

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
– جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان  
Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



**MEMOIRE**

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

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Réseaux et Télécommunications

**Par** : Yazid Namira et Mehadji Nor El-imene

**Sujet**

**Transmission radio sur fibre pour les réseaux 5G**

Soutenu publiquement, le 11/06/2024, devant le jury composé de :

M.BAHRI Sidi Mohammed  
Mme BELGACEM Nassima  
M.BORSALI Ahmed Riad

MCB  
MAB  
Pr

Université de Tlemcen  
Université de Tlemcen  
Université de Tlemcen

Président  
Examinatrice  
Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

## **REMERCIEMENT**

*Notre profonde reconnaissance et nos très vifs remerciements à notre encadreur MR.BORSALI Ahmed Riad professeur à l'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen en Systèmes des télécommunications.*

*Nous lui exprimons notre très profonde gratitude pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la direction de ce mémoire.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à Mr Bahri Sidi Mohammed maitre de conférence classe (B) à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider ce travail, ainsi que Mme Belgacem Nassima maitre assistante classe (A) à l'université de Tlemcen d'avoir bien voulu faire partie de ce jury et examiner ce travail.*

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

# *Dédicace*

*Avec grand plaisir je dédie le fruit de mes études aux deux être les plus chère au monde, qui ont souffert nuit et jour pour nous couvrir de leur Amour*

## *Mes parents*

*La source d'affection qui ont tout fait pour m'aidera vivre cette joie de fin d'étude supérieure.*

*À moi-même, pour avoir bravé les tempêtes intérieures et persisté malgré les obstacles. Pour chaque moment de courage, de croissance personnelle et de foi en mes capacités. Cette réussite est le témoignage de ma résilience, de ma détermination et de ma capacité à me relever même dans les moments les plus sombres.*

*A ma chère grand-mère, source infinie de sagesse et de tendresse*

*À ma famille, pour leur présence réconfortante, leurs encouragements constants et leur croyance en mes capacités.*

*A tous mes amis, A ma chère binôme **Nor El-imene***

*Enfin, que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.*

***Namira .***

## ***Dédicace***

*Tout d'abord, 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 volonté pour l'accomplissement de ce*

*Modeste travail*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes parents qui peuvent être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous.*

*Mes frères qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*À mes amis*

*Avec qui je partage des moments de ma vie au fil du temps, je vous offre cette dédicace d'amitié*

*À ma chère binôme Namira*

***Nor El-imene.***

### *Résumé*

Avec l'augmentation significative du nombre d'utilisateurs ces dernières années, le besoin en bande passante dans les communications mobiles a augmenté rapidement. Par conséquent, les systèmes de communication sans fil de nouvelle génération (5G) doivent répondre à des normes plus élevées pour fournir une variété de services à large bande. Ils ont proposé une norme pour la transmission sans fil dans la bande des ondes millimétriques.

Les pertes d'espace libre sont extrêmement élevées à ces bandes millimétriques et les ondes radio ne peuvent pas traverser les murs. La radio sur fibre (RoF) est une technologie qui permet le transport optique d'un endroit à un autre, ce qui permet la transmission de signaux à très haut débit en compensant les contraintes de propagation à courte distance dans l'espace libre.

Dans ce mémoire, nous étudions un système de communication RoF à ondes millimétriques modifié théoriquement et numériquement à l'aide de la technologie OFDM (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence). Cette étude se concentre sur la transmission des signaux à la fréquence radio 28 GHz. Cette technologie permet la transmission des signaux radio sur des fibres optiques, combinant les avantages de la fibre optique (comme la large bande passante et les faibles pertes) avec la flexibilité des communications sans fil. L'étude se concentre sur l'architecture, les principes de fonctionnement et les avantages de l'intégration de RoF dans les réseaux 5G.

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

### *Abstract*

The bandwidth demand in mobile communications is increasing exponentially as the number of users has grown significantly in recent years. Therefore, in order to provide a variety of broadband services, the upcoming generation of wireless communication networks, or 5G, will need to fulfill greater criteria. There are proposed standards for millimeter-wave wireless transmission. In these millimeter-wave bands, free-space losses are very high, and radio waves do not penetrate walls. Radio-over-Fiber (RoF) technology, used for optical transport from one location to another, enables the distribution of high-speed signals by compensating for the limitations of short-distance free-space propagation.

In this thesis, modified RoF communication systems at millimeter waves using Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) are theoretically and numerically studied. This work focuses on signal transmission at the 28 GHz radio frequency. This technology enables the transmission of radio signals over optical fibers, combining the advantages of optical fiber (such as high bandwidth and low losses) with the flexibility of wireless communications. The study concentrates on the architecture, operating principles, and benefits of integrating RoF into 5G networks.

Keywords: Millimeter wave, Radio-over-Fiber (RoF), QAM modulation, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

### ملخص

زاد الطلب على النطاق الترددي في الاتصالات المتنقلة بشكل هائل، نظرًا لارتفاع عدد المستخدمين بشكل كبير في السنوات الأخيرة. لذا يجب على الجيل القادم من أنظمة الاتصال اللاسلكي (5G) أن يلبي معايير أعلى لدعم مختلف الخدمات عالية النطاق الترددي. تم اقتراح معايير لنقل اللاسلكي في النطاق المليمترية. في هذه الفترات المليمترية، تكون الخسائر في الفضاء الحر كبيرة للغاية ولا تخترق الموجات اللاسلكية الجدران. تسمح تقنية الراديو عبر الألياف (RoF)، المستخدمة لنقل الضوء البصري من مكان إلى آخر، بتوزيع إشارات ذات سرعة عالية جدًا من خلال تعويض القيود التي تواجه انتشار الفضاء الحر على مسافات قصيرة.

في هذه المذكرة، تمت دراسة نظم الاتصال RoF المعدلة على موجات المليمتر باستخدام تقنية التعدد الطيفي بالتقسيم الزمني المتعامد (OFDM) نظريًا و رقميًا. يركز هذا العمل على نقل الإشارات على تردد الراديو 28 جيجاهرتز. تتيح هذه التقنية نقل الإشارات اللاسلكية عبر الألياف البصرية، مما يجمع بين مزايا الألياف البصرية (مثل النطاق الترددي العالي والخسائر المنخفضة) مع مرونة الاتصالات اللاسلكية. تركز الدراسة على الهندسة المعمارية ومبادئ التشغيل وفوائد دمج RoF في شبكات 5G.

الكلمات الرئيسية: الموجات المليمترية، الراديو عبر الألياف (RoF)، تعديل QAM، التعدد الطيفي بالتقسيم الزمني المتعامد (OFDM).

*Table des matières :*

<i>CHAPITRE 01 : Réseau mobile 3G/4G/5G</i> .....	1
1 Introduction :.....	2
2 Définition de réseau mobile :.....	2
3 Evolution des réseaux mobiles :.....	2
3.1 Première génération (1G) :.....	3
3.2 La deuxième génération (2G) :.....	3
3.3 La troisième génération (3G) :.....	4
3.3.1 Le réseau UMTS :.....	4
3.3.2 L'architecture du réseau UMTS.....	4
3.3.3 Les propriétés techniques d'UMTS sont :.....	6
3.3.4 Evolution de l'UMTS :.....	7
3.4 La quatrième génération (4G) :.....	8
3.4.1 La structure du système LTE :.....	8
3.4.2 Caractéristiques de la 4G-LTE :.....	10
4 La cinquième génération 5G :.....	11
4.1 Les améliorations de la 5G :.....	12
4.1.1 Avantages de la 5G :.....	12
4.1.2 Vitesse accrue :.....	12
4.1.3 Faible latence :.....	12
4.1.4 Capacité de connexion massive :.....	13
4.2 Les caractéristiques de la 5G :.....	14
4.2.1 L'exploitation des fréquences millimétriques :.....	14
4.2.2 Technologie de transmission massive à entrées et sorties multiples (mMIMO) :.....	14
4.2.3 Utilisation de petites cellules :.....	16
4.2.4 Communication sans fil full-duplexe :.....	17
4.2.5 La mise en place d'une nouvelle génération d'antennes "intelligentes" :.....	17
4.3 Le défi de la 5G :.....	17
5 Comparaison des performances :.....	19
6 Conclusion :.....	20
<i>CHAPITRE 02 : Transmission Radio sur Fibre</i> .....	23
1. Introduction :.....	24
2. Système de transmission par fibre optique :.....	24
2.1 Définition :.....	24
2.2 La construction de la fibre optique :.....	24
3. Caractéristique de fibre optique :.....	25
3.1 L'indice de Réfraction :.....	25

## ***Table des matières :***

---

3.2 L'angle d'acceptante :	26
3.3 Ouverture numérique :	26
4. Types de fibre optique :	26
4.1 Fibre optique Multi Mode :	26
4.1.1 Multi mode à saut d'indice :	26
4.1.2 Multi mode à gradient d'indice :	27
4.2 Fibre optique Monomode :	27
5. Les avantages et inconvénients :	28
6. La technologie Radio sur Fibre RoF :	29
6.1 Présentation générale de la radio sur fibre optique pour la communication optique :	29
6.2 Définition de RoF :	29
6.3 Systèmes radio-sur-fibre : avantages et limitations :	30
6.3.1 Avantage des systèmes radio-sur-fibre :	30
6.3.2 Limitations des systèmes radio-sur-fibre :	30
7. Les architectures de la radio sur fibre :	31
7.1 Point à point :	31
7.2 Architecture point à multipoints (PON):	32
8. Techniques de transmission des signaux RF, IF et bande de base :	33
8.1 Transport de fréquence RF sur fibre :	33
8.2 Transport de fréquence IF sur fibre :	34
8.3 Transport du signal en bande de base :	34
9. Les ondes Millimétriques (à 28 GHz) :	35
10. MIMO Optique :	36
11. Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM) :	37
12. Applications de la transmission radio sur fibre :	38
12.1 Système de distribution vidéo :	38
12.2 Réseaux locaux sans fil :	38
12.3 Réseaux cellulaires :	38
12.4 Service mobile haut débit :	39
12.5 Mobiles de 5ème génération :	39
13. Conclusion :	39
<b><i>CHAPITRE 03 : Résultat de simulation</i></b> .....	40
1 Introduction :	41
2 Introduction au logiciel OptiSystem :	41
3 Les caractéristiques du logiciel OptiSystem :	42
4 Applications du logiciel OptiSystem :	42

## *Table des matières :*

---

Avantages du logiciel OptiSystem :.....	43
5 Évaluation de la qualité de la transmission (critères et méthodes):.....	43
5.1 Taux d'erreurs binaires (TEB ou BER).....	44
5.2 Facteur de qualité.....	44
5.3 Diagramme de l'œil :.....	44
6 Objectif du travail :.....	44
7 Contexte de la diffusion de signaux 5G/NR à 28 GHz :.....	45
8 Importance de la plage dynamique élevée :.....	45
9 Architecture radio sur fibre pour signaux 5G/NR à 28 GHz :.....	45
10 Simulation obtenue :.....	51
11 Conclusion :.....	56

## Liste des figures

### Figures Chapitre 1 :

Figure 1.1:Evolution des réseaux mobiles.....	3
Figure 1.2:Architecture d'un réseau UMTS.....	5
Figure 1.3:Réseau d'accès UTRAN.....	6
Figure 1.4:Architecture du système LTE.....	9
Figure 1.5:Comparaison 4G/5G .....	12
Figure 1.6:Définitions et utilisations de la 5G.....	13
Figure 1.7:Massive MIMO utilise de vastes réseaux d'antennes.....	15
Figure 1.8:Système MIMO.....	16
Figure 1.9:Réseaux à macro cellules et réseaux à petites cellules.....	17
Figure 1.10:Les défis de la 5G.....	20

### Figures Chapitre 2 :

Figure 2.1:Structure de fibre optique.....	25
Figure 2.2:Ouverture numérique de fibre optique.....	26
Figure 2.3:Fibre optique Multi-mode à saut d'indice.....	27
Figure 2.4:Fibre optique Multi-mode à gradient d'indice.....	27
Figure 2.5:Fibre optique Monomode.....	28
Figure 2.6:Configuration globale d'un réseau de communication par fibre optique.....	29
Figure 2.7:Architecture point à point.....	32
Figure 2.8:Architecture point à multipoint.....	33
Figure 2.9:Système RoF utilisant un transport de signal RF.....	34
Figure 2.10:Système RoF utilisant un transport de signal IF.....	34
Figure 2.11:Transport en bande de base sur fibre optique.....	35
Figure 2.12:Principe de la technologie MIMO optique.....	38

### Figures Chapitre 3 :

Figure 3.1:Illustration de l'interface Optisystem.....	42
Figure 3.2:illustration de l'application Radio sur fibre .....	46
Figure 3.3:Schéma général d'émission .....	47
Figure 3.4: Spectre de sortie du laser.....	49
Figure 3.5:Schéma bloc la partie réception.....	50
Figure 3.6: Spectre du signal RF.....	51
Figure 3.7: Spectre à la sortie du MZM.....	52
Figure 3.8: Spectre à la sortie de la fibre.....	53
Figure 3.9: Spectre à la sortie d'amplificateur.....	53
Figure 3.10 : Le spectre à la sortie de la photodiode.....	54
Figure 3.11:Le spectre à la sortie de démodulateur en quadrature.....	55
Figure 3.12:BER en fonction de la distance.....	56

## Liste des tableaux

### Tableau Chapitre 1 :

Tableau 1.1:Les bénéfices et les désavantages d'UMTS.....	7
Tableau 1.2:Tableau comparatif 3G/4G/5G.....	20

### Tableau Chapitre 2 :

Tableau 2.1:Comparaison entre les différents types de fibres optiques.....	28
--	----

### Tableau Chapitre 3 :

Tableau 3.1:Caractéristique du modulateur QAM.....	47
Tableau 3.2:Caractéristique du modulateur OFDM.....	48
Tableau 3.3:Caractéristique du filtre passe bas.....	48
Tableau 3.4:Caractéristique du modulateur quadratique.....	48
Tableau 3.5:Caractéristique du laser.....	49
Tableau 3.6:Caractéristique de la fibre optique.....	49
Tableau 3.7:Caractéristique de l'amplificateur.....	49
Tableau 3.8:Caractéristique de la photodiode.....	50
Tableau 3.9:Caractéristique du démodulateur OFDM.....	51
Tableau 3.10:Caractéristique du démodulateur quadratique.....	51
Tableau 3.11:Variation de BER en fonction de puissance.....	56
Tableau 3.12:Variation de BER et GAIN en fonction de distance de fibre.....	57

# *Introduction générale*

### *Introduction générale*

Depuis quelques années, nous constatons une demande croissante pour les services large bande proposés pour les troisièmes et quatrièmes générations (3G / 4G) à travers les réseaux d'accès sans fil, fixes et mobiles. Devant cette demande croissante de ressources spectrales et de flux de données, les bandes de fréquences disponibles sont restreintes. Il est nécessaire d'augmenter les fréquences des porteuses radio et d'exploiter le potentiel spectral des bandes non exploitées pour résoudre ce problème.

Les générations précédentes de normes cellulaires ont permis d'améliorer le débit de données, la fiabilité et la simplicité d'utilisation, rendant ainsi possibles des services essentiels à notre vie quotidienne. Cependant, la saturation du spectre radioélectrique actuel rend difficile l'amélioration de ces services. C'est pourquoi l'exploration de fréquences accrues est devenue cruciale. La bande de fréquences des ondes millimétriques offre une large bande passante et est envisagée pour les futures normes sans fil, désignées sous le nom de cinquième génération (5G).

Autrefois, le câble coaxial était considéré comme le support de transmission parfait, permettant de transmettre l'information à un débit de 270 Mbits/s dans les systèmes numériques les plus rapides. Avec l'émergence de nouveaux services multimédia, il est devenu indispensable d'avoir un débit de transfert de données plus élevé. Les fibres optiques s'imposent comme une solution alternative prometteuse, notamment dans les réseaux mobiles. Ils ont l'avantage de posséder une bande passante remarquable et une atténuation du signal faible, ce qui leur permet de transporter des volumes considérables de données sur de longues distances de manière sûre.

Ainsi, la solution consiste à utiliser des infrastructures optiques pour relier les différents points d'accès radio entre eux. La fibre optique est utilisée comme moyen de transmission pour transmettre des signaux radiofréquence à haut débit, appelés canaux radio sur la fibre (RoF), dans le but de diminuer les dépenses liées à la mise en place des systèmes.

Il est primordial d'avoir divers points d'accès afin de permettre aux utilisateurs de se connecter au réseau et garantir une couverture sans fil. Avec la technologie Radio-over-Fiber (RoF), des ondes millimétriques peuvent être utilisées sur divers points d'accès. La lumière est utilisée dans cette technologie pour transmettre des signaux radio via des liaisons optiques.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous aborderons l'évolution des réseaux mobiles, de la 3G à la 5G, cette évolution a transformé de manière significative le paysage des télécommunications. La 3G a introduit les services de données mobiles, permettant l'accès à internet et aux applications en déplacement. La 4G a ensuite amélioré ces capacités, offrant des vitesses de téléchargement et

latence bien supérieur. La 5G promet une révolution encore plus grande avec des vitesses ultra-rapides. Ce chapitre explore les caractéristiques, les performances et les défis associés à chaque génération de réseaux mobiles, en mettant un accent particulier sur les avancées apportées par la 5G et son impact potentiel sur divers secteurs.

Le deuxième chapitre de ce mémoire met l'accent sur l'utilisation de la technologie radio over Fiber (ROF) dans les réseaux de téléphonie mobile. La ROF est une technique innovante qui combine les avantages de la transmission radio et la fibre optique afin d'optimiser les résultats et l'efficacité des réseaux de communication. En transportant les signaux radiofréquence (RF) sur des fibres optiques, cette technologie permet de surmonter les limitations des systèmes de transmission, offrant une bande passante élevée, une faible perte de signal. L'intégration de ROF dans les réseaux mobiles, notamment pour les générations actuelles et futures, promet des améliorations significatives en ce qui concerne la portée, la capacité et la qualité du service.

Le troisième chapitre aborde l'application de la fréquence de 28 GHz pour plage dynamique élevée dans les transmissions 5G, l'utilisation de fréquences millimétrique telles que 28 GHz est devenue cruciale pour répondre aux exigences de bande passante et de faible latence. Ces fréquences offrent des vitesses de transmission extrêmement rapides et une capacité de réseau accrue. Les bénéfices de l'utilisation de la fréquence 28 GHz sont examinés dans ce chapitre, les défis techniques associés et les solutions innovantes pour maximiser la performance et la fiabilité .

***CHAPITRE 01***

***Réseau mobile 3G/4G/5G***

## **1 Introduction :**

L'influence de l'évolution d'Internet sur les réseaux d'accès sans fil a eu un impact significatif sur les modes de vie à l'échelle mondiale. Depuis l'avènement de la communication cellulaire dans les années 80, les services mobiles ont connu une croissance constante, formant progressivement un environnement complexe de réseaux hétérogènes. Dans ce contexte, les utilisateurs mobiles, caractérisés par des profils et des préférences diverses, recherchent une connectivité fluide au sein du meilleur réseau disponible, sans avoir à se préoccuper des transitions entre les différents types de réseaux. Ce chapitre a pour objectif de retracer l'évolution des réseaux mobiles en détaillant les différentes générations (3G et 4G) et en examinant la composante du réseau mobile 5G, y compris ses éléments constitutifs, son architecture, son mode de fonctionnement, ses caractéristiques ainsi que les défis liés à son déploiement.

## **2 Définition de réseau mobile :**

Un réseau mobile est un système de réseau téléphonique qui permet la communication via des appareils portables tels que les téléphones mobiles ou les Smartphones. Il fonctionne grâce à des fréquences formant un spectre hertzien et donne la possibilité d'utiliser simultanément des millions de téléphones sans fil. , qu'ils soient mobiles ou immobile, en partageant efficacement une bande de fréquences hertzienne entre les utilisateurs distribués dans diverses cellules radio selon leur localisation spatiale. Un réseau mobile est constitué d'un réseau d'antennes-relais ou de stations de base qui couvrent chacune une partie de territoire délimitée (cellule) et transmettent les communications par ondes radio. Un ensemble de fréquences différent des cellules voisines peut être utilisé par une cellule afin d'éviter les interférences et de garantir une qualité de service optimale dans chaque cellule. [1]

## **3 Evolution des réseaux mobiles :**

Les réseaux de première génération (ou 1G) ont été introduits dans les années 80 dans les réseaux de télécommunication. Mais ces systèmes ont été abandonnés il y a quelques années, laissant la place à la deuxième génération, aussi connue sous le nom de 2G, qui a été mise en place en 1991 et est toujours en service aujourd'hui. Dans la 2G, on peut identifier deux sous-catégories, la 2.5G et la 2.75G.

Le standard principal utilisé par la 2G est le GSM (Global System for Mobile Communications). Comparée à la 1G, la 2G offre l'accès à différents services, tels que l'utilisation

du WAP pour accéder à Internet. Par la suite, la troisième génération, appelée 3G, propose un débit élevé pour l'utilisation d'Internet et la transmission de données.

La 4G ou LTE (Long Term Evolution), qui a été mise en place jusqu'à présent par certains pays, offre un débit extrêmement élevé. Finalement, les technologies de la cinquième génération (5G) de l'International Mobile Télécommunications (IMT-2020) sont en train d'arriver rapidement, ce qui offre un immense potentiel de transformation pour améliorer notre quotidien.

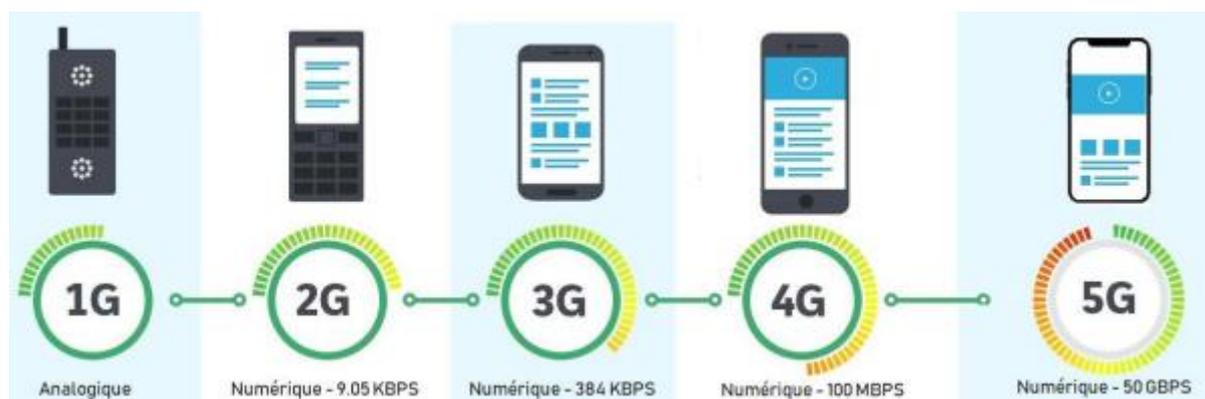


Figure 1.1: Evolution des réseaux mobiles

### 3.1 Première génération (1G) :

Les systèmes cellulaires de la première génération (1G) reposaient sur une technologie de communications mobiles analogiques, limitée à la gestion du trafic vocal. Ils utilisaient la même technologie de modulation radio que les stations de radio FM. [2, 3,4]

La génération initiale de téléphones mobiles, Bien que son équipement soit lourd, présentait des limites clairement visibles. en termes de qualité de communication. Ces limitations étaient liées au type de signal utilisé, entraînant une qualité sonore médiocre et ne garantissant pas la confidentialité des conversations (La communication pouvait être écoutée par un récepteur inconnu équipé d'une radio toutes bandes.). De plus, le réseau de la première génération avait tendance à se saturer rapidement. [3], [5]

### 3.2 La deuxième génération (2G) :

La 2G correspond à la deuxième génération de la téléphonie mobile, également appelée GSM.

Les réseaux 2G présentaient trois avantages majeurs par rapport à leurs prédécesseurs. Tout d'abord, ils assuraient une cryptographie numérique des conversations téléphoniques, renforçant ainsi la sécurité des communications. De plus, les réseaux 2G se distinguaient par leur efficacité accrue sur le spectre, ce qui permettait une pénétration plus étendue et une gestion plus optimale

des fréquences disponibles. En outre, ces réseaux ont inauguré l'ère des services de données mobiles, débutant par le GPRS (2.5G) avec un débit théorique de 171.2 Kbit/s, suivi du EDGE (2.75G) offrant des débits allant jusqu'à 384 Kbit/s. Ces avancées ont été déployées sur les réseaux GSM à partir de 2003, amorcées initialement par AT&T aux États-Unis.

### **3.3 La troisième génération (3G) :**

La 3G, ou troisième génération, est une catégorie de standards de téléphonie mobile, principalement représentée par les standards Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) et CDMA2000. Sa capacité de transmission est élevée, elle est compatible à l'échelle mondiale et elle propose des services mobiles compatibles avec les réseaux de nouvelle génération. Le déploiement d'un réseau UMTS permet aux opérateurs de proposer de nouvelles fonctionnalités en mode paquet, afin de compléter les réseaux GSM et GPRS. La 3G a ouvert la voie à des applications telles que l'accès à Internet, la visiophonie et le visionnage de vidéos.

Le concept essentiel du système 3G est de rassembler tous les réseaux de deuxième génération du monde entier en un seul réseau unique et à lui ajouter des fonctionnalités multimédias (haut débit pour les données). [6]

#### **3.3.1 Le réseau UMTS :**

La norme UMTS est la troisième génération de télécommunications adoptée en Europe, en utilisant la technologie W-CDMA., également utilisée au Japon et en Corée. Elle a commencé à être développée en 2004 avec la Release 99 (R99) et fonctionne sur une plage de fréquence allant de 1900 MHz à 2000 MHz. Les caractéristiques techniques de cette norme sont développées dans le cadre de l'organisme 3GPP. L'UMTS présente une compatibilité mondiale, permettant le roaming à l'échelle planétaire et une coexistence avec les réseaux GSM existants, sans les remplacer.

#### **3.3.2 L'architecture du réseau UMTS**

Le réseau UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) a une architecture proche de celle du GSM. L'architecture du réseau UMTS a repris tous les éléments et les interfaces du réseau GSM. [7].

Le réseau UMTS est constitué d'un réseau d'accès UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) et d'un réseau cœur.

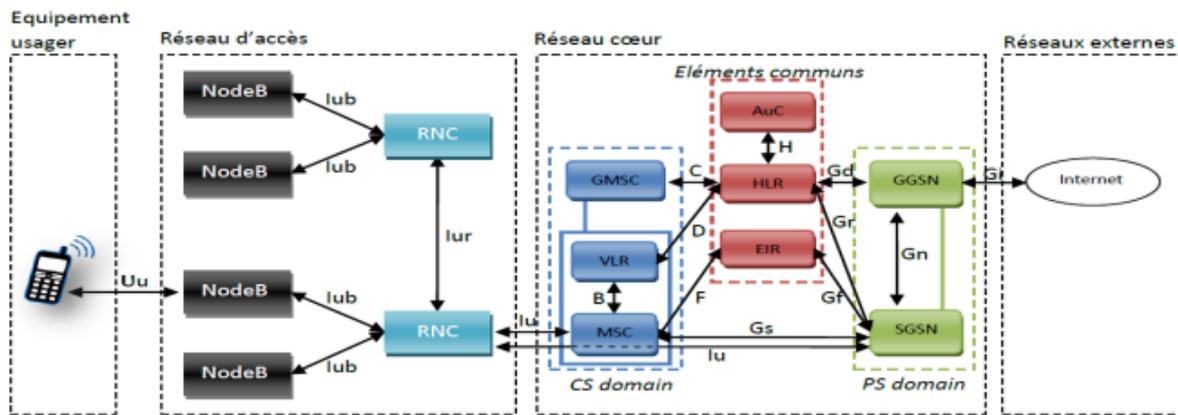


Figure 1. 2: Architecture d'un réseau UMTS

Les services souscrits par les abonnés sont gérés par le réseau cœur du système UMTS. Il simplifie les échanges dans un réseau mobile de téléphonie et assure la connexion de celui-ci avec des réseaux externes, numériques ou analogiques, fixes ou mouvements.

Le réseau cœur comprend trois éléments : Le domaine CS est employé pour la téléphonie, tandis que le domaine PS permet la commutation de paquets, et les éléments communs des domaines CS et PS.

- **Domaine à commutation de circuits (CS)**

La gestion des services de communication en temps réel tels que la vidéo-téléphonie, les jeux vidéo et les applications multimédia est facilitée par le système. La rapidité de transfert est requise pour ces applications. Les composantes du domaine CS sont les suivantes : Le MSC, le GMSC et le VLR.

- **Domaine à commutation de paquet (PS)**

Le domaine paquet offre la possibilité de gérer en temps réel des services non sensibles tels que la navigation sur Internet et les courriels.

Le domaine PS est constitué de ces éléments : Le SGSN et le GGSN.

- **Eléments communs**

Le domaine de commutation de paquet et le domaine de commutation de circuit partagent des éléments tels que • HLR. • L'EIR • L'AuC.

- **Réseau d'accès radio (UTRAN)**

L'UTRAN est un réseau d'accès composé d'une ou plusieurs stations de base (Node B), de contrôleurs radio RNC et d'interfaces d'échanges de données entre les divers éléments du réseau

UMTS. Il offre les fonctionnalités qui permettent de transférer les informations de l'utilisateur vers le réseau cœur, il agit comme une interface entre l'équipement utilisateur et le réseau cœur.

La structure d'un réseau UTRAN est représentée à la figure suivante.

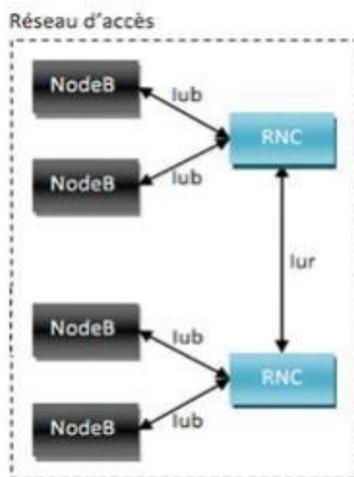


Figure1.3 : Réseau d'accès UTRAN.

- **Node B**

Cela représente une antenne, répartis sur tout le territoire, jouent le rôle équivalent pour le réseau UMTS que les BTS pour le réseau GSM. Ils sont responsables de la gestion de la couche physique de l'interface radio.

- **Radio Network Controller (RNC)**

Le RNC, qui est directement connecté à Node B, garantit la gestion de la charge et de la congestion des divers Node B. Il assure également la gestion de l'admission et de l'allocation des codes pour les nouveaux liens radio (entrée d'un mobile dans la zone de cellules gérées...).

### 3.3.3 Les propriétés techniques d'UMTS sont :

- Offrir des services à haut débit., avec une vitesse maximale de 144 Kbps dans différents contextes, et pouvant atteindre jusqu'à 2 Mbps en intérieur et lors de déplacements à mobilité réduite.

- Envoyer des informations de manière symétrique (avec le même débit à l'amont et à l'aval.) et asymétrique.

- Proposer des services qui permettent de commuter des circuits (idéal pour la voix) et des paquets (performants pour la transmission de données).

- Offrir un son de qualité similaire à celui des réseaux câblés.
- Il est nécessaire de dépasser les capacités et l'efficacité spectrale des systèmes cellulaires de deuxième génération.
- Offrir une connexion multimédia permettant la fourniture de services multimédias, avec des qualités de service variables (débit, taux d'erreurs, etc.) adaptées aux divers types de médias (voix, audio, données).
- Il est essentiel de garantir la compatibilité des réseaux d'accès radio de deuxième génération, ce qui rend plus facile la navigation entre les divers systèmes de troisième génération, garantissant ainsi une interopérabilité fluide.
- Offre d'une couverture globale en reliant des satellites aux réseaux de terre.
- Amélioration de la couverture globale en connectant des satellites aux réseaux terrestres. [8]

➤ **. Avantages et inconvénients :**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
1. Débit élevé	1. Coûts d'infrastructure élevés
2. Voix et données simultanées	2. Migration complexe
3. Qualité vocale améliorée	3. Consommation d'énergie accrue
4. Adapté aux applications gourmandes	4. Couverture limitée en zones rurales
5. Évolution vers des normes 3G avancées	5. Concurrence avec d'autres technologies

Tableau 1.1 : Les bénéfices et les désavantages d'UMTS

**3.3.4 Evolution de l'UMTS :**

La nécessité d'une amélioration des débits dans le réseau mobile actuel découle de la demande croissante des consommateurs. En réponse à cela, les opérateurs explorent des technologies plus avancées, telles que les évolutions HSPA ou HSPA+, offrant des débits considérablement améliorés.

- High Speed Packet Access (HSPA)

La génération 3,5G, parfois appelée HSPA (High Speed Packet Access), est une évolution de l'UMTS qui vise à atteindre un débit théorique maximal de 14,4 Mbit/s, avec une vitesse pratique d'environ 3,6 Mbit/s.

- High Speed Packet Access + (HSPA+)

Le HSPA+ (High Speed Packet Access +), parfois qualifié de génération 3,75G, constitue une évolution avancée du HSPA. Cette technologie se distingue par un débit maximal théorique atteignant 21 Mbit/s, avec une vitesse pratique avoisinant les 5 Mbit/s..

### 3.4 La quatrième génération (4G) :

Les réseaux LTE, également connus sous le nom de 4G, représentent un progrès majeur par rapport aux réseaux GSM et UMTS.

Les critères qui déterminent les réseaux LTE (Long Term Evolution) ont émergé du 3rd Génération Partnership Project (3GPP), tout comme les normes UMTS. Cependant, les normes LTE ont apporté plusieurs modifications et améliorations significatives par rapport à leurs prédécesseurs.

Effectivement, les principales évolutions de la 4G se concentrent sur l'amélioration des vitesses théoriques maximales, engendrant un débit réel supérieur et une amélioration de la capacité des réseaux à gérer le trafic. Parallèlement, la 4G vise à réduire les délais de latence, offrant ainsi des temps de réaction plus courts et favorisant une meilleure interactivité. Ces avancées se traduisent par une connexion pour l'utilisateur qui est environ trois fois plus rapide qu'en 3G [9].

#### 3.4.1 La structure du système LTE :

L'ensemble de l'architecture du système LTE est composé de deux entités principales :

- L'E-UTRAN est le réseau d'accès radio terrestre universel évolué, qui est le réseau d'accès radio pour l'EU (Équipement Utilisateur).
- Le cœur de paquets évolué (EPC) est le cœur du réseau. Le réseau central est aussi appelé évolution d'architecture de service (SAE), tandis que la fusion de l'E-UTRAN et de l'EPC il est aussi appelé de système paquet évolué (EPS). [10][11]

LTE présente une architecture plate et simplifiée par rapport aux systèmes 2G/3G, notamment par l'élimination de l'entité RNC (Radio Network Controller). Cette architecture est entièrement orientée vers les paquets, contrairement à l'architecture des systèmes 2G/3G qui était à la fois basée sur les circuits et les paquets [12].

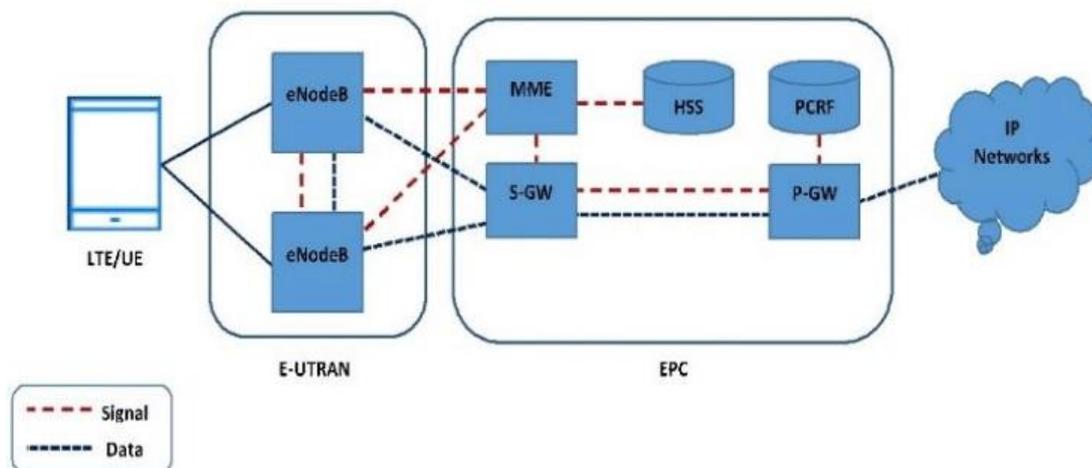


Figure1.4: Architecture du système LTE.

- L'UE (Équipement Utilisateur) comprend les équipements mobiles tels que les smartphones, tablettes et ordinateurs portables, qui doivent être compatibles avec le réseau 4G offrant un débit théorique de 100 Mbits/s.
- L'accès radio eUTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) se compose uniquement d'eNodeB, qui assure l'échange radio avec l'E-UTRAN.
- Le cœur de réseau, l'EPC (Evolved PacketCore), est basé sur une architecture tout IP, utilisant des technologies « full IP ». Il est caractérisé par une structure « plate », où tous les dispositifs IP échangent directement des informations entre eux, sans nécessiter d'allers-retours avec des équipements de niveau supérieur.
  - MME (Entité de gestion de la mobilité), parmi ses caractéristiques, on retrouve la signalisation, l'authentification et la gestion de la liste de suivi de l'aire.
  - L'Entité Serving GW (Serving Gateway) comprend plusieurs fonctionnalités, dont :
    - Point de référence pour le transfert entre les eNodeB. facilite le transfert fluide entre différentes stations de base.
    - Centre de référence pour le transfert LTE et les réseaux 2G/3G: assure la continuité des services lors des transitions entre les technologies de réseau.
    - Routage et relais des paquets : gère le transfert efficace des données entre l'UE et les différentes parties du réseau.
  - L'Entité PDN GW (Packet Data Network Gateway) offre différentes fonctionnalités, notamment :
    - Accès aux réseaux externes tels qu'Internet et intranet : permet la connectivité avec les réseaux externes.

- Redistribution de l'adresse IP de l'UE : attribue une adresse IP à l'Équipement Utilisateur.
- Inscription des paquets dans les directions ascendante et descendante : applique des identifiants pour la gestion du trafic et la qualité de service.
- o L'Entité HSS (Home Subscriber Server) est un HLR amélioré qui renferme les données d'abonnement pour les réseaux GSM, GPRS, 3G, LTE et IMS. Il centralise les données d'abonnés et facilite l'authentification et la gestion des informations utilisateur dans différents types de réseaux.

### 3.4.2 Caractéristiques de la 4G-LTE :

- Optimisation de l'interface radio pour accroître les débits de données en amont et en aval ainsi que la capacité du réseau.
- Accès plus rapide : le temps d'aller-retour est réduit à moins de 10 ms, tandis que le délai d'initialisation est maintenu en dessous de 100 ms, permettant ainsi la prise en charge de services interactifs et en temps réel.
- Mobilité : Une mobilité garantie avec des vitesses pouvant atteindre 350 km/h. Effectivement, le transfert pourra être réalisé dans des situations où l'utilisateur se déplace à une vitesse élevée.
- La capacité de déployer le LTE dans des bandes allant de 1,25 MHz à 20 Mhz, ainsi que dans le spectre apparié et non apparié de la 3G, offre une grande flexibilité. Grâce à cela, l'opérateur peut mettre en place LTE sur la bande existante sans nécessiter de solliciter le permis de nouvelle bande. LTE prend en charge FDD et TDD.
- Une couverture de cellule étendue est assurée dans les zones urbaines et rurales grâce à LTE, car il peut fonctionner sur diverses bandes de fréquences, notamment les bandes basses. Cela permet la mise en place de cellules capables de couvrir des diamètres étendus [12].
- Une architecture simplifiée permet d'accroître la capacité d'expansion des réseaux.
- Compatible avec les réseaux 3G déjà en place. Le handover avec les réseaux existants tels qu'UMTS/HSPA et GSM/GPRS/EDGE doit être possible avec LTE. En outre, Il est essentiel de rendre le transfert entre les domaines plus facile entre les sessions de commutation de paquets et de circuits. [13].

## **4 La cinquième génération 5G :**

Les réseaux cellulaires mobiles 5G sont conçus pour garantir des débits de données plus élevés et réduire le temps de latence, Et une capacité accrue et gérer un nombre croissant d'appareils intelligents, qu'ils soient utilisés par les humains ou pour des communications entre machines. Les systèmes, composants et éléments associés qui offrent des fonctionnalités plus avancées que les systèmes IMT-2000 (3G) et IMT évolués (4G) sont désignés sous le nom d'IMT-2020, couramment connu sous le nom de 5G. Cette nouvelle génération de technologies sans fil améliore significativement les performances en termes de vitesse de transmission des données, de réduction de la latence et de capacité à connecter simultanément de nombreux dispositifs, cela offre la possibilité de développer de nouvelles applications et services.

La montée en popularité des utilisateurs de technologies mobiles et leurs demandes croissantes en matière de performances ont incité plusieurs groupes industriels et laboratoires de recherche à se lancer dans la conception de nouveaux équipements basés sur la technologie de cinquième génération de réseaux mobiles (5G). Ces acteurs discutent actuellement des solutions techniques à adopter pour mettre en place de nouvelles solutions industrielles fondées sur l'Internet des objets (IoT) ou la connectivité des objets via Internet.

La 5G offrant des améliorations significatives par rapport à la 4G. Elle utilise des fréquences plus élevées, des antennes plus avancées et des technologies d'encodage plus efficaces pour fournir des vitesses de téléchargement et de téléchargement bien plus rapides. La 5G permettra également de connecter un grand nombre d'appareils simultanément, ouvrant ainsi la voie à l'Internet des objets et à une connectivité sans fil plus fiable et plus rapide.[20]

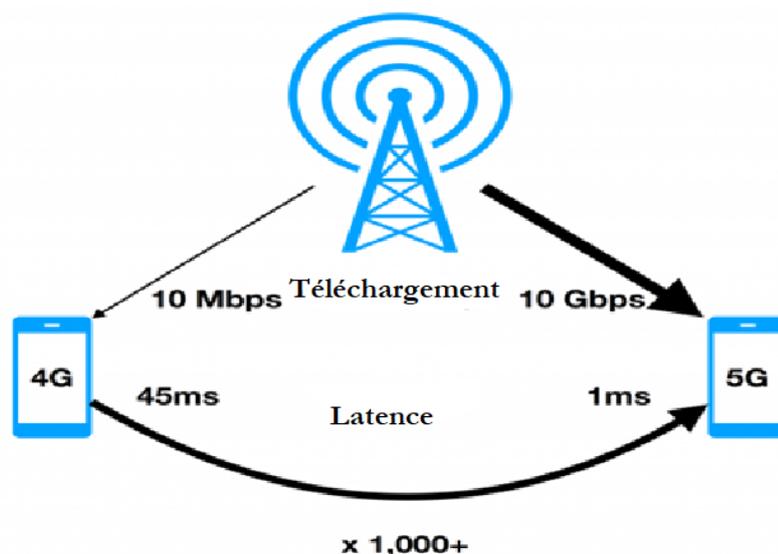


Figure 1.5 : Comparaison 4G/5G [2]

## 4.1 Les améliorations de la 5G :

### 4.1.1 Avantages de la 5G :

La 5G offre de nombreux avantages par rapport à ses prédécesseurs, notamment une vitesse accrue, une faible latence et une capacité de connexion massive. Ces améliorations permettent des transferts de données plus rapides, des temps de réponse plus courts et la possibilité de connecter un grand nombre d'appareils simultanément, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles opportunités technologiques et industrielles [17].

#### 4.1.2 Vitesse accrue :

La vitesse accrue de la 5G est l'un de ses principaux atouts, offrant des débits de données jusqu'à 100 fois plus rapides que la 4G. Cela se traduit par des téléchargements plus rapides, des temps de chargement réduits et une expérience utilisateur améliorée pour les applications gourmandes en bande passante telles que la réalité virtuelle et les jeux en ligne [18].

#### 4.1.3 Faible latence :

La faible latence de la 5G, inférieure à 1 milliseconde, permet des communications quasi-instantanées entre les appareils connectés. Cela est crucial pour les applications nécessitant des réponses en temps réel, comme les véhicules autonomes, la chirurgie à distance et les jeux en ligne compétitifs, où la réactivité est essentielle [19].

#### 4.1.4 Capacité de connexion massive :

La capacité de connexion massive de la 5G permet de connecter un nombre beaucoup plus important d'appareils par unité de surface par rapport aux générations précédentes. Cela ouvre la voie à l'Internet des objets à grande échelle, où des millions d'appareils peuvent interagir et échanger des données en temps réel, rendant possible de nouveaux services et applications innovants

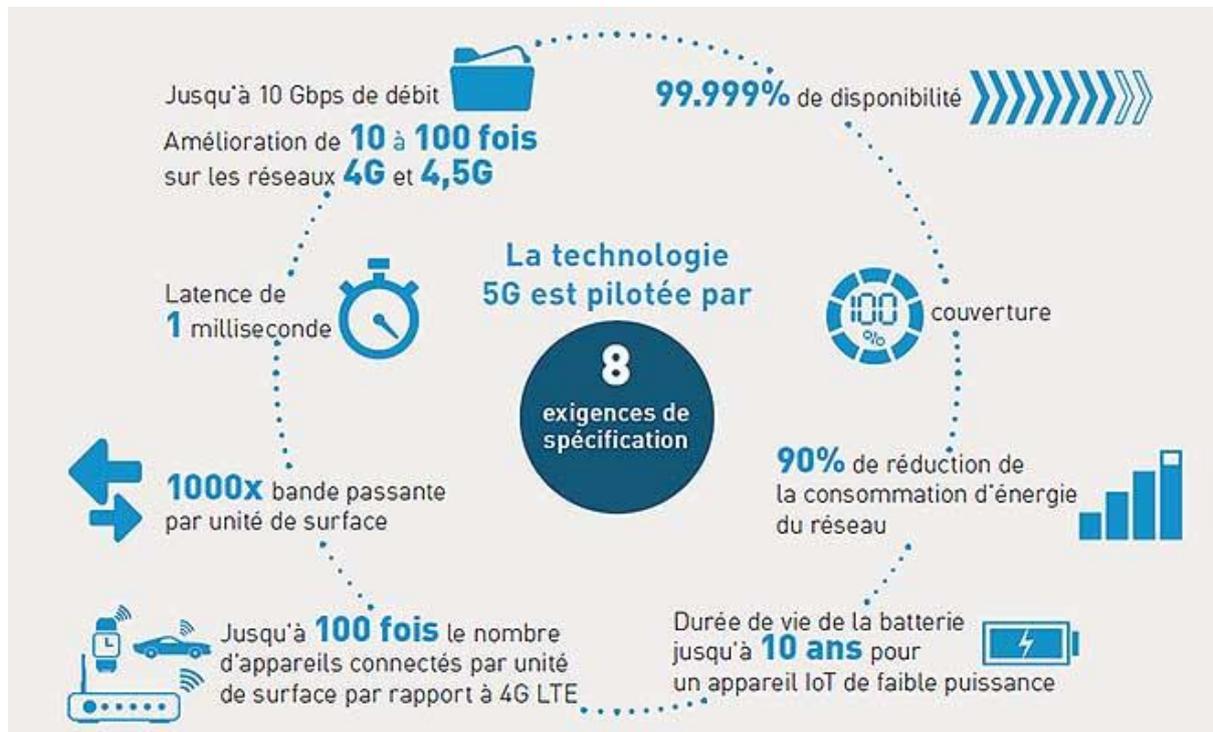


Figure 1.6 : Définitions et utilisations de la 5G

La 5G offre des améliorations significatives par rapport aux générations précédentes. Elle promet d'apporter une connectivité ultra-rapide, une latence réduite et une capacité de réseau accrue.

La 5G est également considérée comme la technologie clé pour permettre l'évolution de nouvelles applications et technologies telles que l'Internet des objets, les véhicules autonomes et la télémédecine. Cependant, son déploiement présente également des difficultés Concernant les infrastructures, la sécurité et la conformité réglementaire. [20]

Ces avancées comprennent :

- Les communications exploitant la gamme d'ondes millimétriques.
- La technologie massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output massif).
- L'utilisation de mini-cellules et la réutilisation du spectre électromagnétique.
- Les communications sans fil full-duplex.
- Le déploiement de nouvelles générations d'antennes.

## 4.2 Les caractéristiques de la 5G :

### 4.2.1 L'exploitation des fréquences millimétriques :

L'avancement technologique et culturel a été profondément influencée par le déploiement croissant au fil des années récentes il y a eu des avancées significatives dans les systèmes de communications sans fil. Ces avancées ont permis un accès plus rapide à l'information, une connectivité accrue et ont facilité le développement d'applications variées dans divers domaines. La satisfaction des besoins futurs des utilisateurs est grandement préoccupée par les débits de données très élevés et d'optimiser les performances des réseaux sans fil.

Pour répondre à un système requérant un débit de données élevé, l'idée d'utiliser des fréquences de porteuses plus élevées a été avancée comme une solution. Cela permet d'augmenter la bande passante disponible, facilitant ainsi le transfert rapide de données dans les systèmes de communication [4].

De nombreuses études ont été menées sur la bande de fréquences des ondes millimétriques et au-delà afin de résoudre le problème de la saturation des ressources spectrales.[4]

Ces fréquences se trouvent dans la plage de 30 GHz à 300 GHz, ce qui correspond à des longueurs d'onde de 10 mm à 1 mm. L'objectif principal des ondes millimétriques est de proposer une bande passante généreuse et une transmission de haute puissance. [5].

Ce qui caractérise ces fréquences élevées des autres, c'est leur vitesse. Avec un codage de signal radio adéquat, les vitesses de la 5G pourront être mille fois supérieures à celles des générations précédentes de téléphonie mobile. [2].

### 4.2.2 Technologie de transmission massive à entrées et sorties multiples (mMIMO) :

Le massive MIMO représente la technologie de couche physique sous les 6 GHz la plus prometteuse pour les futurs accès sans fil. Il repose sur l'utilisation de grandes infrastructures d'antennes au niveau des stations de base pour desservir simultanément de nombreux terminaux autonomes. [6]

Absolument, dans les systèmes MIMO (Multiple input, Output) la communication se déroule à travers deux principaux concepts : la diversité spatiale, qui améliore la fiabilité en utilisant plusieurs antennes pour recevoir le même signal, et le multiplexage spatial, qui accroît le débit en transmettant des données distinctes simultanément via différentes antennes. Ces techniques contribuent à améliorer les performances des systèmes sans fil [7].

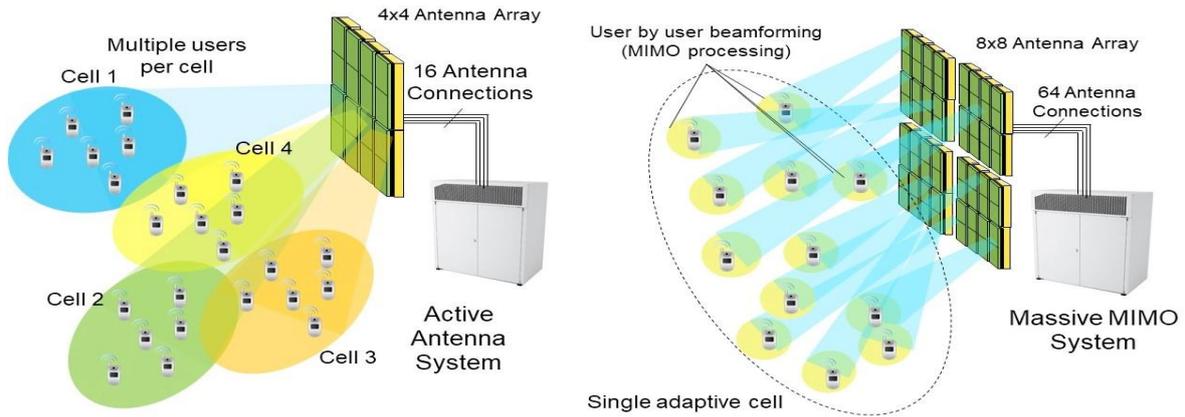


Figure 1.7 : Massive MIMO utilise de vastes réseaux d'antennes.

Un système MIMO utilise plusieurs antennes émettrices et réceptrices pour transmettre des données à travers un canal avec atténuation progressive. Cela contribue à renforcer les compétences et la fiabilité de la communication sans fil en exploitant la diversité spatiale.

Supposons que  $M$  soit le nombre d'antennes d'émission et  $N$  soit le nombre d'antennes réceptrices. La formule fondamentale du système MIMO est fournie par [7] :

$$Y = H.X + W \tag{1.1}$$

Où,  $Y$  ( $N \times 1$ ) est la matrice du récepteur,  $H$  ( $N \times M$ ) est la matrice de canaux,  $X = M \times 1$  Matrice de transition,  $W$  est le bruit

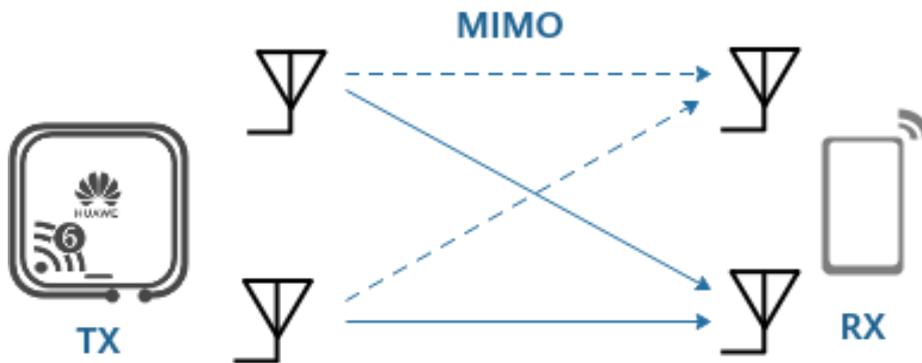


Figure 1.8: Système MIMO

Les matrices MIMO comprennent différentes antennes qui peuvent servir à former le faisceau et orienter les signaux transmis (et les signaux reçus) dans une direction précise.

La technique MIMO exploite la diversité spatiale en transmettant plusieurs versions du message simultanément par différentes antennes. Cela réduit le taux d'erreur, car même si certains canaux sont affectés, la probabilité que tous les signaux soient altérés de la même manière est faible.

Le destinataire peut alors combiner les multiples copies du message pour récupérer l'originale, améliorant ainsi la fiabilité de la communication sans fil [7].

Les réseaux d'antennes ont la capacité de rediriger les faisceaux vers un dispositif connecté, ce qui diminue la puissance requise pour la communication tout en générant un signal présentant une faible interférence [5]

Massive MIMO peut être déployé pour réaliser directement les objectifs de la 5G en améliorant le débit de données et en réduisant la latence. De plus, il contribue de manière indirecte à ces objectifs en permettant une utilisation pratique des fréquences des ondes millimétriques, Bien que présentant des caractéristiques d'atténuation et de diffraction faible. [5].

#### 4.2.3 Utilisation de petites cellules :

Le déploiement de la 5G, on s'attend à une augmentation significative des quantités de données échangées. Les bandes millimétriques, bien qu'offrant des débits élevés, ont une capacité de la propagation limitée, nécessitant ainsi la mise en place généralisée d'émetteurs radioélectrique de faible puissance, tels que les (smallcells). Ces petites stations de base contribuent à densifier le réseau, améliorant la couverture et la capacité des réseaux sans fil dans des zones spécifiques, assurant une connectivité plus fiable et rapide.

Certaines estimations suggèrent qu'au moins 10 petites cellules (small-cells) par site macro sont nécessaires pour répondre à la demande croissante et faciliter le déploiement de la 5G, notamment dans les environnements urbains où les cellules sont déjà assez rapprochées pour gérer la densité d'utilisation. [8].

En utilisant des cellules plus petites (micro et pico), bien qu'elles desservent des zones géographiques bien plus réduites que les cellules macros, Les capacités et la qualité de service des réseaux sont améliorées.

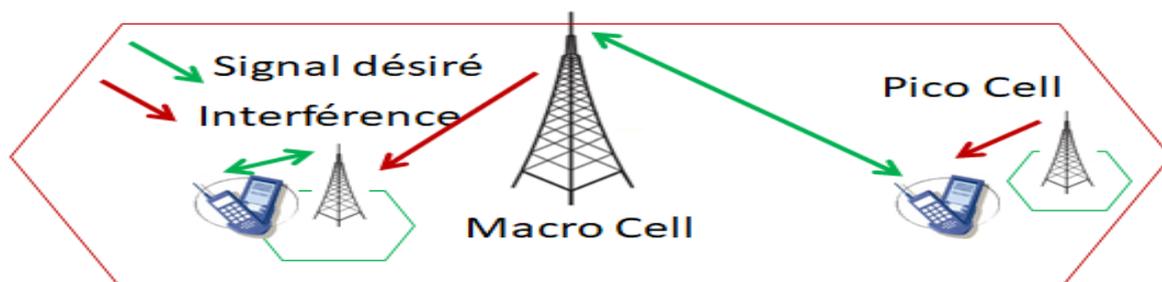


Figure 1.9 : Réseaux à macro cellules et réseaux à petites cellules

Les petites cellules sont déjà utilisées par certains opérateurs de réseaux hertziens afin de renforcer les capacités, et améliorer la couverture en particulier dans des environnements urbains densément peuplés. Les petites cellules offrent une solution efficace pour répondre à la demande

croissante de connectivité dans les zones où les macros cellulaires traditionnelles peuvent rencontrer des défis liés à la densité, à la congestion et la capacité. Cela contribue à garantir une meilleure qualité de service et une expérience utilisateur plus faible dans ces zones à forte densité urbaine [1].

#### **4.2.4 Communication sans fil full-duplex :**

Les spécificités de la 5G sont en train d'être normalisées cela n'entrave pas les constructeurs d'équipements qui peuvent anticiper les besoins futurs et introduire de nouvelles solutions en exploitant les tendances du marché. Cela permet une évolution continue des technologies de réseau mobile.

Les capacités de transfert d'une smallcell classique peuvent être doublées grâce à la technologie sans fil, nous exposons cette technologie « comme une étape vers 5G » [9].

Au sein des systèmes traditionnels, la transmission et la réception se réalisent soit sur des bandes de fréquences distinctes (connu sous le nom de duplexage en fréquence ou FDD, frequency division duplexing), soit lors de différents moments (appelé duplexage temporel ou TDD, time division duplexing) [8], « full-duplex » emploie une seule fréquence unique pour permettre à la fois contrairement au mode « half-duplex » qui utilise deux fréquences distinctes pour les flux montants et descendants. En séparant les communications dans un même émetteur-récepteur, le mode full-duplex permet de réduire significativement les perturbations entre les stations de radio, qu'elles soient macro ou Small, ainsi que les terminaux. [9].

#### **4.2.5 La mise en place d'une nouvelle génération d'antennes "intelligentes" :**

Les antennes intelligentes, composées de nombreuses antennes miniaturisées, offrent des débits et une capacité de transmission actuellement inégalés. Elles améliorent significativement les performances des systèmes de communication

La technologie des antennes intelligentes contribue à augmenter la capacité des systèmes cellulaires, permettant ainsi de desservir un nombre accru d'utilisateurs. Cela est particulièrement bénéfique dans les environnements où la demande en connectivité est élevée.

### **4.3 Le défi de la 5G :**

Le défi majeur de la 5G réside dans la gestion des fréquences radioélectriques, la densification du réseau et la mise en œuvre d'infrastructures capable de supporter des débits élevés tout en minimisant la latence. L'interopérabilité mondiale et les préoccupations liées à la sécurité sont également des aspects clés à surmonter, Afin de garantir une mise en place réussie de la 5G à grande échelle.

Pour permettre le déploiement des réseaux de téléphonie mobile, les opérateurs ont traditionnellement recours à l'installation de leurs équipements sur des sites élevés tels que des pylônes ou des toits de terrasse. Ce besoin continuera d'être crucial pour les réseaux 5G, mais il sera encore plus important pour deux raisons essentielles.

- Les antennes 5G seront vraisemblablement beaucoup plus grandes, atteignant potentiellement des dimensions de l'ordre du mètre carré pour certaines, en raison des exigences de traitement massif MIMO mentionnées précédemment, qui nécessiteront un grand nombre d'éléments rayonnants. De plus, des antennes supplémentaires devront probablement être installées capables d'exploiter les nouvelles bandes 5G. La réutilisation des structures de support existantes pourrait donc poser des problèmes, ce qui pourrait nécessiter la recherche de nouveaux sites (peut-être en co-localisation)
- La recherche de nouveaux emplacements sera également nécessaire pour installer des petites cellules sur des points semi-élevés, ce qui exigera une attention particulière en raison de la densité élevée de ces sites. Il faudra donc aux opérateurs d'installer leurs équipements sur des infrastructures urbaines telles que les abribus, les lampadaires, les bâtiments publics, les panneaux d'affichage, etc....
- La connectivité des sites 5G au réseau pose un défi financier en raison des coûts associés au déploiement de fibres optiques. L'extension de l'infrastructure fibre optique est cruciale pour assurer une connectivité fiable et à haut débit aux antennes 5G. Cependant, des innovations dans les technologies de raccordement, telles que l'utilisation de liaisons sans fil point à point pour certaines parties du réseau, pourraient contribuer à atténuer ces coûts [8].
- Les fibres optiques peuvent servir de moyen de diffusion pour acheminer des signaux millimétriques dans le réseau d'accès avec des pertes minimales et une bande passante pratiquement illimitée. Ainsi, l'intégration des composants radio et optiques, également appelée radio sur fibre (ROF), joue un rôle clé dans la mise en œuvre de cette technologie. Elle permet de transmettre les signaux radio sur des fibres optiques, offrant ainsi une solution efficace pour la distribution du signal radio sur de longues distances tout en minimisant les pertes de signal. Cela contribue à étendre la portée et la flexibilité des réseaux de communication.

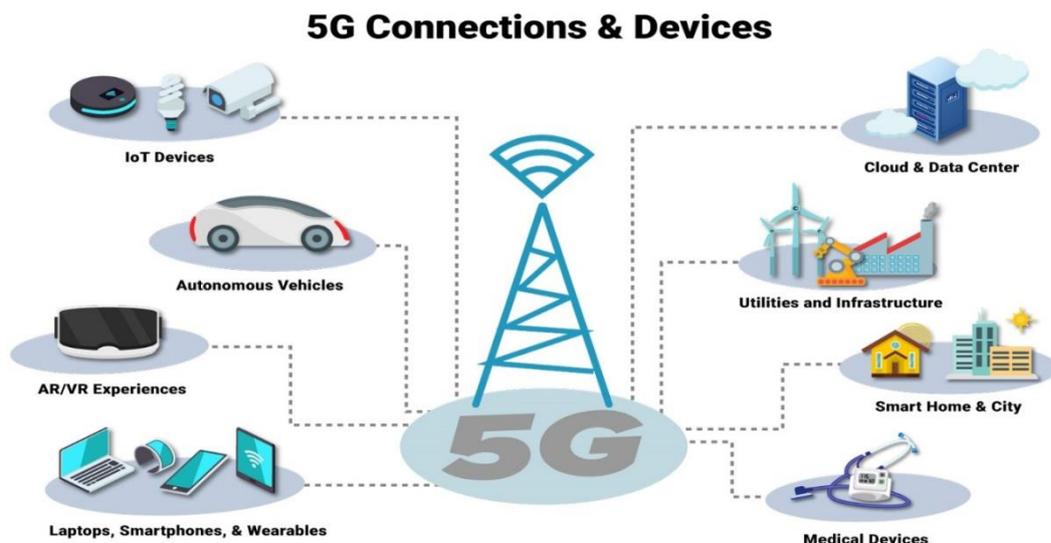


Figure 1.10: Les défis de la 5G

### 5 Comparaison des performances :

Caractéristiques	3G	4G	5G
Débit de données	Jusqu'à plusieurs mégabits par seconde (Mbps)	Jusqu'à plusieurs dizaines de Mbps	Jusqu'à plusieurs gigabits par seconde (Gbps)
Latence	De quelques centaines de millisecondes à plusieurs secondes	Moins de 50 millisecondes	Inférieure à 10 millisecondes (potentiellement jusqu'à 1 ms)
Technologie principale	CDMA, WCDMA, HSPA	LTE	NR (New Radio)
Bande de fréquence	Principalement 850 MHz, 900 MHz, 1900 MHz, 2100 MHz	Principalement 700 MHz, 800 MHz, 1800 MHz, 2600 MHz, 2.5 GHz	Principalement 600 MHz, 700 MHz, 3.5 GHz, 26 GHz, 28 GHz, etc.
Architecture réseau	Principalement basée sur des réseaux à commutation de circuits	Basée sur des réseaux à commutation de paquets (tout IP)	Évolution vers des réseaux à commutation de paquets, avec virtualisation des fonctions réseau (NFV) et tranches réseau

Tableau1.2 : Tableau comparatif 3G/4G/5G

## **6 Conclusion :**

Nous avons commencé notre chapitre par l'évolution des réseaux mobiles, depuis les premières générations jusqu'à la 5G, qui a marqué une progression significative en termes de débits, de capacités et de qualité de service. Les différentes infrastructures, 2G, 3G, 4G ont apporté des fonctionnalités distinctes avec des architectures spécifiques, le passage 5G a présenté des défis notamment en termes de coûts de déploiement et l'intégration d'infrastructure.

# *CHAPITRE 02*

## *Radio sur Fibre*

## **1. Introduction :**

La transmission par fibre optique implique l'acheminement de l'information d'un endroit à un autre en utilisant des fibres optiques. Principalement utilisés dans des applications nécessitant des distances importantes, La performance des systèmes de communication par fibre optique est améliorée pour une utilisation à pleine capacité dans ces cas, compensant ainsi les coûts associés.

Pour les échanges sans fil à portée courte et moyenne, les systèmes de transmission optique sont préférés en raison de leur faible consommation d'énergie. Cependant, dans d'autres scénarios où la distance de transmission est cruciale, une puissance optique plus élevée est requise, ce qui peut déclencher l'apparition de divers effets non linéaires dans la fibre optique.

Parallèlement, la technologie de la radio sur fibre (RoF) offre une solution qui consiste à transmettre des signaux RF modulés sur une liaison optique. Elle permet la communication bidirectionnelle entre la station centrale (CS) et la station de base (BS), tant en liaison descendante qu'en liaison montante. Les systèmes RoF combinent les avantages de la haute vitesse, de la grande capacité et de la faible perte de transmission des communications par fibre optique avec la flexibilité offerte par les communications mobiles.

Ce chapitre abordera d'abord la définition et les composantes de la technologie radio sur fibre, puis les différentes techniques de transmission et de détection, et enfin l'utilisation de la radio sur fibre.

## **2. Système de transmission par fibre optique :**

### **2.1 Définition :**

La fibre optique est un filament mince en verre ou en plastique capable de transporter la lumière. On l'emploie pour transmettre des informations et de la lumière. Comparé aux câbles coaxiaux, elle offre un débit d'information considérablement plus élevé. Elle peut constituer un soutien à un réseau "large bande" permettant le passage de divers types de données, y compris la télévision, le téléphone, la visioconférence et les données informatiques. Le concept de la fibre optique a été élaboré dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works (aujourd'hui Corning Incorporated) dans les années 1970. [10]

### **2.2 La construction de la fibre optique :**

Une fibre optique est un cylindre en verre (silice - SiO<sub>2</sub>) servant de guide d'onde. Sa structure comprend principalement un cœur central, appelé cœur, possédant un indice de réfraction  $n_1$ , entouré d'une gaine présentant un indice de réfraction inférieur, noté  $n_2$ . La lumière ne peut se

propager à travers la fibre que si l'indice de réfraction du cœur ( $n_1$ ) est plus élevé que celui de la gaine ( $n_2$ ).

**Cœur :** Il s'agit du centre de la fibre optique, où la lumière est propagée. Le cœur est entouré par une gaine

**La gaine :** Il s'agit d'une substance qui entoure le cœur et qui a un indice de réfraction inférieur à celui du cœur. Cette différence d'indice de réfraction permet de réfléchir la lumière à l'intérieur du cœur et d'empêcher sa dispersion.

**Revêtement :** C'est une couche protectrice qui entoure la gaine pour protéger la fibre contre les dommages mécaniques, tels que les torsions ou les pliages excessifs. Le revêtement est généralement en plastique.

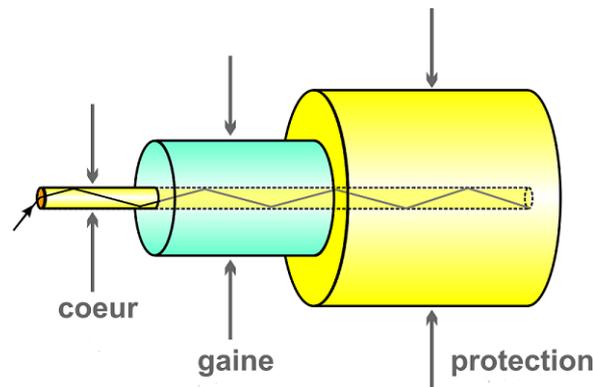


Figure 2.1 : Structure de fibre optique

### 3. Caractéristique de fibre optique :

#### 3.1 L'indice de Réfraction :

L'indice optique, également connu sous le nom d'indice de réfraction, peut être considéré comme la mesure de la "résistance" d'un milieu à la propagation de la lumière. Dans un milieu présentant un indice optique faible, la lumière se propage plus rapidement que dans un milieu ayant un indice optique élevé. L'indice optique est une grandeur sans dimension, ce qui signifie qu'elle n'est pas associée à une unité spécifique. La vitesse de diffusion de la lumière dans un environnement spécifique est calculée en fonction de [4] :

$$\eta = \frac{c}{v} \quad [2.1]$$

### 3.2 L'angle d'acceptante :

L'angle d'incidence à l'entrée de la fibre optique définit le cône d'acceptation, où les rayons lumineux injectés sont entièrement réfléchis par l'interface entre le cœur et la gaine. En mesurant cet angle d'acceptation, on peut définir ce qu'on appelle l'ouverture numérique.

### 3.3 Ouverture numérique :

L'angle de pénétration de la lumière dans la fibre permet de garantir sa propagation. La taille de l'ON augmente, ce qui facilite l'insertion de la lumière dans la fibre, comme illustré dans la figure(I.3).

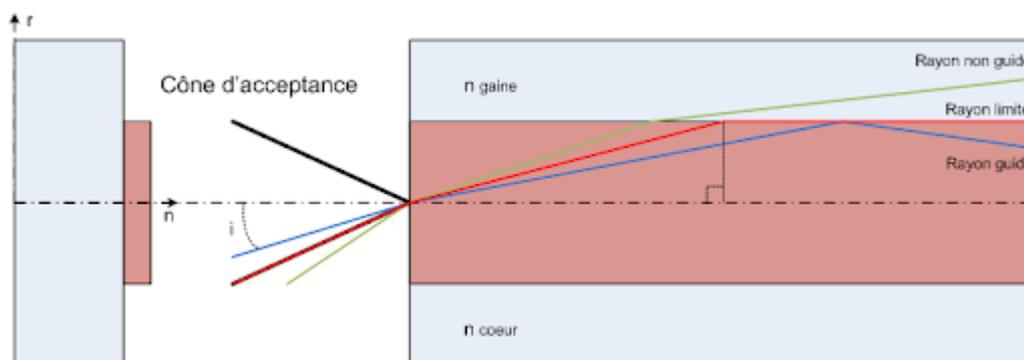


Figure 2.2 : Ouverture numérique de fibre optique.

Avec :  $n_1$  : l'indice de réfraction de cœur,  $n_2$  : l'indice de réfraction de la gaine.

## 4. Types de fibre optique :

### 4.1 Fibre optique Multi Mode :

Différents moyens de diffusion peuvent coexister simultanément dans une fibre optique, car les faisceaux lumineux peuvent emprunter des trajets distincts en fonction de l'angle de réfraction. À l'arrivée, les rayons lumineux traversent l'extrémité de la fibre à des moments différents, cela conduit à une certaine répartition du signal. Ce type de fibre est généralement utilisé pour des distances relativement courtes (de l'ordre de centaines de mètres) et pour des débits plus faibles (environ 1 Gbit/s par kilomètre), principalement dans le cadre de réseaux privés [11, 12].

#### 4.1.1 Multi mode à saut d'indice :

Ce genre de fibre est fréquemment employé dans les réseaux locaux (LAN). Elle se caractérise par un cœur de fibre optique très large, avec un diamètre variant généralement entre 100  $\mu\text{m}$  et 200  $\mu\text{m}$ . Dans ce cœur large, Différentes façons de propager la lumière peuvent coexister.

La gaine qui entoure le cœur présente également une largeur variable, allant typiquement de 150  $\mu\text{m}$  à 250  $\mu\text{m}$ . Toutefois, il est important de noter que cette fibre présente une atténuation du signal significative, ce qui limite sa capacité à transmettre des signaux sur de longues distances [11, 12].

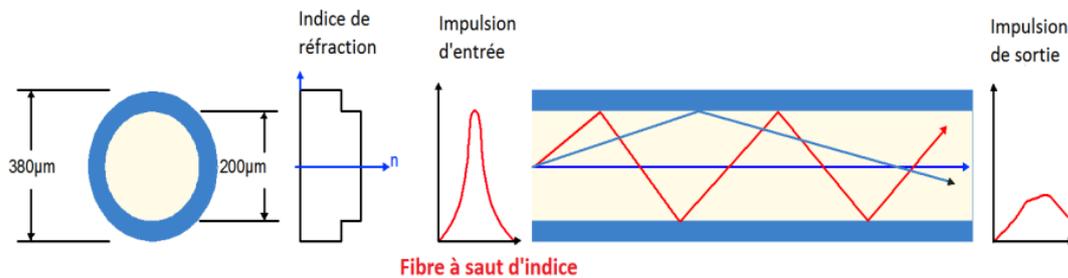


Figure 2.3: Fibre optique Multi-mode à saut d'indice.

#### 4.1.2 Multi mode à gradient d'indice :

Dans cette situation, l'indice de réfraction n'est pas différent entre le cœur et la gaine, puisque le diamètre diminue progressivement vers l'extérieur. Le diamètre de la gaine est de 150  $\mu\text{m}$  et celui du cœur de 50 à 100  $\mu\text{m}$ . Les couches du cœur sont composées de différentes densités d'indices de réfraction, ce qui a un impact sur la trajectoire des rayons lumineux. [11, 13]

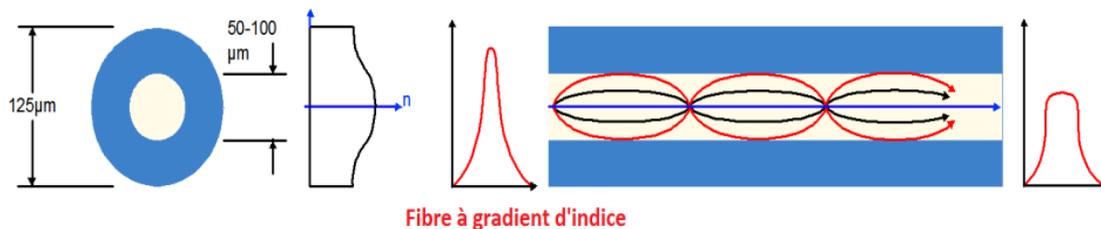


Figure 2.4 : Fibre optique Multi-mode à gradient d'indice.

#### 4.2 Fibre optique Monomode :

Le diamètre du cœur de ce type de fibre est inférieur à 10  $\mu\text{m}$ , habituellement compris entre 6  $\mu\text{m}$  et 8  $\mu\text{m}$ , tandis que celui de la gaine est de 125  $\mu\text{m}$ . Cette fibre ne peut se propager que par un mode de propagation, le mode fondamental. L'utilisation de ces fibres est fréquente afin de transmettre des signaux à grande vitesse et à des distances considérables à cause de leur large spectre

passante, de leurs faibles pertes de signal et de leur absence de dispersion modale.

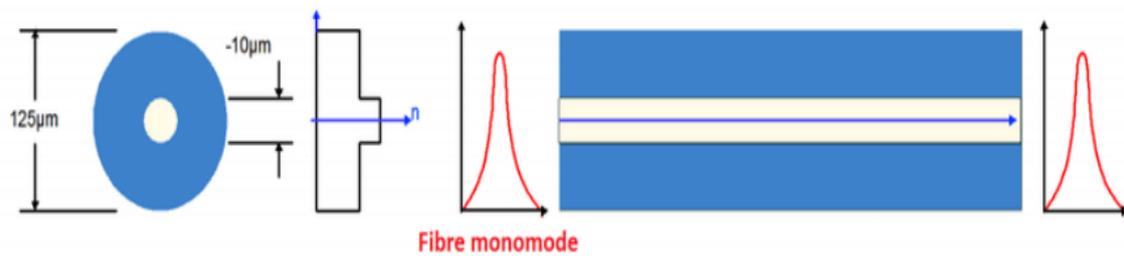


Figure 2.5 : Fibre optique Monomode.

Structure	Avantages	Inconvénients	Applications pratiques
<b>Multimode à saut d'indice (SI)</b>	Une ouverture numérique importante, une connexion simple, des prix abordables et une mise en place facile.	Le signal présente de fortes pertes, dispersion et distorsion.	Distances de communication courtes, réseaux locaux
<b>Multimode à gradient d'indice (GI)</b>	La bande passante est abordable et la qualité de transmission est bonne.	Très compliqué à réaliser.	Distances de communication courtes et moyennes
<b>Monomode</b>	Grande bande passante, faible atténuation, dispersion faible.	Prix très élevé	Communication sur de grandes distances.

Tableau 2. 1 : Comparaison entre les différents types de fibres optiques

### 5. Les avantages et inconvénients :

➤ **Les avantages :**

- Une bande passante accrue et une vitesse accrue.
- Les fibres optiques sont également de plus en plus fines et légères.
- Une plus grande capacité de charge.
- La fibre optique permet une dégradation du signal plus faible.

Les informations sont transmises à travers des signaux lumineux.

- La durée de vie de la fibre optique est améliorée.

➤ **Les inconvénients :**

- Élevés frais d'exploitation.
- Difficulté de raccordement.

## 6. La technologie Radio sur Fibre RoF :

### 6.1 Présentation générale de la radio sur fibre optique pour la communication optique [14] :

Le transfert d'informations repose sur trois éléments fondamentaux : l'émetteur, le canal de transmission et le récepteur.

- L'émetteur est un appareil qui convertit un signal électrique complexe en un signal optique.
- En tant que canal de transmission, la fibre optique transporte une porteuse optique modulée qui contient les informations à transmettre.
- Le récepteur de signal est composé d'un photodétecteur qui convertit le signal optique en signal électrique, qui peut être pris en charge par des systèmes électroniques.

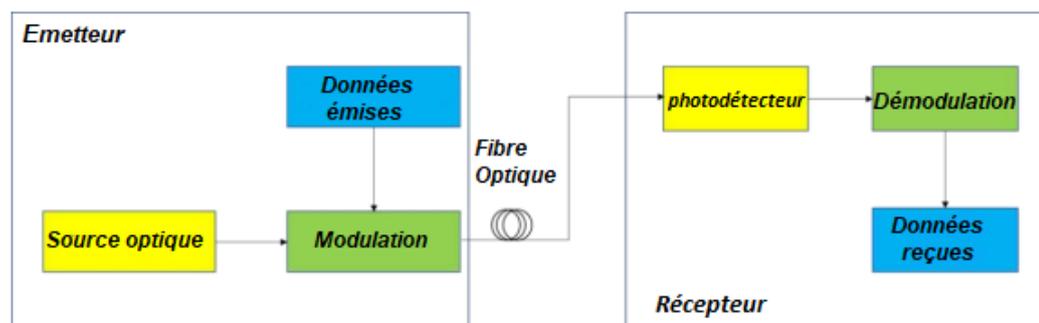


Figure 2.6 : Configuration globale d'un réseau de communication par fibre optique.

### 6.2 Définition de RoF :

Le concept de Radio-sur-Fibre (RoF) désigne des méthodes utilisées pour générer et/ou transmettre des signaux radiofréquences (RF) par voie optique. [15].

L'objectif de RoF est de permettre la transmission optique de signaux analogiques micro-ondes.

De cette manière, la connexion RoF utilise les performances des fibres optiques afin de transmettre les signaux radio vers différents points d'accès sans fil, ce qui offre l'avantage de la mobilité. [16]

Effectivement, Les systèmes RoF transmettent les signaux radio dans leur format analogique d'origine Au lieu de transmettre des signaux numériques comme l'Ethernet (IEEE 802.11ad) ou HDMI (Wireless HD) Afin de faire le lien entre chaque point d'accès, cela requiert des méthodes de traitement du signal tels que des conversions analogique/numérique et numérique/analogique. L'intensité ou la phase de la lumière d'une source laser sont modifiées pour transmettre les signaux radio à une porteuse optique sans changer le format de modulation. On peut y parvenir grâce à l'utilisation de fibres optiques en silice, qui fournissent une grande bande passante et une faible atténuation. [16]

### 6.3 Systèmes radio-sur-fibre : avantages et limitations :

#### 6.3.1 Avantage des systèmes radio-sur-fibre :

La technologie RoF se distingue par son caractère hybride, combinant la communication optique et sans fil. Son principal atout réside dans sa capacité à fusionner les performances élevées de ces deux modes de communication [17], citons :

- Une large bande passante : On utilise les trois fenêtres de transmission à faible atténuation, à 850 nm, 1300 nm et 1550 nm, pour exploiter cette large bande passante. Dans le dernier cas, la transmission actuelle est efficace sur de grandes distances. La bande passante totale de ces trois fenêtres pour une fibre optique monomode dépasse 50 THz.
- Atténuation limitée : la transmission des signaux RF en espace libre ou par câble représente un coût élevé et en raison des pertes limitées, elle est coûteuse .Pour la fibre de silice, l'atténuation spécifique aux longueurs d'onde des télécommunications se situe entre 0,2 et 0,3 dB/km, ce qui contribue à améliorer la portée de la transmission radio.
- Afin de simplifier les BS, une BS peut simplement inclure un laser et une détectrice photo pour la conversion O/E et E/O, une amplification, un filtre RF et une antenne.
- Les systèmes RoF regroupent Les équipements complexes et onéreux au niveau du (SC), ce qui simplifie la centralisation des fonctions complexes. Ainsi, les éléments du SC sont répartis entre différents systèmes d'exploitation, ce qui permet de diminuer les dépenses liées à l'installation et à la maintenance du système.

#### 6.1.2 Limitations des systèmes radio-sur-fibre :

Bien que les systèmes RoF présentent de nombreux bénéfices, ils présentent certaines contraintes en raison de la nature analogique du signal micro-ondes généré par la liaison RoF. Ainsi, il est possible de restreindre le rapport signal/bruit (SNR), ce qui entraîne une diminution de la dynamique de la liaison. Cela peut être associé à :

- Le rapport signal sur bruit (SNR) pour les faibles puissances d'entrée RF du système RoF est principalement influencé par le bruit d'intensité relatif du laser, qui est principalement responsable du bruit additif de la liaison RoF. De plus, la photodiode peut également émettre un bruit de grenaille élevé dans certaines conditions de polarisation et à certains niveaux de puissances optiques émises.

- Concernant la non-linéarité due aux différents éléments de la liaison RoF pour les puissances d'entrée RF élevées, notamment la non-linéarité due au transducteur E/O. Ces non-linéarités entraînent des distorsions du signal transmis, ce qui limite la dynamique de la liaison.

- A Le produit distance-bande passante est limité par la dispersion chromatique de la fibre optique, ce qui entraîne une distorsion. Cette distorsion varie en fonction de la fréquence de modulation du signal RF et de la longueur de la fibre. Il existe également une dispersion modale dans les systèmes RoF utilisant des fibres optiques multimodes (MMF, Multi-ModeFiber).

## 7. Les architectures de la radio sur fibre :

Différentes configurations de topologies sont disponibles pour l'utilisation de la technologie radio sur fibre : Point à point et Point à multipoints. S'en intéresse surtout sur les réseaux FTTH (Fiber-to-the-Home) pour les architectures P2P et PON, qui est une technologie d'accès à Internet à haut débit qui permet de connecter les utilisateurs au réseau en utilisant une connexion à fibre optique.

### 7.1 Point à point :

Il est extrêmement facile de concevoir un système radio sur fibre point à point (P2P : Point To Point). Ce système extrait les informations du centre de réseau et les transforme en un signal radio. Ensuite, le signal est altéré dans l'axe photoélectrique, puis partagé par la fibre optique jusqu'au convertisseur installé dans une station client. Après y être arrivé, le signal est amplifié par un amplificateur de grande puissance avant d'être émis dans l'espace jusqu'au terminal visé.

Pour un réseau FTTH, une fibre optique dédiée et continue relie le Nœud de Raccordement Optique (NRO) à l'utilisateur final. Contrairement aux réseaux partagés, où plusieurs utilisateurs se partagent une même fibre, cette architecture offre une connexion exclusive et performante. La figure II.7 illustre cette architecture.

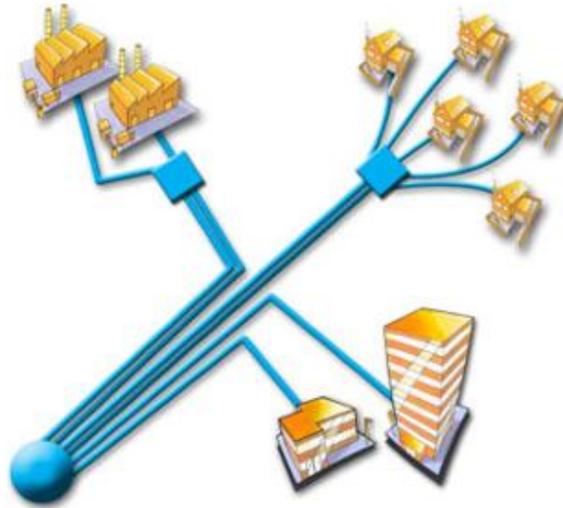


Figure2.7 : Architecture point à point

### 7.2 Architecture point à multipoints (PON):

L'architecture PON (Passive Optical Network) se caractérise par l'utilisation d'un système de couplage passif, comme un coupleur optique ou un splitter, pour distribuer le signal optique depuis un seul point (NRO) vers plusieurs utilisateurs. Cette technologie permet de connecter un grand nombre d'abonnés (jusqu'à 128) sur une même fibre optique, réduisant ainsi les coûts d'infrastructure et de maintenance.

Grâce à l'architecture point à multipoint, il est possible de partager une fibre optique sur une courte distance du réseau, puis de la diviser en plusieurs fibres sur une distance plus courte afin de desservir plusieurs abonnés, comme illustré dans la figure II.8. [14]

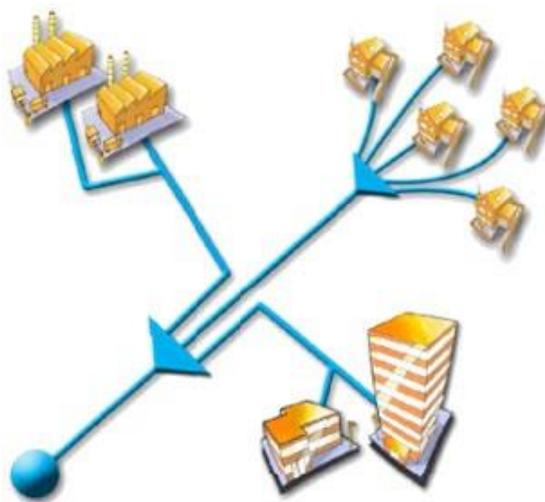


Figure 2.8 : Architecture point à multipoint

## 8. Techniques de transmission des signaux RF, IF et bande de base :

En général, les systèmes Radio sur Fibre sont divisés en trois types d'architecture de transport : Radio Fréquence (RF), fréquence intermédiaire (IF) et bande de base. La sélection de l'architecture influence la quantité de matériel nécessaire et sa complexité au niveau de la base station. Un système duplex complet a la possibilité d'utiliser les diverses architectures pour la liaison montante et la liaison descendante.

### 8.1 Transport de fréquence RF sur fibre :

**Principe :** La technique "radio sur fibre" consiste à transférer une porteuse optique modulée directement par un signal radiofréquence avec les informations sur une fibre optique. [20]

Au niveau des stations de base, cette méthode présente l'avantage que les signaux ne sont pas modifiés en termes de fréquence. Cette architecture est simple, ne nécessitant que des conversions électro-optiques et opto-électriques, une amplification RF, ainsi que des émissions et réceptions RF.

De plus, l'utilisation d'un contrôle centralisé pour le traitement des signaux facilite l'évolution du système.

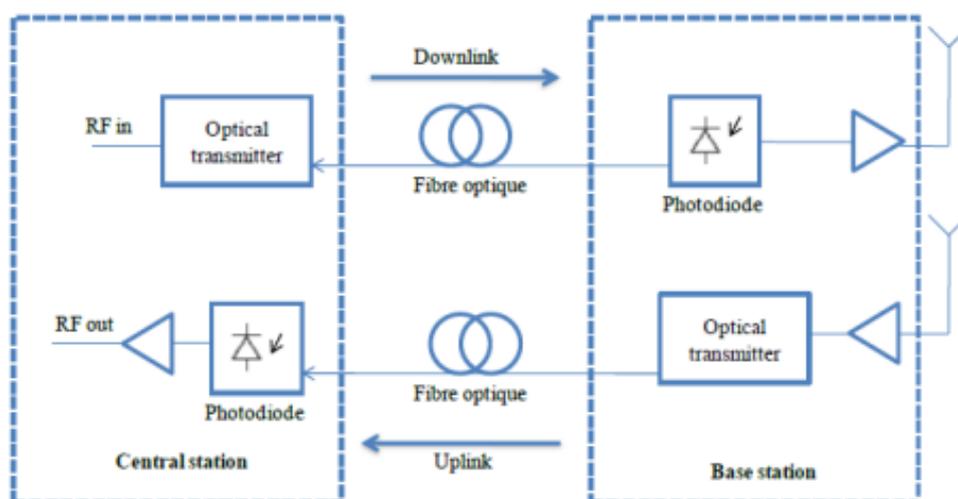


Figure 2.9 : Système RoF utilisant un transport de signal RF.

Néanmoins, un désavantage significatif réside dans le fait que plus la fréquence RF augmente, plus il devient compliqué d'envoyer directement le signal RF en raison des conséquences néfastes de la dispersion lamellaire. En outre, dans le secteur millimétrique (30-300 GHz), les coûts des composants optoélectroniques restent élevés.

### 8.2 Transport de fréquence IF sur fibre :

La transmission des signaux RF est facilitée grâce à l'architecture IF-sur-Fibre, qui réduit considérablement l'effet de la dispersion chromatique en présence des fibres. Les fréquences intermédiaires (IF) sont utilisées pour la transmission des signaux radio sur fibre, après avoir effectué une transposition de fréquence à la station de base.

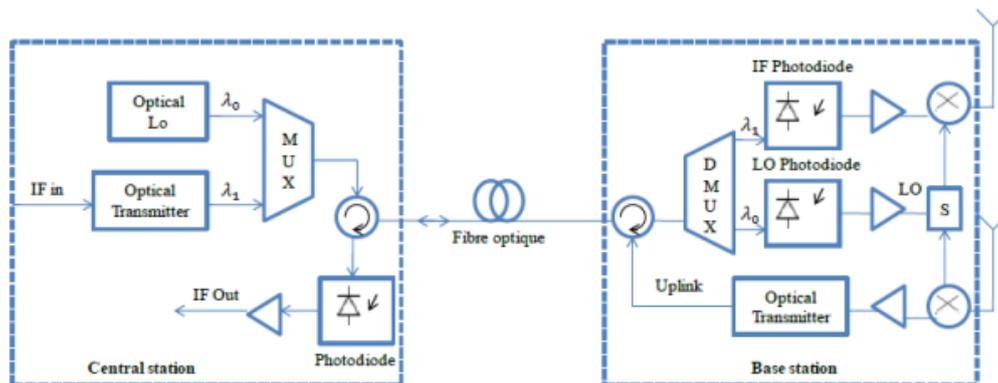


Figure 2.10 : Système RoF utilisant un transport de signal IF.

Les effets de la dispersion chromatique sont considérablement réduits par l'utilisation d'une fréquence de modulation intermédiaire dans le transport IF-sur-Fibre par rapport au transport RF-sur-Fibre. Ce système présente également un bénéfice en termes de coûts car il permet l'intégration de composants électroniques abordables, sur le marché, ils sont largement disponibles.

Cependant, cette architecture demeure plus complexe par rapport à l'architecture RF-sur-Fibre, car elle nécessite des oscillateurs locaux et des mélangeurs à chaque station de base pour réaliser les transpositions de fréquence. Il est toutefois possible de partager ces oscillateurs entre les liens montants et descendants [21].

### 8.3 Transport du signal en bande de base :

**Principe :** Dans cette configuration, nous avons une émission et une transmission d'un signal en bande de base par fibre optique depuis la station de contrôle jusqu'aux stations de base.[15]

Dans ce système, un laser est directement modulé par un signal électrique en bande de base, puis le signal optique résultant (connu sous le nom de "signal optique en bande de base") est transmis à travers une fibre. [22].

Au niveau de la station de base, le signal en bande de base est transmis à une porteuse RF (c'est-à-dire une onde millimétrique) avant d'être émis par l'antenne dans le lien descendant.

Le signal RF reçu par l'antenne doit, en revanche, être transformé en bande de base dans le lien montant avant d'être transmis à la station centrale. [15].

L'avantage majeur de cette approche réside dans sa capacité à diminuer de manière significative les conséquences de la dispersion en utilisant une transmission en bande de base. Cependant, cela nécessite des dispositifs électro-optiques à haute fréquence à un coût élevé, tels que les mélangeurs. [23].

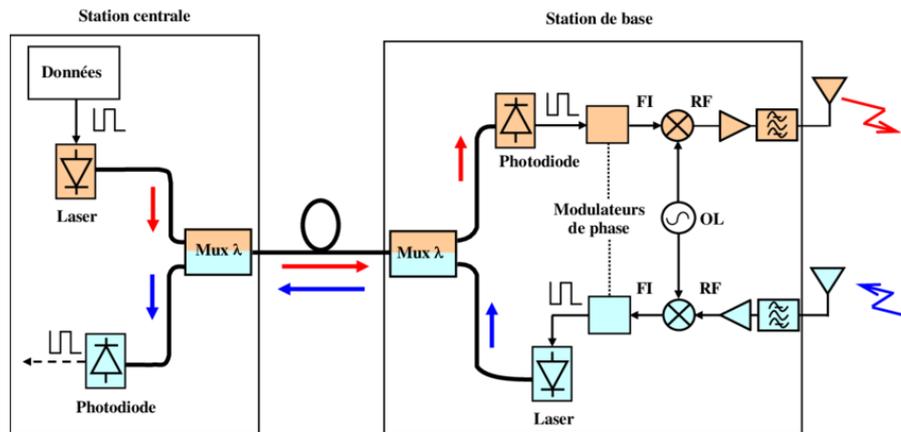


Figure 2. 11 : Transport en bande de base sur fibre optique

## 9. Les ondes Millimétriques (à 28 GHz) :

Les ondes millimétriques (mm) désignent les fréquences situées entre 30 GHz et 300 GHz. Dans ces fréquences, celles proches de 28 GHz sont de plus en plus utilisées dans le domaine des communications sans fil à haut débit. Il s'agit du candidat le plus sincère pour les technologies 5G à venir.

La bande 28 GHz est une bande d'onde millimétrique prometteuse pour une utilisation en 5G. Elle diminue considérablement lors de la propagation dans l'espace ouvert. Grâce à une large bande, Les systèmes de communication à ondes millimétriques offrent de multiples bénéfices Contrairement aux systèmes de communication déjà en place. En outre, étant donné que la bande centimétrique est plus large, la bande millimétrique est plus séduisante Puisque elle est largement accessible à travers le monde et n'est pas encore largement utilisée. [24].

Les ondes millimétriques offrent des fréquences porteuses plus larges, permettant une allocation de bande passante plus importante, ce qui se traduit par un débit de données nettement supérieur. [25].

Le développement des réseaux mobiles de nouvelle génération (5G et au-delà) nécessite une amélioration de la capacité de transmission RF, car la demande en données augmente

considérablement, Alors que la durée de latence du trafic numérique diminue de manière significative. Cela favorise une connexion Internet plus performante et des applications qui requièrent une latence minimale.

À cause de leur longueur d'onde beaucoup plus courte, les fréquences d'onde millimétriques offrent la possibilité d'utiliser la polarisation et des méthodes innovantes de traitement spatial, telles que la MIMO massive et la formation adaptative de faisceaux. À cause de cette nette hausse de la bande passante et des nouvelles caractéristiques des ondes millimétriques, les connexions entre les stations de base et les périphériques, ainsi que les connexions entre les stations de base, dans les zones à forte densité de population, ils pourront gérer une capacité bien supérieure à celle des réseaux 4G actuels. [26]

### **10. MIMO Optique :**

Le débit de données peut être augmenté uniquement en augmentant La dimension de la modulation ou la plage de fréquence employée dans un système mono-antenne. Malgré les difficultés de complexité ou de surcharge que cela engendre, Ils ont prouvé que les systèmes multi-antennes avaient une capacité qui augmentait de façon linéaire avec le nombre d'antennes émettrices, dépassant ainsi de façon significative la limite théorique de Shannon. [27].

Un avantage indéniable pour une communication sans fil performante est la résistance des systèmes multi-antennes aux évanouissements et aux interférences. Cette résistance accrue aux aléas de l'environnement permet de garantir une qualité de service optimale, même dans des conditions difficiles.

Les systèmes MIMO sont devenus l'un des domaines les plus intéressants pour les industriels, ces technologies sont perçues comme l'une des solutions potentielles pour faire face aux problèmes de surcharge et de limitation de capacité des réseaux sans fil à large bande.[28]

La fibre optique multimode (MMF) propose une large bande passante qui lui permet de proposer des services multiservices à haut débit dans les réseaux d'entreprise et en intérieur. Un multiplexage par diversité de groupes de mode (MGDM) peut être utilisé comme une base pour alimenter à la fois les services filaires et sans fil (IEEE 802.x) dans l'ensemble du bâtiment. Dans lequel plusieurs flux de données distincts sont en même temps multiplexés dans un canal spectral indépendant. Le débit peut être considérablement amélioré grâce au multiplexage par division spatiale SDM (Spatial Division Multiplexing), car le nombre de données spatiales résolues est plus élevé.

Notons que chaque antenne du système MIMO doit être équipée d'une chaîne radiofréquences RF et d'un convertisseur analogique-numérique séparé. Les configurations nécessitant plus de deux chaînes d'antennes RF doivent être étudiées de manière approfondie afin de maintenir des coûts abordables tout en satisfaisant les attentes en termes de performance. [29]

En outre, il serait possible de transmettre simultanément les signaux RoF indépendants sur la même fibre optique en utilisant le multiplexage par division de polarisation (PDM) ou le multiplexage par division en longueur d'onde (WDM). [30]

Nous sommes également intéressés par l'optimisation de ces systèmes, notamment l'allocation de fréquences optiques et la décomposition du canal MIMO optique, dans le but d'améliorer la capacité et/ou la qualité globale du système.

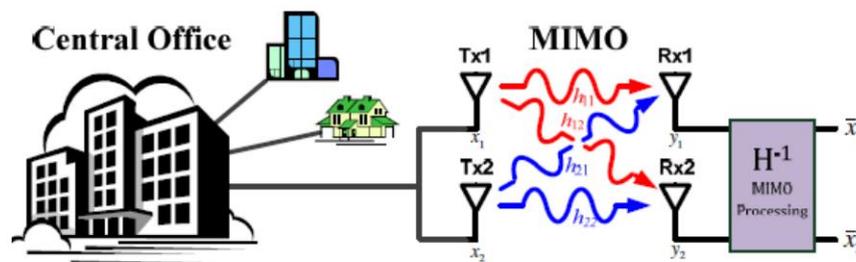


Figure 2. 12: Principe de la technologie MIMO optique [30]

Différentes recherches ont été publiées sur la technologie MIMO pour les systèmes RoF à 28 GHz. Les résultats mentionnés montrent néanmoins des débits de données inférieurs à 10 Gb/s, en raison de l'emploi de formats de modulation à faible efficacité spectrale. Comme la modulation on-off traditionnelle (OOK). Ainsi, il a fallu concevoir un système complexe de modulation pour assurer une communication à haut débit efficace. Afin d'assurer la solidité des liaisons sans fil face aux multiples trajets, en particulier en raison des réflexions des ondes sur les murs et les objets, des solutions sont suggérées qui utilisent le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence, comme l'OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

### 11. Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM) :

Les systèmes de communication sans fil utilisent fréquemment l'OFDM en raison de son efficacité pour résoudre les problèmes d'interférences entre symboles (ISI) causés par un canal dispersif.

Le principe de l'OFDM repose sur la division du signal numérique à transmettre sur un grand nombre de sous-porteuses. On pourrait le comparer à la combinaison du signal à transmettre

sur de multiples systèmes de transmission indépendants, chacun opérant à des fréquences porteuses distinctes.

Les fréquences porteuses orthogonales sont utilisées dans l'OFDM. Les signaux des différentes porteuses s'entrecroisent, mais l'orthogonalité leur permet de ne pas interférer. L'utilisation de l'orthogonalité offre également une grande efficacité spectrale, car la bande passante est presque totalement exploitée. Lorsque le canal de transmission comprend plusieurs chemins et que certaines fréquences seront affectées par la conjonction destructrice de voies, le système OFDM pourra tout de même recueillir les informations perdues sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été impactées. [31]

Récemment suggéré pour les systèmes de communications sans fil à venir, la technologie RoF a démontré une transmission via modulation par multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM) avec une fréquence caractérisée par une faible atténuation pour les services mobiles. Le RoF analogique a été étudié pour trouver une solution à l'architecture de réseau d'accès radio central afin d'obtenir un signal IF sur des fibres optiques en utilisant la technique de modulation d'amplitude en quadrature (QAM). [32]

## **12. Applications de la transmission radio sur fibre :**

### **12.1 Système de distribution vidéo :**

Les services de distribution vidéo multipoint (MVDS) constituent l'un des principaux domaines d'application prometteurs de la technologie RoF. Le réseau de transmission vidéo terrestre (MVDS) est un réseau de cellules. Les systèmes multimédias opèrent dans la plage de fréquences de 40 GHz.[33]

### **12.2 Réseaux locaux sans fil :**

Le réseau local sans fil sur technologie radio sur fibre est une méthode de communication sans fil utilisant des ondes radio pour transmettre les données entre les appareils connectés. Il offre une alternative pratique et efficace aux réseaux câblés traditionnels, permettant une flexibilité accrue et une meilleure mobilité des utilisateurs. En outre, cette technologie utilise la fibre optique pour relier les points d'accès, offrant ainsi un débit élevé de transmission des données et une meilleure sécurité. [34]

### **12.3 Réseaux cellulaires :**

Un réseau sans fil de télécommunications est un réseau de cellules partageant une même zone de protection. La station de base de chaque cellule est équipée d'antennes qui transmettent et reçoivent des signaux radio. Grâce à l'utilisation de fréquences radio spécifiques, ces cellules permettent de couvrir une vaste étendue géographique afin d'éviter les interférences. [35]

La technologie RoF s'avère être une solution prometteuse pour les réseaux mobiles, lesquels voient une augmentation continue du nombre d'abonnés et de la demande en services à large bande passante. [36]

#### **12.4 Service mobile haut débit :**

Le Mobile Broadband System (MBS), également connu sous le nom de système de large bande mobile, a pour objectif d'élargir Les services à grande échelle fixes aux utilisateurs de tous types de téléphones portables [37].

L'objectif est de proposer un débit très élevé de plusieurs Gbps par utilisateur, avec des fréquences allant de 57 GHz à 63 GHz. La station de base peut être reliée par fibre optique à des microcellules dont le diamètre peut atteindre plusieurs centaines de mètres. La mise en place de la technologie RoF pour produire des ondes millimétriques faciliterait l'organisation des stations de base, diminuant ainsi leurs dépenses de production et de maintenance, ce qui rendrait l'installation des réseaux MBS économiquement rentable.

#### **12.5 Mobiles de 5ème génération :**

C'est la nouvelle génération de communication mobile (5G), qui fait encore face à de nombreux défis techniques. La technologie RoF est considérée comme l'une des solutions les plus efficaces pour diminuer la taille des cellules de couverture. Les fonctions de traitement du signal peuvent être transférées vers une station de contrôle centralisée grâce à la bande passante ultralarge de la fibre optique. Les dispositifs onéreux et complexes peuvent être regroupés au sein de cette station grâce à la technologie RoF, ce qui facilite la création compacte et économique des unités d'accès à distance (RAU : Remote Access Unit).

Ainsi, la technologie RoF permet d'accéder à divers systèmes sans fil, tels que la 3G, la 4G, les réseaux sans fil, les systèmes de diffusion multimédia numérique et le B3G (systèmes en dehors de la 3G). [37]

### **13. Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré à l'étude de l'état actuel de la Radio sur Fibre, ainsi que les systèmes de transport de données par onde millimétrique de 28 GHz, les systèmes de transport et les différents signaux RF utilisés la fibre ainsi que ses applications. La radio sur fibre est perçue comme l'une des technologies envisageables qui pourraient être utilisées pour mettre en place les architectures distribuées envisagées pour le réseau d'accès 5G.

Dans le chapitre qui suit on va faire une étude détaillée sur ce système de transport, avec des données millimétrique à 28 GHz, où la liaison sera présentée en détail.

***CHAPITRE 03***  
***Résultats de Simulation***

## 1 Introduction :

Le développement très rapide des systèmes de communication optique s'accompagne ces dernières années d'une complexité accrue, exigeant des outils d'analyse sophistiqués. Optisystem se présente comme une solution puissante permettant aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, d'analyser et de concevoir avec précision chaque élément d'un système optique, du composant le plus simple au réseau le plus complet.

Au cours de ce chapitre, nous allons tout d'abord introduire le logiciel Optisystem en décrivant son interface, sa bibliothèque et son éditeur de conception. Par la suite, une analyse approfondie sera réalisée sur un système radio sur fibre (RoF) destiné aux applications sans fil (5G).

## 2 Introduction au logiciel OptiSystem [38]:

OptiSystem est un logiciel développé par Optiwave, une entreprise canadienne, qui offre aux ingénieurs et aux chercheurs la possibilité de la création, l'étude et la simulation de systèmes de transmission optique. L'ajout de fonctions réalisées par l'utilisateur et qui peuvent être intégrées aux systèmes simulés permet d'élargir la variété des systèmes simulés.

OptiSystem (figure 1.3) est basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications par fibres optiques et permet de tester et d'optimiser pratiquement n'importe quel type de liaison optique.

L'interface OptiSystem est composée d'une fenêtre principale divisée en différentes parties :

- Bibliothèque : une collection de différents éléments.
- Le logiciel d'édition du lay-out permet de modifier et de configurer le schéma en cours de conception.
- Projet en cours : affichage des différents fichiers et éléments liés au projet en cours.

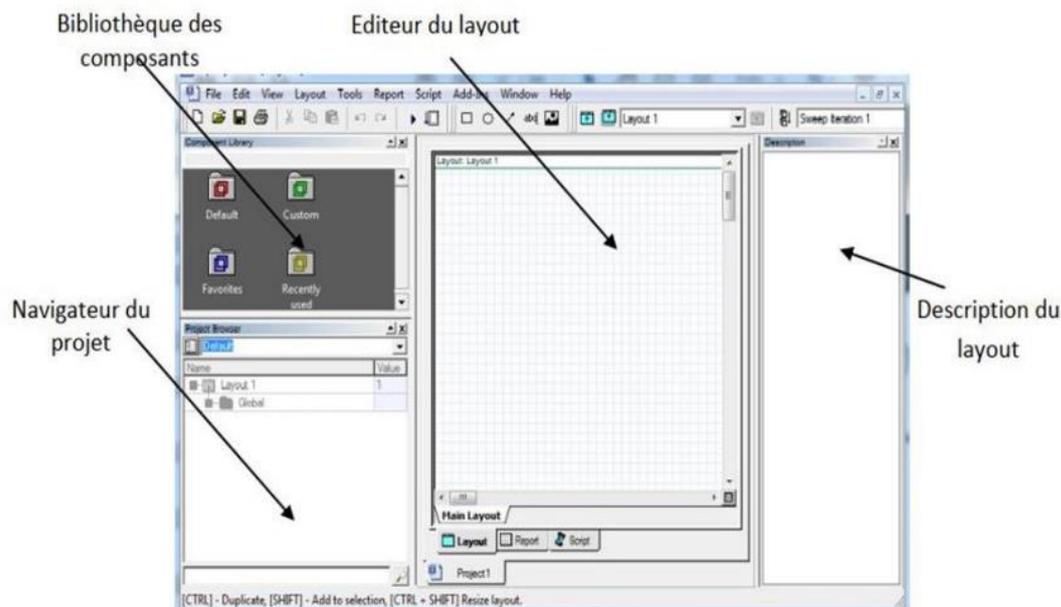


Figure3.1 : Illustration de l'interface Optisystem

### 3 Les caractéristiques du logiciel OptiSystem [39] :

- Les éléments numériques de la bibliothèque simulent fidèlement le comportement et l'effet des composants réels, avec une précision et une efficacité configurable.
- La bibliothèque de composants permet d'intégrer des paramètres mesurables à partir de périphériques réels.
- Les outils de visualisation avancée offrent une large gamme d'analyses, incluant le SAOS spectral, le signal sonore, les diagrammes de l'oeil, l'état de la polarisation, les constellations et bien plus encore.
- Il est possible de connecter un nombre illimité de visualiseurs sur le même port du moniteur.
- L'état de l'art en matière de calcul de flux de données repose sur un ordonnancement intelligent des modules composants, piloté par un calcul planificateur qui optimise l'exécution en fonction des données sélectionnées

### 4 Applications du logiciel OptiSystem [39]:

- Élaboration d'un système de communication optique dans le domaine du composant.
- Système physique de la couche Création de réseaux CATV ou TDM / WDM
- FTTx utilisant des réseaux optiques passifs (PON)
- Systèmes optiques en espace libre (FSO)

- Radio sur fibre (ROF)
- Conception de l'anneau SONET / SDH
- Émetteur, canal, amplificateur et récepteur
- Carte de dispersion Analyse du BER et des sanctions du système en utilisant divers modèles de récepteur.
- Amélioration du système BER et calcul du budget de liaison. Transmettre un seul mode ou plusieurs.
- L'amplification et les lasers (EDFA, SOA, Raman, hybride, optimisation GFF, lasers à fibre)
- Le traitement du signal (électrique, numérique, tout optique).
- Élaboration du sous-système entre l'émetteur et le récepteur (direct/consistant)
- Différents types de modulation (RZ, RZ...).
- Évaluation des résultats du système (diagramme de l'œil / facteur Q / BER, puissance du signal / OSNR, états de polarisation, diagrammes de constellation, pénalités linéaires et non linéaires)

### **Avantages du logiciel OptiSystem [38] :**

- Découvrir les caractéristiques du système de fibre optique.
- Offrir une possibilité d'accéder directement à des ensembles de données de caractérisation.
- Visualisation des différentes possibilités de conception.
- Le processus de simulation d'un système optique se divise en deux étapes :
  - o Élaborer le schéma en bloc.
  - o Étudier le diagramme.

## **5 Évaluation de la qualité de la transmission (critères et méthodes):**

Il existe divers critères afin de mesurer la qualité d'une transmission optique. Le diagramme de l'œil, le taux d'erreur binaire BER et le facteur de qualité Q sont les trois critères principaux de qualité d'un signal.

### 5.1 Taux d'erreurs binaires (TEB ou BER)

Le Bit Error Rate (BER), ou taux d'erreurs binaires, est une évaluation de la qualité d'une transmission optique. Il est calculé en analysant la série de données binaires émises à celle reçue, ce qui correspond au rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total de bits transmis :

$$BER = \frac{\text{Nombre de bit érronés}}{\text{Nombre de bit transmis}} \quad [3.1]$$

En télécom optique, on considère généralement qu'un système est de bonne qualité lorsque son taux d'erreur binaire BER est inférieur à  $10^{-9}$  ou à  $10^{-12}$ .

### 5.2 Facteur de qualité

Le facteur de qualité (Q) est un indicateur qui offre la possibilité de mesurer et d'évaluer la qualité d'un signal numérique sans avoir à comptabiliser les erreurs [30].il qui s'appuie sur les statistiques du bruit affectant les niveaux "1" et "0" du signal. Il permet d'estimer le taux d'erreur binaire (TEB) sans avoir à le calculer directement, en se basant sur l'amplitude moyenne et l'écart-type du bruit pour chaque niveau logique.

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad [3.2]$$

Les valeurs moyennes du niveau « 1 » et « 0 » sont les écarts-types du bruit sur le signal des symboles « 1 » et « 0 », respectivement.

### 5.3 Diagramme de l'œil :

Le schéma de l'œil est une méthode « visuelle » pour évaluer la qualité d'un signal. Tous les symboles binaires sont superposés pour former le signal émis. Le diagramme de l'œil est plus ouvert lorsque le signal est de bonne qualité, ce qui entraîne une augmentation du facteur de qualité, ce qui facilite la détection du signal sans erreur. Ainsi, la représentation visuelle de l'œil est un outil très performant pour évaluer la qualité du signal en mesure de mesurer la réponse de la photodiode et de l'oscilloscope utilisés.

## 6 Objectif du travail :

Le but de cette étude est d'évaluer l'impact de la haute plage dynamique sur la diffusion des signaux 5G/NR à 28 GHz. Nous souhaitons analyser comment cette plage dynamique influe sur la qualité de la diffusion et identifier des solutions pour l'améliorer, afin d'optimiser les performances des réseaux 5G/NR. Cette recherche vise à fournir des données pertinentes pour les opérateurs de télécommunications et les fabricants d'équipements, afin de les aider dans le développement et le déploiement des réseaux 5G/NR à 28 GHz.

## 7 Contexte de la diffusion de signaux 5G/NR à 28 GHz :

La diffusion de signaux 5G/NR à 28 GHz fait partie des initiatives visant à exploiter les hautes fréquences pour répondre aux besoins croissants de connectivité. Les fréquences plus élevées offrent une plus grande bande passante et une capacité accrue, ce qui permet de prendre en charge des applications à haut débit, telles que la diffusion de vidéos haute résolution et les communications à faible latence. Toutefois, ces niveaux de fréquence plus élevés posent également des défis en termes de propagation des signaux, d'atténuation atmosphérique et d'interférences, d'où l'importance de la plage dynamique élevée pour assurer une diffusion de signaux fiable et de haute qualité.

## 8 Importance de la plage dynamique élevée :

La plage dynamique élevée joue un rôle crucial dans la diffusion de signaux 5G/NR à 28 GHz. En raison de la nature des fréquences élevées, les signaux sont plus sensibles aux perturbations et aux atténuations. Une plage dynamique élevée permet de compenser ces pertes et d'assurer une réception de qualité des signaux, même dans des conditions difficiles. Cela est essentiel pour garantir une expérience utilisateur optimale, spécialement pour les utilisations qui exigent des vitesses élevées, une faible latence et une qualité d'image et de son élevée. Une plage dynamique élevée est donc un critère clé dans la conception et la mise en œuvre de réseaux 5G/NR à 28 GHz.

## 9 Architecture radio sur fibre pour signaux 5G/NR à 28 GHz :

La figure 3.2 illustre la structure globale de notre connexion RoF, avec une conversion d'onde millimétrique de 28 GHz à l'aide de 2 modulateurs Mach-Zehnder (MZM), sous le logiciel Optisystem. Elle est composée d'une partie émettrice, d'un canal de transmission et d'une partie réceptrice.

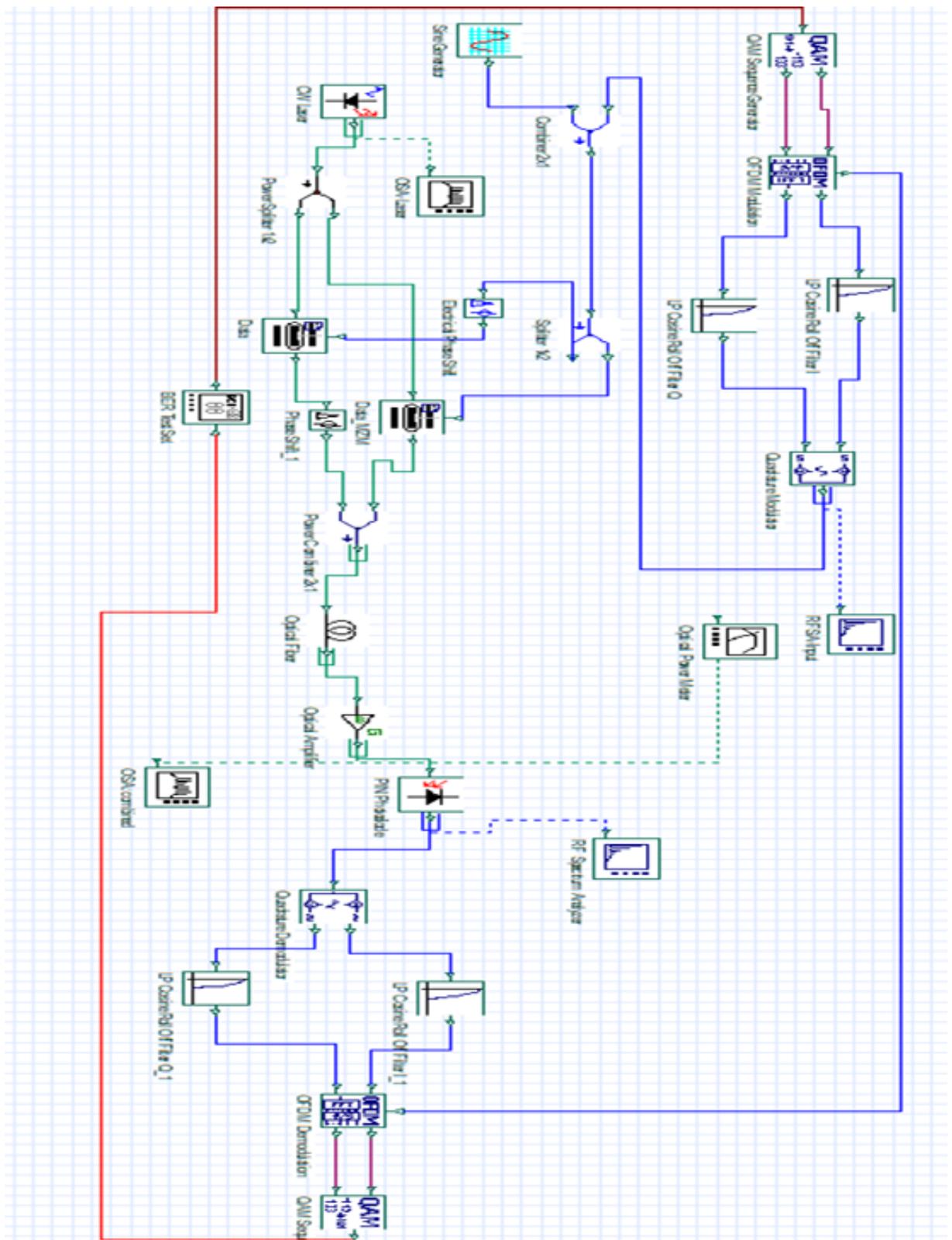


Figure3.2 : illustration de l'application Radio sur fibre

Dans ce qui suit, nous allons présenter les différents éléments de la liaison, depuis la partie émission jusqu'à la partie réception.

➤ **Partie émission :**

La partie émission est représentée sur la figure 3.3, le schéma est composé d'un modulateur de Mach Zender, qui a comme entrée un signal optique provenant d'un laser continu (CW Laser) et une deuxième entrée électrique qui provient d'une combinaison de deux signaux. Le premier signal est sinusoïdal et le second un signal informatif via du modulateur en quadrature.

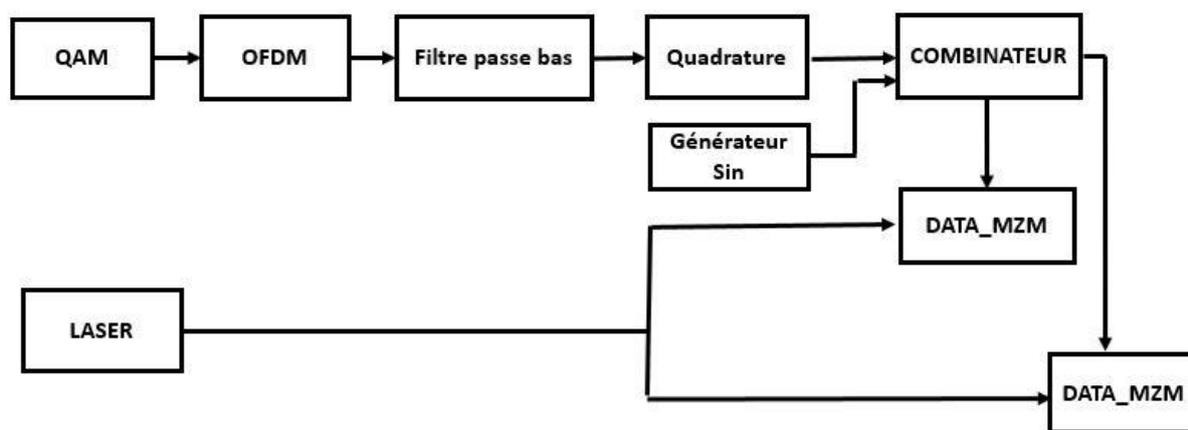


Figure3.3 : Schéma général d'émission

Comme la montre la figure ci-dessus, on génère d'abord une séquence QAM. Un générateur de séquence QAM est un équipement électronique utilisé pour générer des séquences de symboles QAM. La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est une technique de modulation largement utilisée dans les systèmes de communication numérique. Ce générateur permet de produire des signaux QAM avec différentes constellations Les caractéristiques de ce modulateur sont récapitulées dans le tableau suivant.

<b>Nombre des bites par symbole (bit/sym)</b>	6 bits
<b>Type de constellation</b>	Rectangulaire

Tableau 3.1 : Caractéristique du modulateur QAM

La sortie du générateur QAM est reliée à un modulateur OFDM. Un signal numérique est modulé par cette composante en plusieurs sous-porteuses orthogonales. Les paramètres spécifiques du modulateur OFDM sont récapitulés de la manière suivante :

<b>Nombre de sous-porteuses</b>	2048 sous-porteuse
<b>Numéro de point de préfix</b>	100

<b>Puissance moyenne</b>	10 dBm
<b>Emplacements des sous-porteuses</b>	424 1200

Tableau 3.2 : Caractéristique du modulateur OFDM

Le modulateur OFDM est reliée à deux filtres passe bas qui sont des dispositifs électroniques permettant de laisser passer les fréquences basses d'un signal tout en atténuant les fréquences plus élevées. Ce filtre est souvent utilisé dans le traitement des signaux audio et télécommunication pour améliorer la qualité et réduire les interférences.[26]

<b>Fréquence de coupure</b>	33* Symbol rate Hz
<b>La profondeur</b>	80 dBm
<b>Le facteur de roll</b>	0.25

Tableau 3.3 : Caractéristique du filtre passe bas

La sortie des deux filtres passe ensuite par un modulateur en quadrature, qui consiste à moduler simultanément deux signaux, appelés signaux en phase et en quadrature de phase, pour transmettre des informations numériques ou analogiques.[27]

<b>La fréquence</b>	<b>12 GHZ</b>
<b>Le Gain</b>	<b>1</b>

Tableau 3.4 : Caractéristique du modulateur quadratique

La sortie du modulateur en quadrature va être combinée avec une sortie d'un générateur sinusoïdal puis reliés à un Modulateur Mach-Zehnder, qui est un dispositif optoélectronique qui utilise les principes de l'interférométrie pour moduler, ou contrôler, l'intensité d'un signal. Après avoir utilisé une modulation directe du courant d'alimentation de CW Laser, on peut moduler les symboles OFDM en enregistrant les données électriques sur un signal optique.

Et puis la sortie du Modulateur Mach-Zehnder est reliée à un laser continu (cw) qui est un type de laser qui émet une lumière constante pendant une durée indéfinie. Il diffère des lasers pulsés qui émettent des impulsions de lumière sur de courtes périodes. Il examine également les différentes caractéristiques du laser cw telles que la puissance de sortie, la longueur d'onde, la stabilité de fréquence et la durée de vie de l'appareil.[28]

<b>Fréquences (longueur d'onde)</b>	<b>1548.51 (nm)</b>
<b>Puissance d'émission</b>	<b>15 dBm</b>
<b>Largeur de raie</b>	<b>5 MHz</b>

Tableau 3.5 : Caractéristique du laser

La visualisation du spectre fréquentiel (figure 3.4) en sortie des lasers, La largeur spectrale du laser et le niveau de puissance optique en sortie sont mis en évidence.

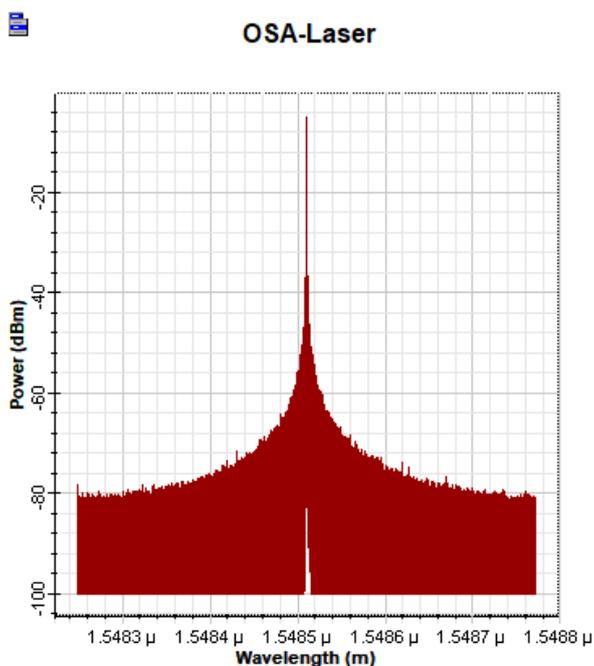


Figure 3.4 : Spectre de sortie du laser

➤ **Le canal de transmission :**

La sortie du modulateur MZM est liée à une fibre optique monomode reliés à un amplificateur optique Afin d'optimiser la puissance, les paramètres de la fibre et de l'amplificateur sont résumés dans les tableaux ci-dessous :

<b>Longueur</b>	12 Km
<b>Atténuation</b>	0.2 dB/km
<b>Dispersion</b>	14ps/nm/km
<b>Longueur d'onde de référence</b>	1548.51 nm

Tableau 3.6 : Caractéristique de la fibre optique

<b>Gain</b>	<b>13 dB</b>
<b>La puissance de bruit</b>	<b>10 dB</b>

Tableau 3.7: Caractéristique de l'amplificateur

➤ **Partie réception**

Le schéma bloc de la partie réception est illustré dans la figure 3.5. Dans cette partie, les données sont captées, les opérations sont effectuées en utilisant une démodulation en quadrature, puis en utilisant un démultiplexage OFDM, suivi d'un décodeur QAM pour récupérer les données transmises.

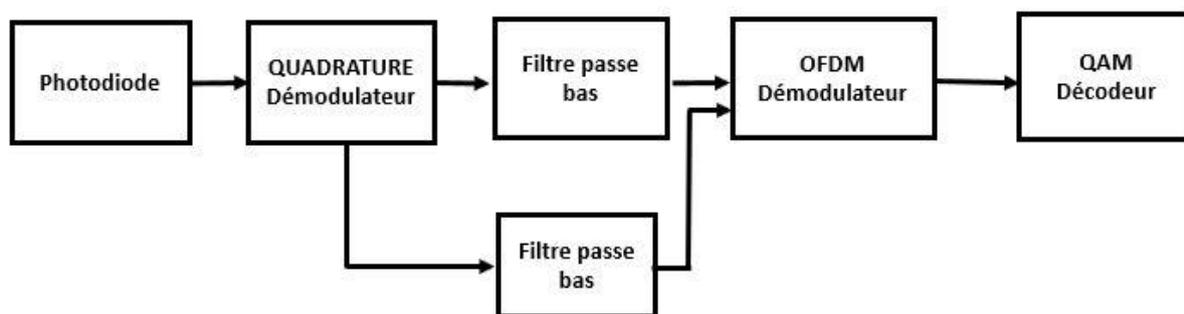


Figure3.5: Schéma bloc la partie réception.

Le photodétecteur utilisé est une photodiode PIN, pour détecter le signal. Le tableau suivant récapitule les paramètres utilisés :

<b>Rendement</b>	0.8 A/W
<b>Courant d’obscurité</b>	10 nA
<b>Bruit Thermique</b>	100e-024W/Hz
<b>Largeur de bande de modulation</b>	40 MHz
<b>La fréquence centrale</b>	193.1THz

Tableau 3.8: Caractéristique de la photodiode

Le photodétecteur est relié à un décodeur QAM qui permet de **décoder** un signal numérique modulé en QAM, Il transforme un signal binaire en deux séquences de symboles M-aires QAM parallèles.

Le signal émis par le décodeur QAM est ensuite filtré par deux filtres passe bas Afin de supprimer le bruit ajouté dans la fibre optique. Puis la sortie des deux filtres est reliée à un démodulateur OFDM pour **démoduler** le signal OFDM reçu afin de récupérer les données numériques originales. Ces propriétés comprennent :

<b>Nombre de sous-porteuses possibles</b>	<b>2048</b>
<b>Référence bit rate</b>	<b>Bit rate * 1200 / 2048 bit/s</b>
<b>Longueur de propagation</b>	<b>0.1 Km</b>

Tableau 3.9 : Caractéristique du démodulateur OFDM

La sortie du démodulateur OFDM est finalement connectée à un démodulateur en quadrature pour transformer le signal optique en radiofréquence, incluant la séparation entre les symboles réels et imaginaires (I/Q). Le tableau ci-dessous résume les paramètres utilisés.

La fréquence	28 GHz
Le gain	100
fréquence de coupure du filtre	50 MHz

Tableau 3.10 : Caractéristique du démodulateur quadratique

### 10 Simulation obtenue :

Au sein de cette partie, nous allons évaluer Les résultats de performance de notre système RoF.

Le spectre du signal RF émis après modulation en quadratures est illustré dans les figures (3.7 (a)) et (3.7 (b)).

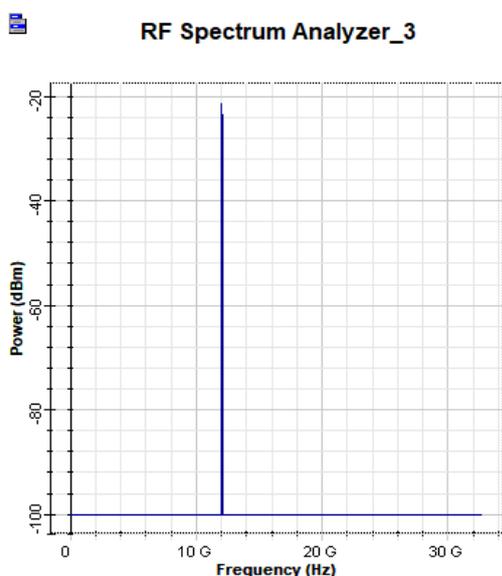


Figure3.7(a): Spectre du signal RF

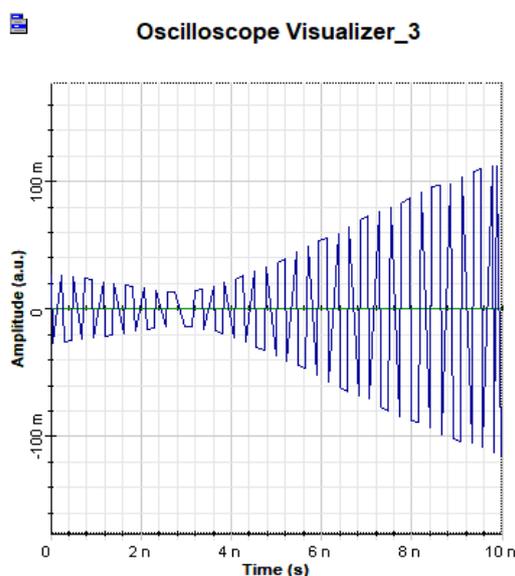


Figure3.7(b): Signal RF

Le spectre du signal RF émis après modulation en quadrature (QAM) et du signal RF dans le contexte d’une transmission sans fil est essentielle pour comprendre la bande passante occupée par le signal et pour évaluer la qualité de la transmission.

Le signal RF avant la modulation en quadrature, est généralement une onde porteuse sinusoïdale à une fréquence de base. Son spectre est caractérisé par une seule raie à la fréquence de la porteuse, avec une puissance concentrée autour de cette fréquence, après la modulation en quadrature, le spectre du signal RF devient plus complexe. Pour un signal QAM, le spectre est composé de plusieurs raies de fréquences différentes, chacune portant une partie de l’information modulée. Les raies sont généralement symétriquement réparties de part et d’autre de la fréquence de la porteuse. Ensuite l’occupation de la bande passante par le signal modulé en quadrature dépend

du nombre de raies présentes dans le spectre, une bande passante plus large est nécessaire pour accommoder des signaux QAM avec un plus grand nombre d'états de modulation.

La conversion du signal RF OFDM en signal optique dans une plage de 1552.52 nm (193,1 THz) est effectuée à l'aide de deux modulateurs externes MZM. L'un reçoit une commande RF de 28 GHz tandis que l'autre est commandé par le signal informatique OFDM. En fournissant une puissance de 15 dBm. La figure 3.8 (a) et 3.8 (b) présentent le signal obtenu dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel.

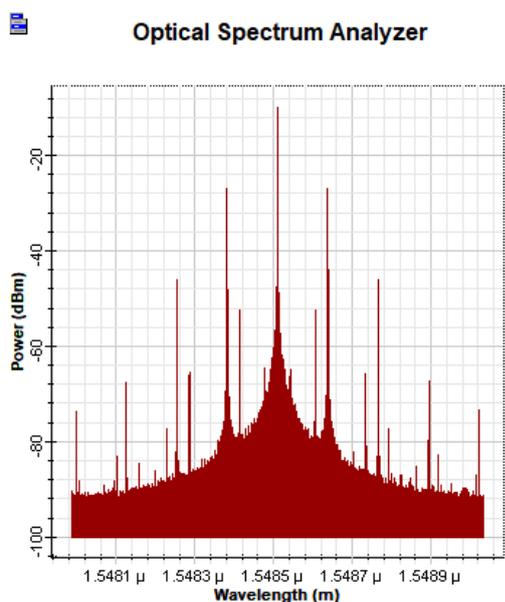


Figure 3.8(a): Spectre à la sortie du MZM

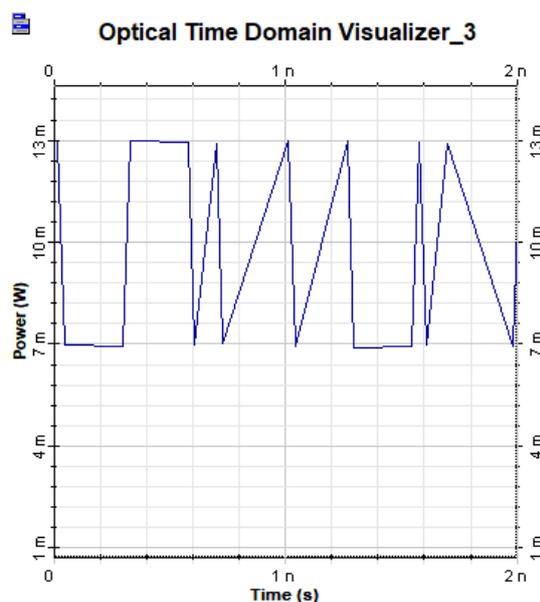


Figure 3.8(b): Signal à la sortie du MZM.  
(Représentation temporel).

Un modulateur Mach-Zehnder externe est un dispositif optoélectronique utilisé pour moduler un signal optique en fonction d'un signal électrique appliqué. à l'aide de 2 modulateurs MZM, chacun recevant un signal de commande différent : l'un à partir du signal RF à 28 GHz et l'autre à partir du signal informatique OFDM.

Le signal RF-OFDM à 28 GHz est appliqué en tant que signal de commande à l'un des modulateurs MZM. Cela entraîne une modulation du signal optique par le signal RF

. Le signal informatique OFDM est appliqué en tant que signal de commande de l'autre MZM. Cela module également le signal optique, avec les données de l'OFDM. Après les deux signaux modulés sont ensuite combinés optiquement, ce qui multiplexe les informations RF et OFDM sur le même support optique. Le signal optique multiplexé peut maintenant être transmis sur une fibre optique ou tout autre support de transmission optique approprié. Avec une bande passante étendue de la modulation OFDM et de la haute fréquence du signal RF à 28 GHz, ce

système est adapté à des applications nécessitant une transmission à haut débit et à large bande passante.

Après une transmission sur une distance de 25 km, le signal reçu est représenté (représentation temporelle et fréquentielle) sur les figures 3.9(a) et 3.9(b).

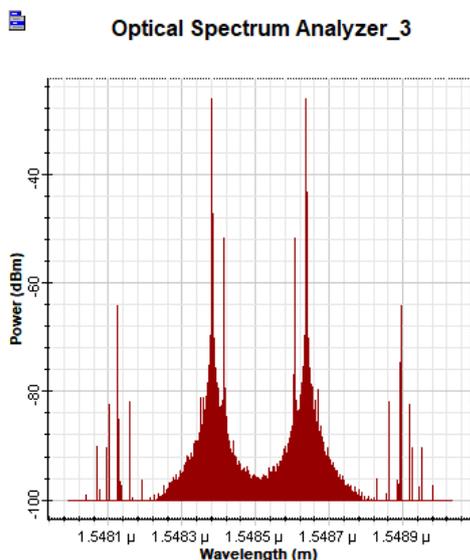


Figure 3.9(a): Spectre à la sortie de la fibre

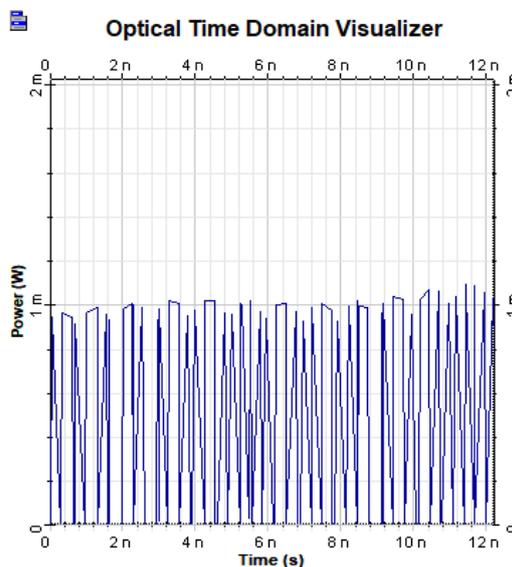


Figure 3.9(b). Signal à la sortie de la fibre  
(Représentation temporel).

Le signal reçu de sortie de l'amplificateur est donné par les figures 3.10(a) et 3.10(b).

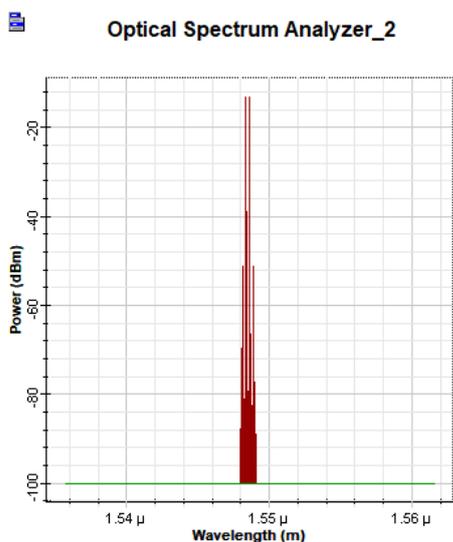


Figure3.10(a) : Spectre à la sortie  
d'amplificateur

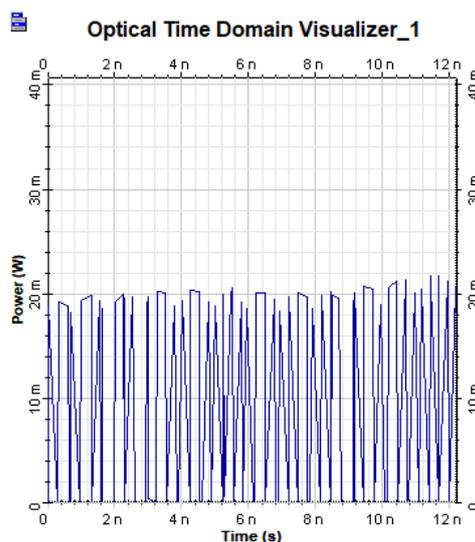


Figure3.10(b) : Signal de sortie d'amplificateur  
(Représentation temporel).

Les données sont converties en utilisant une photodiode en énergie optique et électrique. La sortie de la photodiode est illustrée dans les figures 3.11(a) et 3.11(b).

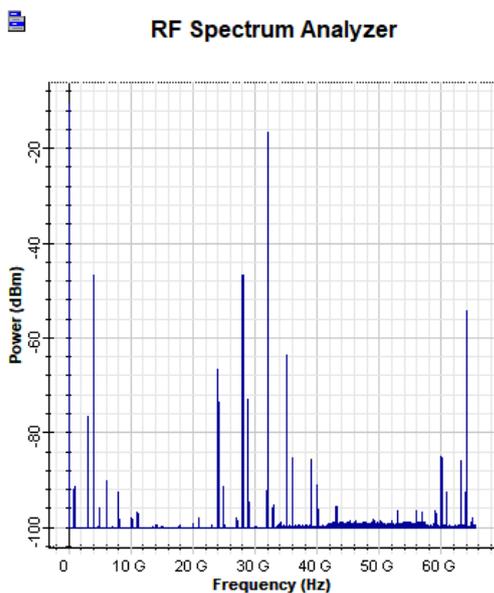


Figure 3.11(a) : Le spectre à la sortie de la photodiode

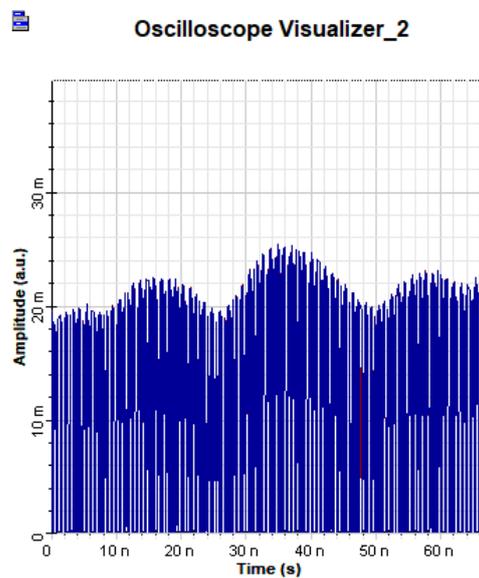


Figure 3.11(b) : Signal de sortie de la photodiode (Représentation temporel).

Le spectre électrique à la sortie de la photodiode reflète les caractéristiques du signal optique composite après sa conversion en signal électrique. Il présente une série de composantes correspondant aux différentes fréquences, présentes dans le signal optique modulé. Les composantes à fréquences élevée, correspondent aux informations RF modulées sur la porteuse optique, tandis que les composantes à fréquences plus basses, correspondent aux sous-porteuses OFDM. Permettant ainsi d'évaluer la distribution spectrale du signal électrique, mettant en évidence l'intégrité des informations RF et OFDM. Un pic net et bien défini à la fréquence RF de 28 GHz témoigne de la présence du signal RF, tandis que la répartition régulière des sous-porteuses OFDM révèle la transmission efficace des données OFDM. En conclusion le spectre à la sortie de la photodiode fournit des informations essentielles sur la qualité de la transmission optique et la fidélité de la conversion en signal électrique, Cela favorise l'amélioration des performances du système de communication optique afin d'assurer une transmission efficace.

Les informations sont collectées et traitées en utilisant une démodulation RF, suivie d'une démodulation en quadrature, d'une démodulation OFDM et d'un encodage QAM pour récupérer les informations. Les figures ci-dessous présentent les spectres de la sortie du démodulateur en quadrature.

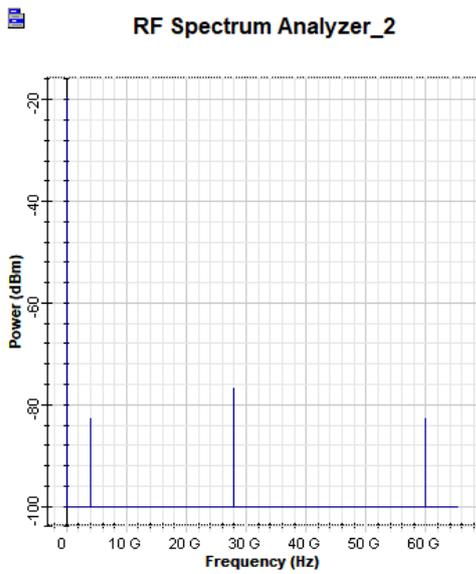


Figure 3.12(a): Le spectre à la sortie de démodulateur en quadrature

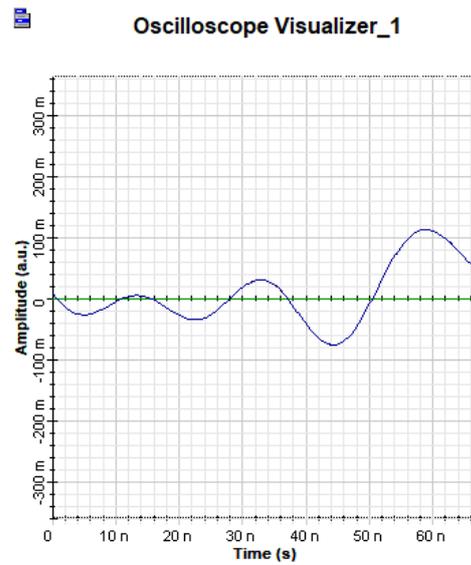


Figure 3.12(b): Le signal à la sortie de démodulateur en quadrature (Représentation temporel).

- **Impact de l'évolution de la puissance du laser :**

Le tableau 3.11 représente la variation du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la puissance laser.

<b>P (dBm)</b>	5	10	15	20	25
<b>BER</b>	0	0	0	0	0.4306

Tableau 3.11 : Variation de BER en fonction de puissance

On constate une relation entre la puissance du laser et le taux d'erreur binaire. à des niveaux de puissances plus faibles, le taux d'erreur binaire reste négligeable. Cependant, à mesure que la puissance du laser augmente, le taux d'erreur binaire commence à augmenter également avec une augmentation significative à 25 dbm de puissance. Cela suggère que la puissance du laser peut avoir un effet important sur la précision ou la fiabilité du système.

- **Effet de variation de la distance de fibre optique**

Le tableau 3.12 représente la variation du taux d'erreur binaire (BER) et du gain en fonction de la distance de la fibre optique.

<b>Distance (Km)</b>	12	16	20	24	28	32
<b>Gain</b>	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4
<b>BER</b>	0	0	0.00027	0.0022	0.015	0.273

Tableau 3.12: Variation de BER et GAIN en fonction de distance de fibre.

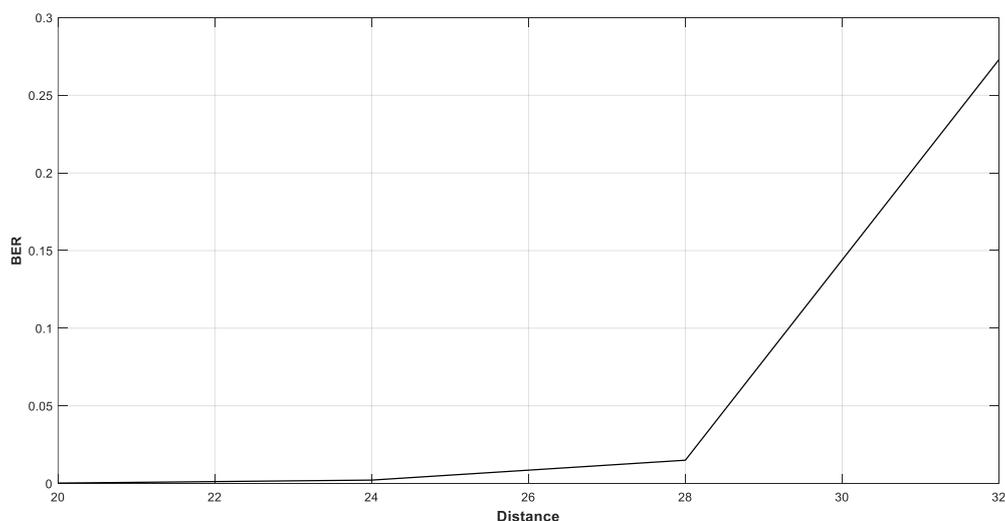


Figure 3.13: BER en fonction de la distance.

Suite aux résultats obtenus., on remarque l'augmentation du BER en fonction de la distance de la fibre, à mesure que le signal se propage sur une grande distance, il subit une atténuation, et rend plus difficile la détection précise des bits, la dispersion chromatique peut se produire lorsque différents composants de la lumière se déplacent à des vitesses légèrement différentes à travers la fibre, les effets non linéaires tels que modulation de phase et la diffusion peuvent devenir perturbant ainsi que la transmission du signal et augmentant le BER.

Le taux d'erreur binaire semble augmenter non linéairement avec la distance de la fibre.

Cela suggère qu'il y a des limites à la distance sur laquelle le système peut maintenir un faible taux d'erreur, malgré l'augmentation du gain d'amplification.

Le BER reste nul pour les distances de 12 Km et 16 Km , ce qui signifie qu'il n'y a pas d'erreurs détectées, entre 20 km et 24 km les erreurs commencent à apparaître , mais elles restent relativement faibles, au-delà de 24 km, la qualité du signal se dégrade rapidement, rendant la transmission de données de plus erronée et peu fiable à 32 km.

## 11 Conclusion :

Nous avons étudié la qualité de transmission d'une liaison RoF dans ce chapitre, pour les réseaux 5G en utilisant le logiciel Optisystem. Les différents paramètres tels que la longueur de la fibre optique et la puissance du laser ont été pris en considération. L'emploi de la fibre optique présente des bénéfices importants en ce qui concerne le débit, de latence réduite et de fiabilité ce

qui en fait un choix optimal pour répondre aux exigences croissantes des réseaux 5G, En outre une étude met en évidence la plage dynamique élevée permet de garantir une transmission efficace des données sur des fréquences élevées. Ainsi la combinaison de la transmission radio sur fibre et la plage dynamique élevée offre une solution prometteuse pour répondre aux besoins de connectivité avancée des réseaux 5G.

*Conclusion générale*

*Conclusion générale*

### *Conclusion générale*

La technologie la plus récente en matière de radio sur fibre témoigne d'un intérêt renouvelé pour ce domaine prometteur, qui rentre dans le cadre des communications sans fil et des télécommunications optiques. L'accent est mis sur les performances des éléments, l'amélioration globale du système et la création de nouvelles applications, telles que l'intégration de nouveaux réseaux sans fil.

Toutefois, la technologie de la fibre optique et les ondes millimétriques (mm) peuvent potentiellement offrir une capacité de données d'environ Mb/s et Tb/s, respectivement.

Ainsi, afin de satisfaire les exigences des réseaux sans fil à large bande des futures générations, comme la 5G, une approche intégrée combinant les technologies sans fil, les fibres optiques et les ondes millimétriques se révèle prometteuse. Les fibres optiques, offrant une transmission efficace des signaux millimétriques avec une bande passante illimitée et des pertes minimales, peuvent jouer un rôle crucial. Les éléments radio et optique sont intégrés pour créer une technologie émergente appelée Radio over Fiber (RoF), qui permet une diffusion étendue des services sans fil haut débit.

En ce sens, Ce mémoire a exploré l'intégration de la transmission sur fibre optique pour les réseaux 5G, en mettant l'accent sur une application à plage dynamique élevée fonctionnant à 28 GHz. L'étude a démontré que l'utilisation de la fibre optique pour la transmission dans les réseaux 5G offre de nombreux avantages, notamment une bande passante élevée, une faible latence et une immunité aux interférences électromagnétiques. Ces caractéristiques sont essentielles pour répondre aux exigences de performance des réseaux 5 G, qui visent à offrir des services à haut débit et une connectivité fiable à un large éventail d'applications, allant des communications mobiles aux applications industrielles.

L'application spécifique étudiée, fonctionnant à une fréquence de 28GHz a permis de mettre en évidence les défis et les solutions liés à la gestion de la plage dynamique élevée. Les résultats obtenus montrent que l'optimisation des composants optiques et des techniques de modulation est cruciale pour maintenir la qualité du signal et minimiser les pertes. De plus, l'implémentation de technologies avancées telles que le multiplexage par division de longueur d'onde (WDM) et l'amplification optique a démontré leur efficacité dans l'amélioration des performances globales du système.

## ***Conclusion générale***

Nous avons étudié les performances d'une application de fréquence 28 GHz en fonction de la distance de fibre. Les résultats indiquent que le taux d'erreur binaire (BER) reste nul pour les distances de 12 Km et 16 Km, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'erreurs détectées, entre 20 km et 24 km les erreurs commencent à apparaître, mais elles restent relativement faibles, au-delà de 24 km, la qualité du signal se dégrade rapidement, rendant la transmission de données de plus erronée et peu fiable à 32 km.

En conclusion, l'intégration de la fibre optique dans les réseaux 5G s'avère être une solution prometteuse pour répondre aux défis posés par la montée en fréquence des transmissions et la demande croissante de données. Les résultats de cette étude suggèrent que l'utilisation de la fibre pour des applications à haut fréquence, comme le 28 GHz peut grandement optimiser les capacités et la qualité des services offerts par les réseaux 5G.

Les futures recherches pourraient se concentrer sur l'optimisation des coûts et la simplification des déploiements pour une adoption plus large et plus rapide de cette technologie avancée.

## *Liste des Acronymes*

### *Liste des Acronymes*

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
LTE	Long Terme Evolution
GSM	Global System for Mobile Communications
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
CDMA	Code Division Multiple Access
GPRS	General Packet Radio Service
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplexing
TDD	Time Division Duplexing
MIMO	Multiple Input Multiple Output
LAN	Local Area Network
ROF	Radio over Fiber
RF	Radio Frequency
ON	Optical Network
SI	Signal Integrity
GI	Graded-Index
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
SNR	Signal-to-Noise Ratio
P2P	Point-to-Point
PON	Passive Optical Network
MMF	Multimode Fiber
FTTH	Fiber to the Home

## ***Liste des Acronymes***

NRO	Network Resource Orchestrator
IF	Intermediate Frequency
WDM	Wavelength Division Multiplexing
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
CATV	Community Antenna Television)
FSO	Free Space Optics)
SONET	Synchronous Optical Networking)
SDH	Synchronous Digital Hierarchy)
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier)
SOA	Semiconductor Optical Amplifier)
RZ	Return-to-Zero
BER	Bit Error Rate
TDM	Time Division

## **Bibliographie**

- [1] Lemamou, E. (2014). Planification globale des réseaux mobiles de la quatrième génération (4G) (Thèse de doctorat inédite). Université de Montréal, Canada
- [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/dal1g-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] Khobzaoui, A., et Chaibi, B. (2016). Planification d'un réseau 4G en zone urbaine (Mémoire de master inédit). Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa, Algérie.
- [7] M. T. AISSAOUI et R. BOUGHANEM , Optimisation de la couverture dans le Réseau REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 100 3G,mémoire master 2 Bejaia: Université Abderrahmane Mira, 2014
- [8] Y. Otmani, Présentation du GSM, UMTS et la signalisation Air Interface,mémoire master acadimique Tlemcen: univ-tlemcen, 2018.
- [9] «Les technologies 2G, 3G et 4G,» 21 Novembre 2014. [En ligne]. Available: <https://www.telecom-infoconso.fr/les-technologies-2g-3g-et-4g/>.
- [10] 3GPP TS 36.401, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Architecture description (Release 8)”.
- [11] 3GPP TS 36.306, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 8) .
- [12] I.BERCHID, Optimisation d'un réseau Single RAN (3G) et planification LTE, 75 pages, Télécommunications et Technologies de l'Information, institut national des postes et télécommunications, royaume du Maroc, 2014
- [13] V. D. Dau , Évolution LTE, Architecture de LTE et Interface radio, Institut de la Francophonie pour l'Informatique, 19 juillet 2013.
- [14] H. BOUCHENTOUF et R. BOUDGHENE STAMBOULI, etude des performances des reseaux 4G (LTE),mémoire master 2, Tlemcen: Université abou bker belkaid, 2013.

## ***Bibliographie***

- [15] K. K. Djogoo, "Etude d'une liaison transmission par fibre optique et simulation d'un résonateur optique en anneau", 2016.
- [16] M. SidiAli, "Télécommunications Optiques", 2001, p. 162.
- [17] F. Maurice, "Thèmes actuels en optique, Collection Physique fondamentale et appliquée" 0299-2434 éd., E. Masson, Éd., 1986, p. 120.
- [18] C. Alain, "optique et télécommunications", Collection technique et scientifique des télécommunications, ISSN 0221-2579 éd., 1981.
- [19] D. Frederique, "Optical transimpedance receiver for high data transmission in OFDM modulation format", Lightwave Technology, vol. 33, 2015.
- [20] . G. TESSERAULT et G. TESSERAULT, Modélisation multi-fréquences du canal de propagation, thèse doctorat ,Ecole doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur & Aéronautique, 11 Décembre 2008.
- [21] M. R. TAB et D. FESRAOUI , Etude d'une liaison radio sur fibre optique,thèse doctorat, Saida: Université Dr. Tahar Moulay–Saida, 2018
- [22] M. A. Elaji, Etude et modélisation d'un système de transmission radio-sur-fibre,mémoire de fin d'etude, bretagne: Université de Bretagne, 2009.
- [23] . Y.-D. Hamedi, Etude D'une liaison Radio sur fibre, Tlemcen: université Tlemcen, 2014.
- [24] B Cherifa, BD Zed - researchgate.net. Génération d'ondes millimétriques dans les systèmes photoniques Radio sur Fibre.
- [24] 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.
- [25] J. Guillory, Radio over Fiber (RoF) for the future home area networks,thèse doctorat, Paris: University of Paris-Est, 2012.
- [26] 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,.
- [27] H. RZAIGUI, Systèmes hybrides opto/sans fil pour les réseaux multigigabits aux fréquences millimétriques,thésedoctorat, Grenoble: UNiversite Grenoble alpes, 2016.
- [28] S. Tomasin, Use of millimeter wave carrier frequencies in 5G, Padova: University of Padova, 2018.

## ***Bibliographie***

- [29] 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.
- [30] Chun-Ting Lin, et All,  $2 \times 2$  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).
- [31] F. T. BENDIMERAD , MIMO et accès multiples avancés pour réseaux sans fil, Tlemcen: Université Abou Bekr Belkaid, 2011-2013.
- [32] A. Fellag Chebra, A. R. Borsali ,Bidirectional transmission over optical fiber with Intermediate Frequency for 5G system ,Telecommunications department University of Tlemcen,2022.
- [33]F Bouchachi - 2023 - dspace.univ-bouira.dz. Mémoire de Master.
- [34] H Maadhour, A Berregui - dspace.univ-ouargla.dz. Etude et simulation d'une liaison de communication 5G NR.
- [35]AYA AHMED - 2023 - archipel.uqam.ca. OPTIMISATION DES RÉSEAUX SANS FIL SANS CELLULE ASSISTÉS PAR DRONES: UNE APPROCHE D'APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT.
- [36] M NECIB - 2023 - dspace.univ-tebessa.dz. Analyse des performances d'une liaison FSO (optique en espace libre)
- [37] 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.
- [38] KAHLOUCHE Ahmed, TP N°1: « Initiation à l'utilisation du logiciel OptiSystem », Université de Mohamed Boudiaf – M'sila Année Universitaire 2018/2019.
- [39] LITIM Salsabil BELAID Chourouk , « Simulation d'une chaîne optique multiplexée » , mémoire de master, UNIVERSITÉBADJI MOKHTAR-ANNABA , 2019/2020.