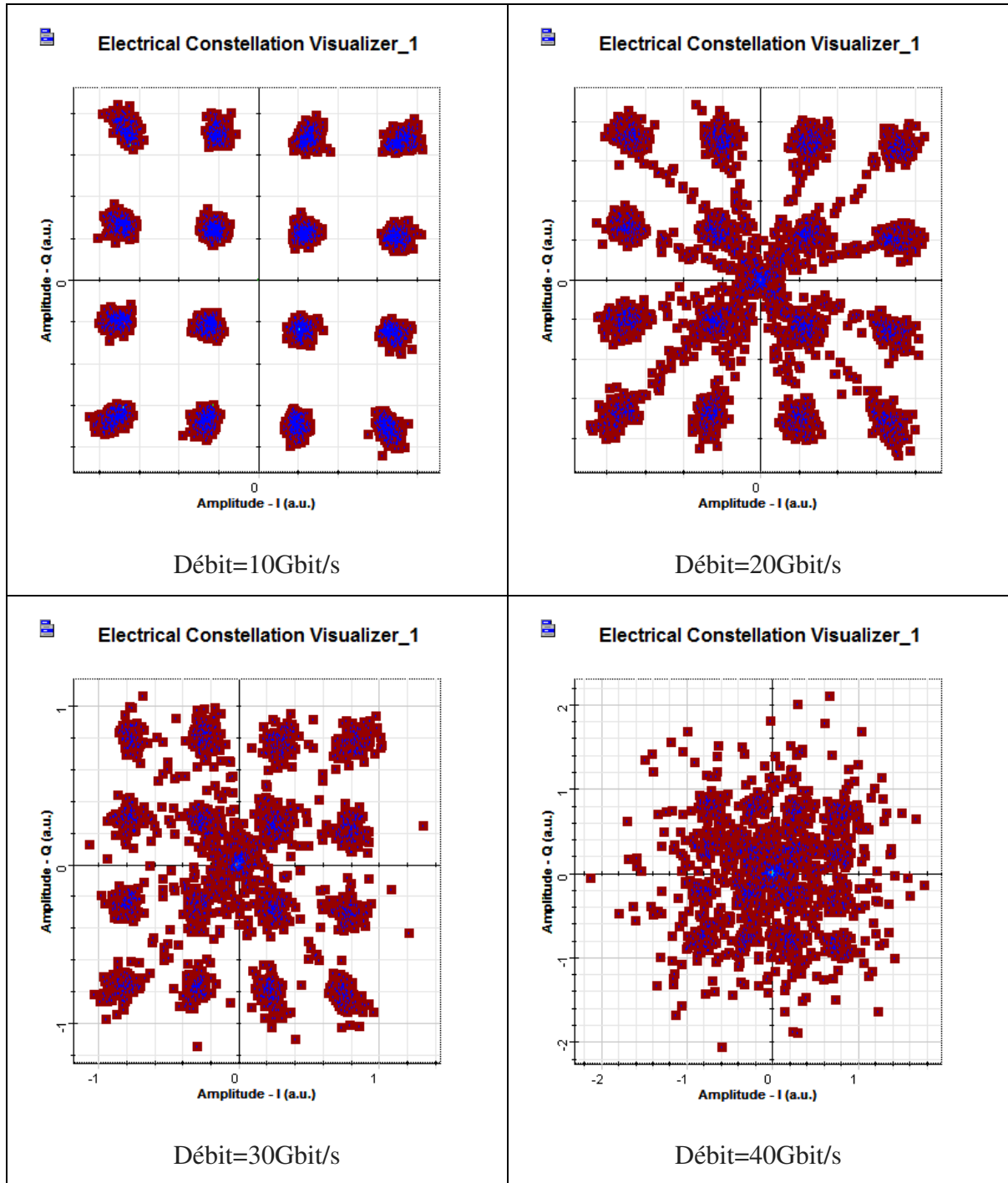


Figure IV. 21 : Diagrammes de la constellation à la sortie du décodeur 16-QAM pour chaque valeur de débit.

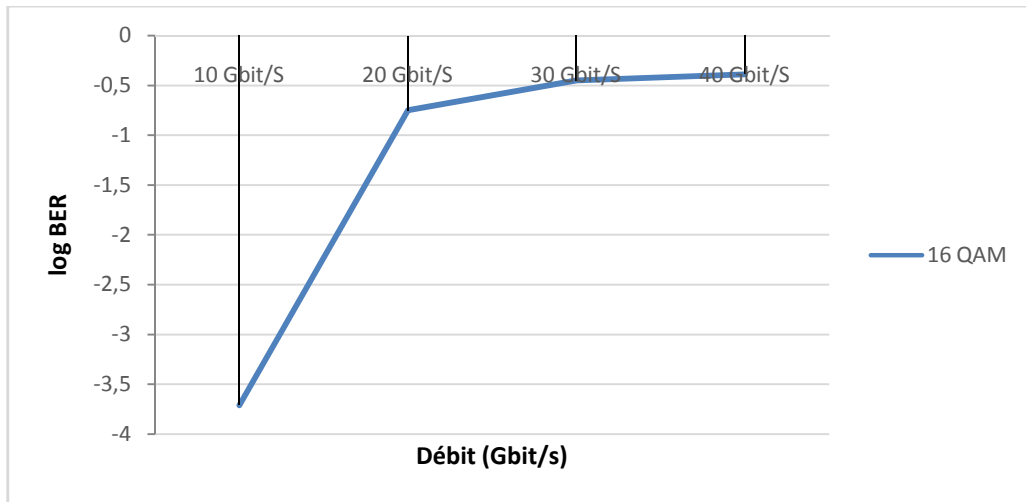


Figure IV. 22 : BER en fonction de débit binaire

La relation entre le BER et la longueur de la fibre de la liaison pour un Débit = 10Gbit/s est représenté par la Figure IV. 23.

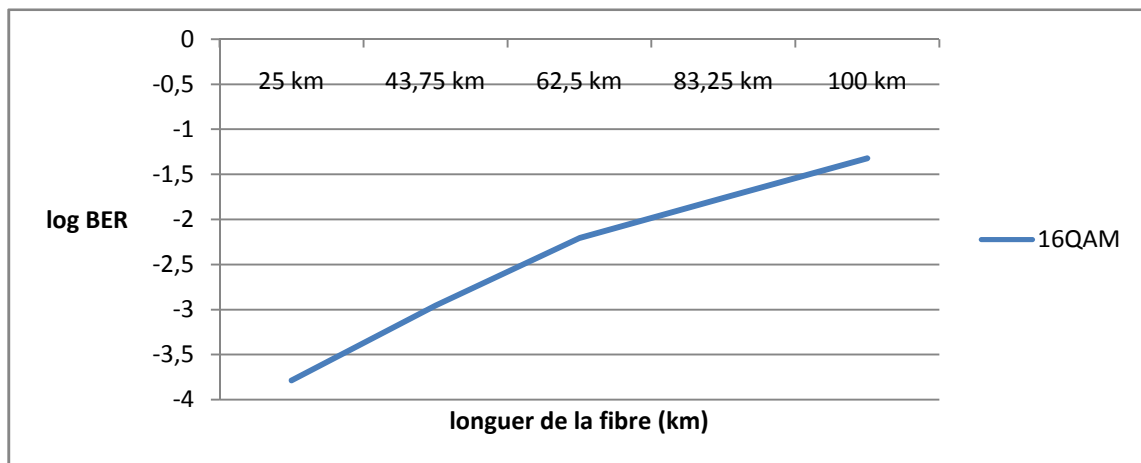


Figure IV. 23 : BER en fonction de la longueur de la fibre

Une meilleure qualité de signal est obtenue à une distance plus proche mais se dégrade au fur et à mesure que la distance augmente. Ceci a pour conséquence la susceptibilité des signaux de modulation à haut débit à la dispersion chromatique, et à l'accumulation de bruit des amplificateurs en ligne. On constate que pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , la longueur de la fibre doit être inférieure à 100 Km.

Les performances du système peuvent être étudiées en mesurant le BER par rapport au l'OSNR. La figure IV.24 montre le BER en fonction de l'OSNR, il est clair que plus le OSNR augmente, plus le BER diminue. Ainsi, pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , le rapport OSNR doit être supérieur à 17dB.

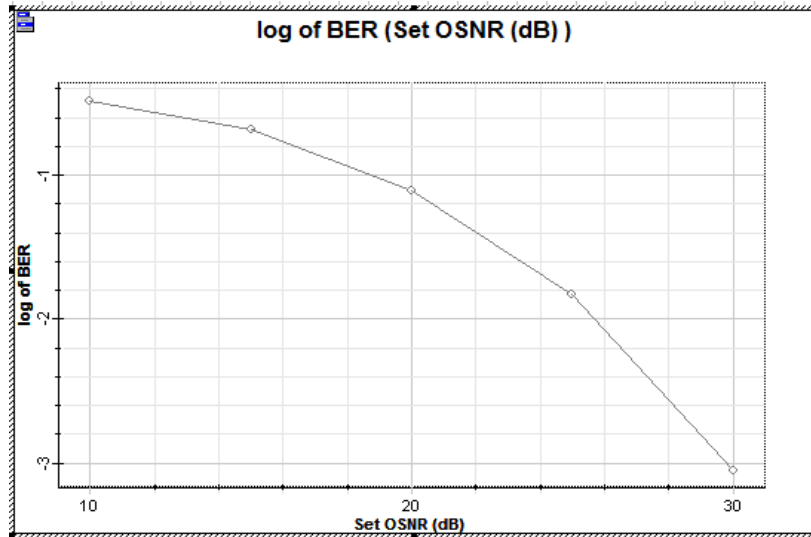


Figure IV. 24 : BER en fonction d'OSNR

b. Système 64-QAM-OFDM RoF:

Dans le système 64QAM-OFDM RoF, le générateur de bits génère une séquence de 0 et 1 avec une longueur de séquence de 16 384bits, puis ces bits codés avec un encodeur 64-QAM, qui utilisent 6 bits par symbole. La figure IV. 25 et la figure IV. 26 ci-dessus montrent le signal binaire d'origine et le diagramme de constellation du signal codé 64-QAM.

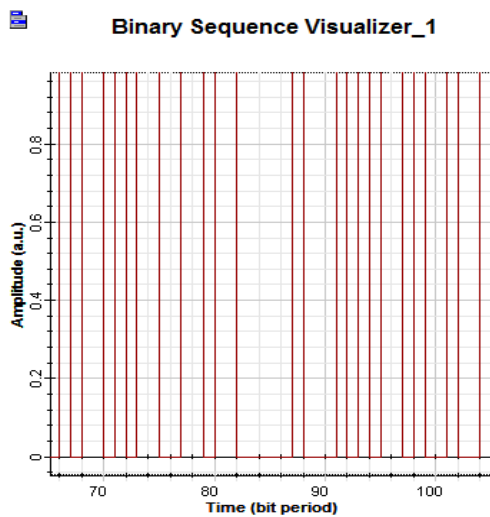


Figure IV. 25 : signal originale

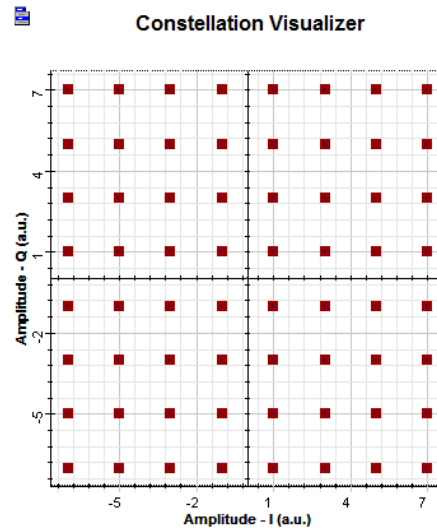


Figure IV. 26 : diagramme de constellation

Les diagrammes de constellation à la sortie du décodeur 64-QAM en fonction de débit sont présentés à la Figure IV. 27. Cette figure montre que lorsqu'on augmente le débit la qualité de signal se dégrade pour les mêmes raisons discutées pour le 16-QAM.

La dépendance de dégradation du signal par rapport au débit est bien montrée par la figure IV .28, qui représente la variation de BER en fonction de différentes valeurs de débit.

Pour 64 –QAM, On constate que pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , le débit binaire doit être inférieur à 25Gb/s

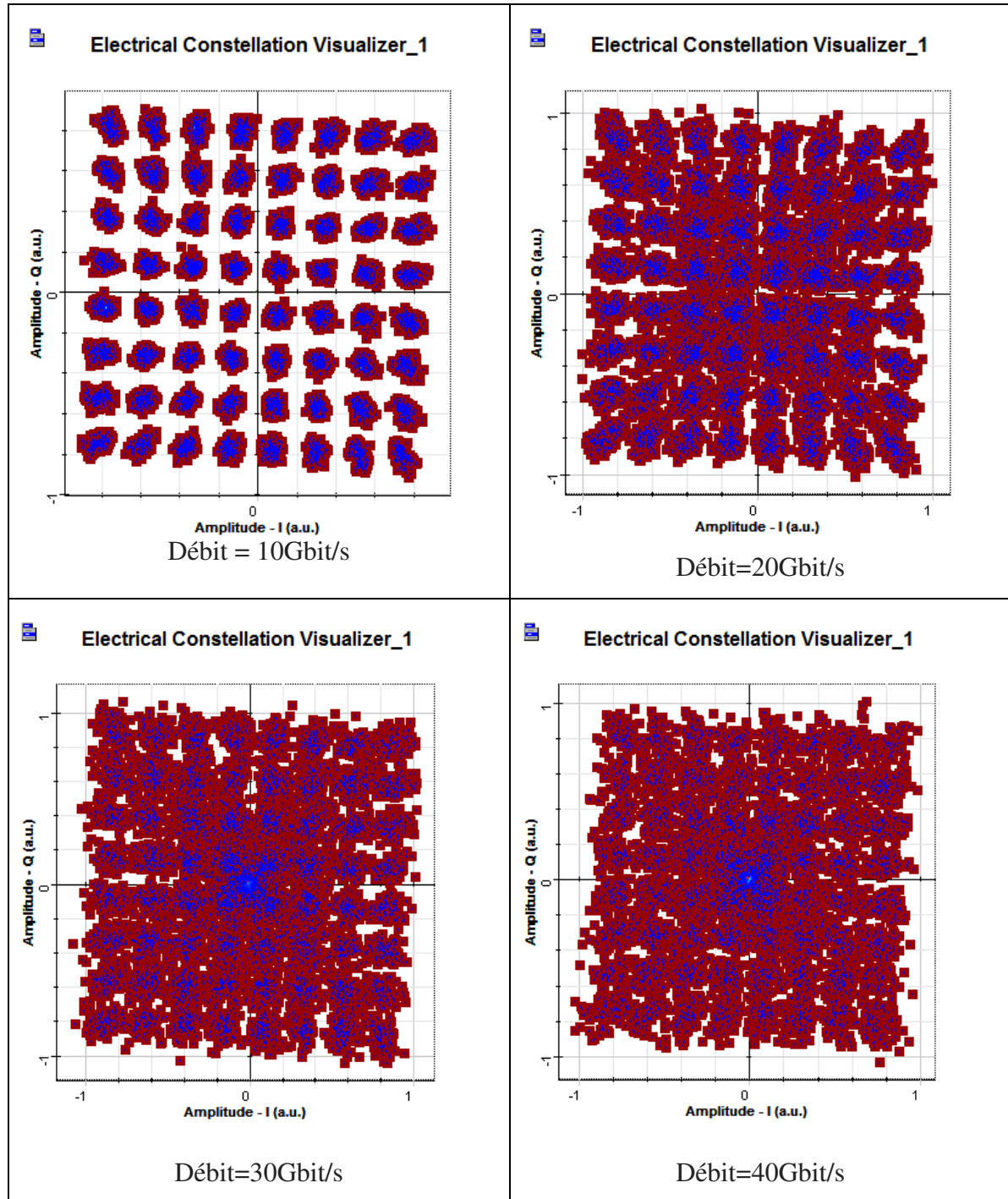


Figure IV. 27 : Diagrammes de la constellation à la sortie du décodeur 64-QAM pour différentes valeur de débit.

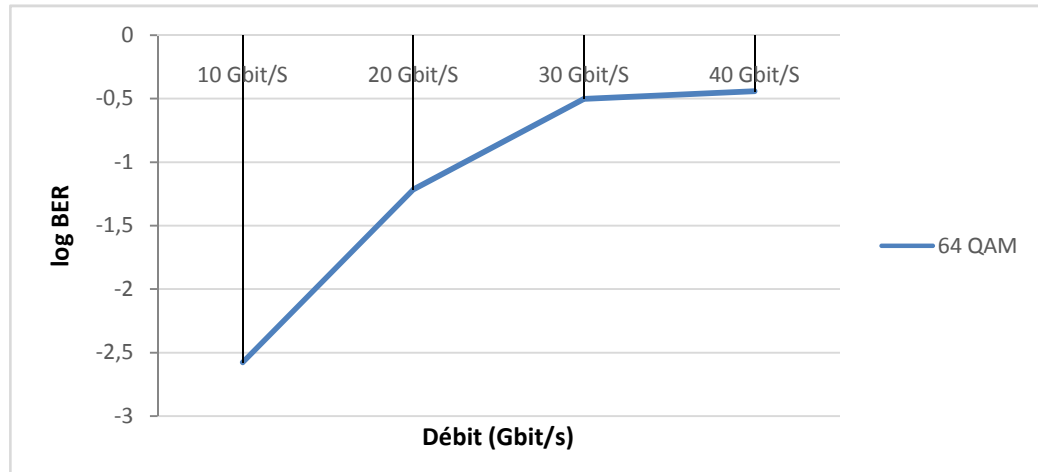


Figure IV. 28 :BER en fonction de débit

La performance du système peut être étudiée en mesurant le BER pour différentes longueurs de la fibre de la liaison pour Débit= 10Gbit/s, les résultats sont représenté par la figure ci-dessous :

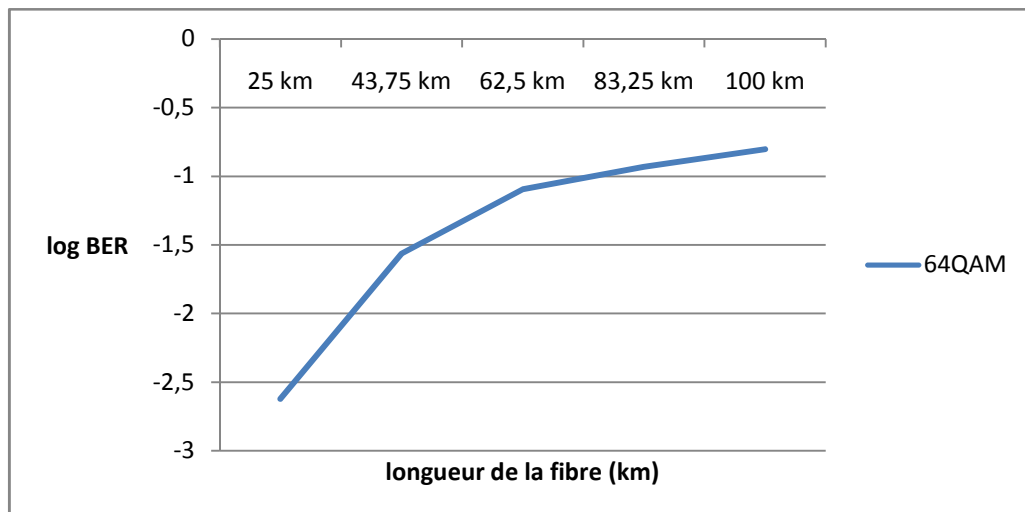


Figure IV. 29 : BER en fonction de la longueur de la fibre

Comme le 16-QAM Une meilleure qualité de signal est obtenue à une distance plus proche mais se dégrade au fur et à mesure que la distance augmente. On constate que pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , la longueur de la fibre doit être inférieure à 85 Km

Un autre critère pour étudier les performances du système en mesurant le BER par rapport à l'OSNR. La Figure IV.30 montre la variation de BER en fonction de variation de l'OSNR, il est clair que plus l'OSNR augmente, plus le BER diminue. Ainsi, pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , le rapport OSNR doit être supérieur à 22dB.

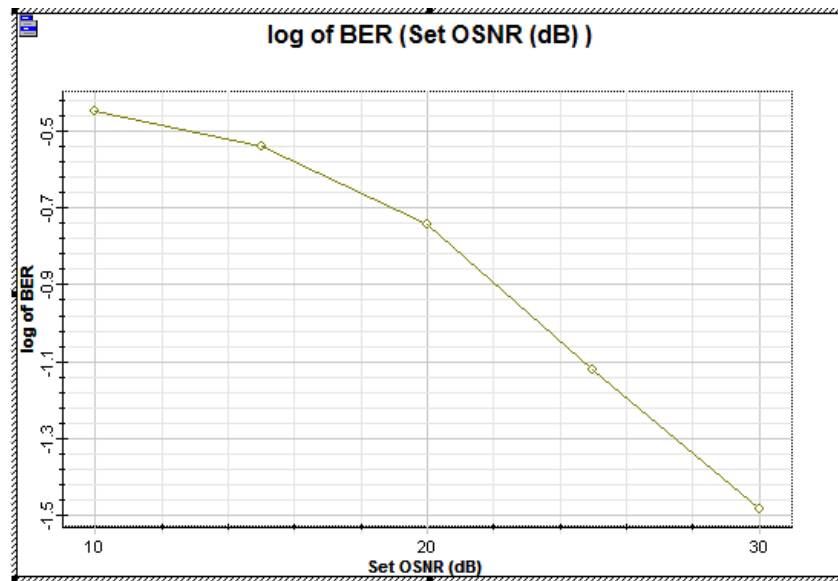


Figure IV. 30: BER en fonction d'OSNR

c. Système 256-QAM-OFDM RoF:

Dans le système 256QAM-OFDM RoF, le générateur de bits génère une séquence de 0 et 1 avec une longueur de séquence de 65536 bits, puis ces bits codés avec un encodeur 256-QAM, qui utilisent 8 bits par symbole. La figure IV. 31 et la figure IV. 32 ci-dessus montrent le signal binaire d'origine et le diagramme de constellation du signal codé 256-QAM.

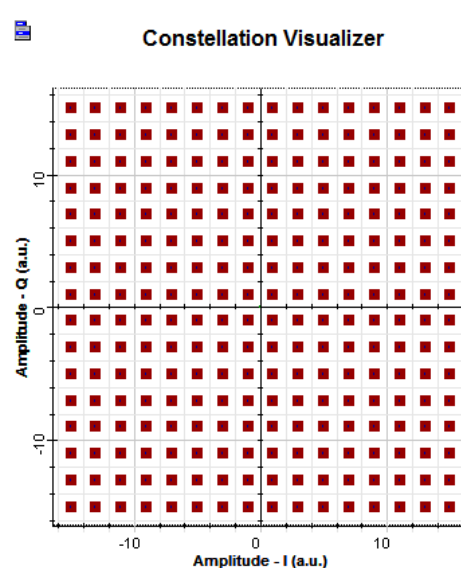
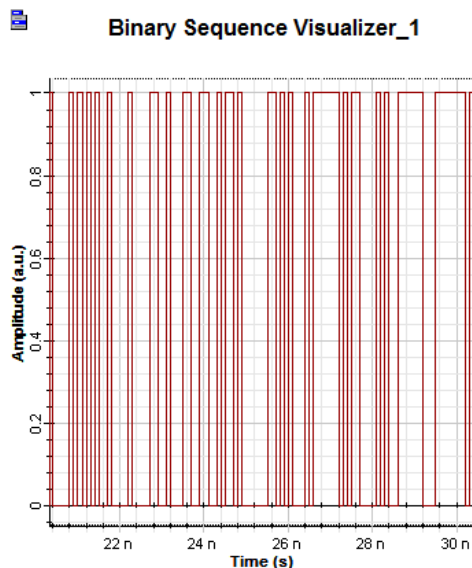
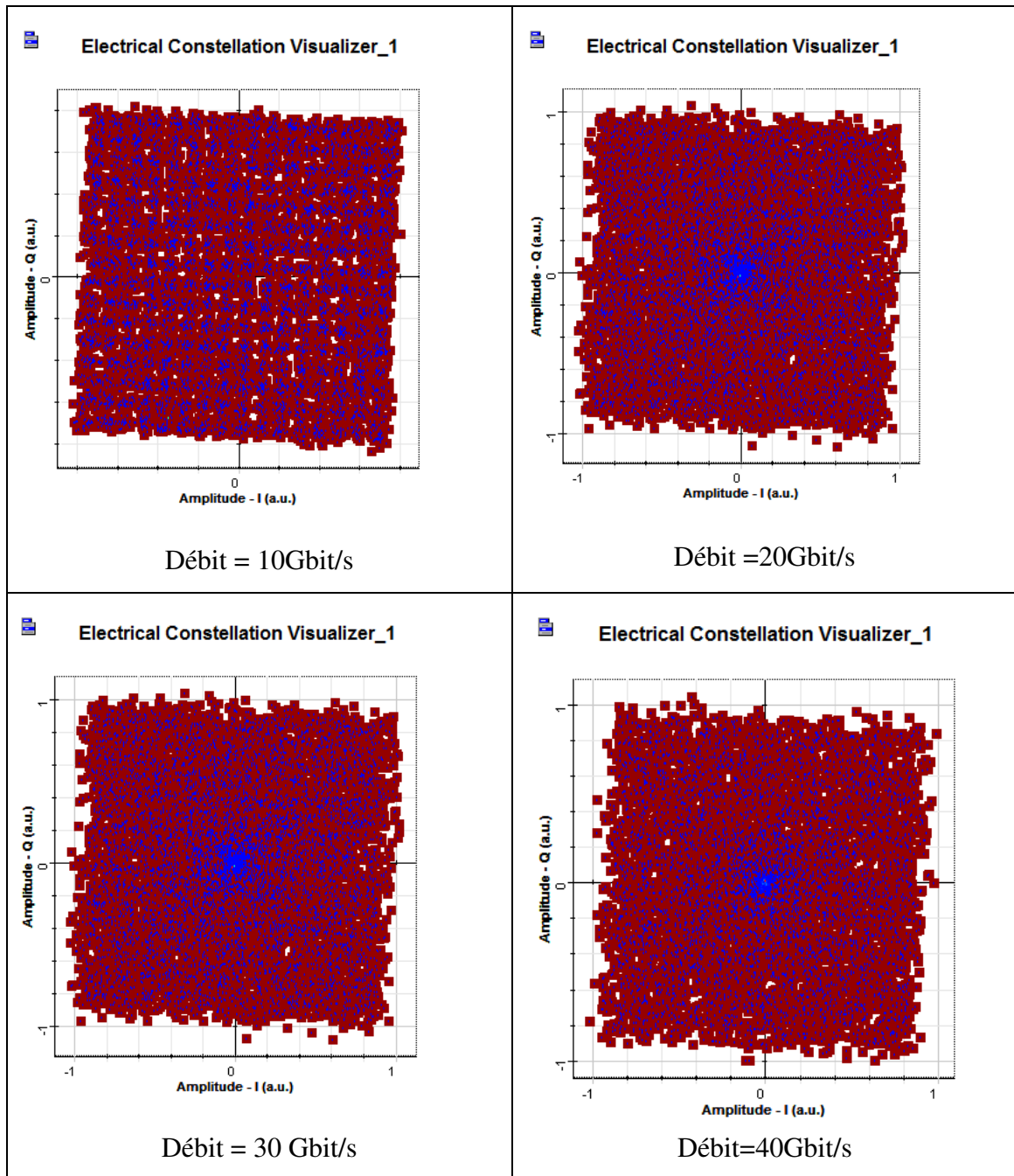


Figure IV. 31: Signal d'origine

Figure IV. 32: Diagramme de la constellation

Les diagrammes de constellation à la sortie du décodeur 256-QAM en fonction de différentes valeurs débit présenté par la Figure IV.33 ; on constate que lorsqu'on augmente le débit la qualité de signal se dégrade, ici aussi, pour les mêmes raisons discuté pour le 16-QAM.

La figure IV .34représente la variation de BER en fonction de déférentes valeurs de débit. Pour 256 –QAM, un BER inférieur à 10^{-9} est obtenue lorsque le débit binaire est inferieur à 20 Gb/s.



*Figure IV. 33 : Diagrammes de constellation à la sortie de décodeur 256-QAM
Pour différentes valeur de débit*

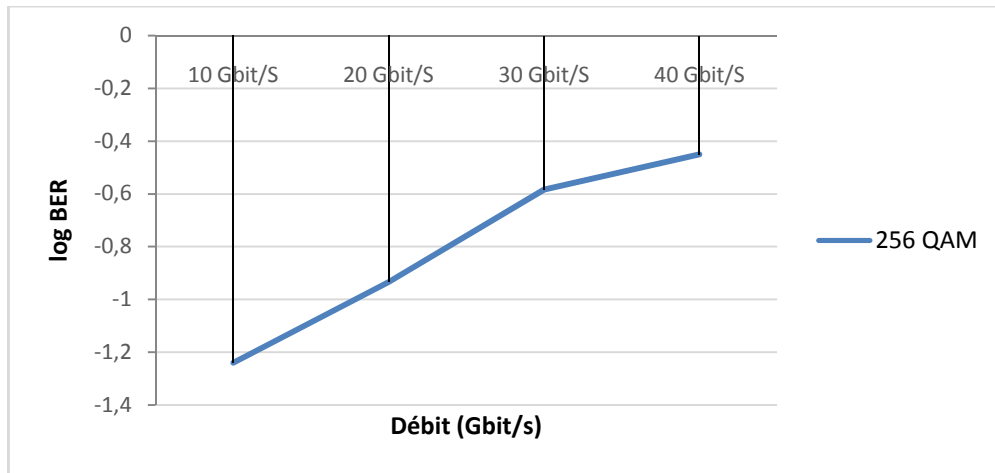


Figure IV. 34 : BER en fonction de débit

La performance du système est étudiée en mesurant le BER pour différentes longueurs de la fibre de la liaison pour Débit = 10 Gbit/s, les résultats sont représenté par la Figure IV.35. On constate que la qualité de signal se dégrade avec l'augmentation de la longueur de la fibre. Ainsi pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , la longueur de la fibre doit être inférieure à 35 Km

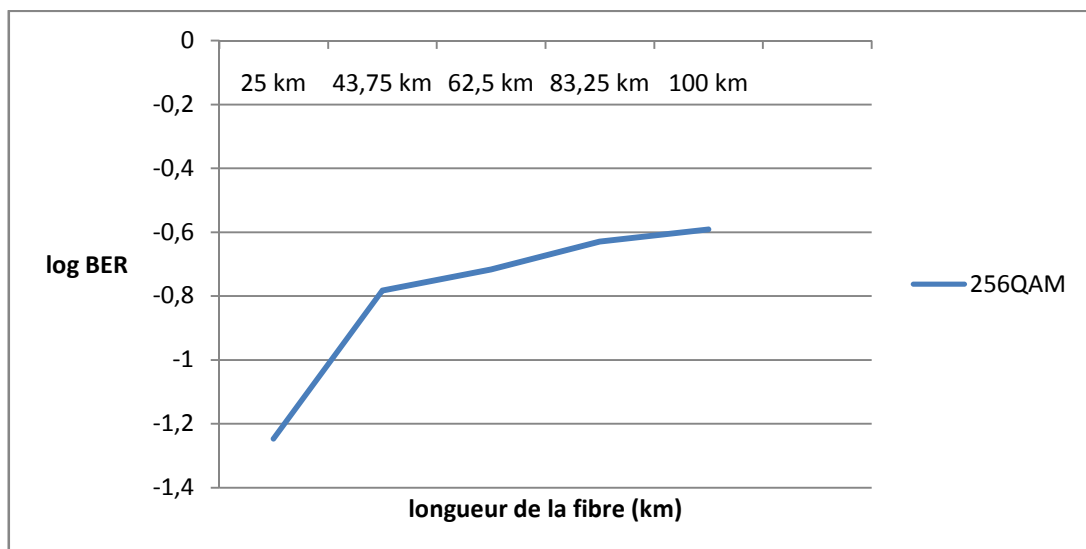


Figure IV. 35 : BER en fonction de la longueur de la fibre

La Figure IV.36 montre le BER en fonction de l'OSNR, elle montre que plus le OSNR augmente, plus le BER diminue. Ainsi, pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , le rapport OSNR doit être supérieur à 30 dB.

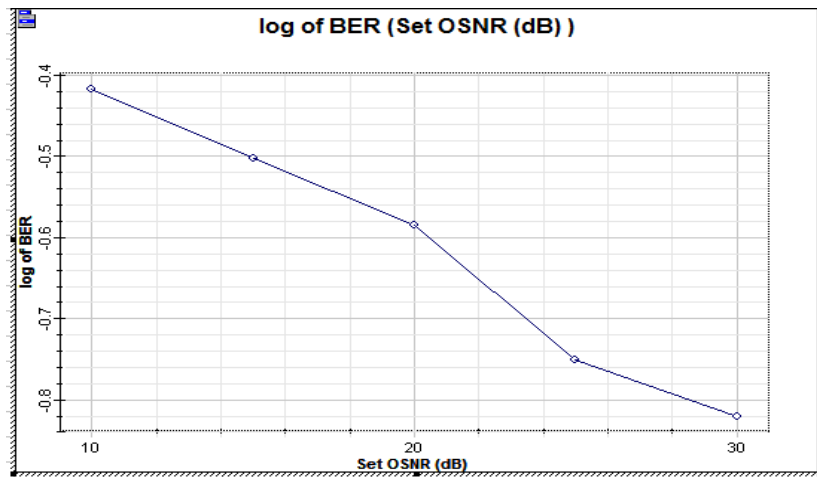


Figure IV. 36 : BER en fonction de débit

d. Comparaison de performance des systèmes (16-QAM, 64-QAM et 256-QAM) OFDM-RoF:

Le but de toute liaison est d'atteindre une bonne transmission avec le plus haut débit, tout en conservant le signal émis à la réception.

❖ **En fonction de Débit binaire:**

Dans ce qui suit on va étudier l'effet du débit sur notre liaison. La figure ci-dessous présente les résultats de simulation pour différents débits pour les 3 formats de modulation (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM), se propageant sur une distance de 25 km.

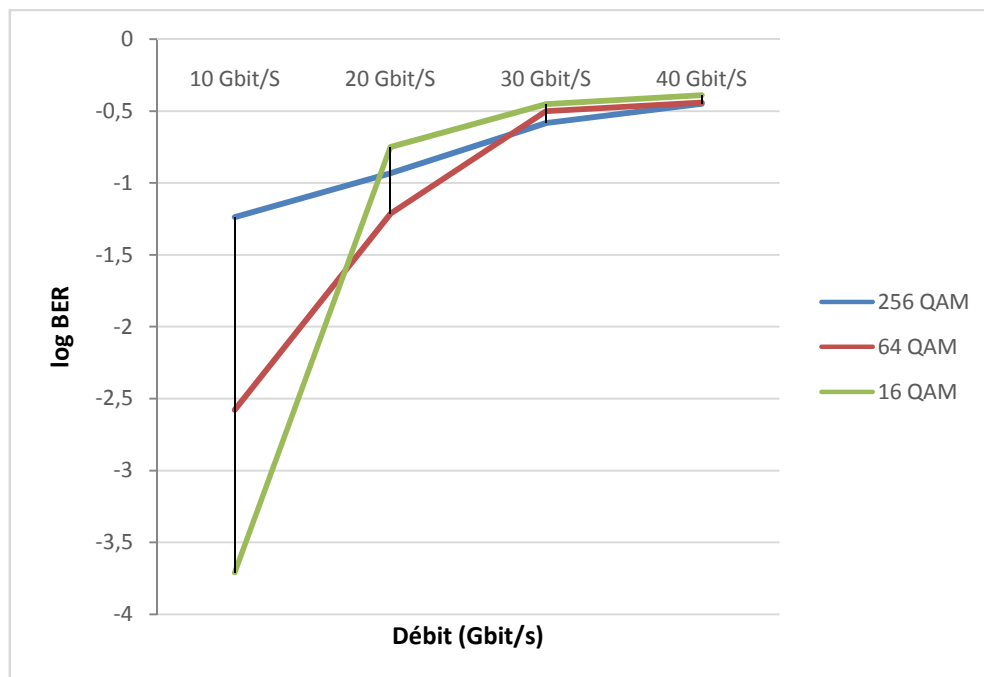


Figure IV. 37 : BER en fonction de débit

On constate d'après la Figure IV.37, que les schémas de modulation à faible débit montrent une meilleure amélioration BER que ceux des schémas de modulation à haut débit, bien que plus le débit augmente, plus la qualité du signal se dégrade. On note également, que pour des débits supérieurs à 30 Gb/s, la performance des 3 formats (16-QAM, 64-QAM, et 256-QAM) sont sensiblement identiques.

❖ **En fonction de la puissance optique:**

Les mesures suivantes sont faites en variant la puissance du laser tout en gardant une longueur de la fibre constante de 25 km avec un débit de 10Gbits/s pour 16-QAM, 64-QAM, et 256-QAM.

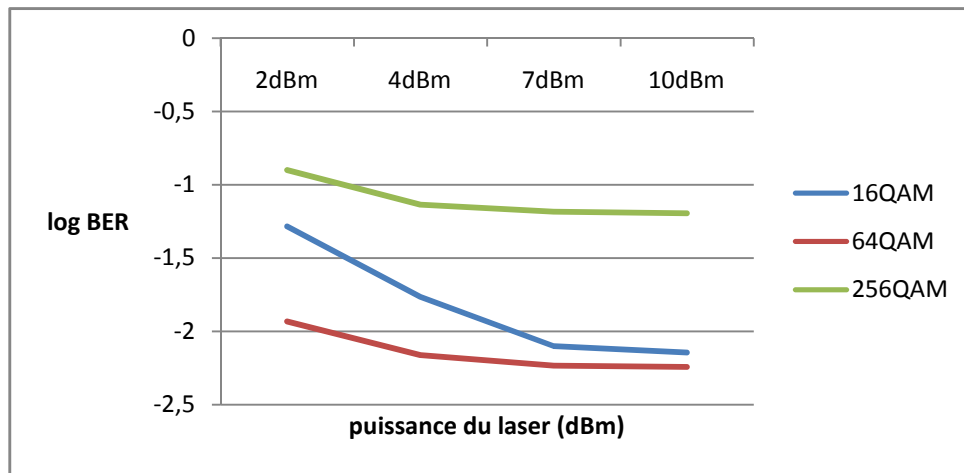


Figure IV. 38 : BER en fonction de la puissance optique

La figure IV.38 montre la variation de BER en fonction de la puissance de la porteuse optique délivré par la diode laser, On constate, que plus on augmente la puissance émise du laser plus on obtient des très bonnes valeurs de BER (Le BER décroît en fonction de la puissance optique reçue).Cependant, de meilleurs BER sont obtenus pour des niveaux élevés de puissance d'entrée avec la modulation 64-QAM.

❖ **En fonction d'OSNR :**

L'étude suivante montre la variation d'OSNR pour un débit de 10 Gbit/s pour les 3 formats de modulation 16-QAM ,64-QAM, 256-QAM. Les résultats sont donnés par la Figure IV.39. On remarque que l'orque on augmente l'ordre de QAM, la valeur d'OSNR augmente pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} . Il apparait aussi, que pour des valeurs de l'OSNR inférieur à 13 dB, la performance des 3 formats (16-QAM, 64-QAM, et 256-QAM) sont sensiblement identiques.

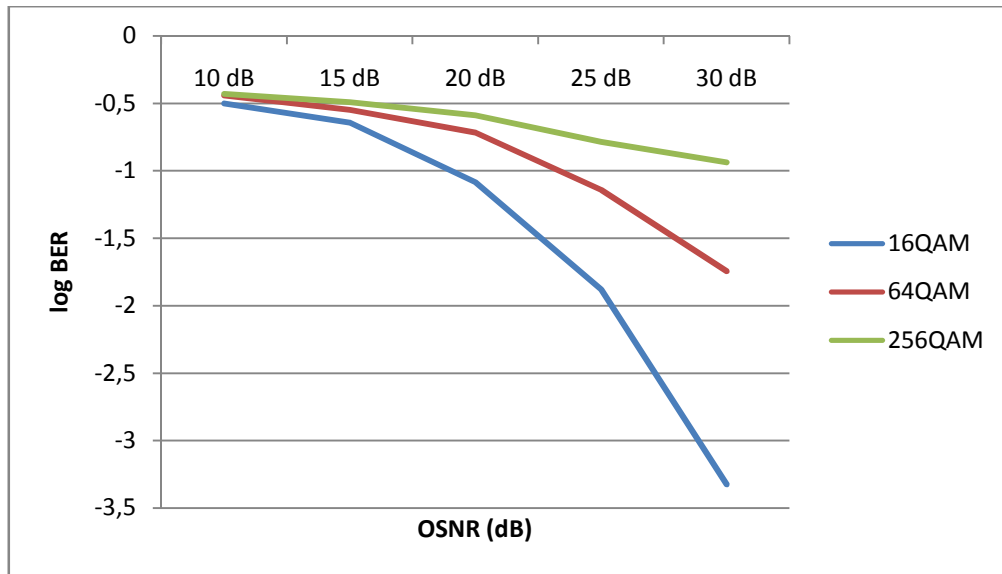


Figure IV. 39 : BER en fonction d'OSNR

❖ En fonction de la longueur de la fibre

Dans l'étude suivante on variant la longueur de ligne de transmission (la fibre optique) pour les 3 formats de modulation 16-QAM ,64-QAM, 256-QAM.En gardant un débit de 10Gbits. Les résultats sont donnés par la Figure IV.40.

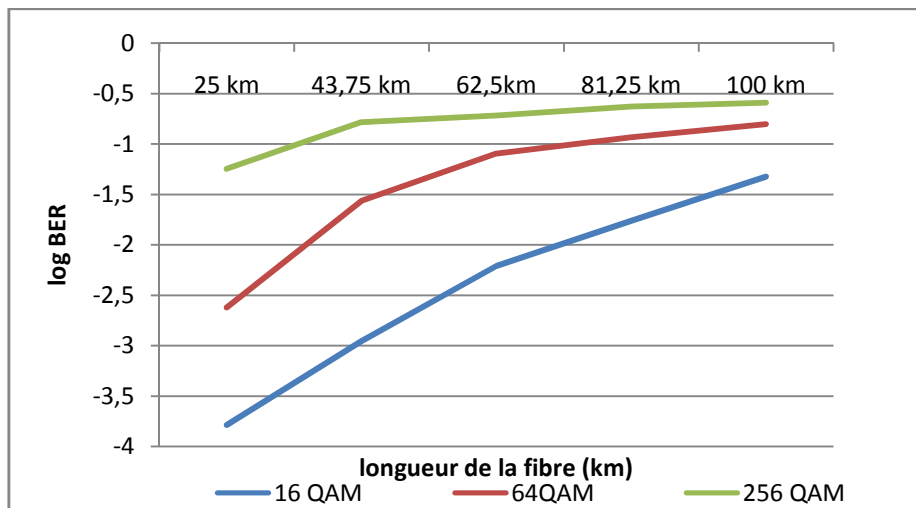


Figure IV. 40 :BER en fonction de la longueur de la fibre

On constate que, La qualité de signal reçu se dégrade avec l'augmentation de la longueur de la fibre. Une meilleure amélioration de BER pour les formats de modulation a faible niveau par rapport au format haut niveau .On note aussi, que pour des longueurs supérieures à 100 Km, la performance des 3 formats (16-QAM, 64-QAM, et 256-QAM) sont sensiblement identiques.

IV.4.2. Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant un mélangeur :

Le principe de cette architecture est d'envoyer sur une fibre optique monomode, des signaux OFDM porté sur une porteuse de 60GHz avec la conversion d'ondes millimétriques RF électrique, c.-à-d. à l'aide du mélangeur.

IV.4.2.1. Au niveau de la station central (CS) :

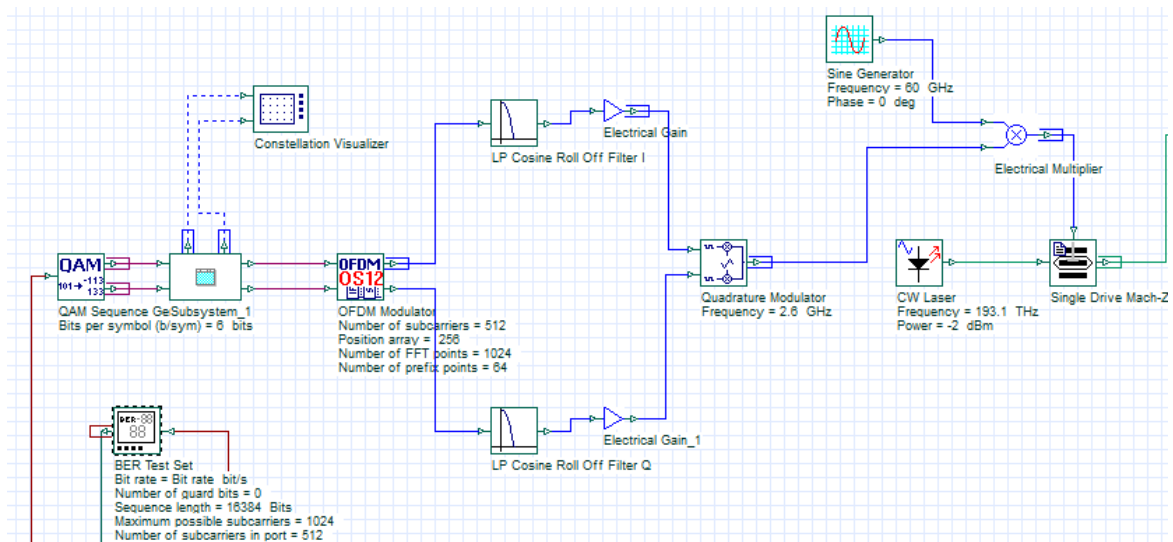


Figure IV. 41 : la station centrale

On va moduler d'abord les données générées par le PBRS via un traitement OFDM la Figure IV.42 montre le signal à la sortie de modulateur OFDM.

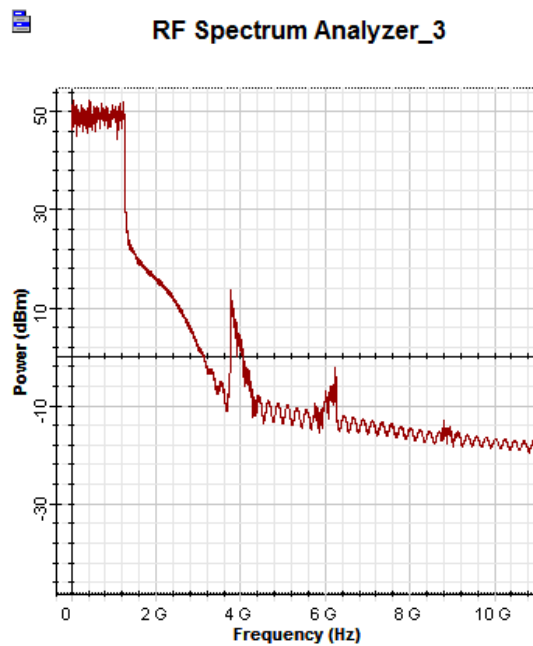


Figure IV. 42 : le signal après la modulation OFDM

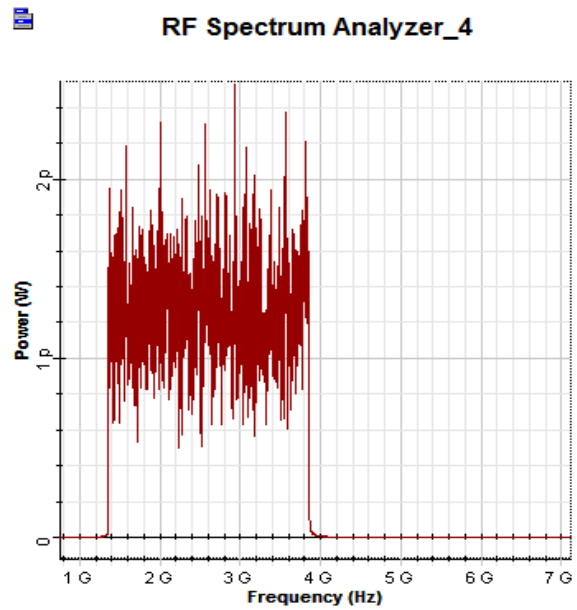
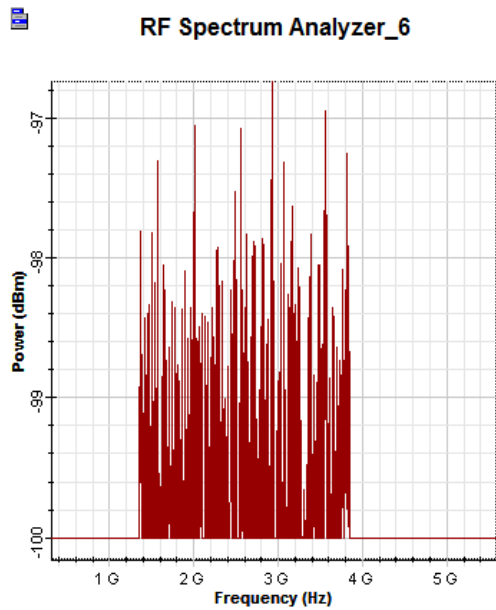


Figure IV. 43 : signal à la sortie du modulateur en quadrature *Figure IV. 44 : le signal à la sortie du multiplicateur*

Une fois le signal OFDM généré, il sera modulé par un modulateur en quadrature, le spectre a la sortie du modulateur présenté par la Figure IV.43. Le signal de sortie va transposer sur une porteuse analogique de 60 GHz par une opération de multiplication, cela est présenté dans la Figure IV.44. Ensuite l'opération de conversion électrique-optique à la fenêtre de 1552.52 nm (193.1 THz) on utilise un modulateur externe MZM qui est piloté par le signal obtenu à la sortie de multiplicateur, le spectre du signal optique représenté par la Figure IV.45. Puis ces données sont envoyées dans la fibre optique via EDFA pour amplifier le signal.

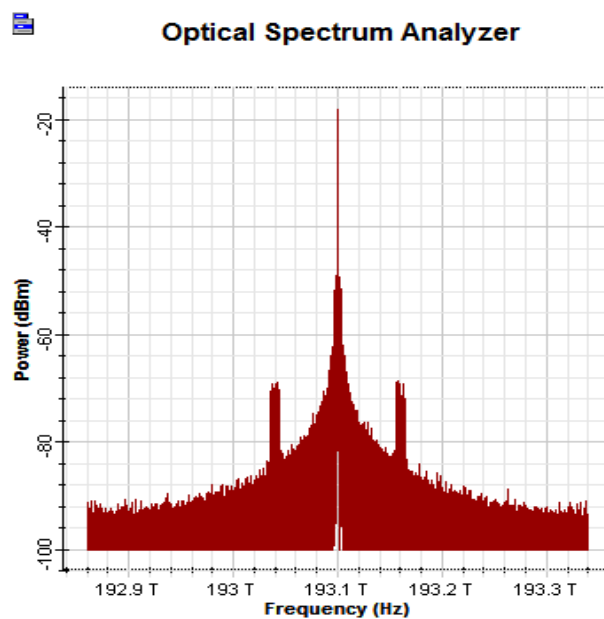


Figure IV. 45 : Signal à la sortie du MZM

IV.4.2.2. Au niveau de la station de base (BS) :

Les données sont reçues par une photodiode PD qui fait la conversion optique électrique, le spectre a la sortie du PD présenté par la Figure IV.46.

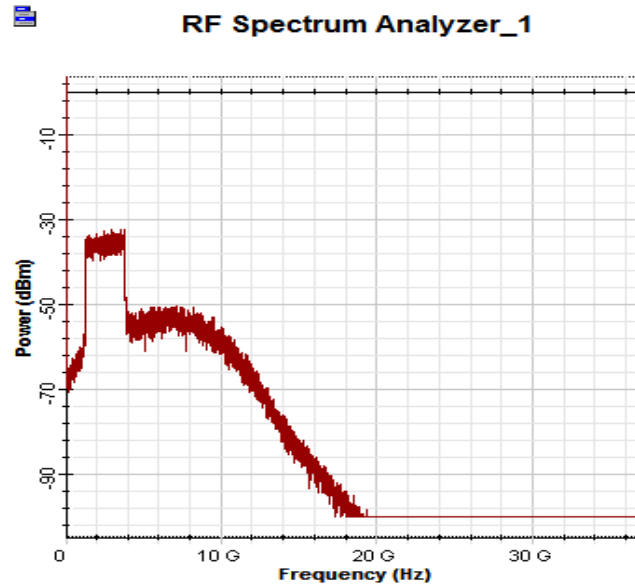


Figure IV. 46 : le signal à la sortie du PD

Le signal résulte de la photodiode sera amplifier et transmettre via une antenne émettrice à l'antenne réceptrice de la station mobile (MS).

IV.4.2.3. Au niveau du MS :

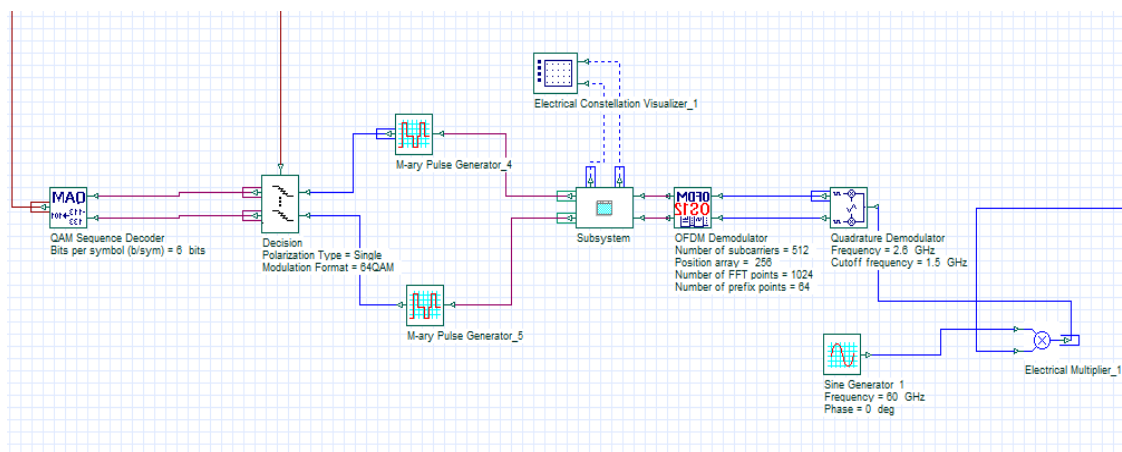


Figure IV. 47 : la station Mobile

Les données sont captées par une antenne, et exécutés avec une démodulation RF suivie par démodulateur en quadrature, démodulation OFDM et encodage QAM afin de récupérer les données. Les spectres a la sortie des démodulateurs présenté par les Figure ci-dessous.

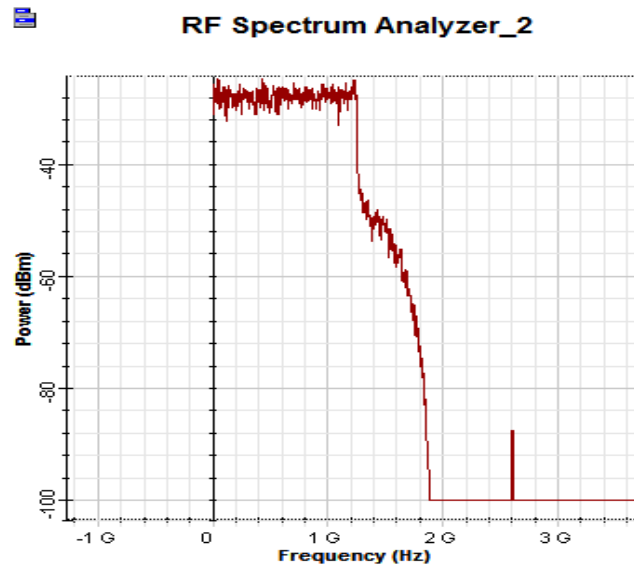


Figure IV. 48 : Signal après démodulation en quadrature

❖ Etude des performances du deuxième système:

Dans cette partie on va étudier les performances de notre 2ime liaison en terme de BER on fait varie le débit binaire, la puissance optique, l'OSNR et la longueur de la fibre. Ainsi on va montrer les constellations des signaux reçus, et on fait une comparaison entre les 3 formats de modulation 16-QAM, 64-QAM ,256-QAM .Les résultats sont présentés dans les figures ci-après.

La figure IV.49 montre la constellation des signaux reçus pour les 3 formats de modulation 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM pour un débit =10Gbit/s, et une longueur de fibre de 25 Km.

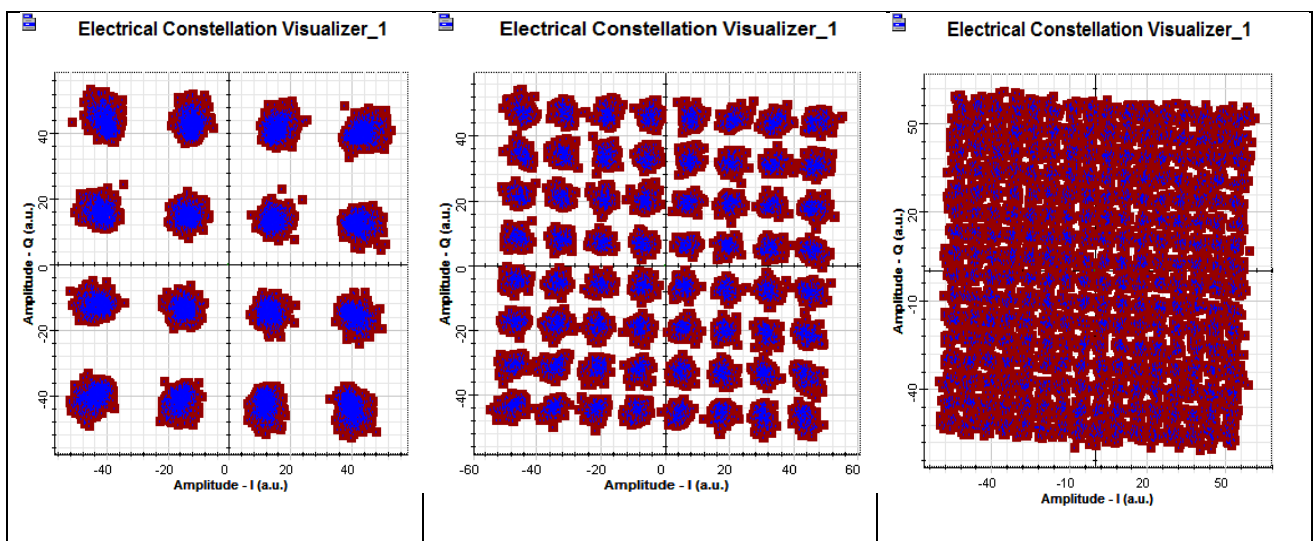


Figure IV. 49: Les constellations des signaux reçus pour débit =10Gbit/s

Il apparaît sur les diagrammes de constellations obtenus une certaine distorsion dans le signal pour les 3 formats en raison de l'atténuation, de la dispersion chromatique et du bruit de la source laser, du photodétecteur et de l'amplificateur. La dispersion chromatique provoque l'élargissement du signal qui augmente avec l'augmentation de débit et de la distances de propagation, ainsi le bruit augmente, et l'OSNR diminue.

❖ **En fonction de débit:**

Dans cette approche on va montrer la variation de log BER pour les 3 formats de modulation 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM en fonction de débit pour une distance de 25 km. Les résultats sont donnés par la figure IV.50.

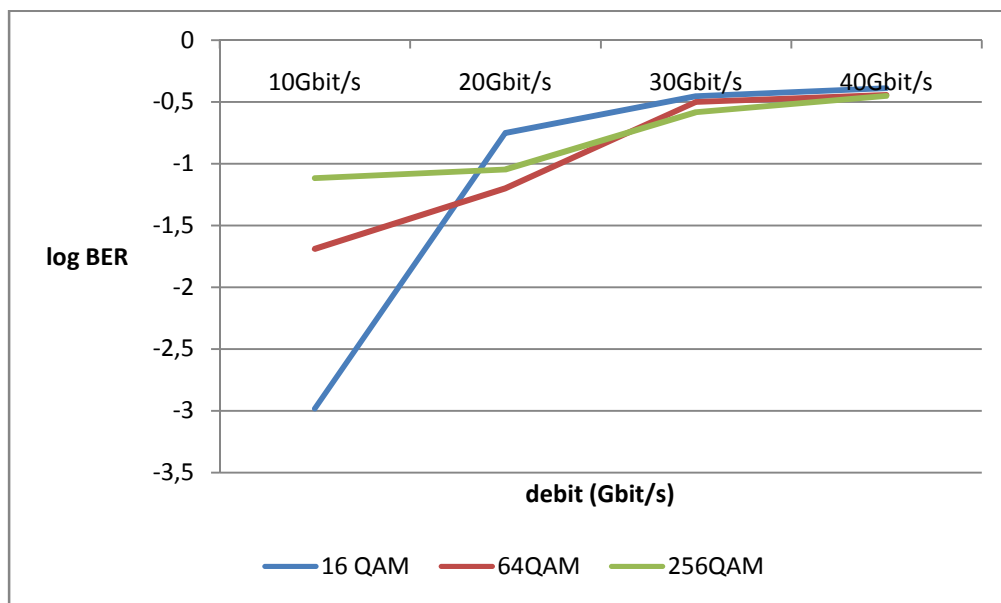


Figure IV. 50: BER en fonction de débit

Il est clair que la qualité de signal se détériore (BER augmente) avec l'augmentation de débit. Ainsi, pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , le débit binaire doit être inférieur à 17Gb/s pour 16-QAM, inférieur à 25 Gb/s pour 64-QAM, et inférieur à 22 Gb/s pour 256-QAM. On remarque que pour des débits supérieurs à 30 Gb/s, la performance des 3 formats (16-QAM, 64-QAM, et 256-QAM) sont sensiblement identiques.

❖ **En fonction de la puissance optique :**

Les mesures suivantes sont faites en variant la puissance du laser tout en gardant une longueur de la fibre constante de 25km avec un débit de 10Gbits/s.

On constate d'après la Figure IV.51, que plus on augmente la puissance de la porteuse optique délivré par le laser, le BER diminue de la même façon pour tous les formats de modulation

(16-QAM, 64-QAM, 256-QAM). Cependant, de meilleurs BER sont obtenus pour des niveaux élevés de puissance d'entrée avec la modulation 64-QAM.

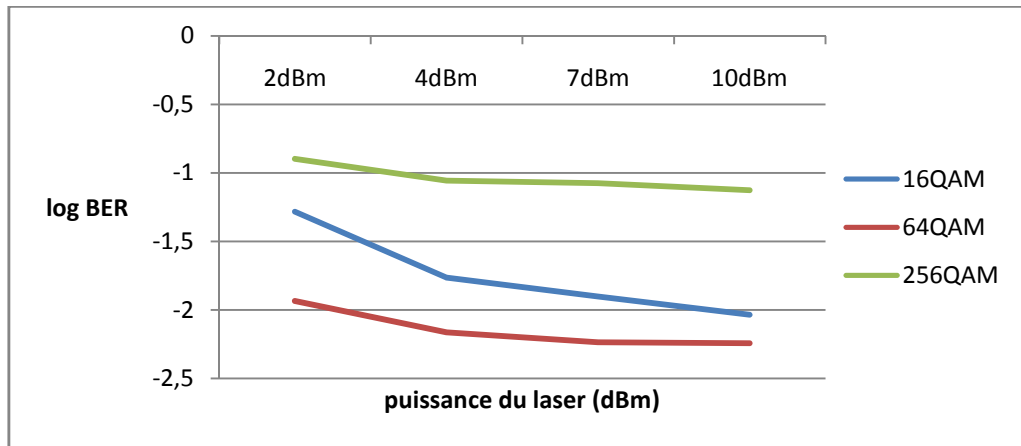


Figure IV. 51 :BER en fonction de la puissance optique

❖ En fonction de l'OSNR :

L'étude suivante montre La variation de BER en fonction de l'OSNR pour un débit = 10 Gbit/s et une longueur de fibre de 25 km.

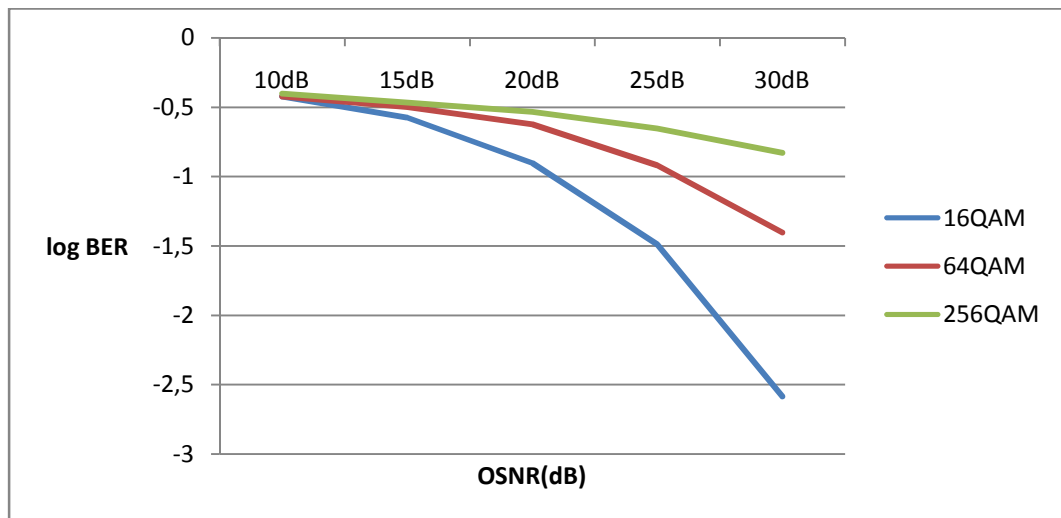


Figure IV. 52 : BER en fonction de l'OSNR

La figure IV .52 montre que la qualité de signal se détériore (BER augmente) avec la diminution de l'OSNR. Ainsi, pour obtenir un BER inférieur à 10^{-9} , l'OSNR doit être supérieur à 17dB pour 16-QAM, supérieur à 22 dB pour 64-QAM, et supérieur à 30 dB pour 256-QAM. On note, que pour des valeurs de l'OSNR inférieure à 12 dB, la performance des 3 formats (16-QAM, 64-QAM, et 256-QAM) sont sensiblement identiques.

❖ **En fonction de la longueur de la fibre :**

La variation de log BER en fonction de la longueur de la fibre et pour un débit = 10 Gb/s, est présentée par Figure IV.53.

Comme le 1^{er} modèle, En modulation de fréquence faible, une meilleure qualité de signal est obtenue à une distance plus proche mais se dégrade à mesure que la distance augmente. On obtient à une longueur de 100 km un BER de 10^{-6} pour 256-QAM, 10^{-7} pour 64-QAM et 10^{-11} pour 16-QAM. D'autre façon, pour avoir un BER inférieur à 10^{-9} , la longueur de la fibre doit être inférieur à 100 Km pour 16-QAM, inférieur à 85 Km pour 64-QAM, et inférieur à 35 Km pour 256-QAM. On remarque aussi, que pour des longueurs supérieures à 100 Km, la performance des 3 formats (16-QAM, 64-QAM, et 256-QAM) sont sensiblement identiques.

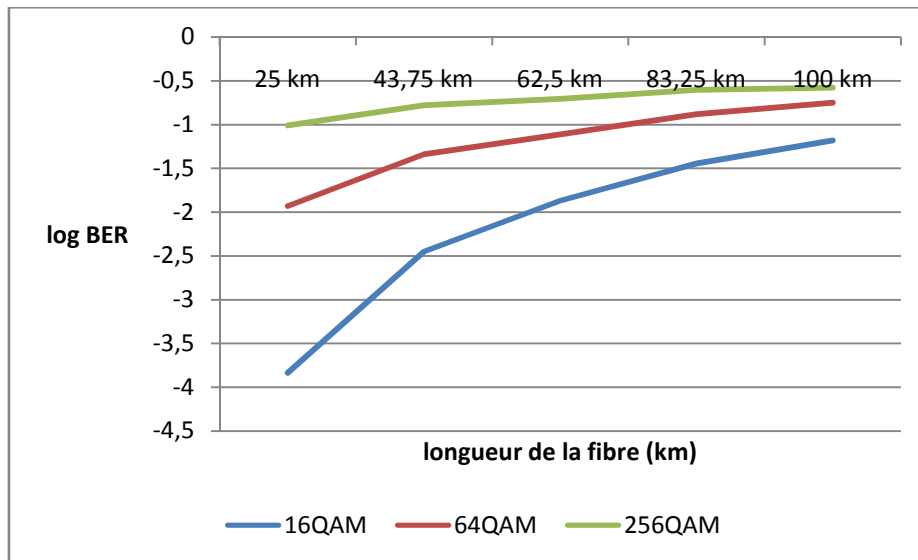


Figure IV. 53: BER en fonction de la longueur

❖ **Résumé des analyses entre les deux configurations RoF :**

Pour les deux architectures OFDM-RoF, Les trois formats de modulations étudiés (16-QAM, 64-QAM, et 256-QAM) sont affectés par le bruit provenant du laser, de l'amplificateur, et de la photodiode, qui représentent les sources de bruit les plus gênantes dans le cas de la liaison RoF. La réduction du bruit ou l'augmentation de la puissance optique donnera de meilleurs BER pour les faibles longueurs de liaison. De même, la dispersion de la fibre, qui augmente au fur et à mesure on augmentant la longueur ou le débit de la liaison, respectivement. Dans la 1^{iere} architecture avec le format 16-QAM, et

pour avoir un BER inférieur à 10^{-9} , la longueur de la fibre doit être inférieure à 100 Km, le débit inférieur à 20Gb/s, et l'OSNR supérieur à 15 dB. Tandis que pour le format 64-QAM, la longueur de la fibre doit être inférieure à 85Km, le débit inférieur à 25Gb/s, et l'OSNR supérieur à 22 dB pour avoir un BER inférieur à 10^{-9} . Alors pour le format 256-QAM, la longueur de la fibre doit être inférieure à 35 Km, le débit inférieur à 20Gb/s, et l'OSNR supérieur à 30 dB pour avoir un BER inférieur à 10^{-9} , ces résultats sont sensiblement améliorés avec la 2ème architecture. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour le format 64-QAM, qui présente un bon compromis entre le format 16-QAM, et 256-QAM, en terme de débit et de longueur de liaison. On note aussi qu'on peut améliorer l'OSNR avec l'augmentation de la puissance optique ou le format 64-QAM à les meilleurs BER obtenus pour des niveaux élevés de puissance d'entrée.

IV.4.3 MIMO-OFDM-ROF :

Cette étude concerne un système de transmission 2x2 MIMO (utilisant 2 émetteurs et 2 récepteurs à la fois). On s'appuie principalement sur une technique de multiplexage par répartition de longueurs d'ondes (WDM). A l'émission ce dernier consiste à envoyer dans la fibre plusieurs longueurs d'onde différentes à travers un multiplexeur, au niveau de récepteur se trouve un démultiplexeur qui permet d'extraire le signal à la longueur d'onde correspondant au destinataire.

On a choisi la 2ème architecture en raison de leurs performances qui sont légèrement améliorées par rapport à la première architecture pour l'application de 2x2 MIMO.

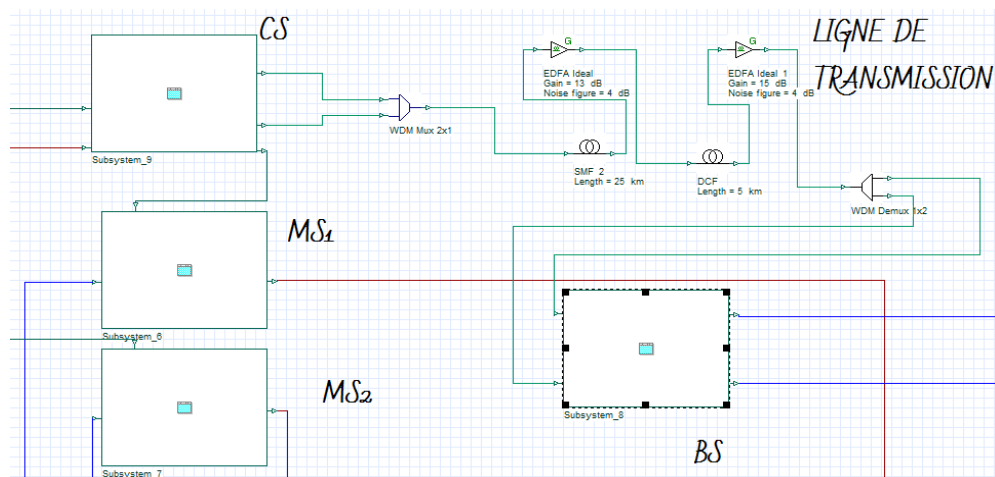


Figure IV. 54 : Architecture générale du système 2*2 MIMO

Dans la partie d'émission, Chacun des deux émetteurs envoie un signal sur une porteuse de 60 GHz, qui sera transposée sur une porteuse optique de fréquence 193.1THZ, et 193.3THZ

respectivement. Ensuite les 2 signaux seront combinés sur le même canal via un multiplexeur WDM.

Le signal sortant de WDM sera transporté par une fibre optique de 25 km de longueur. On utilise une fibre de compensation de dispersion (DCF) qui permet de compenser la dispersion sur les tronçons de la fibre.

Le signal à la sortie du canal de transmission sera divisé en 2 grâce à un démultiplexeur WDM, chacun d'eux passera d'abord par une photodiode qui fera la conversion optique – électrique, ensuite ils seront multipliés par un signal analogique de 60 GHz (démodulation), finalement ils seront passés par une série de démodulateurs (quadrature, OFDM, QAM) afin de récupérer le signal informatique.

❖ **Etude de performance:**

Dans cette partie on va étudier les performances de notre liaison en termes de BER, en fonction de débit pour les 3 formats de modulation 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM.

La Figure IV.55, représente la variation de log BER en fonction de débit pour 16-QAM.

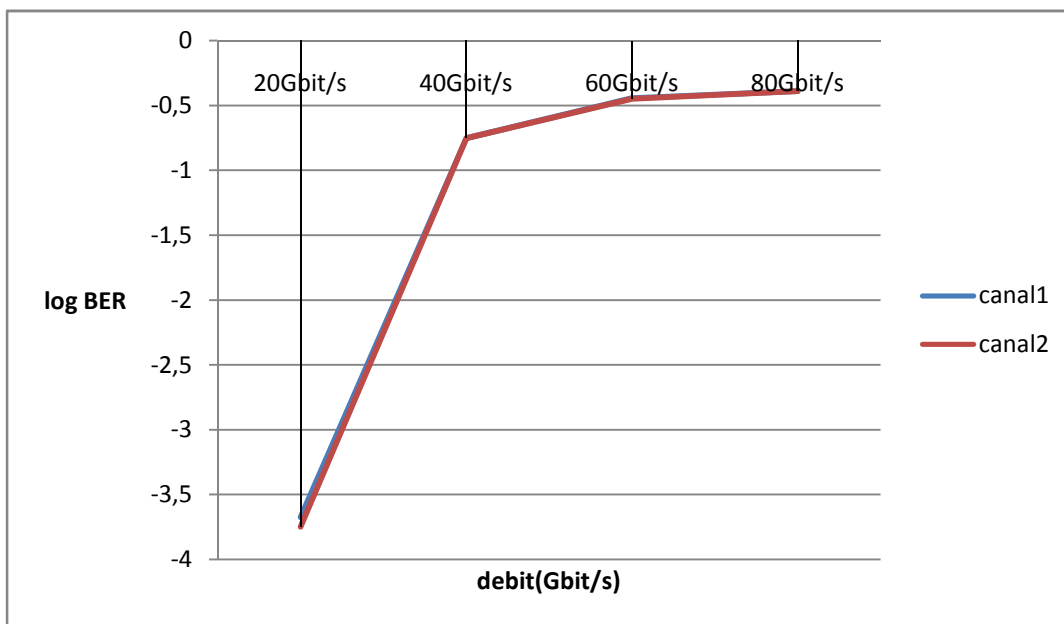


Figure IV. 55: BER en fonction de débit pour 16-QAM

On constate que :

- lorsqu' on augmente le débit la qualité de signal se dégrade(log BER augmente).
- La qualité des 2 canaux varient de manière similaire.
- Dans la plage de débit de 20 Gbit/s à 40 Gbit/s on remarque que les deux canaux accroissent rapidement.

- Toute la liaison supportera un débit de 40 Gbit/s pour un BER de 10^{-9}

La Figure IV.56, représente la variation de log BER en fonction de débit pour 64-QAM.

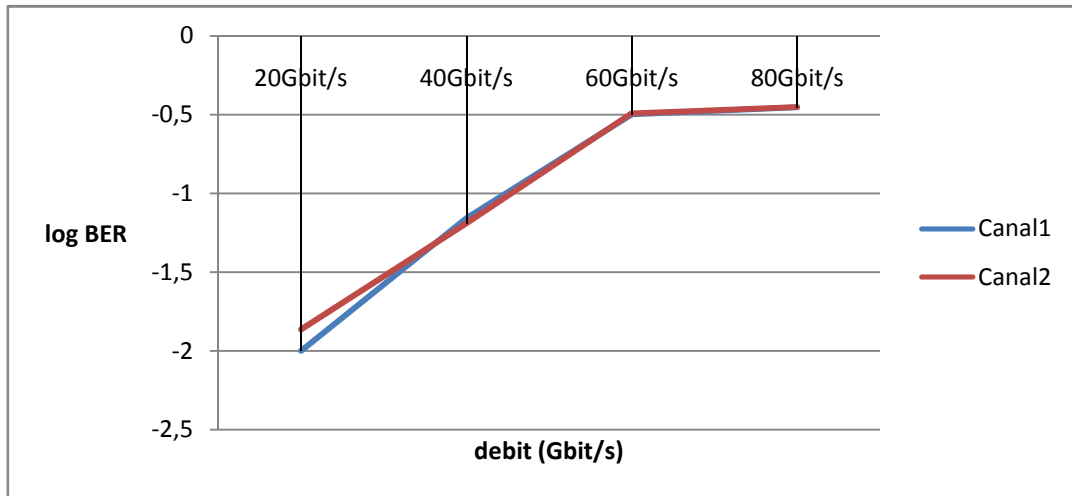


Figure IV. 56 : BER en fonction de débit pour 64-QAM

On constate que :

- La qualité de la liaison décroît avec l'augmentation de débit.
- Dans la plage de 20 Gbit/s à 36 Gbit/s on trouve que le 1^{er} canal est plus performant qu'au deuxième ,au-delà de ce débit les deux canaux varient de la même manière est accroit de façon légère.
- Toute la liaison supportera un débit de 48 Gbit/s pour un BER de 10^{-9} .

La Figure IV.57, représente la variation de log BER en fonction de débit pour 256-QAM.

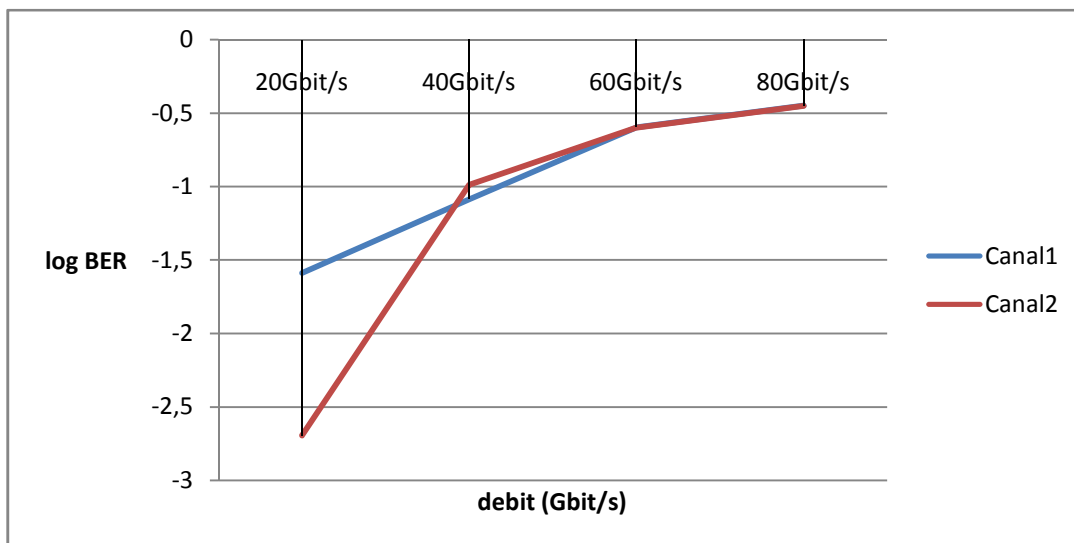


Figure IV. 57 : BER en fonction de débit pour 256-QAM

On constate:

- A la plage de 20 Gbit/s à 38 Gbit/s le deuxième canal est plus performant que le 1^{er} canal.
- De débit de 40Gbit/s à 60 Gbit/s, le canal 1er est l'égerment performant que le 2eme canal,
- De débit de 60 Gbit/s à 80 Gbit/s, le 1er canal est similaire au 2eme.
- Toute la liaison supportera un débit de 40 Gbit/s pour un BER de 10^{-9} .

Pour conclure, pour le système 2*2 MIMO, il est claire que la qualité de signal se détériore (BER augmente) avec l'augmentation de débit du chaque canal pour les trois formats de modulations étudiées (16-QAM, 64-QAM, et 256-QAM). Cependant les meilleurs résultats ont été obtenus pour le format 64-QAM avec un débit total de 48 Gbit/s pour un BER de 10^{-9} . Tandis qu'un débit total de 40 Gbit/s pour un BER de 10^{-9} est obtenue pout les deux formats 16-QAM, et 256-QAM, cette dégradation est due aux effets non linéaires élève apparaisse dans le système à 16-QAM, et la dégradation de l'OSNR dans le système 256-QAM, respectivement.

IV.5 Conclusion :

Ce dernier chapitre est consacré à la simulation du système ROF pour les réseaux sans fil (5G) à l'aide du logiciel Optisystem grâce aux applications, outils d'analyse et a une étude comparative entre les différentes techniques (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM) dans deux architectures différentes l'une est optique et l'autre est électrique. L'étude de ces liaisons nous a permis de mettre en œuvre un réseau OFDM-RoF avec les meilleurs critères possibles en variant la longueur de la fibre, la puissance de la porteuse optique émise par le laser, le débit de transmission, et l'OSNR, tout en respectant le taux d'erreur binaire en télécoms optiques. L'Analyse de ces performances nous a permis de juger que la deuxième architecture qui consiste à la conversion électrique a des meilleures qualités que la première (la conversion optique) vis-à-vis de bruit parce que utilise un seul laser.

On a étudié aussi un système de transmission 2*2 MIMO entre la station de base et les différentes stations mobile on utilisant WDM. Les résultats obtenues ont montré que le ROF et en mesure d'adapté la communication MIMO avec un rendement élevé .L'objectif de notre étude était de démontrer les capacités de ce genre de système qui est utilisé aussi bien pour les transmissions courtes distances à très haut débit.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La sollicitation ainsi que l'utilisation de la bande passante notamment par les nombreuses applications est sans cesse croissante, les diverses technologies dites sans fil à base de fréquence utilisant des spectres radiofréquences déjà saturé empêche de manière systématique le renforcement du système sans fil à haute vitesse. Les systèmes existants peuvent difficilement fournir une capacité de transmission de l'ordre de quelques Mb/s. Cependant, les ondes millimétriques (mm) et la technologie de la fibre optique peuvent potentiellement fournir une capacité de données de l'ordre de Mb/s et Tb/s, respectivement. Par conséquent, les besoins des systèmes sans fil à large bande pour la prochaine génération (5G) peuvent être satisfaits grâce à l'intégration de systèmes sans fil, à fibres optiques, et à ondes millimétriques. Les fibres optiques pouvant être utilisés comme moyen de transmission pour distribuer des signaux millimétriques avec de faibles pertes et une bande passante disponible illimitée. Donc, l'intégration entre les composants radio et optiques est réalisée pour la fourniture d'une technologie répandue connue sous le nom de Radio over-Fibre (RoF).

En ce sens, notre mémoire se propose d'étudier la transmission des signaux numériques complexes de type OFDM dans les systèmes de transport des données à ondes millimétriques à la fréquence de 60 GHz par la technique RoF pour des applications sans fil 5G. Dans un premier temps, nous avons présenté l'évolution des réseaux mobiles. Nous nous sommes occupés surtout de la 5^{ime} génération (5G), 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. Cette technologie fait l'objet d'une étude approfondi dans le deuxième chapitre, 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.

Dans le troisième chapitre, notre étude avait été portée sur les systèmes de transport des données à 60 GHz par la technique RoF. Nous avons présenté deux différentes architectures des liaisons RoF à la fréquence de 60 GHz pour les applications sans fil 5G. Les configurations RoF dédiées à la génération des signaux millimétriques ont été également présentées. Elles sont séparées en deux catégories en fonction de la nature de génération de la porteuse : une solution électrique intégrant oscillateur RF et étage de conversion et une solution optique par mélange de deux signaux optiques. Le signal

numérique est transposé sur une porteuse RF de fréquence de 60 GHz. La technique de modulation d'intensité externe et détection directe est privilégiée à une fréquence RF afin d'assurer la simplicité et le bas coût du système. Ensuite nous avons traité les différents concepts utilisés dans ces architectures notamment pour ce qui est l'onde millimétrique et la transmission des signaux OFDM.

Le quatrième chapitre est divisé en deux parties, dans la première partie, nous avons présenté le logiciel de simulation OptiSystem et les critères de qualité pour évaluer la performance des systèmes RoF-OFDM à 60 GHz, la deuxième partie comporte à son tour deux sections : La première section est réservée aux description de chaque sous bloc ainsi que l'architecture général de la liaison que ce soit la station centrale (CS), la station de base (BS), et la station mobile (MS). Cependant la deuxième partie décrit les résultats de la simulation pour trois formats de modulation 16-QAM, 64-QAM et 256-QAM, ainsi un système 2x2 MIMO à des débits de transmission variant de 10 à 40 Gb/s respectivement, y compris les spectres des signaux et les performances du système en termes de BER, de l'OSNR, et les diagrammes de constellation. Ici, Les meilleurs résultats ont été obtenus pour le format 64-QAM. La modulation pourra atteindre l'ordre 256-QAM, soit une augmentation de la capacité maximale de 33%, par l'amélioration du bilan de liaison.

Cette étude est une ouverture pour étudier des systèmes plus complexes se focalisant principalement sur les formes d'ondes assurant une meilleure pureté et efficacité spectrale est à envisager pour les futures applications 5G à savoir la modulation FBMC (Filter Bank Multi-Carrier), GFDM (Generalized frequency division multiplexing), UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier)...

Bibliographie :

- [1] M. Rjiba et K. Habbouli, Apprentissage et optimisation des réseaux mobiles 5G, rapport de projet, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2017.
- [2] N. ZERMI , LES Différentes Génération DU Téléphone MOBILE, cours n05, Annaba: Université Badji Mohtar, 2017.
- [3] «Sicom Testing Labs,» 2013. [En ligne]. Available: <https://www.sicomtesting.com/fr/blog/dal-1g-al-5g-il-passato-e-il-futuro-degli-standard-gsm-umts-hspa-ed-lte/>.
- [4] X. Lagrange, Introduction aux réseaux mobiles - session 5, 2017: Institut Mines-Télécom, Paris.
- [5] N. Bhandari, S. Devra et K. Singh, «Evolution of Cellular Network: From 1G to 5G,» *International Journal of Engineering and Techniques*, vol 3 issus 5, pp. 99-105, Sep - Oct 2017.
- [6] H. TOUNSI, Optimisation de la couverture radio du réseau 4G de Tunisie Telecom, mémoire master professionnel Tunis: Université virtuelle de tunis, 2016.
- [7] L. A. Steffemel, Les Réseaux GSM et les différents générations, mémoire master professionnel , Reims: Université de Reims Champagne-Ardenne, 2017.
- [8] «Les technologies 2G, 3G et 4G,» 21 Novembre 2014. [En ligne]. Available: <https://www.telecom-infoconso.fr/les-technologies-2g-3g-et-4g/>.
- [9] H. BAMBY, Etude de la qualité de service dans les réseaux mobiles GSM, licence professionnel Institut supérieur d'informatique, 2012.
- [10] K. Pandya, Comparative Study on Wireless Mobile Technology: 1G, 2G, 3G, 4G and 5G, Gujarat, India: Université Gujarat Technological, vol. 1, no 1, p. 24-27..
- [11] F. Dupont, Réseaux sans-fil et réseaux de mobiles, Master Informatique - UCBL, 2001.
- [12] Y. Otmani, Présentation du GSM, UMTS et la signalisation Air Interface, mémoire master académique Tlemcen: univ-tlemcen, 2018.
- [13] C. DEMOULIN et M. V. DROOGENBROECK, principes de base du fonctionnement du réseau gsm, Montefiore: Institut Montefiore, pp3-18 ,n 04 , 2004..
- [14] A. Xerinay et N. FERON , Les réseaux GSM , 3G, U M TS, 4G, GPRS.L a télé sur mobile, Reims : Université de Reims Champagne-Ardenne, 2017.
- [15] 2G/3G Mobile Communication Systems, Ilmenau, Allemagne: université Ilmenau de Technology, 2012.
- [16] X. Lagrange, Réseaux mobiles 2G et 3G, cours , Bretagne: ENST Bretagne, 2004.
- [17] M. T. AISSAOUI et R. BOUGHANEM , Optimisation de la couverture dans le Réseau

- 3G,mémoire master 2 Bejaia: Université Abderrahmane Mira, 2014.
- [18] M. Benana, code division multiple access, Yaoundé, Cameroun: ecole nationale superieure polytechnique_cameroun , 2015.
- [19] V. D. Dau , Évolution LTE, Architecture de LTE et Interface radio, Institut de la Francophonie pour l'Informatique, 19 juillet 2013.
- [20] H. BOUCHENTOUF et R. BOUDGHENE STAMBOULI, etude des performances des reseaux 4G (LTE),mémoire master 2, Tlemcen: Université abou bker belkaid, 2013.
- [21] «Poser les jalons de la 5G: perspectives et difficultés,» Union internationale De Telecommunication, 2018.
- [22] E. M. Roche, B. H. Dickens-Jr et W. Townes, La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation), Netcom Association, p. 139-162, 2018.
- [23] S. E. Hajri, L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs,thèse doctorat, Paris: Université Paris-Saclay, 2018.
- [24] H. Hallak Elwan, Optical systems for next wireless standard (5G) generation delivery,thèse doctorat, Grenoble: Universite grenoble alpes, 2017.
- [25] S. Bergren, Design Considerations for a 5G Network Architecture, Universite Oklahoma State, 2018.
- [26] E. G. Larsson, Massive MIMO for 5G, Linköping University, IEEE 5G Tech Focus: Volume 1, Number 1, March 2017
- [27] M. Y. Shaik et B. Koushik Barman, «an overview of massive mimo system in 5G,», University, Punjab, Indian, International Science Press, pp. 4957-4968, 2016.
- [28] LES ENJEUX DE LA 5G, Autorité de régulation des communications électroniques et des postes, France, Mars 2017.
- [29] C. Lagane, Fujitsu double les capacités des small-cell full-duplex, 9 septembre 2015.
- [30] K. Hettak et G. Y. Delisle, Conception et réalisation d'antennes intelligentes,rapport annuel, Laboratoire de Radiocommunications et de Traitement du Signal, 1999.
- [31] M. A. Elaji, Etude et modélisation d'un système de transmission radio-sur-fibre,mémoire de fin d'etude, bretagne: Université de Bretagne, 2009.
- [32] A. Kabalan, Etude de systemes radio sur fibre pour des applications de reseaux domestique en bande millimétrique,thèse doctorat, paris: ecole doctorale mstic mathematiques, sciences et technologies de l'information et de la communication, 2017.
- [33] . Y.-D. Hamedi, Etude D'une liaison Radio sur fibre, Tlemcen: université Tlemcen, 2014.
- [34] FASCO, «what is radio over fiber?,» [En ligne]. Available: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95043078-what-is-radio-over-fiber>. [Accès le 12 Mars 2019].

- [35] Y. Chenichene, Intégration de système radio sur fibre dans les réseaux optiques passifs,mémoire master 2, Guelma: universite 8mai1945, 2018.
- [36] M. R. TAB et D. FESRAOUI , Etude d'une liaison radio sur fibre optique,thèse doctorat, Saida: Université Dr. Tahar Moulay–Saida, 2018.
- [37] . G. TESSERAULT et G. TESSERAULT, Modélisation multi-fréquences du canal de propagation, thèse doctorat ,Ecole doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur & Aéronautique, 11 Décembre 2008.
- [38] Boudinar-Besma, Systèmes de transport des données à 60Gb/s par RoF vers,mémoire master 2, Annaba: UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016.
- [39] H. Liu, Radio sur fibre : réseaux, couvertures radio,architectures et dimensionnements matériels, Thèse de Doctorat, Télécom, Bretagne: Université européenne de Bretagne, 2013.
- [40] O. Bouchard, Etude de diodes lasers à cavité Planaire entièrement définie par cristal photonique: nouvelle approche pour le contrôle spectral,thèse doctorat, Toulouse: Université de Toulouse, 2008.
- [41] H. Brahimi, Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence,thèse doctorat, Toulouse: Université Paul Sabatier, 2010.
- [42] I. Chiali, Etude d'une transmission d'un signal modulé directement par une source optique laser a un debit de 10Gbit/s,mémoire master 2, Tlemcen: Université Abou-Bekr Belkaid, 2013.
- [43] H. Rzaigui, Systèmes hybrides opto/sans fil pour les réseaux multigigabits aux fréquences millimétriques,thèse doctorat, Grenoble: UNiversite Grenoble alpes, 2016.
- [44] H. Le Bras, Étude des réseaux radio sur fibre dans le contexte des réseaux d'accès et privés,thèse doctorat , Paris: l'université pierre et marie curie, 2008.
- [45] L. Meyzonnette, Radiométrie et détection optique, éditeur scientifique, 2002.
- [46] A. Ng'oma , Radio-over-Fibre Technologies for Broadband Wireless Communication Systems, Eindhoven: Universiteit Eindhoven, 2005.
- [47] D. Habauzit, R. Sauleau et S. M. Yonis, Ondes millimétriques : le point sur les effets biologiques à 40-60 GHz Millimeter-waves at 40-60 GHz: state of knowledge on biological effects, Paris: Camp électromagnétique: de la désométrie a la sante humaine,volume 14 , issu 5 , pp402-411, 3-4 Avril 2012.
- [48] J. Guillory, Radio over Fiber (RoF) for the future home area networks,thèse doctorat, Paris: University of Paris-Est, 2012.
- [49] T. S. RAPPAPORT et all, Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!, New York: Polytechnic Institute of New York University ,IEEE Access, VOLUME 1,pp335-349, May 10, 2013,.
- [50] H. RZAIGUI, Systèmes hybrides opto/sans fil pour les réseaux multigigabits aux fréquences millimétriques,thésedoctorat, Grenoble: UNiversite Grenoble alpes, 2016.

- [51] S. Tomasin, Use of millimeter wave carrier frequencies in 5G, Padova: University of Padova, 2018.
- [52] R. BENOSMAN et A. SIDHOUM , Etudes et simulation des performances des systèmes MIMO en configurations STBC et V-BLAST, mémoire master, Tlemcen: Université abou bekr blkaid, 2013.
- [53] Chun-Ting Lin, et All, 2×2 MIMO radio-over-fiber system at 60 GHz employing frequency domain equalization, OPTICS EXPRESS, Vol. 20, No. 1, pp 562 - 572, 2012.
- [54] K. Zhu, M. J. Crisp, S. He, R. V. Penty, I. H. White, "MIMO System Capacity Improvements Using Radio-over-Fibre Distributed Antenna System Technology," Proc. OFC'11, OTuO2 (2011).
- [55] F. T. BENDIMERAD , MIMO et accès multiples avancés pour réseaux sans fil, Tlemcen: Université Abou Bekr Belkaid, 2011-2013.
- [56] A. Diallo, Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO, université de nice-sophia antipolis ufr sciences, thèse doctorat , 2007.
- [57] S. AGREBI, implémentation fpga d'une fft à base d'arithmétique logarithmique pour les systèmes ofdm, québec: l'université du québec à trois-rivières, 2012.
- [58] N. Farhi et S. Helaimia , Etude et Simulation d'une Transmission de Type OFDM Pour Les Communications Sans Fil, mémoire master 2, tebessa: université larbi tebessi, 2016.
- [59] R. Prasad et R. van Nee, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000.
- [60] A. Glavieux et M. Joindot, Communications numériques: introduction, Ellipses: Collection pédagogique de telecommunication , 1996.
- [61] R.-Y. Wei, «Differential encoding by a look-up table for quadrature-amplitude modulation,» IEEE Transactions on Communications, vol 59, issu 1 , pp. 84 - 94, 11 November 2010.
- [62] V. Castellani, S. Benedetto et E. Biglieri, Digital Transmission Theory, Valentino Castellani, 1987.
- [63] X. Liu, F. Buchali et R. W. Tkach, «Improving the nonlinear tolerance of polarization-Division-Multiplexed CO-OFDM in long-haul fiber transmission,» Journal of Lightwave Technology, vol27 , issus 16, pp. 3632 - 3640, Aug.15, 2009.
- [64] G. EL Soury, J.-p. Dubois et J. S. Daba, «performance analysis in 5th generation massive multiple-input-multiple-output system,» Journal of Electronics and Communication Engineering, vol12, No:16p. 4, 2018.
- [65] L. Mehedy, M. Bakaul et A. Nirmalathas, «Spectrally-Efficient 100 Gb/s Transmission in Next Generation Optical Access Networks Employing Directly Detected Optical-OFDM,» chez Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, Auckland, New Zealand, 31 Oct.-3 Nov. 2010.

- [66] J. C. Cartledge , «Combining self-phase modulation and optimum modulation conditions to improve the performance of 10-Gb/s transmission systems using MQW Mach-Zehnder modulators,» *Journal of Lightwave Technology*,vol 18,issue5 pp. 647 - 655, May 2000.
- [67] M. Shify Annam et V. Sujithkumar , «Quality Improvement in Millimeter Wave Generation Techniques,» *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 5, n° 12, pp. 892-989, 02 Février 2016.
- [68] www.optiwave.com
- [69] définition-diagramme de constellation , dictionnaire Le Parésien ,2016

Glossaire:

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
AMPS	Advanced Mobile Phone System
BS	Base Station
BER	Bit Error Rate
CS	Central Station
CW	Continuous Wave
EDFA	Erbium-Doped Fibre Amplifier
EDGE	Enhanced Data Rates Evolution
EOM	Modulateur Electro-Optique
FDMA	Frequency Division Multiplexing Access
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
IF	Intermediate Frequency
IM-DD	Intensity Modulation – Direct Detection
ISI	Inter Symbols Interference
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMF	Multi-Mode Fiber
mm-wave	Millimeter-Wave
MS	Mobile Station
MZM	Mach-Zehnder Modulator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PD	PhotoDiode
PIN	Positive Intrinsic Negative
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RIN	Relative Intensity Noise
RoF	Radio Over Fiber
SMF	Single Mode Fiber
SNR	Signal to Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiplexing Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WLAN	Wireless Local Area Network