

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 : Bekaddour Abdelaziz et Derni kenza chahinez

Sujet

Contribution à l'étude des technologies hybrides optiques/radio dans les futurs réseaux 5G.

Soutenu publiquement, le 26 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

Mr M. HADJILA

Mme A. SEDJELMACI

Mr M. CHIKH- BLED

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examinateur

Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciements

Avant tout, Nous devons des remerciements et de la gratitude à Allah Tout-Puissant pour avoir éclairé mon chemin avec la connaissance et pour m'avoir accordé la capacité d'accomplir ce travail.

*Nous tenons à exprimer mon immense gratitude à mon encadrant, prof. **Chikh - Bled Mohammed** pour ses conseils constructifs, ses précieux commentaires et son aide à la réalisation de ce travail. On a apprécié sincèrement tout le temps qu'il a passé à relire notre travail et les précieuses suggestions qui ont amélioré projet de fin d'études.*

*Nous remercions également le président Mr **M. HADJILA** et examinatrice Mme **A. SEDJELMACI**.*

Remerciements particuliers à toutes les personnes qui ont rendu ce travail de recherche possible à tous les enseignants et étudiants qui ont participé à ce travail de recherche pour leur coopération et leur contribution.

Nous tenons remercier chaleureusement le jury qui a bien voulu accepter d'examiner, de lire et d'évaluer ce travail. Notre profonde gratitude va également à tous les professeurs qui nous ont enseigné à l'Université de Tlemcen, tout au long de ces cinq années, et à mes camarades de classe.

Dédicaces :

Ma mère : *A ma raison de vivre, celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour inaccessible, la mère des sentiments fragile qui ma bénie par ces prières A celle qui m'a donné la vie, qui m'a soutenu et encouragée durant tous ces années d'étude ma chère mère Dawia.*

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

Mes adorables sœurs :Fathia ,Ghizlan ,Marwa.

A tous mes petits anges : Harouni , Tabouz, Hamitouche.

Mon cher oncle : Salah

Mon beau-frère : Sofian

Mon Binôme de travail : Aziz

Mes copines: Iman, Raja et Meriem.

Dédicaces :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs et mes chers frères pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A Mon Binôme de travail Kenza,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

AZIZ

TABLE DES MATIÈRES :

I. REMERCIEMENTS :	
II. DEDICASSES :	
III. RESUME :	
IV. INTRODUCTION GENERALE :	
1.1. INTRODUCTION.	6
1.1.1 Définition de réseau mobile	6
1.2. Evolution des réseaux mobiles	6
1.3. La cinquième génération (5G)	7
1.4. Les caractéristiques de la 5G	9
1.4.1. L'utilisation des fréquences des ondes millimétriques	9
1.5. Utilisation de petites cellules	10
1.6. Communication sans fil full-duplex.	11
1.7. Le déploiement d'une nouvelle génération d'antennes « intelligentes Le défi de la 5G.	12
1.8. Le défi de la 5G.	13
1.9. La fibre optique.	14
1.9.1. Définition	14
1.9.2 Structure de la fibre optique.	14
1.9.3 Les réseaux de fibres optiques.	16
1.10 Nouvelles utilisations des fibres optiques dans les réseaux.	18
a) Réseaux d'accès, architectures FTTx.	18
b) Data center.	21
conclusion.	24
2.I. INTRODUCTION.	28
2.1. Radio sur fibre	28
2.1.1 Définition	28
2.1.2 Techniques de transport de la radio sur fibre	30

2.1.2.1	Transport de fréquence RF sur fibre : RF-over-Fiber (RFoF)	30
2.1.2.2	Transport de fréquence IF sur fibre : IF-over-Fiber (IFoF)	31
2.1.2.3	Transport en bande de base sur fibre : Baseband-over-Fiber (BBoF)	32
2.1.3	Principales architectures de la radio sur fibre	33
2.1.3.1	Le point à point passif	33
2.1.3.2	Le point à multipoint passif	33
2.1.4	: Avantages et limitations de la radio sur fibre	35
2.1.4.1	Avantages de la radio sur fibre	35
2.1.4.2	Limitations de la radio sur fibre	35
2.1.5	Les applications principales de la radio sur fibre	36
2.2	Architecture FTTA (Fiber-To-The-Antenna).....	37
2.2.1	Architecture traditionnelle	38
2.2.2	Station de base avec RRH	39
2.2.3	Architecture centralisée des stations de base : CRAN (Centralized Radio Access Network).....	40
	Conclusion.....	42
	Introduction.....	42
3.1.	Les techniques de déport radio sur fibre	42
3.1.1.	Détection directe.....	42
3.1.1.1.	La diode laser	43
3.1.1.2.	Les modulateurs externes	43
3.1.2.	La détection hétérodyne	45
3.2.	Limitations de la transmission liées à l'optique	46
3.2.1	Les sources de bruits dans une transmission radio sur fibre	46
3.2.2.	Le bruit du laser	47
3.2.3.	Le bruit de la photodiode	48
3.2.4.	Bruit d'un amplificateur transimpédance	48

3.2.5.Effet de la dispersion chromatique sur une transmission radio sur fibre	49
3.2.5.1 : Définition	49
3.2.5.2 : Cas d'applications	50
3.2.5.3 :Conclusion sur les effets de la dispersion chromatique	53
3.2.6 :Effet de la dispersion modale dans la fibre	53
3.2.7 : Les fibres multimodes à saut d'indice	53
3.2.8. Les fibres multimodes à gradient d'indice	54
3.3 Bilan RF linéaire d'une liaison radio sur fibre.....	55
3.3.1Bilan Optique.....	55
3.3.1.1 Liaison radio sur fibre.....	55
3.3.1.1.1 Liaison sans amplificateur transimpédance	55
3.3.1.1.2 Liaison avec amplificateur transimpédance	57
3.3.2Bilan des bruit.....	57
3.3.2.1 Evolution du rapport signal sur bruit d'une liaison optique radio sur fibre	58
3.3.2.1.1 Hypothèses et caractéristiques types d'une liaison radio sur fibre....	58
3.3.3 Bilan radio.....	61
3.3.3.1 Les sources de bruit dans une transmission radio :.....	61
3.3.3.1.1 Bruit thermique	61
3.3.3.1.2 Bruit radioélectriques.....	62
3.3.3.4 Pertes liées à la propagation dans l'air.....	62
3.3.3.4.1 Propagation sans multitrajet	62
3.3.3.4.2 Propagation multitrajet.....	64
Conclusion.....	65
Conclusion Générale.....	68

Liste DES FIGURES :

Figure 1.1: Evolution des réseaux mobiles.....	7
Figure (1 .2): Comparaison 4G / 5G	8
Figure (1.3) : Définitions de la 5G	9
Figure (1 .4) : Atténuation en fonction de différentes fréquences	10
Figure (1.5) : Réseaux à macro cellules et réseaux à petites cellules.....	12
Figure (1 .6): Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD.....	13
Figure(1 .7) :Structure d'une fibreoptique.....	16
Figure(1.8) : atténuation d une paire de file de cuivre torsadée pour différentes longueur ligne.....	17
Figure(1 .9) : Longueur des réseaux installés en bâtiment à l'échelle mondiale.....	19
Figure(1.10) - Fibres optiques multimodes installées dans le monde (perspectives)	19
Figure(1.11) - Architectures FTTx en France	20
Figure(1.12) – Deux topologies pour les architectures FTTH et FFTB (source : ARCE...)	21
Figure (1.13) - Proportion de logements reliés à la fibre optique en France.....	21
Figure (1.14) - Proportion de logements reliés à la fibre optique aux Etats-Unis.....	22
Figure(1.15) - Longueurs des tronçons de fibres installés dans les data center.....	23
Figure(1.16) - Interfaces prévues par les différents standards 8023 à 10Gb/s.....	23
Figure(1.17) - Types de fibres installés dans les centres de traitement de données sur la période 2004-2011	24
Figure (2.1) : Modèle d'un système RoF simplifié.....	29
Figure(2.2) : transport de fréquence RF sur fibre.....	31
Figure (2.3) : transport fréquence IF sur fibre.....	31
Figure (2.4) : transport en bande de base sur fibre.....	32
Figure (2.5) : architecture point à point passif.....	33
Figure (2.6) : architecture point à multipoint passif.....	33
Figure (2.7) : station de base traditionnelle.....	39

Figure (2.8) : station de base avec RRH.....	40
Figure (2.9): architecture C-RAN.....	41
Figure (3.1) : Schéma simplifié du modulateur à électro-absorption [31].....	44
Figure (3.2) : Schéma de principe d'un modulateur externe de type Mach- Zehnder [31]...	44
Figure (3.3): Chaîne optique du système RoF typique.....	45
Figure (3.4): Chaîne optique du système RoF typique.....	47
Figure (3.5): RIN aux hautes fréquences d'un laser DFB pour différents courants de polarisation.....	48
Figure(3.6.(a)) Évolution de la puissance d'entrée de la photodiode en fonction de la distance parcourue dans la fibre (sans atténuation).....	51
Figure (3.6.(b)) Évolution de la puissance d'entrée de la photodiode en fonction de la fréquence après 20km de propagation dans la fibre.....	52
Figure 3.7– Ouverture numérique d'une fibre optique.....	54
Figure 3.8 . Propagation de la lumière dans une fibre multimode à gradient d'indice.....	55
Figure. 3.9 – Principales caractéristiques d'une transmission radio sur fibre.....	56
Figure. 3.10 – Principales caractéristiques d'une liaison radio sur fibre avec un amplifi- cateur transimpédance.....	57
Figure. 3.11 – Évolution de la puissance de bruit en sortie de l'amplificateur transimpé- dance en fonction des pertes optiques.....	60
Figure. 3.12– Évolution du SNR en fonction des pertes optiques.....	61
Figure. 3.13– Principales caractéristiques d'une chaine radio.....	62
Figure. 3.14 – Exemple de propagation en espace libre d'une source ponctuelle.....	63
Figure. 3.15 – Principaux mécanismes de propagation [43].....	65

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1 :Protocoles de transfert à 40 et 100 Gb/s.....	24
Tableau 2.1 : Comparaison des systèmes de communication mobil.....	38
Tableau. 3.1 – Caractéristiques des différents équipements électro-optiques d’une chaîne radio sur fibre.....	59
Tableau. 3.2 – Bilan électrique d’une chaîne radio sur fibre (Pin = 0dBm, Bruit et Pout exprimés en dBm, Gain et SNR en dB).....	59

Résumé :

L'évolution des services et des applications multimédias a obligé les opérateurs de télécommunications à augmenter le débit de transmission sur tous les segments du réseau. La radio sur fibre qui est une technologie hybride optique /radio est une solution pour cette montée en débit.

Dans ce travail on a étudié la technologie hybride dite « Radio sur Fibre » qui a été inventé pour améliorer les services et applications multimédias face au futurs exigences à venir en associant les avantages de la fibre optique aux signaux radio en espace libre.

On présente deux techniques pour la réalisation d'un déport radio sur fibre sur une fréquence porteuse, ainsi que les limitations liées à la technologie optique. Elles sont basées sur la détection directe, et la détection hétérodyne pour des fréquences radio inférieures ou bien supérieures à 10 GHz. Dans une seconde partie des bilans de liaison radio sur fibre ont été proposés et discutés. Des exemples théoriques avec des caractéristiques des composants optoélectroniques se rapprochent de celles qui sont utilisées en pratique ont été également étudiées.

Mots clés : Réseau 5G, Fibre optique, Composants optoélectroniques, FTTH (Fiber To The Antenna), Déport radio sur fibre, Détection directe, Détection hétérodyne, Modulateurs électro-optiques.

Abstract :

The evolution of multimedia services and applications has forced telecommunications operators to increase the transmission rate on all network segments. Radio over fibre, which is a hybrid optical/radio technology, is a solution for this increase in speed.

In this work we studied the hybrid technology called "Radio on Fiber" which was invented to improve multimedia services and applications in the face of future requirements by combining the advantages of optical fiber with radio signals in free space.

We present two techniques for the realization of a radio offset on fiber on a carrier frequency, as well as the limitations related to the optical technology. They are based on direct detection, and heterodyne detection for radio frequencies below or above 10 GHz. In a second part, radio link budgets on fiber were proposed and discussed. Theoretical examples with characteristics of optoelectronic components approaching those used in practice have also been studied.

Key words: Network 5G ,Fiber-To-The-Antenna, Optoelectronic components, FTTA (Fiber To The Antenna), Radio deport on fiber, Direct detection, Heterodyne detection, Electro-optical modulators.

المخلص :

لقد أجبر تطور خدمات الوسائط المتعددة وتطبيقاتها مشغلي الاتصالات على زيادة معدل الإرسال على قطاعات الشبكة. يعد الراديو فوق الألياف ، وهو تقنية هجينة بصرية / راديو ، حلاً لهذه الزيادة في السرعة. درسنا في هذا العمل التقنية الهجينة المسماة "راديو على الألياف" والتي تم اختراعها لتحسين خدمات الوسائط المتعددة وتطبيقاتها في مواجهة المتطلبات المستقبلية من خلال الجمع بين مزايا الألياف الضوئية وإشارات الراديو في الفضاء الحر.

نقدم تقنيتين لتحقيق إزاحة الراديو على الألياف لتردد ناقل ، بالإضافة إلى القيود المتعلقة بالتكنولوجيا الضوئية. وهي تستند إلى الاكتشاف المباشر والكشف المتغير للترددات الراديوية التي تقل عن 10 جيجا هرتز أو أعلى. في الجزء الثاني ، تم اقتراح ومناقشة ميزانيات الارتباط اللاسلكي على الألياف. كما تمت دراسة الأمثلة النظرية بخصائص المكونات الإلكترونية الضوئية التي تشبه المستخدمة في الممارسة العملية

الكلمات المفتاحية: شبكة G 5 ، الألياف الضوئية ، المكونات الإلكترونية الضوئية ، (FTTA الألياف إلى الهوائي) ، الإرسال اللاسلكي عبر الألياف ، الكشف المباشر ، الكشف عن التغيرات ، المعدلات الكهروضوئية.

Introduction générale

La demande de bande passante dans les communications mobiles augmente de façon exponentielle jour après jour, comme le nombre d'utilisateurs a considérablement augmenté ces dernières années. La prochaine génération (5G) de systèmes de communication sans fil doit donc répondre à des normes plus élevées, de manière à prendre en charge divers services sans fil à large bande. Des normes pour la transmission sans fil en bande millimétrique ont été proposées. A de telles fréquences, les pertes en espace libre sont très élevées et les ondes radios ne traversent pas les murs.

A cet effet des technologies hybrides optiques/ Radios ont vu le jour ces dernières années afin d'assurer une vaste couverture radio. Ces techniques utilisent principalement les avantages et les performances de la fibre optique ainsi que les composants optoélectroniques, ce qui facilite la distribution de données à large bande et/ou de signaux à haute fréquence dans de nombreuses stations de base.

L'objectif de ce mémoire est l'étude des systèmes hybrides optiques/radios dans les futurs réseaux 5 G. Les réseaux 5G peuvent fournir la rapidité, la fiabilité et l'efficacité du réseau d'accès optique, et la flexibilité et la mobilité du réseau radio sans fil.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier est consacré à l'évolution de l'Internet dans les réseaux d'accès sans fil depuis la 1er génération (1G) jusqu'à la 5G, L'utilisation des fréquences des ondes millimétriques et nouvelles utilisations des fibres optiques dans les réseaux.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la technologie radio sur fibre « radio-over-fiber (RoF) » avec les différentes architectures, ainsi qu'aux différentes limitations.

Enfin dans le dernier chapitre, une étude détaillée des systèmes hybrides optiques /radio a été mise en œuvre. Dans un premier temps on présente les différentes étapes de réalisation un déport radio sur fibre, puis une discussion sur les différents paramètres physiques les plus pertinents qu'il faut prendre en considération dans un bilan de liaison, avec les différentes limitations liées à l'optique.

chapitre 1 Etat de l'art

1.I. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'état de l'art. Nous présentons tout d'abord l'évolution des réseaux mobiles de façon générale afin de se familiariser avec les termes et les technologies employés. Dans la première partie nous allons décrire les différentes générations (1G, 2G, 3G et 4G). Ensuite on va aborder la partie du réseau mobile 5G et ses éléments constitutifs. Enfin on présente la structure de la fibre optique et nouvelles utilisations des fibres optiques dans les réseaux

1.1 Définition de réseau mobile :

Un réseau mobile est un réseau de communication sans fil. Il est réparti sur des zones appelées cellules, dont chacune est desservie par au moins un émetteur-récepteur fixe connu de la station de base. La station de base fournit à la cellule une couverture réseau qui peut être utilisée pour assurer la transmission de la voix et des données. Une cellule peut utiliser un ensemble de fréquences différent de celui des cellules voisines pour éviter les interférences et fournir une qualité de service garantie dans chaque cellule. [1]

1.2 Evolution des réseaux mobiles :

Les réseaux de la 1ère génération (appelée aussi 1G) ont été intégrés au réseau de télécommunication dans les années 80. Ces systèmes ont cependant été abandonnés il y a quelques années laissant la place la seconde génération, appelée 2G lancée en 1991. Elle est encore active de nos jours. Nous pouvons distinguer deux autres types de générations au sein même de la seconde : la 2.5 et la 2.75. Le principal standard utilisant la 2G est GSM (Global System for Mobile Communications). A la différence de la 1G, la seconde génération de normes permet d'accéder aux divers services, comme l'utilisation du WAP permettant d'accéder Internet, tant dit que pour la 3ème génération connue sous le nom de 3G permet un haut débit pour l'accès l'internet et le transfert de données. En ce qui concerne la nouvelle génération 4G ou LTE (Long Term Evolution), déployé jusque-là que par quelque pays, elle permet le très haut débit, ensuite les technologies IMT-2020 (International Mobile Telecommunications- 2020) de cinquième génération (5G) arrivent à grands pas, et elles possèdent un potentiel de transformation immense pour rendre nos vies meilleures.

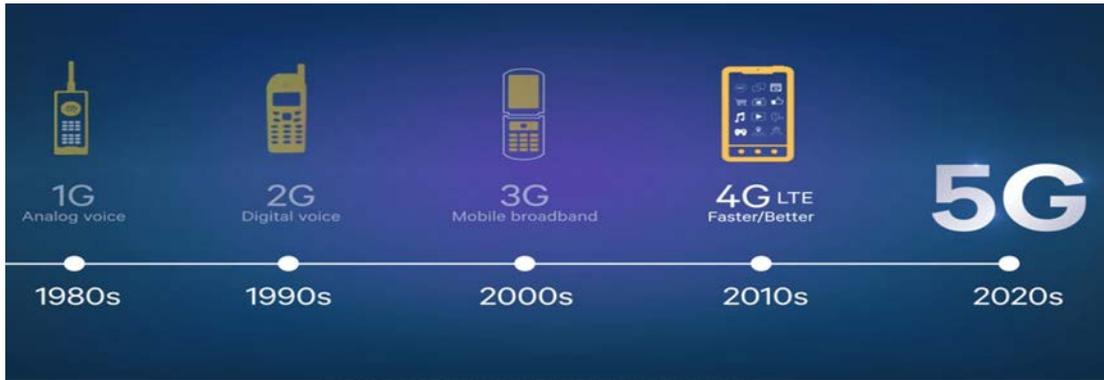


Figure 1.1: Evolution des réseaux mobiles

1.3 La cinquième génération (5G) :

La 5G est la prochaine génération de normes de téléphonie mobile que l'UIT s'emploie à définir. Les systèmes, composants et éléments connexes prenant en charge des capacités plus poussées que celles des systèmes IMT-2000 (3G) et IMT évolués (4G) sont connus sous le nom d'IMT-2020 ou (5G) [2].

Malgré son nom, la 5G ne consiste pas en une amélioration des normes précédentes de télécommunications. Il s'agit plutôt d'une innovation de rupture qui va révolutionner les télécommunications et qui est susceptible d'apporter des changements radicaux dans les modèles commerciaux ayant cours chez les opérateurs [3].

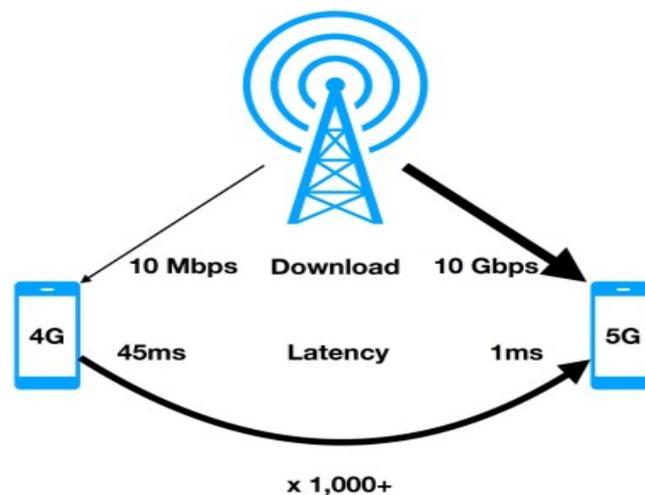


Figure 1.2: Comparaison 4G / 5G

Les réseaux de 5 G devraient fournir des améliorations telles que [4] :

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

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

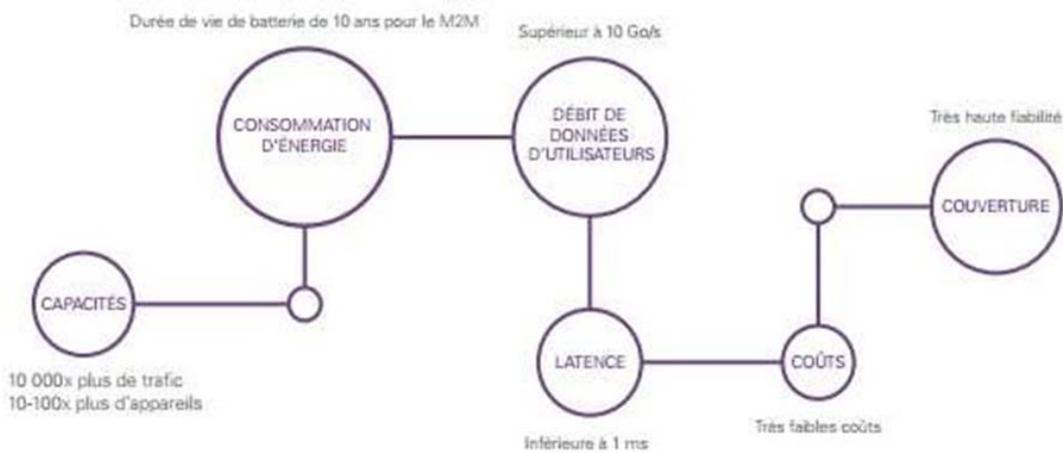


Figure 1. 3 : Définitions de la 5G

Répondre aux exigences mentionnées nécessite des changements radicaux dans le paradigme du réseau en plus d'innovations perturbatrices. Les réseaux 5G peuvent faire appel à un large éventail de nouvelles technologies. Cela permet un saut dans les performances qui éclipse ses prédécesseurs. Ces innovations toucheront la transmission et la conception de la couche physique en plus d'introduire des bouleversements dans les couches supérieures du réseau [4].

Parmi ces technologies :

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

1.4 Les caractéristiques de la 5G :

1.4.1 L'utilisation des fréquences des ondes millimétriques :

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

De manière inhérente, un système nécessitant un débit de données élevé se traduit directement par une demande de bande passante disponible élevée, l'utilisation de fréquences de porteuse beaucoup plus élevées a été proposée comme solution pour une bande passante plus large disponible [5].

La bande de fréquence à ondes millimétriques (onde mm) et au-delà a fait l'objet de nombreuses recherches pour surmonter la saturation des ressources spectrales [5].

Ces fréquences correspondent à des fréquences de 30 GHz à 300 GHz, associées à une longueur d'onde de 10 mm à 1 mm, respectivement. Le principe derrière les ondes millimétriques est d'offrir une bande passante disponible élevée et une puissance transmise élevée [6].

Ce qui distingue ces bandes à haute fréquence des autres est leur vitesse. Si le codage des signaux radio est approprié, les vitesses 5G seront mille fois plus rapides que celles des générations précédentes de téléphonie mobile [3].

Cependant, ces fréquences plus élevées ont des problèmes de propagation du signal sur une grande distance (figure 1.4).

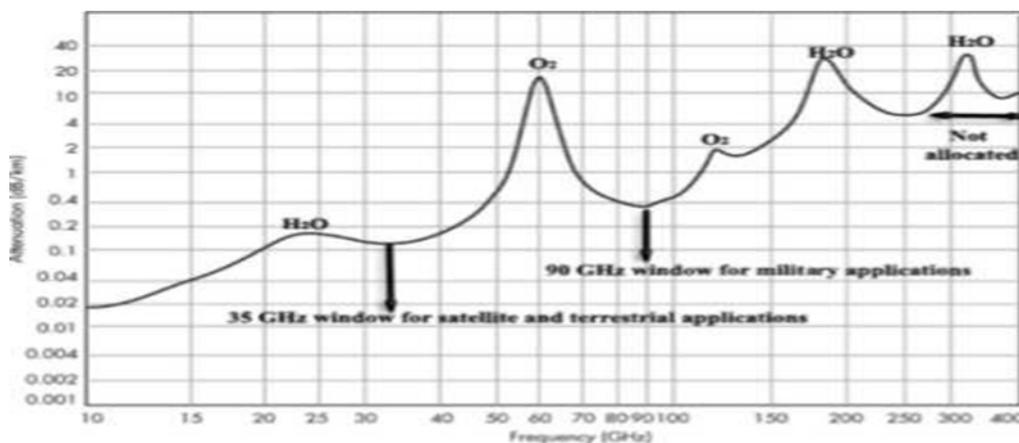


Figure 1.4 : Atténuation en fonction de différentes fréquences

On peut observer sur la figure (1 .4) des pics qui divisent le spectre en quatre fenêtres : 35, 90, 140 et 220 GHz, ce qui permet de surmonter la limitation des ondes radio. Les spécifications de ces fenêtres en fonction de la valeur d'atténuation inférieure et de la largeur de bande large peuvent être adaptées à ces fenêtres pour les communications sans fil avec un débit binaire élevé [3].

Il y a plusieurs facteurs impliqués dans cette atténuation [5] :

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

1.5 Utilisation de petites cellules :

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

Des estimations évoquent, pour satisfaire la demande et permettre l'introduction de la 5G, un nombre d'au moins 10 small-cells par site macro en milieu urbain, milieu dans lequel les cellules sont déjà relativement resserrées pour faire face à la densité des usages [7].

En déployant de petites cellules (micro, pico). Bien qu'elles couvrent une zone

géographique beaucoup plus petite que les macros cellules, les petites cellules améliorent la couverture, les capacités et la qualité de service des réseaux (Figure 1.5.).

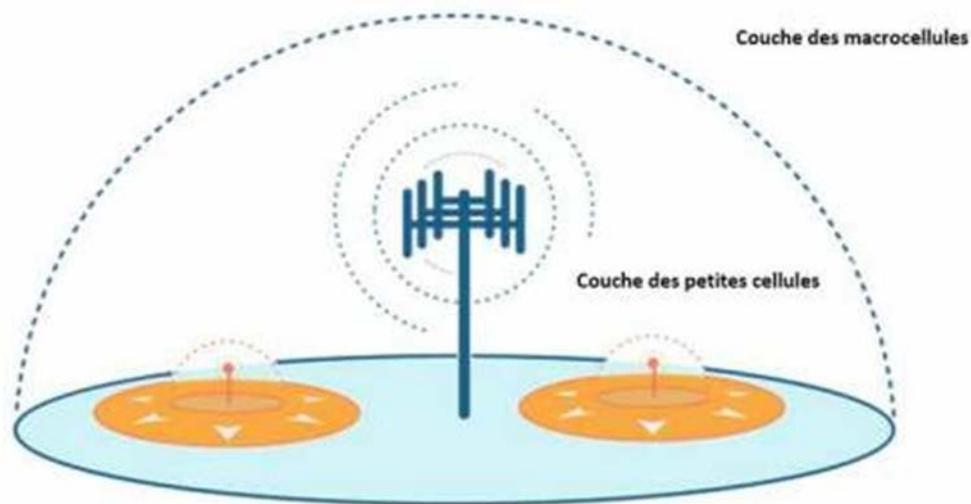


Figure 1.5 : Réseaux à macro cellules et réseaux à petites cellules

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

Certains opérateurs de réseaux hertziens utilisent déjà les petites cellules pour améliorer les capacités et la couverture de leurs réseaux, en particulier dans des environnements urbains à forte densité [2].

1.6 Communication sans fil full-duplexe :

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

La technologie sans fil permet de doubler les capacités de transfert d'une smallcell traditionnelle. Cette technologie est présentée « *comme une étape vers 5G* »[7].

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

« full-duplex » utilise une seule fréquence pour assurer simultanément l'envoi et la réception des données au lieu d'utiliser deux fréquences (half-duplex), chacune étant

dévolue à un flux montant ou descendant, un émetteur-récepteur de séparation des communications full-duplex permet de limiter grandement les interférences entre les stations radio, macro et small, et les terminaux [7].

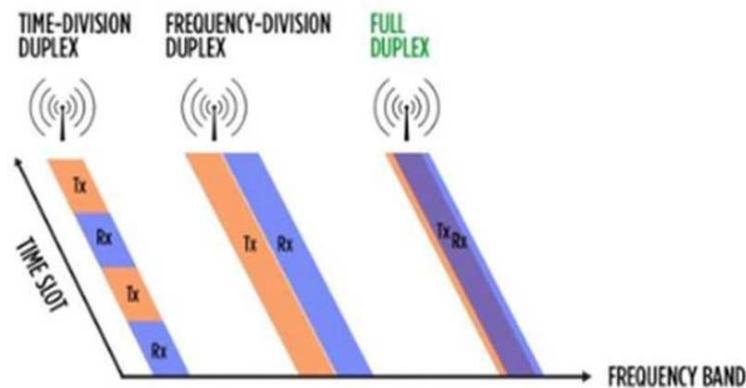


Figure 1.6: Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD

1.7 Le déploiement d'une nouvelle génération d'antennes « intelligentes » :

Ces antennes intelligentes constituées d'un grand nombre d'antennes miniaturisées permettent d'atteindre des débits et une capacité de transmission inaccessibles aujourd'hui. La technologie des antennes intelligentes permettra deux choses : L'augmentation du nombre d'utilisateurs que pourra desservir un système cellulaire donné.

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

- Une réduction des bruits ambiants
- Une élimination des interférences provenant d'autres utilisateurs et obstacles Cette amélioration de qualité et l'augmentation du nombre d'utilisateurs et de services sont des atouts pour les futurs systèmes sans fil de troisième génération [9].

1.8 Le défi de la 5G:

Le déploiement des réseaux mobiles actuels est essentiellement basé sur l'utilisation de stations de base dites « macro » ; des sites dotés d'antennes de forte puissance sont installés pour garantir la couverture d'une zone relativement large, avec

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

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

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

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

En outre, le raccordement au réseau des sites 5G posera la question du coût de leur raccordement en fibre optique, dans la mesure où celle-ci sera vraisemblablement nécessaire dans la majorité des cas pour assurer la qualité de service attendue [3].

Les fibres optiques pouvant être utilisés comme moyen de transmission pour distribuer des signaux millimétriques dans le réseau d'accès avec de faibles pertes et une bande passante disponible illimitée. Alors L'intégration entre les composants radio et optiques est réalisée pour la fourniture d'une technologie répandue connue sous le nom de Radio over- Fibre (RoF) une solution innovant pour surmonte le problème rencontré par ce réseau en utilisant la technologie de distribution de données sans fil à ondes radios sur voie optique.

1.9 La fibre optique :

1.9.1 Définition :

La fibre optique est un canal de transmission idéal pour transmettre des signaux numériques sous forme d'impulsions lumineuses. La fibre optique est un support de verre transparent ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans les transmissions, elle donne un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux.

1.9.2 Structure de la fibre optique :

Dans sa structure, la fibre optique se décompose en trois parties : d'un cœur (n_1) qui est composé de silice (Un composé chimique qui entre dans la composition de nombreux minéraux sa formule est SiO_2), c'est dans cette partie qu'à lieu la réfraction qui permet le transfert de la lumière est des informations suivant les lois de Descartes.

Ensuite, la gaine optique (n_2) construit avec les mêmes matériaux que le cœur, elle permet de rediriger l'information dans le cœur qui va permettre une meilleure transmission de celle-ci. Néanmoins, le matériau utilisé pour cette gaine est de moins bonne qualité que celui du cœur car son rôle est juste d'appliquer le principe de réfraction pour recentrer l'information dans la fibre, et enfin le revêtement de protection en général constitué de plastique, il a pour fonction de protéger les autres parties et d'assurer la flexibilité de la fibre optique [13].

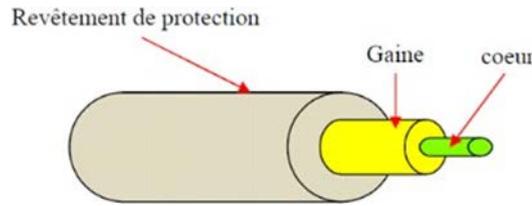
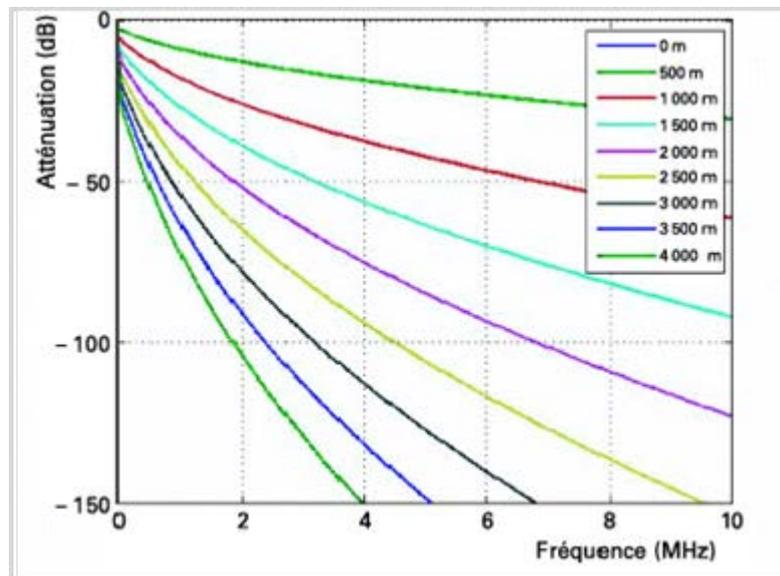


Figure (1.7): Structure d'une fibre optique

1.9.3 Les réseaux de fibres optiques

De par sa capacité beaucoup plus importante que ce que proposent les réseaux câblés classiques en cuivre, la fibre optique a été plébiscitée comme vecteur de transport d'information à haut débit et sur de longues distances. Cette technologie s'impose donc de plus en plus dans le cadre d'applications de télécommunications ou de transfert de données. Contrairement aux réseaux câblés, elle propose en effet une atténuation beaucoup plus faible, de l'ordre de quelques dixièmes de dB/km, contre une à plusieurs dizaines de dB/km pour des fils de cuivre (à 1 MHz, d'après la figure 7). L'atténuation très faible de la fibre optique permet ainsi de diffuser un signal sur de très longues distances avec une utilisation limitée de répéteurs, le signal optique ayant moins besoin d'être régénéré qu'un signal électrique circulant sur une ligne métallique.



Figure(1.8) - Atténuation d'une paire de fils de cuivre torsadée pour différentes longueurs de ligne

Par ailleurs, la bande passante des fibres optiques est beaucoup plus importante que celle proposée par les différents supports cuivre. Le produit bande passante-longueur varie ainsi typiquement de 200 MHz.km à plusieurs centaines de GHz.km, en fonction du type de fibre utilisé et de la longueur d'onde à laquelle émet la source optique. Plus

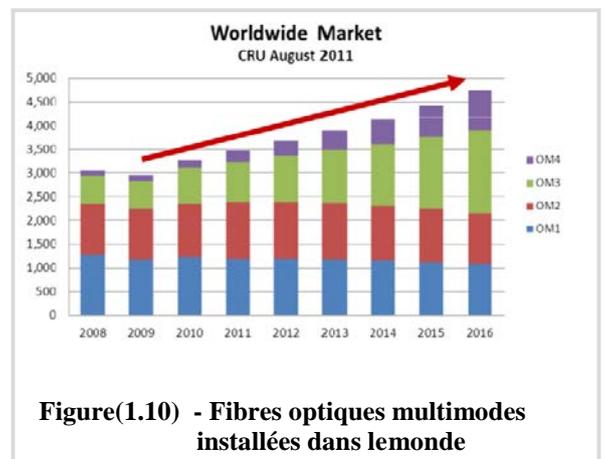
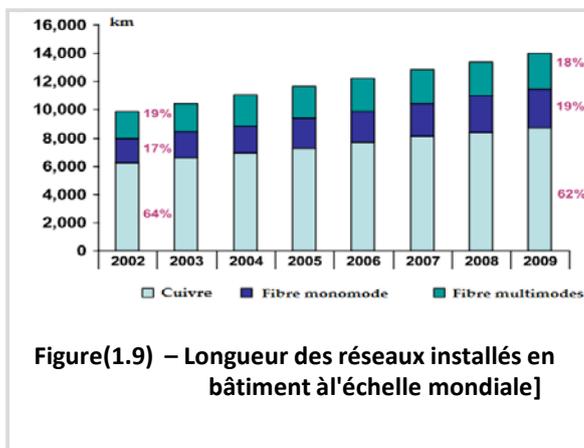
précisément, les fibres optiques utilisées sont réparties en trois grandes catégories : les fibres monomodes, les fibres multimodes à saut d'indice et les fibres multimodes à gradient d'indice. En pratique, les fibres monomodes ont une bande passante quasi illimitée.

Les fibres multimodes à saut d'indice, qui possèdent un cœur d'indice n_c supérieur à l'indice de la gaine n_g , ont été les premières étudiées [13] et mises en place, mais sont aujourd'hui cantonnées aux applications faible distance et nécessitant une faible largeur de bande passante (OM1, *optical multimode 1*). Elles ont été progressivement remplacées par les fibres multimodes à gradient d'indice (OM2, OM3, OM4), dont le profil d'indice a été optimisé de façon à réduire la dispersion intermodale. Cette dispersion, liée à la différence de vitesse de propagation des différents modes à travers la fibre optique, limite les débits de transmission de façon importante, puisqu'elle entraîne l'élargissement de toute impulsion envoyée en entrée de la fibre optique, conduisant à de l'interférence entre symboles, lors d'une transmission numérique. Ces fibres multimodes ont été largement déployées dans les réseaux locaux (LAN, *Local Area Networks*). Les premières générations OM1 et OM2 sont aujourd'hui obsolètes mais restent encore en place dans de nombreux bâtiments.

Les fibres monomodes à saut d'indice permettent de s'affranchir de la limitation due à la dispersion intermodale : leur diamètre de cœur est beaucoup plus petit (8-10 μm à 1550 nm) que celui des fibres multimodes (50/62,5 μm), ce qui ne permet la propagation que d'un mode unique dans la fibre optique. Il n'y a alors pas de dispersion intermodale. On note que la dispersion chromatique, due à la différence de vitesse de propagation en fonction de la longueur d'onde, est généralement considérée comme négligeable par rapport à la dispersion intermodale dans les fibres multimodes. Ce n'est plus le cas pour les fibres monomodes ; cependant, l'utilisation de lasers de longueur d'onde 1310 nm permet de réduire drastiquement cette dispersion dans les fibres monomodes standard, et d'atteindre alors une capacité théorique de plusieurs centaines voire milliers de Gb/s. L'utilisation de sources à 1550 nm, comme pour les liaisons intercontinentales, permet quant à elle de profiter d'une atténuation minimale (de l'ordre de 0,2 dB/km), mais nécessite alors l'emploi de tronçons de fibre à compensation de dispersion pour s'affranchir de la dispersion chromatique puisque cette dernière est significative dans les fibres monomodes standard à cette longueur d'onde.

Ces bonnes performances des fibres monomodes sont obtenues au détriment d'un

coût plus élevé en termes de maintenance, d'infrastructures et d'utilisation. En effet, le faible diamètre de cœur de ces fibres impose une plus grande contrainte au niveau des connexions et des sources lasers utilisées. Ainsi, les fibres monomodes sont généralement utilisées avec des lasers monomodes de type DFB (*Distributed FeedBack*). Elles sont donc privilégiées pour les transmissions très longues distances à de très grands débits (réseaux cœurs), comme les transmissions trans- et inter-continentales (câbles sous-marins notamment). Leur usage s'est par ailleurs aussi répandu dans les cœurs de réseaux métropolitains et les réseaux d'accès haut débit.



Comme le montre la figure [9], les fibres multimodes sont toutefois largement employées et concurrencent les fibres monomodes, principalement dans les bâtiments pour les réseaux locaux. La figure 10 montre l'évolution des standards pour ces fibres multimodes. Il en ressort que le stock de fibres multimodes obsolètes du fait de leur faible bande passante (type OM1 et OM2) va croître au fur et à mesure que les nouveaux standards vont s'imposer.

En conclusion, la fibre monomode, historiquement utilisée notamment pour les transmissions longue distance, est donc en concurrence avec la fibre optique multimode qui est de plus en plus utilisée pour répondre aujourd'hui aux nouvelles demandes en fibres optiques. La partie suivante présente quelques-unes de ces applications, afin de bien saisir les enjeux futurs des systèmes employant la fibre optique ainsi que les différents verrous technologiques à lever.

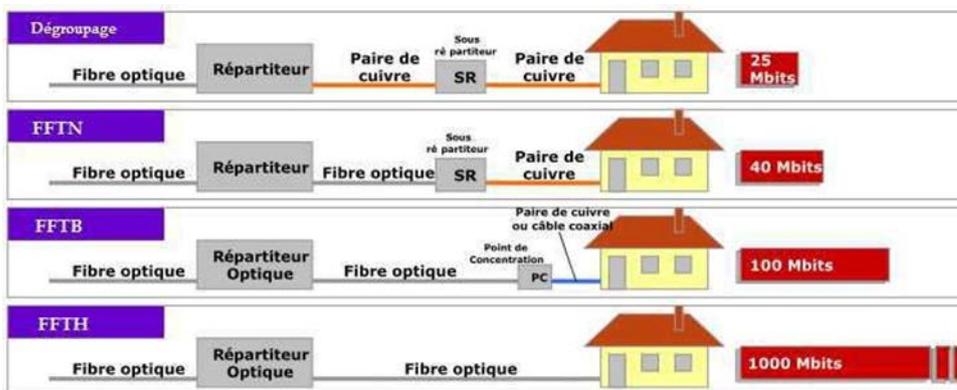
1.10 Nouvelles utilisations des fibres optiques dans les réseaux

a) Réseaux d'accès, architectures FTTx

Comme dit précédemment, la fibre optique monomode est utilisée depuis longtemps dans le cœur de réseaux pour les transmissions très haut débit et longue distance [11]. Elle est actuellement en cours de déploiement pour les réseaux d'accès, et supplante progressivement la technologie DSL (*Digital Subscriber Line*) utilisant comme support de transmission la paire de fils de cuivre torsadée. Les différents réseaux d'accès de fibres optiques déployés sont maintenant utilisés dans le cadre du développement des architectures FTTx (« *Fiber to the ...* », fibre jusqu'à). On peut citer notamment les architectures :

FTTN (*Fiber to the Neighborhood/Node*, fibre jusqu'au quartier/répartiteur) FTTB (*Fiber to the Building*, fibre jusqu'au bâtiment)

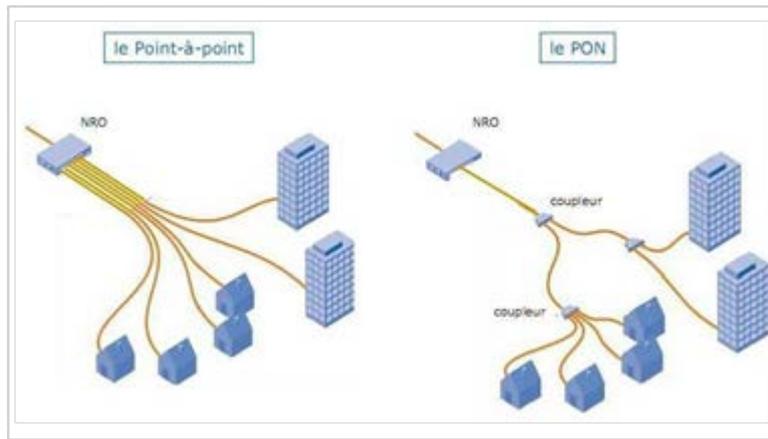
FFTH (*Fiber to the Home*, fibre jusqu'au domicile – aussi appelée FTTH, *Fiber to the User*, fibre jusqu'à l'utilisateur)



Figure(1.11) - Architectures FTTx en France

Pour les architectures FTTN et FTTB, le réseau d'accès est constitué de fibres optiques jusqu'à un certain point, à partir duquel le signal est distribué classiquement sur des réseaux de type câble à paires de fils en cuivre ou câble coaxial. la fibre optique ne relie que le sous-répartiteur de réseau desservant le quartier de l'utilisateur, tandis que les derniers mètres (jusqu'à 1500 mètres en pratique) réutilisent les câbles de cuivre existants. Ce sous-répartiteur est alors équipé de matériel haut débit, qui permettra de transmettre un signal de type VDSL (*Very high-bit rate DSL*, DSL à très haut débit)

jusqu'à l'utilisateur. Dans le cas des architectures FTTB et FTTH, la fibre optique relie le nœud de raccordement optique du réseau fibré à un nœud de répartition au pied de l'immeuble (FTTB) ou directement aux prises murales de l'abonné (FTTH). Plusieurs topologies peuvent alors être choisies, parmi lesquelles la topologie P2P (*Peer-to-Peer* ou point-à-point), où chaque utilisateur possède une fibre optique dédiée, et la topologie GPON (*Gigabit Passive Optical Network* ou point à multipoints), qui sont privilégiées par les opérateurs français. Dans ce dernier cas, la bande passante de la fibre est partagée entre les utilisateurs et le coût de l'infrastructure est différent, suivant l'implantation géographique.



Figure(1.12) – Deux topologies pour les architectures FTTH et FTTB (source : ARCE)

La FTTH connaît actuellement une croissance rapide en termes de foyers et d'entreprises éligibles à la FTTH, dont rendent compte les figures [13] et [14]. Cette croissance est cependant à mettre en perspective avec le nombre d'abonnés, c'est-à-dire physiquement connectés au réseau optique. Ainsi, seule une fraction des utilisateurs éligibles profite réellement du potentiel de l'optique, comme le montre la figure [14]. On peut toutefois émettre la conjecture que cette part est amenée à croître du fait de l'évolution des contenus et des usages

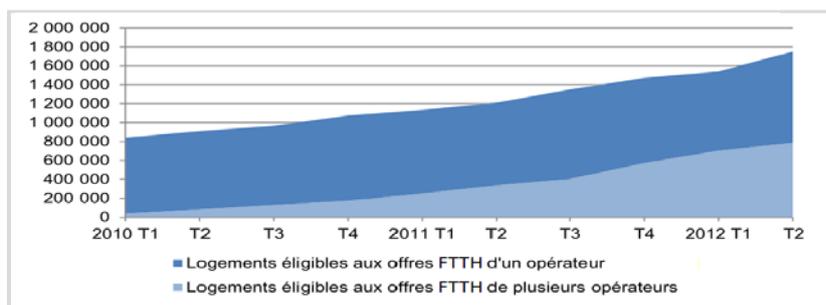
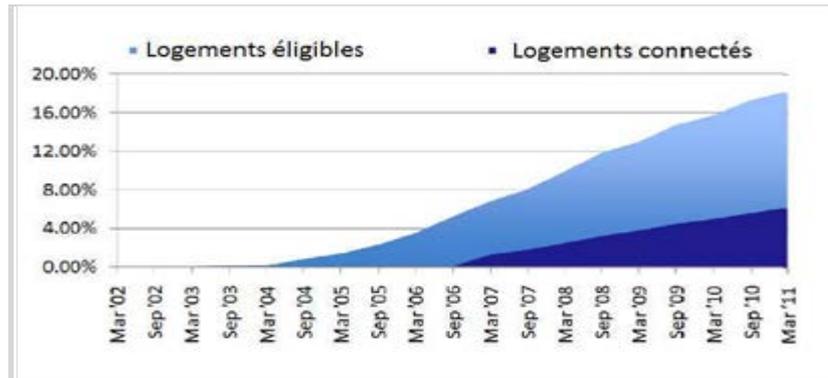


Figure1.13 - Nombre de logements reliés à la fibre optique en France



Figure(1.14) - Proportion de logements reliés à la fibre optique aux États-Unis

Le potentiel global de la FTTH est d'autant plus important que l'architecture FTTN peut être considérée comme la première étape du passage d'un réseau de communications câblées à un réseau optique. Il suffit en effet de remplacer le dernier tronçon de réseau câblé encore utilisé par un réseau fibré FTTN pour disposer ensuite d'une architecture FTTH. L'intérêt de la FTTN est de permettre dans un premier temps la réutilisation des réseaux câblés existants vers les abonnés, ce qui limite les coûts inhérents à l'installation de la fibre optique. On peut donc installer un réseau FTTN comme préalable à un réseau FTTH, dans le but de répartir l'effort financier dans le temps.

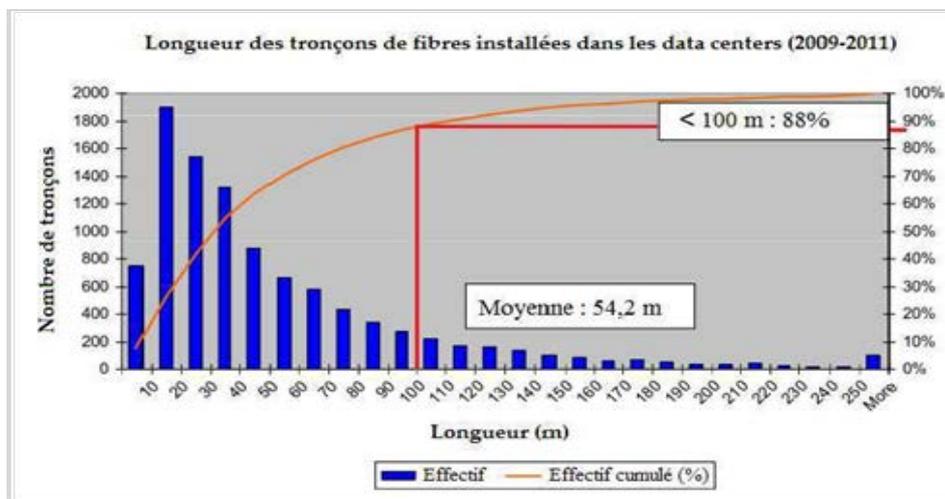
La quasi-intégralité des fibres optiques installées pour les réseaux FTTx sont des fibres monomodes. Cependant, compte-tenu de la popularité des fibres optiques multimodes liée à leur faible coût d'installation et de maintenance, l'utilisation de ces dernières est aussi envisagée [11] [12].

Les débits dans les réseaux cœur et les réseaux d'accès poursuivent leur croissance, il sera donc encore nécessaire d'imaginer de nouvelles solutions pour augmenter les capacités de transmission. Les infrastructures et supports physiques existants doivent être exploités en particulier, de façon à ne pas dépendre uniquement de nouvelles installations de matériels plus performants. Que ce soient des réseaux d'accès FTTH de type P2P ou GPON à fibre monomode, ou bien des réseaux FTTH avec fibres multimodes, tous ces réseaux devront donc pouvoir évoluer de manière à transmettre à terme des débits plus importants que ceux prévus lors de leur mise en place.

b) Data centres :

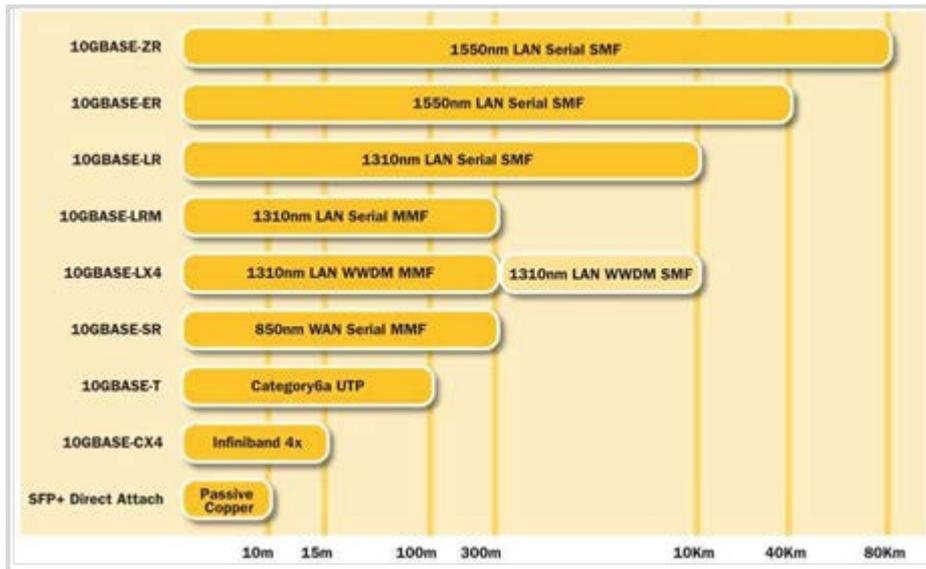
Les centres de traitement de données (data centres) concentrent des équipements réseaux et informatiques dans le but de stocker d'énormes quantités de données .Les serveurs qu'ils hébergent permettent la dématérialisation des contenus et garantissent l'existence physique des données numérisées. Compte tenu de la taille extrêmement importante des données à transmettre, l'infrastructure doit fournir une capacité très élevée. Le standard régissant ces transferts à haut débit est généralement le 10 Gigabit Ethernet (issu des normes IEEE 802.3), dont les déclinaisons diffèrent selon que le médium utilisé soit l'optique ou le cuivre, et selon l'interface utilisée.

Cette concurrence actuelle entre ces deux supports physiques s'explique par les faibles distances de transmission : dans un centre de traitement de données, les longueurs typiques des tronçons de fibre installés sont de l'ordre d'une centaine de mètres, comme indiqué par la figure [15]. En traçant l'effectif cumulé des tronçons de fibre optique déployés dans les data centres sur la période 2009-2011, on montre que 88% d'entre eux ont une longueur égale ou inférieure à 100 mètres. Pour de telles distances, l'atténuation d'un câble constitué d'une paire de fils de cuivre reste assez faible pour concurrencer efficacement la fibre optique. Néanmoins, le standard de transmission à 10 Gb/s fait déjà la part belle aux interfaces optiques, comme le montre la figure [15] : les interfaces électriques ne concernent que les transmissions inférieures à une centaine de mètres. La fibre optique multimode occupe le créneau des transmissions inférieures à 300 mètres tandis que la fibre monomode reste la seule option considérée pour les transmissions longue distance.



Figure(1.15) - Longueurs des tronçons de fibres installés dans les **data centers** (2009-2011)

Cependant, l'augmentation des débits à transmettre s'accompagne aussi d'une évolution des standard terme par des standards de transmission à 40, puis 100 Gb/s, via la norme 802.3ba. Ces futurs standards s'appuient notamment sur une multiplication des liens, le 40 Gigabit Ethernet (40 GE) transmis sur câble étant par exemple une combinaison de 4 liens câblés à 10 Gb/s[12]. Ces standards sont détaillés dans le tableau 1.



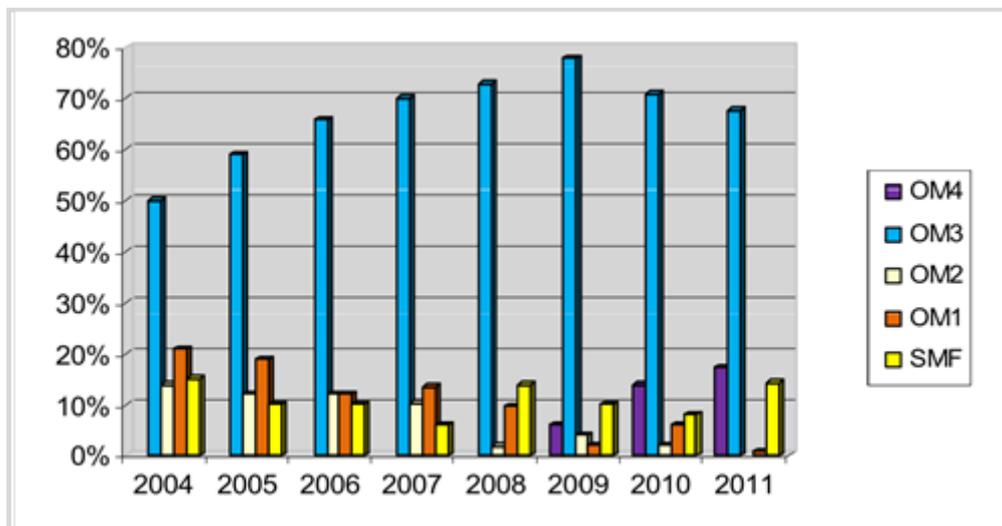
Figure(1.16) - Interfaces prévues par les différents standards 802.3 à 10Gb/s

Dans le cas des réseaux câblés, on se dirige alors vers une parallélisations de plusieurs liens, avec une augmentation des coûts en conséquence. Cette multiplication des liens reste aussi envisagée dans le cas de l'optique mais reste optionnelle, dans la mesure où une seule fibre optique peut suffire à assurer la capacité de transmission souhaitée en utilisant du multiplexage en longueur d'onde. A noter que ces standards n'envisagent la transmission sur câble que pour de très courtes distances inférieures à 7 mètres, ce qui illustre la domination à venir des fibres optiques pour les transmissions ultra haut débit même sur des distances relativement courtes.

	Médium (couche physique)	Distance maximale	Débit (Gb/s)
40GBASE-KR4	Bus de communication	1m	4x10
40GBASE-CR4	Paire de fils de cuivre torsadée	7m	4x10
100GBASE-CR10			10x10
40GBASE-SR4	Fibre multimode OM3/OM4	100/150 m	4x10
100GBASE-SR10			4x25
40GBASE-LR4			4x10
100GBASE-LR4	Fibre monomode	10 km	4x25
100GBASE-ER4	Fibre monomode	40 km	4x25

Tableau 1 - Protocoles de transfert à 40 et 100 Gb/s

Comme dit plus haut, le standard prédominant en 2012 est le 10 GE. Sur les distances de transmission caractéristiques de l'environnement des centres de traitement de données, la fibre optique monomode est peu employée au profit de la fibre optique multimode, comme le montre la figure [17]. Ceci s'explique à la fois par les performances suffisantes des fibres multimodes et par leur plus grande facilité d'installation et d'utilisation, en raison d'un diamètre de cœur plus large. Ainsi, la fibre multimode OM3 de diamètre de cœur de 50 micromètres et de diamètre de gaine de 125 micromètres domine ce marché. On assiste cependant au développement de la fibre optique OM4, plus récente, de caractéristiques similaires à la fibre OM3 (multimode, mêmes diamètres de cœur et de gaine 50/125 μm) mais à la bande passante plus importante ($\sim 3500 \text{ MHz.km}$ contre $\sim 1500 \text{ MHz.km}$ pour la fibre OM3, pour une bande passante mesurée en injection saturée à 850 nm). Ce type de fibre est donc voué à remplacer la fibre OM3 actuelle, tandis que la fibre OM5 est déjà en développement.



Figure(1.17) - Types de fibres installés dans les centres de traitement de données sur la période 2004-2011

En conclusion, dans les data center, une stratégie actuellement adoptée pour répondre à l'augmentation des débits consiste à paralléliser les transmissions en augmentant le nombre de câbles. Cette stratégie ne peut être une solution à terme, le nombre de câbles ne pouvant pas être augmenté indéfiniment compte tenu des contraintes de coût et d'encombrement. L'utilisation de la fibre optique multi mode permet de diminuer le nombre de liens parallèles, mais sans pour autant changer de problématique à long terme : quel que soit le type de fibre multi mode utilisé, il y a une limite au débit maximal que l'on peut transmettre en utilisant une simple transmission en bande de base avec un protocole Ethernet. Il est donc primordial de développer de nouvelles techniques pour optimiser les capacités de transmission des fibres existantes et à venir, notamment pour leur utilisation dans les data centres.

1.II. Conclusion :

Nous commençons notre chapitre par des concepts généraux comme le réseautage Les appareils mobiles et leur évolution et les différentes infrastructures 2G, 3G et 4G, suivies par des réseaux mobiles 5G, ainsi que ses composantes, le principal défi de la 5G et des solutions conçues pour assurer la couverture et la qualité de service attendues

Chapitre 2 : La Radio sur Fibre (RoF) dans une architecture FTTH

2.1. Introduction :

Avec le développement fulgurant des communications mobiles et sans fil, la combinaison des technologies radio et optiques a attiré une large attention. Aujourd'hui, les appareils intelligents, tels que les téléphones portables, les ordinateurs personnels ou les tablettes, permettent de fournir des services hautement évolutifs, notamment des services multimédias riches tels que ceux fournis par les réseaux fixes. Par conséquent, les futurs réseaux d'accès devront être capables de transmettre des flux de données pouvant atteindre des gigabits par seconde pour les appareils mobiles sans fil. Cette exigence de débit élevé peut être satisfaite en utilisant la technologie millimétrique (30 - 300 GHz), mais a une portée plus courte par rapport aux signaux micro-ondes. Pour remédier à cette limitation, la technologie optique a été introduite dans le domaine RF. La solution repose sur une technologie hybride appelée Radio over Fiber (RoF : Radio over Fiber).

Dans cette partie, nous donnons la définition de la technique radio sur fibre, puis nous présentons les domaines d'applications et les architectures radio sur fibre utilisées pour les différents réseaux.

2.1 Radio sur fibre :

2.1.1 Définition :

Radio-over-Fibre (Radio-over-Fiber ou RoF) en anglais désigne le Générer et/ou transmettre optiquement des signaux de radiofréquence. La technologie .La transmission RoF est principalement basée sur la modulation d'une porteuse optique par un signal RF, qui transporte les données à transmettre [15] Par conséquent, la technologie radio sur fibre (RoF) vise à simplifier au maximum la configuration et le coût des terminaux radio pour les réseaux sans fil. Réseau sans fil (WLAN) et Les réseaux cellulaires peuvent alors bénéficier de RoF. Dans les systèmes sans fil, Un oscillateur radio (l'équipement le plus cher aujourd'hui) est nécessaire à tous les niveaux Site d'antenne (station de base : SB).

Par conséquent, le prétraitement des signaux radio effectué dans le domaine L'électricité par RAU est particulièrement chère pour les opérateurs en termes de coûts d'installation (CAPEX) et de coûts de maintenance (OPEX)

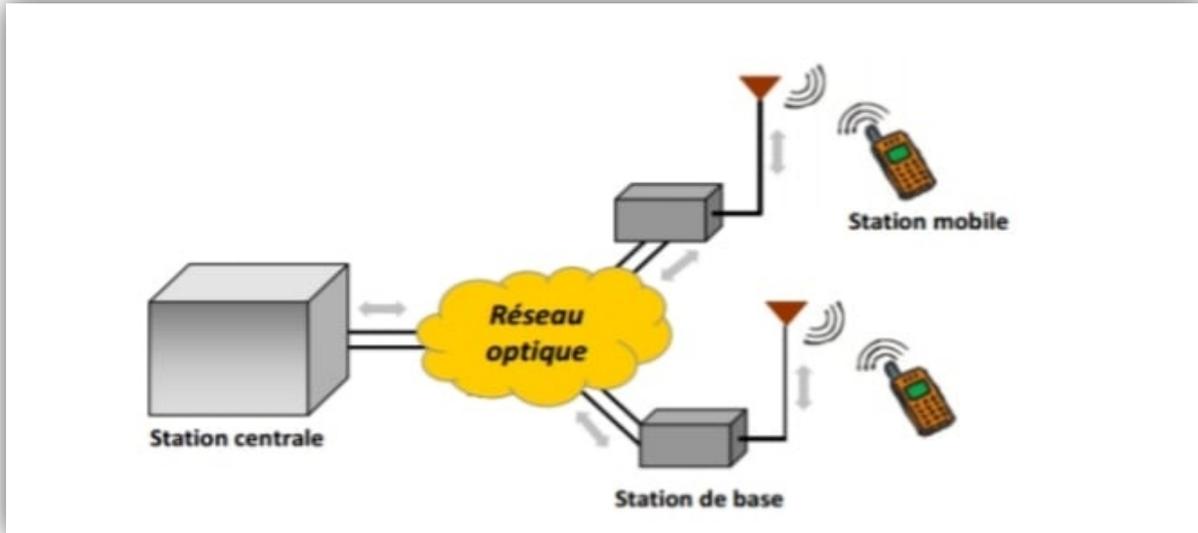


Figure 2.1 Modèle d'un système RoF simplifié [16]

La RoF permet ensuite de déplacer les radios les plus complexes du SB vers le site central distant (SC). Dans le cadre des réseaux cellulaires publics, un tel site central correspond à Souvent avec du personnel permanent dans un centre de commutation mobile (MSC) Surveillance sur place. L'idée de base de RoF est de transmettre des RF d'une station centrale (MSC) à plusieurs SB et vice versa sur une fibre monomode standard (SMF). (Voir figure 2.1). À la fin des années 1990, la technologie RoF a été expérimentée pour la première fois Les avantages économiques de cette approche sont démontrés. En fait, l'équipement le plus cher Initialement situé à chaque station de base peut être à la même Station de base des sites qui facilitent leur mutualisation potentielle.[17]

Il existe deux façons de transmettre des signaux radio. L'une consiste à convertir les signaux radio en signaux numériques, et l'autre consiste à utiliser directement les signaux radio [20]. Dans le premier cas On parle de radio numérique sur fibre (D-RoF : Digital Radio-over-Fiber), et dans le second cas, de radio analogique sur fibre (A-RoF : Analog Radio-over-Fiber) [18]. C'est cette dernière qui anime cette recherche, car dans le contexte béninois, elle représente le premier axe de réflexion et permettra de concevoir l'utilisation des infrastructures radio existantes. Par conséquent, c'est sans aucun doute l'alternative la moins chère mais la plus efficace au déploiement de la technologie. Quant à la forme D-RoF, elle sera abordée dans d'autres travaux en tant que candidat technique pour l'environnement numérique des réseaux de télécommunication terrestres.

Dans l'un ou l'autre des cas, il existe principalement trois types d'architecture pour le transport de la radio sur fibre. Elles seront abordées dans la suite de ce chapitre. Dans chacune des architectures, l'idée de base consiste à simplifier autant que possible la complexité du système.

2.1.2 Techniques de transport de la radio sur fibre :

Comme mentionné précédemment, la motivation principale de la RoF est d'alléger les sites d'antennes (Station de base) des périphériques radio coûteux tels que les oscillateurs et les circuits électroniques à grande vitesse associés.

À cette fin, certaines ou idéalement toutes les radios sont transmises à partir de la station de base (SB) vers un emplacement centralisé où la mise en commun des infrastructures peut être effectuée (SC) et la gestion et la supervision du site Web. Dans ce cas, le SB de N cellules distantes correspond à un ensemble de cartes électroniques connectées à différents racks. Le châssis est situé en SC. Les N racks sont alimentés localement par une paire d'oscillateurs à IF et RF (f_i et f_c). De même, un seul système de refroidissement peut être utilisé pour la régulation de la température de diverses radios SB situées dans la même enceinte. En revanche, sans le RoF, il faudrait N paires de ces oscillateurs (f_i et f_c) et N sites surveillés par des permanents sur chaque site : c'est aussi cher. Il existe trois façons d'interconnecter SC et SB.

2.1.2.1 Transport de fréquence RF sur fibre : RF-over-Fiber (RFoF) :

La première option consiste à transférer toutes les radios de SB à SC (fig. 2.2). Par conséquent, le SB n'a qu'une seule interface optoélectronique et une seule antenne rayonnante. Une sorte de cette méthode, appelée « RF-over-fiber », transmet des signaux radio directement depuis le SC à l'antenne RF vers la base. C'est donc l'option la plus rentable pour les opérateurs de télécommunications, car SB n'a plus besoin d'oscillateur radio. Dans la figure 2.2, nous supposons deux fibres unidirectionnelles pour la liaison descendante (de SB à SC) et séparément pour le trafic en amont (de SC à SB). Dans ce cas, le même canal optique peut être utilisé pour transmettre des signaux RF dans les deux sens [17].

Cependant, plus la fréquence est élevée, plus la transmission directe du signal radiofréquence est difficile. RF est élevé en raison des effets néfastes de la dispersion chromatique. De plus, dans le domaine millimétrique (30-300 GHz).

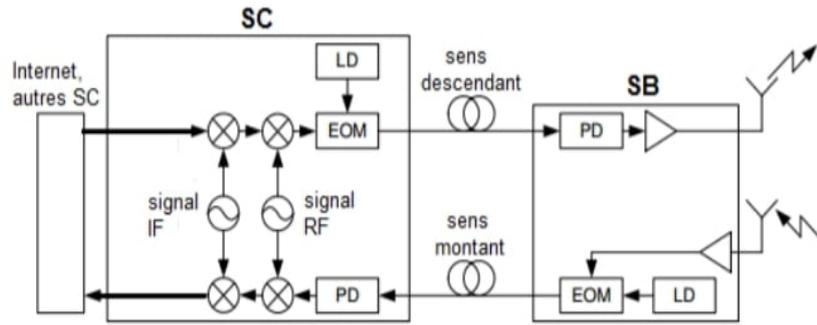


Figure 2 : 2 : transport de fréquence RF sur fibre [18]

le prix élevé des composants optoélectroniques nécessite des photodiodes à large bande passante avec un bon rendement de conversion. Au niveau SC et à tous les niveaux SB. La modulation externe est réalisée à l'aide d'un modulateur ultrarapide, permettant d'atteindre des vitesses de modulation élevées (> 40 GHz), par ex. Modulateur Mach-Zehnder (MZM) ou modulateur à électro-absorption (EAM) [15]

2.1.2.2 Transport de fréquence IF sur fibre : IF-over-Fiber (IFoF) :

La deuxième option est de transmettre un signal pré modulé à une fréquence intermédiaire f_i est de SC à SB. La valeur de la fréquence f_i dépend du système sans fil considéré. Cette fréquence est l'endroit où le multiplexeur radio est construit. Selon la technologie radio considérée, le multiplexage radio correspond généralement à des canaux QAM indépendants (cas des systèmes mobiles radio 3G) ou chaînes OFDM interdépendantes (dans le cas des systèmes mobiles radio 4G) . L'avantage de ce système est d'offrir une efficacité en termes de coût car il peut être intégré Composants électroniques à faible coût largement utilisés sur le marché [15]. cette seconde L'option s'appelle "IF-over-Fiber" et est illustrée à la Figure 2.3.

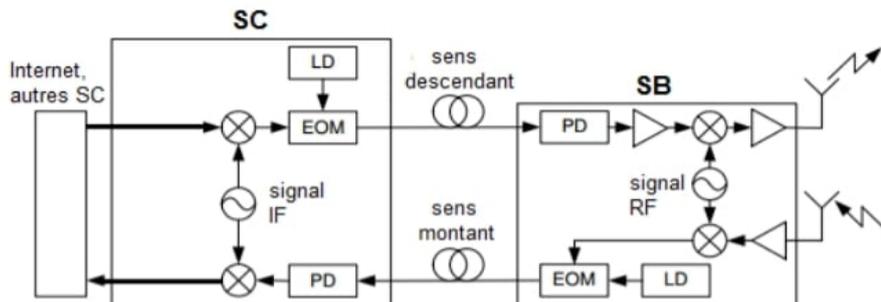


Figure 2 : 3 : transport fréquence IF sur fibre [18]

Cependant, cette architecture reste complexe par rapport à l'architecture RF-over-Fiber, où Parce que chaque SB nécessite un oscillateur local et un mélangeur Effectuer une conversion de fréquence. Ces oscillateurs peuvent être partagés entre les liens montant et descendant [15].

2.1.2.3 Transport en bande de base sur fibre : Base band-over-Fiber (BBoF) :

La modulation en bande de base de la fibre signifie que les données à transmettre sont Principalement en bande de base de SC à SB où le signal est transposé en fréquence Antenne radio rayonnante. A SB, après détection photoélectrique, le signal en bande de base est obtenu Module la fréquence intermédiaire (f_i) bien en dessous de la fréquence RF rayonnée dans les cellules. L'idée de la transmission en bande de base par fibre optique est de choisir, d'utiliser Filtre passe-bande, l'une des copies du signal modulé est située dans la gamme de fréquences correspondant à la radiofréquence souhaitée dans la cellule radio. Les répliques sélectionnées doivent être agrandies avant d'être rayonnées à travers la cellule.

Cette troisième option *CF.FI* (figure 2 :4) appelée « baseband –over-fiber » [17], a l'avantage de réduire les effets de dispersion En raison de la transmission en bande de base, mais nécessite un équipement électro-optique haute fréquence coûteux (mélangeurs).[15]

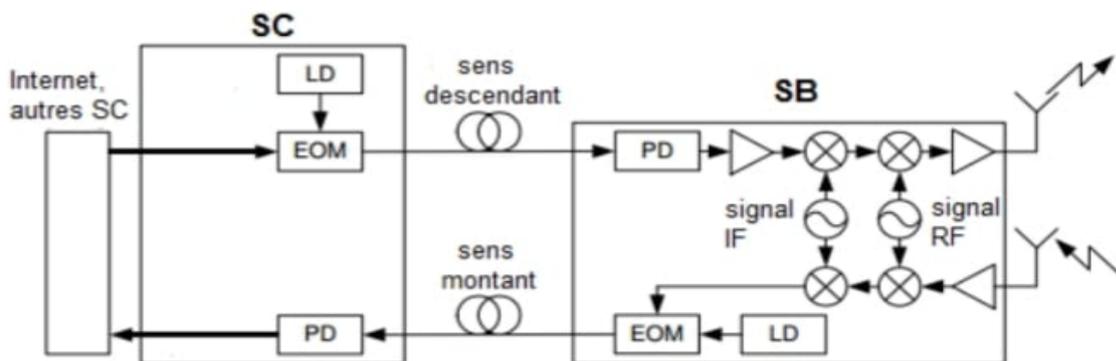


Figure 2 :4 : transport en bande de base sur fibre [18]

Toutefois, il existe plusieurs architectures possibles de la radio sur fibre pour les réseaux d'accès, les réseaux indoor et les réseaux domestiques. Elles seront présentées dans la suite de ce document.

2.1.3 Principales architectures de la radio sur fibre :

En général, on rencontre deux architectures radio sur fibre. Le premier est Connecter chaque abonné central avec une fibre optique de bout en bout et la deuxième solution consiste à assembler une partie des fibres entre plusieurs clients.

2.1.3.1 Le point à point passif :

L'architecture point à point est la plus simple à déployer puisqu'elle consiste à avoir un lien physique en fibre optique directement entre l'utilisateur et la station centrale garantissant la totalité de la bande passante et la sécurité des données [19], [16] (Cf. Figure 2.5).

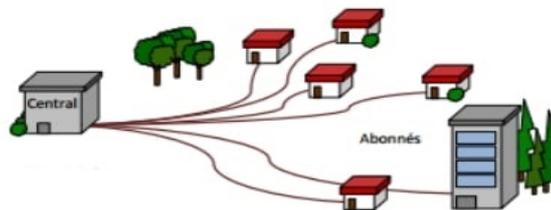


Figure 2 :5 : Architecture point à point passif [19]

Entre l'OLT (Optical Line Termination) et l'ONT (Optical Network Termination) il n'y a pas de composant actif, par conséquent le budget optique est optimal et la distance de fonctionnement peut être très grande sans amplification. Les composants d'extrémités ne requièrent pas de grandes performances et donc peuvent être à bas coût (utilisation possible de « Media Converters standards » pour transformer le signal électrique en signal optique et inversement) [20]. Cependant le coût de déploiement est prohibitif puisqu'il est nécessaire d'installer autant de fibres optiques que de clients ce qui revient extrêmement cher et pose des problèmes de génie civil à chaque nouveau raccordement [19].

2.1.3.2 Le point à multipoint passif :

L'architecture point à multipoint optique permet de partager l'infrastructure entre plusieurs clients. L'élément clé de cette architecture est un séparateur optique passif 1 vers N, qui distribue la puissance optique dans le sens aval vers autant de ports de sortie que possible. Le PON (Passive Optical Network) est un réseau point à multipoint (P2MP) dont le support est la fibre optique [21].

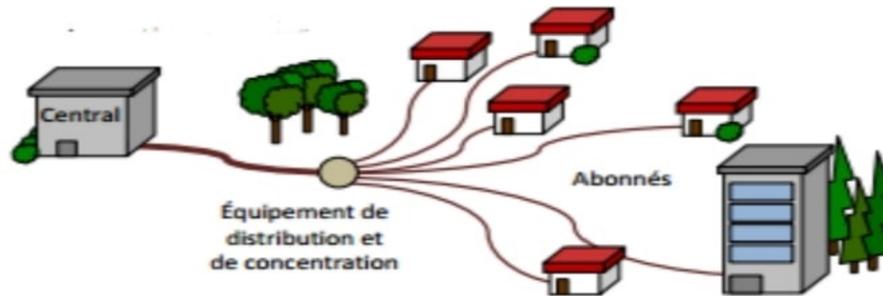


Figure 2 :6 : Architecture point à multipoint passif [19]

Dans cette architecture, une seule fibre commence au niveau du commutateur et dessert plusieurs foyers qui sont connectés à cette fibre au niveau du dispositif passif (coupleur ou répartiteur), placé près de la zone à desservir. Chaque foyer reçoit toutes les informations transmises par l'équipement central OLT, l'équipement récepteur ONT de chaque utilisateur assure le filtrage. Cette architecture permet d'économiser sur le nombre de fibres posées, économisant ainsi la taille de l'infrastructure de réception.[21]

Parmi les différents standards PON [22], émergent EPON (Ethernet PON, un standard proposée par l'ITU « International Telecommunication Union ») et GPON (Gigabit PON, un standard proposée par l'IEEE) ; elles permettent toutes deux des débits supérieurs au Gbps, EPON permet Le débit symétrique maximum est de 1,25 Gbps sur une distance d'environ 20 kilomètres. Le GPON permet des vitesses de liaison descendante de 2,5 Gbps et jusqu'à 64 utilisateurs par port OLT. En 2009, Alcatel-Lucent a démontré une nouvelle convergence de l'accès fixe et mobile La plate-forme 10 G-PON offre une capacité de liaison descendante de 10 Gbit/s liaison montante 2,5 Gbps (il s'agit de la première génération de PON de nouvelle génération) [23].

2.1.4 Avantages et limitations de la radio sur fibre :

2.1.4.1 Avantages de la radio sur fibre :

La technologie ROF combine deux communications : optique et sans fils. Nous pouvons déterminer ses avantages par la suite :

Chapitre 2 : la radio sur fibre (RoF) dans une architecture FTTH

- La fibre en silice a une faible atténuation de 0.2 pour les longueurs d'onde de 1550nm et 0.3 dB/km pour les longueurs d'ondes de 1310nm ce qui permet une amélioration de la zone de couverture
- La transparence par rapport au standard radio utilisé.
- Immunité aux interférences électromagnétiques.
- L'utilisation des systèmes RoF a un faible coût d'installation.
- Le pouvoir de réaliser le Multiple Input Multiple Output (MIMO) à l'aide de la RoF.
- Le poids des fibres est considérablement léger à celui des câbles coaxiaux classiques.
- Une très grande couverture géographique par la bande passante qui est très élevée de la fibre optique et la possibilité d'atteindre des débits de transmission supérieurs au Gbit/s.
- Le coût est moins élevé.
- Simplification de l'unité d'antenne à distance unités : - Petites, légères et de faible puissance. – Entretien et installation plus faciles.
- On peut réaliser des systèmes « Multiple Input Multiple Output » efficaces à l'aide du réseau RoF.

2.1.4.2 Limitations de la radio sur fibre :

- **Dispersion au niveau de la fibre optique :**

La dispersion est toujours une contrainte qui limite la longueur des liens. Pour la fibre monomode (SMF : Single Mode Fiber), la limitation est due à la dispersion chromatique, tandis que pour la fibre multimode (MMF : Multi Mode Fiber), c'est la dispersion intermodale qui est la plus pénalisante.[24]

- **Bruit et non-linéarité :**

Etant donné que l'on utilise des signaux analogiques, il faut dimensionner le système en tenant compte des imperfections propres telles que le bruit (facteur de bruit : NF (Noise Figure)) et les non-linéarités (IP3 (point d'interception du troisième ordre) ou TOI (Third-order Intercept Point)). Ces handicaps limitent la dynamique (DR : Dynamic Range) de la liaison radio sur fibre [3]. La dynamique caractérise la différence entre le plus fort et le plus faible des signaux circulant dans le lien tout en respectant les marges (back-off) au bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) et à la non-

linéarité (déformation du signal). le lien optique se caractérise souvent par un faible IP3 et un très fort NF, aussi, la DR de la liaison optique est beaucoup plus faible que la DR du système radio[24]

2.1.5 Les applications principales de la radio sur fibre :

Les applications de la technologie RoF sont multiples et comprennent notamment les communications par satellite, communications radio-mobiles, les Services Vidéo par distribution multipoint (MVDS), mobile haut débit, les communications routières, les réseaux locaux sans fil reliés aux réseaux optiques etc.

Les principaux domaines d'application sont brièvement décrits ci-dessous :

- **Réseaux cellulaires :**

Les réseaux mobiles représentent un domaine d'application important de la technologie RoF. Le nombre toujours croissant d'abonnés mobiles et l'augmentation de la demande des services à large bande passante ont maintenu une pression soutenue sur les réseaux mobiles pour offrir une plus grande capacité. Par conséquent, le trafic mobile (GSM ou UMTS) peut être efficacement acheminé entre la station de contrôle et la station de base en exploitant les avantages de la fibre optique .

- **Communication routière :**

L'objectif est de fournir en continu une couverture des communications mobiles sur les principaux axes routiers. En vue de répondre aux besoins de couverture du réseau routier, il est nécessaire de déployer un grand nombre de stations de base. Celles-ci peuvent être réalisées de manière simple et avec un coût faible par le biais de la technologie RoF, ce qui rend le système efficace et gérable .

- **Réseaux locaux sans fil :**

Comme les terminaux mobiles deviennent de plus en plus répandus, les réseaux d'accès sans fil à haut débit évolueront vers une demande « haut débit ». La technique radio sur fibre est une solution de manière à répondre à cette demande en utilisant la conception de réseaux pico-cellulaires afin d'optimiser la couverture tout en transmettant les signaux au plus près de l'utilisateur .

- **Accès aux zones mortes :**

Une application importante de la RoF est son utilisation pour fournir une couverture sans fil dans les zones où la liaison sans fil est impossible. Ces zones peuvent être des zones à l'intérieur

Chapitre 2 : la radio sur fibre (RoF) dans une architecture FTTA

d'une structure comme un tunnel, les zones derrière les bâtiments, les places montagneuses ou des zones isolées telles que les jungles [25]

- **FTTA (Fiber to the Antenna) :**

L'utilisation d'un lien optique jusqu'à l'antenne confère plusieurs avantages comme de faibles pertes en lignes et la simplification de la station de base.[25]

2.2 Architecture FTTA (Fiber-To-The-Antenna)

En raison de l'augmentation des débits de données, de l'augmentation des fréquences de transmission et de l'augmentation des volumes de données, la taille des cellules radio dans les systèmes de communication mobiles modernes devient de plus en plus petite. Le tableau [2.1] montre la comparaison des paramètres de divers systèmes de téléphonie mobile. Alors que le GSM fonctionne principalement dans les bandes de fréquences inférieures autour de 900 MHz, les systèmes plus récents utilisent les bandes de fréquences 2,1 GHz, 2,5 GHz et 3,5 GHz.

La propagation augmente avec le carré de la distance, ce qui signifie que le nouveau système nécessite des cellules radio plus petites pour garantir la couverture du réseau égal. Par conséquent, le nombre d'antennes et de stations de base augmente en conséquence. En conséquence, les opérateurs de réseau sont contraints de construire des réseaux de plus en plus denses pour assurer Service de téléphonie cellulaire de qualité constante.[22].

<u>Technologies</u>	<u>Bande</u>	<u>Taille de cellule</u>	<u>Nombres d'antennes</u>
GSM	850/900 Mhz 1800/1900 Mhz	2-35km	2-12 TRX
3G(WCDMA/HSPA,TD-SCDMA)	2.1GHZ	500-2km	Moyen
Wimax	2.5/3.5GHZ	500m	4xHSPA
4G (LTE,Wimax II)	2.5/3.5GHZ	10-20m	Grand(100 Mbps)

Tableau 2.1 – Comparaison des systèmes de communication mobile [22]

Chapitre 2 : la radio sur fibre (RoF) dans une architecture FTTH

Cependant, l'architecture des réseaux cellulaires traditionnels et la liaison entre les fils de cuivre Les stations de base et les antennes de station de base ne supportent plus cette tendance, donc Rentable et compétitif. La plupart des systèmes de communication mobile modernes utilisent Maintenant, la fibre optique (FTTH) est utilisée pour le lien entre la station de base et l'antenne [26]. La technologie FTTH est une architecture de réseau à large bande dans laquelle les fibres optiques permettent.

Connectez d'abord la station centrale à la station de base, puis connectez la station de base à Antenne dans la deuxième étape [27].

2.2.1 Architecture traditionnelle :

Les stations de base des systèmes de communications mobiles conventionnels modulent les données dans la bande de fréquence allouée et par la suite amplifient les signaux à hautes fréquences. Ces signaux de sortie sont transmis par l'intermédiaire de câbles coaxiaux à l'antenne qui les rayonne dans la cellule radio (Cf. Figure 2.7). La distance de transmission par câble coaxial est limitée à moins de cinquante mètres étant donné que les câbles coaxiaux sont très sujets à des pertes qui ont un impact négatif sur la couverture des cellules radio et sur le débit de transmission. Avec des distances plus importantes, on utilise des câbles coaxiaux à faibles pertes mais coûteux et qui sont également longs à installer. Généralement, une station de base fournit 3 à 6 antennes, qui couvrent chacune un secteur de 120° ou 60° dans la cellule radio [22].

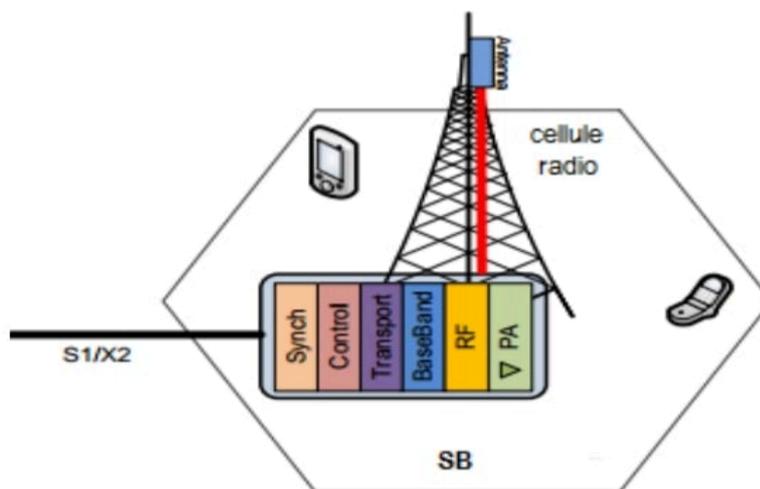


Figure 2 :7 : station de base traditionnelle [27]

Chapitre 2 : la radio sur fibre (RoF) dans une architecture FTTH

L'interface X2 est définie entre les stations de base tandis que l'interface S1 relie une station de base à une station central du réseau mobile. Cette architecture était populaire pour le déploiement de réseaux mobiles 1G et 2G [26].

2.2.2 Station de base avec RRH :

Dans une station de base avec une architecture qui comprend une tête radio à distance (RRH), La station de base est divisée en une unité radio et une unité de traitement du signal (voir Figure 2.8).

Une unité radio appelée RRH assure l'interface avec la fibre et effectue le traitement numérique, c'est-à-dire Conversion numérique-analogique, conversion analogique-numérique, amplification de puissance et filtrage. La partie traitement du signal en bande de base est appelée BBU (Baseband unité). Cette architecture a été livrée avec l'introduction des réseaux 3G Il est actuellement utilisé par la plupart des stations de base. Distance entre RRH et BBU Peut être étendue à 40 km [26].

Dans cette architecture, toute l'électronique de haute fréquence et de puissance est déportée de puis la station de base à la tête radio à distance. Cette dernière est reliée à la station de base (BBU) par des câbles à fibres optiques. Le traitement du signal en bande de base continue d'avoir lieu dans la station de base, où la dernière unité, un émetteur-récepteur SFP, effectue la conversion électro-optique des données. Le signal optique est transmis à des débits typiques d'un gigabit par seconde à la tête de la radio qui convertit le signal optique en un signal électrique au moyen d'un second module SFP, avant la modulation haute fréquence et l'amplification de puissance final.

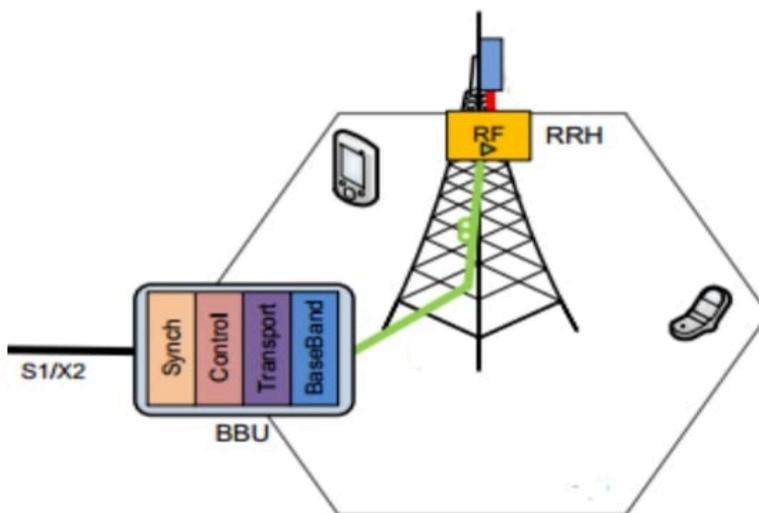


Figure 2 :8 : station de base avec RRH[27]

Chapitre 2 : la radio sur fibre (RoF) dans une architecture FTTH

Le signal radiofréquence est transmis à l'antenne par l'intermédiaire d'un court câble coaxial appelé « jumper » avant d'être émis par l'antenne. Les systèmes FTTH augmentent les distances de transmission entre la station de base et les têtes de radio à distance et ont des avantages considérables en termes de coût et d'opérations.[22]

2.2.3 Architecture centralisée des stations de base : CRAN (Centralized Radio Access Network)

Dans l'architecture C-RAN, afin d'optimiser l'utilisation des BBU entre les stations de base Charge légère au lieu de charge lourde, BBU est concentré dans un BBU". Un hôtel BBU est une collection virtuelle partagée entre plusieurs sites cellulaires (voir Fig.2.9) et assurent le traitement des données en bande de base. L'architecture C-RAN ne permet pas Non seulement les coûts d'installation et de maintenance du réseau peuvent être réduits, mais il peut également apporter des performances en termes de mobilité et de couverture radio. Le concept de C-RAN a été introduit par IBM (International Business Machines Corporation), nommée "Wireless Network Cloud (WNC)" et basée sur Le concept de systèmes de communication sans fil distribués [26]. Aujourd'hui, C-RAN est un terme Utilisé pour décrire cette architecture, où la lettre C peut être interprétée comme : "cloud" ou "centralisé (traitement centralisé)".

Différents travaux sur la FTTH ont été traités dans [27], [28] et [29]. Dans [28] et [29], l'opération de changement de fréquence a été réalisée dans le domaine électrique. Par contre dans [27], elle a été réalisée par voie optique et c'est cette dernière méthode que nous adopterons dans cette étude.

Plutôt que de générer un signal dans le domaine électrique pour après le convertir dans le domaine optique, il est possible de générer ce signal directement sur le lien optique. Les données sont appliquées sur les convertisseurs E/O à une fréquence intermédiaire ou directement en bande de base .

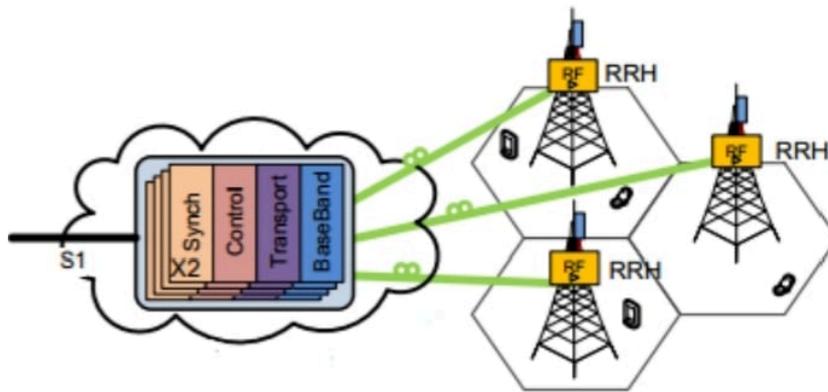


Figure 2 :9: architecture C-RAN [27]

2.II. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présente les techniques de transport et les avantages des systèmes ROF, plus leurs limitations ainsi que leur application ont été montré et enfin Architecture FTTH.

Chapitre 3 : Etude des systèmes hybrides optiques/radio

3.1. Les techniques de déport radio sur fibre :

3.1. Introduction :

Ce chapitre présente dans un premier temps les différentes techniques pour réaliser une liaison radio sur fibre sur une fréquence porteuse avec les différentes limitations qui sont liées à l'optique.

La première classe de ces techniques fait appel à la détection directe qui trouve son application lorsque les signaux radio possèdent des fréquences inférieures à 10 GHz, tandis que la seconde classe qui est la détection hétérodyne est plus adaptée aux signaux ayant des fréquences supérieures à 10 GHz. Une étude sur les différents types de bruit et leur influence sur les performances de la transmission sera également présentée. Enfin, la fin de ce chapitre sera consacrée aux différentes méthodes pour la réalisation d'un bilan avec des exemples théoriques dans le cas où les différents types de bruit sont de type gaussien, et blancs.

Les techniques de modulation permettant de réaliser un déport radio sur fibre sur une fréquence porteuse ou intermédiaire peuvent se classer en deux catégories. Une catégorie est la détection directe (partie 3.1.1), dans ce cas une photodiode est utilisée pour recevoir le signal, elle convertit la puissance optique en courant électrique. La technique de détection hétérodyne (partie 3.1.2) consiste à détecter sur une photodiode deux longueurs d'ondes proches l'une de l'autre (λ_1 et λ_2). Les fréquences optiques f_1 et f_2 associées à λ_1 et λ_2 respectivement sont trop élevées pour être détectées par la photodiode (supérieures à 1THz), ce qui donne après la photodiode deux composantes de courant continues. Cependant la photodiode détecte un troisième courant de signal dit hétérodyne. La fréquence f_3 de ce courant correspond à la différence de fréquence entre les deux lasers [30].

3.1.1. Détection directe :

La détection directe du signal sur la photodiode est un moyen simple pour transmettre un signal radio sur fibre. En effet, le signal radio module directement le composant électro-optique et aucun élément de codage ne se trouve au niveau de l'antenne déportée. Ces modulations avec une détection directe conviennent bien pour des signaux dont les fréquences porteuses sont inférieures à 10GHz. Cependant pour des signaux ayant des fréquences plus élevées, trouver des composants capables d'être modulés suffisamment rapidement devient plus difficile. De plus, certains

phénomènes physiques détaillés par la suite ajoutent des contraintes pour ces signaux. Les composants qui génèrent un signal radio sur fibre pour un système à détection directe sont, soit un laser dont le courant de polarisation est modulé, soit un laser continu couplé à un modulateur externe (électro-absorption ou Mach-Zehnder). Pour recevoir le signal optique, une photodiode est utilisée. Elle convertit la puissance optique en courant électrique.

3.1.1.1. La diode laser :

Pour une diode laser, le signal RF modifie le courant de polarisation du laser. Son intensité lumineuse est alors modulée. Les avantages de ce composant sont, sa mise en œuvre aisée, l'absence de conversion analogique numérique, une simplification de l'antenne déportée (absence d'oscillateur local car le signal radio et la porteuse RF sont transmises optiquement), et enfin une évolution facile (si le système radio change, le laser reste identique).

Les inconvénients de la modulation directe sont plutôt au niveau du laser qui nécessite une bonne linéarité de sa courbe de conversion électro-optique pour éviter de déformer le signal. De plus la bande passante d'un laser doit être suffisamment grande ce qui limite l'utilisation des lasers bas coûts. Dans le cas de l'utilisation d'un laser bas coût, il est nécessaire de transposer le signal sur une fréquence intermédiaire plus basse pour qu'il se propage dans la fibre. Cette technique ajoute un oscillateur local au niveau de l'antenne pour mettre le signal à la bonne fréquence, et n'apporte pas de simplification.

3.1.1.2. Les modulateurs externes :

Une deuxième technique est d'utiliser une modulation externe. Ici le signal radio modifie le comportement du modulateur utilisé pour générer un signal radio sur fibre et non plus le courant de polarisation du laser. Le signal radio modifie la tension de polarisation du modulateur et donc sa transmissivité .

Le signal optique de sortie est alors modulé en amplitude. L'avantage d'utiliser un modulateur externe est d'avoir une bande passante importante ce qui permet d'utiliser des fréquences porteuses élevées. De plus cela permet d'utiliser un laser bas coût étant donné que ce dernier n'est pas modulé. Les inconvénients communs de ces modulateurs sont l'utilisation de deux composants (laser + modulateur) pour générer le signal radio sur fibre et leurs coûts élevés.

- **Le modulateur à électro-absorption :**

Le principe de fonctionnement d'un modulateur à électro-absorption est basé sur la modification du spectre d'absorption d'un semi-conducteur soumis à un champ électrique (Figure 3.1). La transparence du matériau est modifiée en fonction de la tension qui lui est appliquée, ce qui module l'amplitude du signal optique.

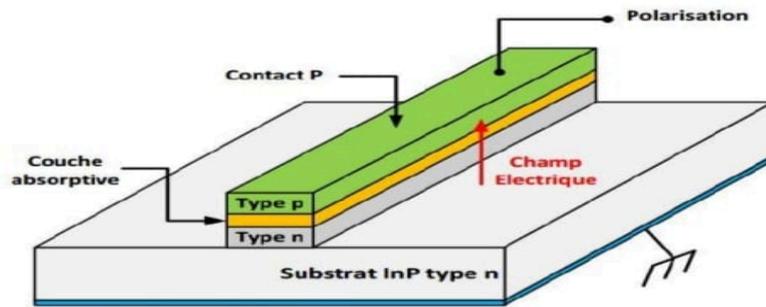


Figure 3.1 : Schéma simplifié du modulateur à électro-absorption [31]

- **Le modulateur Mach-Zehnder :**

Un interféromètre de type Mach-Zehnder (Figure 3.2) présente deux jonctions Y: la première permet de séparer de manière équilibrée la puissance sur les deux bras de l'interféromètre. Elle se prolonge ensuite sur deux bras parallèles, non soumis au même champ électrique. Des électrodes permettent par effet électro-optique, de modifier l'indice de réfraction des deux bras. Il est alors possible de déphaser les ondes se propageant dans chacun des bras, l'une par rapport à l'autre. En fonction de ce déphasage la transmission varie.

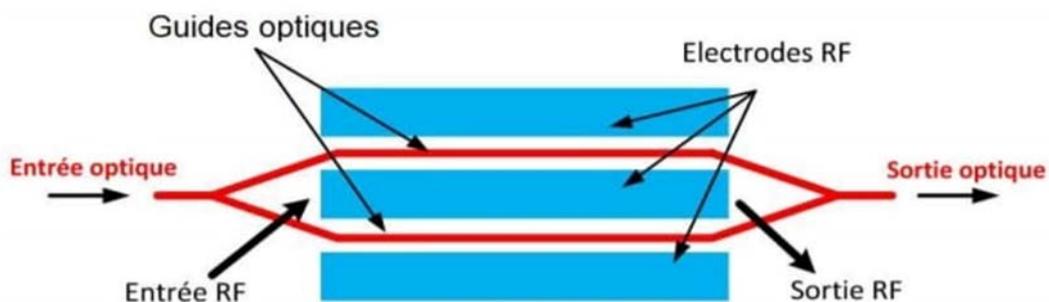


Figure 3.2 : Schéma de principe d'un modulateur externe de type Mach-Zehnder [31]

Suivant la différence de marche (phase relative) introduite par la tension V , les deux faisceaux interfèrent de manière constructive (toute la puissance optique est disponible en sortie,

équivalente à un « 1 ») ou de manière destructive (aucune lumière n'est présente en sortie du guide, équivalente à un « 0 »).

Le champ électrique appliqué est en général un champ de très haute fréquence permettant de moduler le signal à des débits très élevés pouvant atteindre 100 Gb/s.

3.1.2. La détection hétérodyne :

Pour générer un signal RF, la plupart des techniques reposent sur le principe de cohérence de mélange dans la photodiode. Ces techniques sont généralement désignées par le terme « Détection Hétérodyne (RHD) ».

- **Conversion O/E :**

Les convertisseurs O/E à détection directe sont quadratiques c'est à dire que la puissance est proportionnelle au carré du champ électrique. D'un point de vue spectral, cela se traduit par la détection non pas des raies du spectre du champ optique mais des battements entre les raies du spectre optique. Pour un signal optique incident non modulé, le spectre optique est constitué d'une unique raie à la fréquence de la porteuse optique. On obtient alors en sortie du convertisseur O/E un signal continu. Le cas de spectres optiques incidents à deux et trois raies est illustré au niveau de la (Figure 3.3).

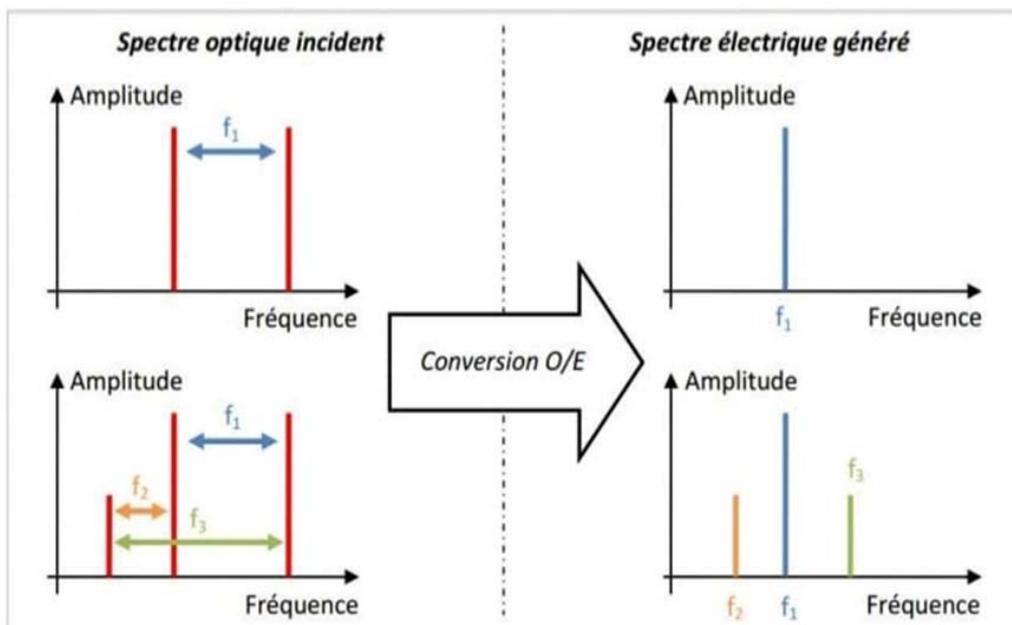


Figure 3.3: Chaîne optique du système RoF typique.

Pour un spectre incident contenant deux raies optiques, un seul battement est possible. On obtient, après conversion O/E un signal sinusoïdal dont la fréquence correspond à l'espacement entre les deux raies optiques. Pour un spectre incident contenant trois raies optiques, trois battements sont possibles. On obtient, après conversion O/E, trois signaux sinusoïdaux correspondant à la somme de ces trois battements.

Un cas particulier est le cas où deux battements se font à la même fréquence. C'est le cas où $f_2 = f_1$ sur figure(3.3) . Après conversion O/E, le signal à f_1 est constitué de la somme des deux signaux issus de chacun des deux battements. On n'obtient plus que deux raies dans le spectre électrique émis.

Suivant le déphasage relatif entre les deux signaux générés à f_1 , la somme des deux battements peut être constructive ou destructive. Si les deux signaux sont en phase, les amplitudes des deux battements s'additionnent. S'ils sont en opposition de phase, les amplitudes se retranchent et plus aucun signal n'est détecté à la fréquence f_1 .

3.2. Limitations de la transmission liées à l'optique :

Cette partie présente les phénomènes physiques qui limitent la transmission. Dans un premier temps, nous étudions les bruits liés à une transmission optique (section 3.2.1). Dans un second temps, l'effet de la dispersion chromatique pour une fibre monomode (section 3.2.2) est décrit pour un signal radio sur fibre. Dans un troisième temps nous présentons brièvement l'effet de la dispersion modale dans les fibres multimodes. Enfin nous analysons l'effet Brillouin dans le cas d'une transmission radio sur fibre pour déterminer dans quelles conditions nous devons ou non en tenir compte et comment nous pouvons limiter son influence.

3.2.1 Les sources de bruits dans une transmission radio sur fibre :

La connaissance des différents bruits dans une transmission permet de connaître les paramètres tels que le rapport signal sur bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) et le facteur de bruit (NF : Noise Factor) qui déterminent la qualité de la liaison. Les sources de bruits d'une liaison optique sont variées.

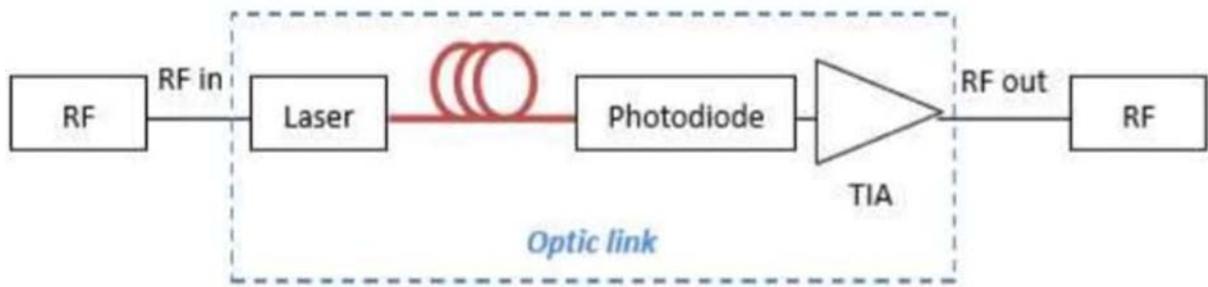


Figure 3.4: Chaîne optique du système RoF typique.

Quatre types de bruits peuvent être définis (figure 3.4) : Les bruits provenant des amplificateurs avant la transmission, le bruit du laser, les bruits de la photodiode et les bruits provenant des amplificateurs après la réception.[33]

3.2.2. Le bruit du laser :

Les fluctuations de l'intensité optique générée par la diode laser représentent une des principales sources contribuant au bruit total de la liaison [34]. A cause de l'émission spontanée et de la recombinaison électron-trou, le signal optique émis par la diode laser est bruité en amplitude et en fréquence [35]. Cette fluctuation est gênante dans le cas d'une détection directe lorsque le taux de modulation du laser est faible [36]. Le paramètre de bruit du laser est le bruit d'intensité relatif (RIN : Relative Intensity Noise) qui est le rapport entre la puissance de bruit $(\Delta P^2(f))$ et le carré de l'intensité moyenne (P^2) [33].

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

$$\mathbf{RIN(f)} = \frac{(\Delta P^2)}{P^2} \quad (\text{eq : 3.1})$$

L'unité est 1/Hz.

En dB l'équation devient :

$$\mathbf{RIN(f)} = 10 \log \left(\frac{\Delta P^2}{P^2} \right) \quad (\text{eq : 3.2})$$

L'unité est alors dBc/Hz [33].

Le RIN du laser possède deux termes indépendants : le RIN basse fréquence et le RIN haute fréquence [35].(figure 3.4)

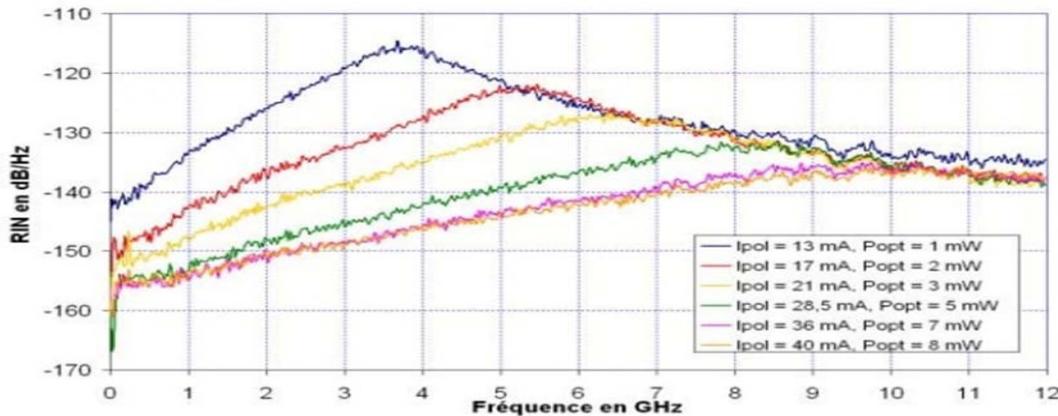


Figure 3.5: RIN aux hautes fréquences d'un laser DFB pour différents courants de polarisation

3.2.3. Le bruit de la photodiode :

Le bruit de grenaille (Shot Noise en anglais) est lié à la distribution aléatoire instantanée des photons émis par la source lorsque le signal arrive sur la photodiode. Dès que la photodiode est polarisée, un courant d'obscurité (I_{dark}) apparaît. Il est dû à l'émission aléatoire des paires électron-trou.

Le bruit de la photodiode est donc :

$$I_{\text{noise Photodiode}} = \sqrt{2q(I_{dc} + I_{dark})\Delta F} \quad \text{eq (3.3)}$$

Avec $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ la charge électrique, I_{dc} le courant de sortie de la photodiode, et ΔF la bande de fréquence utilisée pour la mesure. Son unité est l'ampère (A).

3.2.4. Bruit d'un amplificateur transimpédance :

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

Cependant, l'ajout d'un amplificateur augmente aussi la puissance de bruit. Les paramètres habituellement fournis sont soit le courant de bruit entre la sortie de la photodiode et l'entrée de

l'amplificateur transimpédance ($A/\sqrt{\text{Hz}}$) ou bien la puissance de bruit en sortie de la photodiode (NEP), dont l'unité est le W/Hz.[33]

3.2.5 Effet de la dispersion chromatique sur une transmission radio sur fibre :

2.2.5.1 Définition :

L'étude de la propagation d'une onde électromagnétique dans un guide dispersif, comme la fibre optique, est effectuée dans le domaine fréquentiel plutôt que dans le domaine temporel. En effet, en fréquentiel, le champ électrique est multiplié par $\exp[-i\beta(\omega)z]$ constante de propagation du champ dans la fibre (z représentant la distance parcourue dans la fibre et β dépend de la pulsation). La fibre est caractérisée comme un filtre. Sa fonction de transfert est $h(t, z)$. À la distance z la forme d'onde sera : $e(t, z) = e(t, 0) * h(t, z)$. Sachant que nous connaissons $H(\omega, z)$, le calcul s'effectue dans l'espace de Fourier [39] et [40].

$$E(\omega, z) = \text{T F}[e(t, z)] = [e(t, 0) * h(t, z)] = E(\omega, 0) \cdot H(\omega, z) = E(\omega, 0) \cdot e^{-i\beta(\omega)z} \quad \text{eq(3.4)}$$

C'est la méthode générale pour étudier l'évolution de l'onde en fonction de la distance. Néanmoins, la décomposition en une somme d'ondes planes du champ électromagnétique permet de multiplier chaque composante spectrale avec sa constante de propagation. Cette décomposition dépend des caractéristiques du modulateur. Donc en partant du champ optique modulé nous pouvons déterminer l'évolution ce champ due à la dispersion chromatique en fonction de la distance de propagation.

La puissance de sortie d'un modulateur idéal est de la forme ($\eta_{EO} = 1$) :

$$I = I_0 \cdot (1 + m \cdot \cos(\omega_{RF} \cdot t)) \quad \text{eq(3.5)}$$

où m est l'indice de modulation.

Maintenant le champ électrique à la sortie du modulateur est proportionnel à :

$$e(t, 0) = \sqrt{I_0 \cdot (1 + m \cos(\omega_{RF} \cdot t))} \cdot e^{i\omega_0 \cdot t} \quad \text{eq(3.6)}$$

m étant plus petit que 1 et $e^{i\omega_0 \cdot t}$ porteuse optique.

Chapitre 3 : Etude des systèmes hybrides optiques/radio

La propagation dans une fibre de longueur L d'un signal monochromatique induit un déphasage $\varphi(\omega)$ par rapport à la pulsation ω_0 . Ce déphasage est fonction de l'écart entre la pulsation $\omega = \omega_0 \pm \omega_{RF}$ et ω_0 . Le déphasage est de la forme :

$$\beta(\omega) = \beta_0(\omega_s) + \beta_1 \cdot (\omega - \omega_s) + \frac{\beta_2}{2} \cdot (\omega - \omega_s)^2 \quad \text{eq(3.7)}$$

β_2 peut s'exprimer en fonction du paramètre de dispersion chromatique D . Les deux premiers termes de l'équation 3.7 correspondent à un déphasage pur pour le premier (β_0 est le nombre d'onde) et un retard pour le second (β_1). β_1 peut s'exprimer en fonction de la vitesse de groupe v_g . Ils sont ignorés par la suite car ceci revient à changer l'origine des temps. Ce terme s'applique donc au champ électrique (déphasage).

Dans le cas idéal où le laser n'a pas de chirp. L'évolution de la puissance RF à l'entrée de la photodiode est donc :

$$I_{RF} = \frac{I_0 \cdot m}{4} \cdot \cos\left(\frac{\pi \lambda^2 \cdot D \cdot f_{RF}^2}{c} \cdot z\right) \quad \text{eq(3.8)}$$

3.2.5.2 : Cas d'applications :

Cette partie a pour but de déterminer dans quel cas nous devons tenir compte de la dispersion chromatique et du chirp du laser.

La figure 3.6 (a) représente l'évolution de la puissance RF de sortie en fonction de la distance parcourue dans une fibre sans atténuation à une fréquence de 2GHz. Le chirp fixe la position du premier évanouissement de la puissance optique au niveau de la photodiode. En ce qui concerne le chirp, il joue sur l'état de phase des bandes latérales à la sortie du laser. Pour un laser, dont le chirp est positif, il faut moins de distance parcourue dans la fibre par rapport à un laser idéal sans chirp avant que le premier évanouissement ne se produise.

Chapitre 3 : Etude des systèmes hybrides optiques/radio

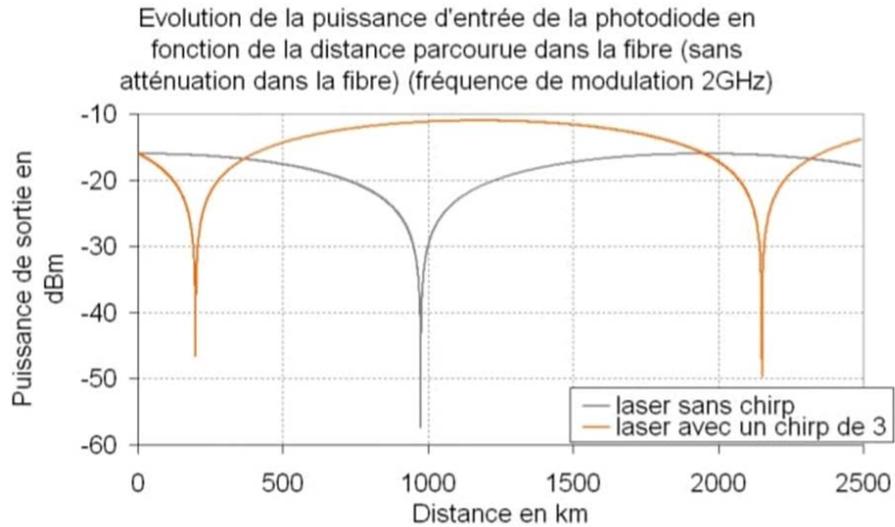


Figure3.6.(a) Évolution de la puissance d'entrée de la photodiode en fonction de la distance parcourue dans la fibre (sans atténuation)

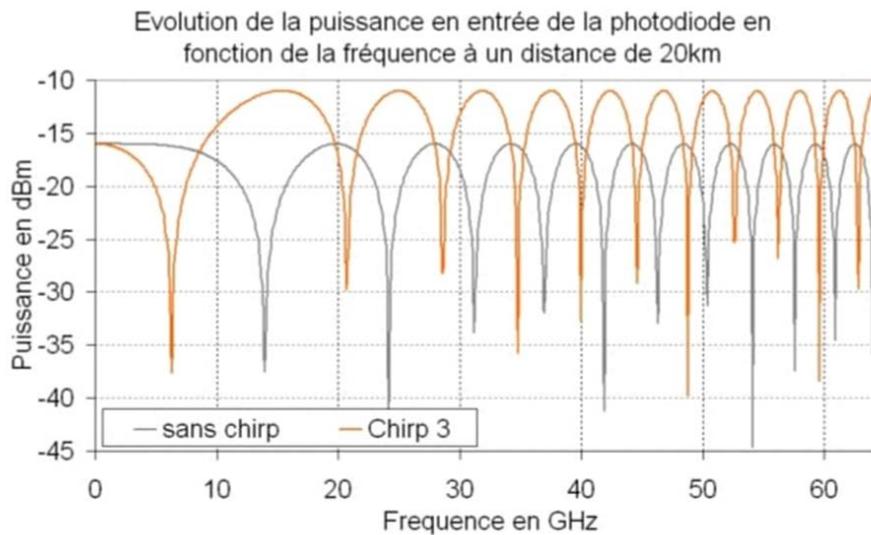


figure 3.6.(b) Évolution de la puissance d'entrée de la photodiode en fonction de la fréquence après 20km de propagation dans la fibre

Figure 3.6(b)– Évolution de la puissance d'entrée de la photodiode en fonction de la distance parcourue ou bien de la fréquence comparée pour un laser idéal et un laser

Maintenant la figure 3.6(b) représente l'évolution de la puissance RF à l'entrée de la photodiode en fonction de la fréquence pour une distance donnée. Nous constatons que, pour une même distance, et suivant la fréquence que nous utilisons, nous pouvons nous trouver au niveau d'un évanouissement du signal. Plus la fréquence de modulation est élevée, plus la fréquence entre deux évanouissements est petite. Par exemple, pour une fréquence de 2GHz, il faut une distance de 199,8km pour atteindre le premier évanouissement et la distance entre deux évanouissements est de 1951,1km. Alors que pour une fréquence de 10GHz le premier évanouissement à lieu pour une distance de 7,99km et la distance entre deux évanouissements est de 78km

2.2.5.3 : Conclusion sur les effets de la dispersion chromatique :

Pour des fréquences inférieures à 3GHz et une distance de propagation dans la fibre jusqu'à 20km, la dispersion chromatique peut être négligée. Par contre pour des petites distances de propagation typiquement inférieures à 300m et dans le cas de la modulation directe du laser (laser ayant un chirp positif) nous pouvons négliger l'influence de la dispersion chromatique pour les fibres monomodes et des fréquences inférieures à 10GHz.

3.2.6 : Effet de la dispersion modale dans la fibre :

La dispersion modale est présente uniquement dans les fibres multimodes. Une fibre est multimode lorsque le diamètre du cœur est grand devant la longueur d'onde. Dans les fibres multimodes, chaque mode a une vitesse de propagation différente. Lors de l'injection d'une longueur d'onde dans une fibre multimode, cette longueur d'onde excite un grand nombre de modes. Chaque mode correspond à un trajet différent dans la fibre et donc à un temps de propagation différent. C'est la différence de trajet entre le trajet le plus court et le trajet le plus long qui va créer des interférences entre les modes et ainsi limiter la bande passante de la fibre multimode. Il existe principalement deux types de fibre optique multimodes, les fibres multimodes à saut d'indice et les fibres multimodes à gradient d'indice.

3.2.7 : Les fibres multimodes à saut d'indice :

Dans ce type de fibre, la différence d'indice entre le cœur et la gaine est importante.

L'ouverture numérique (ON) d'une fibre optique est définie en fonction de l'angle d'incidence limite i_{iL} qui permet d'assurer une transmission sans pertes théorique. L'angle d'incidence limite i_{iL} est l'angle pour lequel tout le signal est réfléchi à l'intérieur de la fibre. La

figure 3.7 donne les paramètres à déterminer pour connaître les conditions de propagation dans la fibre.

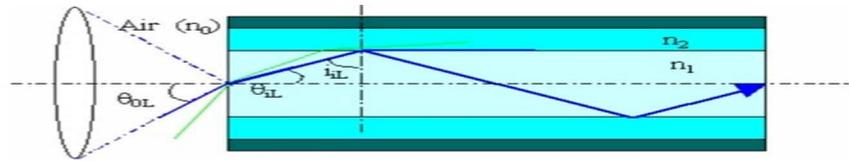


Figure 3.7– Ouverture numérique d’une fibre optique.

Le nombre de modes dans une fibre en fonction du diamètre d du cœur de la fibre optique est donné par l’expression suivante de la fibre [37].

$$N = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 \quad \text{eq(3.9)}$$

La dispersion modale introduit un retard notable. Ce retard, pour une longueur de fibre L se calcule d’une manière assez simple et correspond à la différence entre le temps de propagation maximal (avec l’angle d’entrée θ_{0L}) et le trajet direct. La publication de Pepeljugin [38], donnant l’expression de la réponse de la fibre à une impulsion lumineuse pour une distance z est la suivante :

$$H(z, t) = \sum_u w_u \cdot e^{-\lambda_u z} \delta(t - T_\mu z) \quad \text{eq(3.10)}$$

Avec w_u qui est la distribution de la puissance des modes, T_μ le délai du groupe par unité de temps et λ_u le coefficient d’atténuation pour le mode μ .

3.2.8. Les fibres multimodes à gradient d’indice :

Le cœur se caractérise par un indice variable qui varie progressivement de n_2 à l’interface gaine-cœur jusqu’à n_1 au centre de la fibre (figure 3.8). Les rayons lumineux vont emprunter des chemins différents, mais un choix judicieux du profil d’indice du cœur permet de tendre vers des temps de parcours voisins et donc réduire l’étalement du signal.

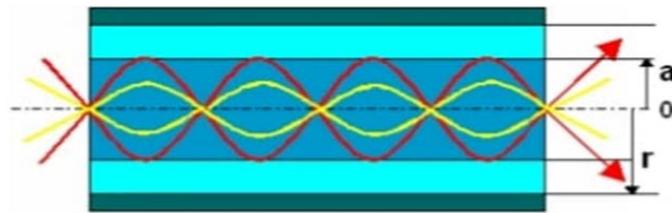


Figure 3.8 . Propagation de la lumière dans une fibre multimode à gradient d'indice.

L'ouverture numérique d'une fibre optique à gradient d'indice est la suivante

$$ON = \frac{\sqrt{n(M)^2 - n_1^2}}{n_0} \quad \text{eq(3.11)}$$

Avec $n(M)$ l'indice local du cœur au point M . La formule du nombre d'onde d'une fibre à gradient d'indice est la suivante :

$$N = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} ON \right)^2 \quad \text{eq(3.12)}$$

3.3 Bilan RF linéaire d'une liaison radio sur fibre

3.3.1 Bilan Optique

Une liaison radio sur fibre est composée de différents composants optiques et électro-optiques, tels que des lasers, des modulateurs, photodiodes. Tous ces éléments influent sur la qualité de la liaison hybride optique/radio, en termes de bruit, d'efficacité de conversion, et de non linéarité. En effet, si le signal n'est pas linéaire, une baisse du rapport signal sur bruit ainsi qu'une augmentation de la puissance des harmoniques sont constatées [41]. Cette partie présente le bilan RF linéaire d'une liaison radio sur fibre.

3.3.1.1 Liaison radio sur fibre :

3.3.1.1.1 Liaison sans amplificateur transpidance :

La figure (3.9) représente l'architecture de base d'une transmission hybride et les principales caractéristiques pour établir un bilan électrique de la liaison. Les valeurs utilisées sont celles typiques des composants. Une liaison radio sur fibre est composée d'un convertisseur électro-optique, soit un laser plus modulateur électro-optique (Mach Zehnder, MEA : modulateur à électro-absorption), soit un laser modulé directement (DML : *Direct Modulator Laser*). Dans ce cas, l'efficacité de conversion (η_{EO}) dépend de la fréquence et du courant de modulation, tandis que dans le cas d'un

modulateur externe, l'efficacité de conversion dépend de la fréquence, du courant de polarisation mais aussi de la puissance optique de sortie du laser. La connaissance de la résistance d'entrée (R_{in}) et l'efficacité de conversion électrique/optique ou pente notée η_{EO} sont des paramètres importants. De même pour le récepteur optique les paramètres sont la résistance de sortie R_{out} et l'efficacité de conversion optique/électrique η_{OE} . Les pertes optiques ($L_{opt,dB}$) sont aussi à prendre en compte lors d'un bilan radio sur fibre électrique.



Figure. 3.9 – Principales caractéristiques d’une transmission radio sur fibre

$$G_{\text{OpticalLink}_{dB,RF}} = 20 \log(\eta_{EO} \cdot \eta_{OE}) - 2 \cdot L_{opt,dB} + 10 \log(R_{out}/R_{in}) \quad \text{eq(3.13)}$$

L'équation (3.13) représente le bilan RF de la partie électro/optique d'une liaison hybride [42] dans le cas où le laser est modulé directement. La perte de un décibel optique correspond à une perte de deux décibels RF. Le terme 2 de $L_{opt,dB}$ vient de la conversion optique électrique. En effet, la puissance optique est convertie en un courant électrique, liée à la détection quadratique de la photodiode.

Une application numérique donne un gain de $G_{\text{OpticalLink}_{dB,RF}} = 15.92dB$, dans le cas où il n'y a pas de propagation dans la fibre et aucun atténuateur ou coupleur optique, ce qui revient à transmission back to back (les paramètres utilisés sont ceux indiqués sur la figure (3.9)

3.3.1.1.2 Liaison avec amplificateur transimpédance:

Dans le cas d'une liaison ayant un amplificateur transimpédance (TIA = TransImpedance Amplifier) l'équation 3.13 devient :

$$G_{\text{OpticalLink}_{dB,RF}} = 20 \log(\eta_{EO} \cdot \eta_{OE}) - 2 \cdot L_{opt,dB} + 10 \log(R_{out}/R_{in}) + 20 \log(R_{tia}/R_{out}) \quad \text{eq(3.14)}$$



Figure. 3.10 – Principales caractéristiques d’une liaison radio sur fibre avec un ampli- cateur transimpédance

Une application numérique donne un gain de $G_{OpticalLinkdB}$, $RF = 4.22dB$ dans le cas où il n'y a pas de propagation dans la fibre (les paramètres utilisés sont ceux indiqués sur la figure (3.10))

3.3.2 Bilan des bruits

Cette section a pour but de donner un exemple de la puissance de bruit générée par une chaîne radio sur fibre. Le calcul de la puissance de bruit en sortie de la chaîne électro-optique nous donne :

Pour le laser :

$$N_{laser} = \frac{1}{R_c} \cdot \left(10^{\frac{RIN_{db}}{10}} \left(\frac{(I_{dc} - I_{th}) \eta E O \eta O E}{10^{\frac{L_{opt_{db}}}{10}}} \right)^2 R_{TIA}^2 \right) \quad \text{eq(3.15)}$$

avec R_c résistance de charge d'une valeur de 50Ω en général.

Pour la photodiode

$$N_{Photodiode} = \frac{(2q(I_{dc} + I_{dark})\Delta F)R_{TIA}^2}{R_c} \cdot \Delta F \quad \text{eq(3.16)}$$

Avec q la charge électrique.

Pour l'amplificateur transpédance :

$$N_{TIA} = \frac{i_{ENC}R_{TIA}^2}{R_c} \cdot \Delta F \quad \text{eq(3.17)}$$

L'unité du bruit N est le Watt W dans la bande ΔF

Le bruit total d'une chaîne est la somme des bruits (à condition que le système soit linéaire) donc le bruit total d'une liaison radio sur fibre est de la forme :

$$N_{Tot} = \frac{\left(10^{\frac{RIN_{db}}{10}} \left(\frac{(I_{dc} - I_{th}) \eta E O \eta O E}{10^{\frac{L_{opt_{db}}}{10}}} \right)^2 R_{TIA}^2 \right)}{R_c} + \frac{(2q(I_{dc} + I_{dark})\Delta F)R_{TIA}^2}{R_c} + \frac{i_{ENC}R_{TIA}^2}{R_c} \quad \text{eq(3.18)}$$

Sur ce bilan, le bruit thermique en entrée est négligé car il est faible comparé aux autres bruits.

Pour connaître le bruit équivalent en entrée (EIN : *Equivalent Input Noise*) du système il suffit de le diviser par le gain

$$EIN_{Tot} = \frac{N_{tot}}{G_{Opticalink,RF}} \quad \text{eq(3.18)}$$

L'unité est aussi le Watt dans la bande ΔF .

NB : toutes les équations pour le bruit sont données en linéaire sauf lorsque dB est indiqué

3.3.2.1 Evolution du rapport signal sur bruit d'une liaison optique radio sur fibre :

3.3.2.1.1 Hypothèses et caractéristiques types d'une liaison radio sur fibre

Les hypothèses sont :

- La réponse en fréquence des composants optiques est linéaire et ne dépend pas du temps
- Les fréquences utilisées sont inférieures à 10 GHz
- Les composants optiques n'introduisent pas de distorsion
- La dispersion chromatique est négligeable
- un signal de type UMTS avec une largeur de bande de 3,84MHz
- La fréquence centrale du signal UMTS est de 2,14GHz

Les caractéristiques d'une liaison radio sur fibre standard avec et sans amplificateur transpérance sont indiquées dans le tableau 3.1.

Laser	Fibre	Photodiode	TIA
$I_{DC} = 50\text{mA}$	$L = 0 \text{ km}$	$R_c = 50\Omega$	$I_{Enc} = 1, 2 \cdot 10^{-11} \text{ A/ H}$
$\eta_{EO} = 0, 20 \text{ A/W}$	Pertes= 0, 2dB/Km	$\eta_{OE} = 0, 80 \text{ A/W}$	$R_{TIA} = 508\Omega$
$R_{in} = 50\Omega$		$I_{dark} = 3, 3 \cdot 10^{-10} \text{ A}$	
RIN= 150dBc/Hz			

TaB. 3.1 – Caractéristiques des différents équipements électro-optiques d'une chaîne radio sur fibre

Chapitre 3 : Etude des systèmes hybrides optiques/radio

Le tableau 3.2 regroupe les paramètres de bruit, de gain et de SNR pour 0dB de pertes optiques et 20dB de pertes optiques avec et sans amplificateur transimpédance et une puissance d'entrée électrique de 0dBm.

Valeur en dB	Pertes optiques=0dB				Pertes optiques=20dB			
	Gain	Bruit	P_{out}	SNR	Gain	Bruit	P_{out}	SNR
Sans TIA	-15,92	-77,05	-15,92	61,13	-55,92	-110,95	-55,92	55,03
Avec TIA	4,22	-56,92	4,22	61,14	-35,78	-84,33	-35,78	48,55

TaB. 3.2 – Bilan électrique d'une chaîne radio sur fibre ($P_{in} = 0\text{dBm}$, Bruit et P_{out} exprimés en dBm, Gain et SNR en dB)

La figure (3.10) permet de connaître l'influence de la contribution de chaque bruit en fonction des pertes optiques. Pour des pertes optiques faibles (L_{opt}), le bruit du laser limite la transmission (de 0 à 15dB dans notre cas). Ensuite le bruit de la photodiode limite le rapport signal sur bruit (SNR) (s'il n'y a pas d'amplificateur transpédance ou bien en présence d'une photodiode ayant plus de bruit). Enfin le bruit de l'amplificateur transpédance va limiter les performances du système.

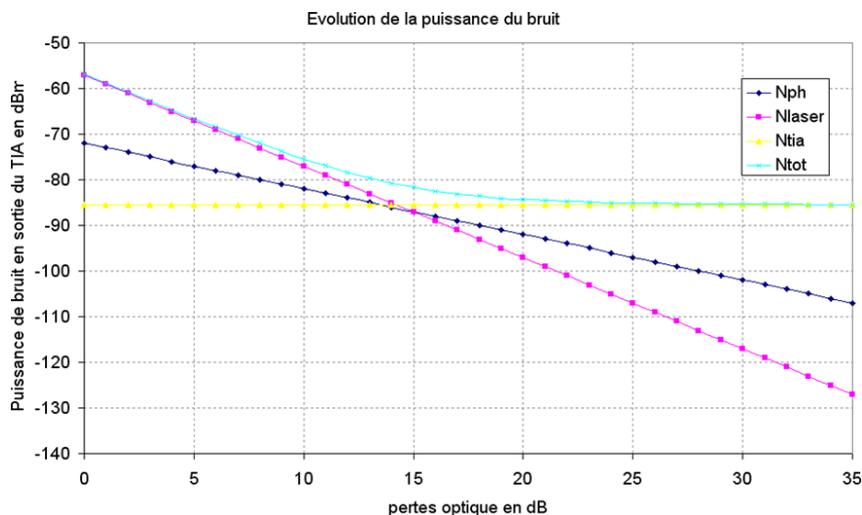


Figure. 3.11 – Évolution de la puissance de bruit en sortie de l'amplificateur transimpédance en fonction des pertes optiques

La figure (3.11) représente l'évolution du rapport signal sur bruit en fonction des pertes optiques liées à la fibre et/ou connecteurs et/ou aux coupleurs et/ou multiplexeurs. Pour une puissance électrique de 0dBm en entrée du laser nous remarquons que pour un SNR de 10dBm en sortie de fibre, le système tolère 66dB de pertes optiques pour une liaison avec une photodiode sans amplificateur transimpédance et 40dB optique pour une photodiode avec un amplificateur transimpédance.

Cependant il faut aussi tenir compte des puissances de sortie pour une propagation dans l'air du signal. Dans le cas avec un amplificateur transpédance le SNR est plus faible, mais la puissance de sortie est plus forte. Nous verrons dans la section 3.2, qu'il faut trouver un compromis entre le SNR et la puissance de sortie.

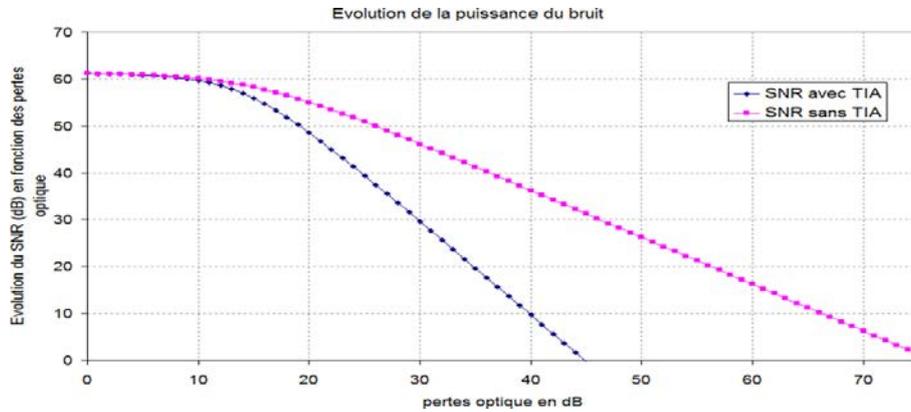


Figure. 3.11– Évolution du SNR en fonction des pertes optiques

3.3.3 Bilan radio

3.3.3.1 Les sources de bruit dans une transmission radio :

Les sources de bruit dans une transmission radio peuvent avoir des origines différentes. Les différents bruits sont le bruit thermique, et le bruit provenant d'autres sources radios ou bien les trajets multiples.

3.3.3.1.1 Bruit thermique :

Le bruit thermique se situe au niveau du récepteur. L'agitation thermique des électrons dans les résistances se traduit par une tension de bruit de valeur :

$$E^2 = 4 k_B \cdot T \cdot \Delta F \cdot R \quad eq(3.19)$$

où R est la valeur de la résistance, k_B est la constante de Boltzmann soit $1,3810 \cdot 10^{-23}$

J/°K, T est la température absolue en °K, Δf est la bande passante du système.

La puissance de bruit thermique est :

$$P = k_B \cdot T \cdot \Delta F \quad eq(3.20)$$

Pour une température de 290°K, la puissance de bruit est de -174dBm/Hz . Le bruit thermique est un bruit blanc, gaussien de moyenne nulle et s'ajoute aux autres signaux de manière additive (AWGN : *Additive White Gaussian Noise*). Sa densité spectrale de puissance est $1/2 \cdot k_B \cdot T$

3.3.3.1.2 Bruits radioélectriques :

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

3.3.3.4 Pertes liées à la propagation dans l'air :

Dans cette section, nous présenterons le cas d'une propagation sans multitrajet que nous appellerons de référence car seul le bruit thermique de l'antenne (blanc et gaussien) et les pertes liées à la propagation en espace libre limitent la transmission. Par la suite nous présentons le cas d'une propagation d'un signal radio dans un canal multi trajet.

3.3.3.4.1 Propagation sans multi trajet :

La figure (3.13) représente l'architecture de base d'une transmission radio et les principales caractéristiques pour établir un bilan électrique linéaire de la liaison. Une liaison radio est composée d'une antenne d'émission avec un gain G_E , du canal hertzien avec des pertes L et d'une antenne de réception avec un gain G_R , alors que L_E et L_R sont les pertes entre d'une part l'émetteur et l'antenne et d'autre part l'antenne et le récepteur [43].

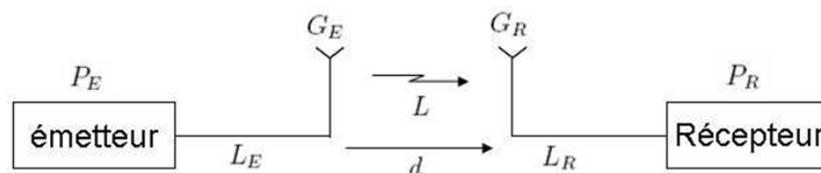


Figure. 3.13– Principales caractéristiques d'une chaîne radio

L'équation (3.21) donne la puissance reçue. Le fait d'être en espace libre sans obstacle (en anglais Line Of Sight (LOS)) donne la relation $L = f(d)$ mais cette relation est valable lorsque les pertes sont égales à L .

$$P_r = \frac{G_e G_r P_e}{L L_e L_r} \quad \text{eq (3.21)}$$

Chapitre 3 : Etude des systèmes hybrides optiques/radio

avec P_r la puissance au niveau du récepteur, et P_e puissance au niveau de l'émetteur. Les pertes radio en espace libre proviennent surtout du partage de l'énergie dans l'espace. Dans le cas d'une source ponctuelle, au départ, l'énergie sera concentrée dans un point. Á une distance d , l'énergie sera répartie sur toute la surface d'une sphère dans le cas d'une émission isotrope.

La formule ci dessous donne la densité de puissance par unité de surface :

$$W = \frac{P_E G_E}{4\pi d^2} \quad \text{eq(3.22)}$$

La figure 3.14 montre un exemple de propagation en espace libre d'une source ponctuelle d'origine O.

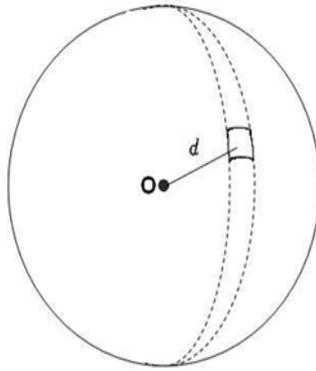


Figure. 3.14 – Exemple de propagation en espace libre d'une source ponctuelle

$$P_R = W A_R = W \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad \text{eq(3.23)}$$

Avec W densité de puissance, et A_R aire effective de l'antenne de réception.

Les équations 3.23 et 3.22 conduisent à la formule de Friis [44], qui permet de calculer l'atténuation en espace libre :

$$\frac{P_R}{P_E} = G_R G_E \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad \text{eq(3.24)}$$

où $\lambda = c/f$ avec f la fréquence et c la vitesse de propagation dans le vide. Cette relation est valide si la distance entre l'émetteur et le récepteur est grande comparée à la longueur d'onde (champ lointain).

Les formules ci-dessus sont valables dans le cas d'une transmission sans obstacle. Cependant toutes les propagations en espace libre ne se font pas sans obstacle. Il existe différentes perturbations du canal radio.

3.3.3.4.2 Propagation multi trajet :

Dans un environnement réel, la transmission d'un signal se fait généralement en empruntant, en plus d'un possible trajet direct, d'autres trajets de propagation. Ces trajets sont en nombre variable et subissent différents effets suivant la nature de l'interaction entre l'onde et un élément de l'environnement. Le signal obtenu au niveau de l'antenne réceptrice correspond à une recombinaison de ces ondes, qui ont subi un affaiblissement et une rotation de phase différente, et qui arrivent au récepteur avec un retard lié à la longueur du trajet de propagation. La présence de trajets multiples de propagation peut conduire à une distorsion importante du signal reçu. D'un autre côté, et plus particulièrement à l'intérieur des bâtiments, un trajet en visibilité directe, ou Line Of Sight (LOS), n'est pas toujours disponible. Dans ce cas, ce sont les trajets en non-visibilité, ou Non Line Of Sight (NLOS), qui permettent la communication radio. La figure (3. 15) illustre le concept de propagation par trajets multiples, ainsi que les principaux phénomènes de propagation. La propagation par trajets multiples se compose de différents phénomènes qui sont la réflexion, la diffraction, la diffusion, la transmission (dans un milieu non opaque pour les ondes radios) et le guidage.

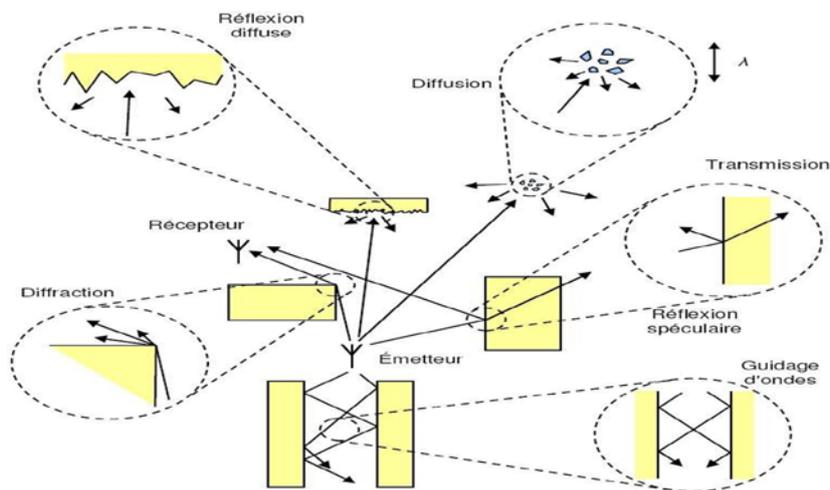


Figure. 3.15 – Principaux mécanismes de propagation [43]

Pour un taux d'erreur similaire, le rapport signal sur bruit d'un trajet multiple doit être plus grand que le rapport signal sur bruit obtenu dans un canal gaussien (section 3.3.3.4.1)

3.II. Conclusion :

Dans une première partie de ce chapitre on a présenté deux techniques pour la réalisation d'un déport radio sur fibre sur une fréquence porteuse, ainsi que les limitations liées à la technologie optique. Elles sont basées sur la détection directe, et la détection hétérodyne pour des fréquences radio inférieures ou bien supérieures à 10 GHz. Dans une seconde partie des bilans de liaison radio sur fibre ont été présentés, et discutés. Des exemples théoriques avec des caractéristiques des composants optoélectroniques se rapprochent de celles qui sont utilisées en pratique ont été également étudiées.

Conclusion générale

Conclusion générale :

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

En ce sens, notre mémoire se propose d'étudier les différentes techniques de transport de la radio sur fibre pour des applications sans fil 5G. Dans un premier temps, nous avons présenté l'évolution des réseaux mobiles.

Nous nous sommes occupés surtout de la 5^{ème} génération (5G), ses caractéristiques, et le défi principal exigeant l'infrastructure de la 5G devra s'appuyer sur un réseau à fibre qui nécessite des liaisons RoF. Cette technologie fait l'objet d'une étude approfondi dans le 2^{ème} chapitre. Nous avons étudié les différentes architectures RoF, les techniques de génération des signaux RF ainsi que les différentes limitations connues lors de la propagation du signal.

Le troisième chapitre, est divisé en deux parties. Dans la première partie notre étude avait été portée sur les techniques de transmission radio sur fibre et limitations liées à l'optique ensuite nous avons présenté tous les bruits possibles, dans une deuxième partie nous nous somme intéressé an bilan RF linéaire pour une liaison radio fibre.

Cette étude ouvre des perspectives pour étudier des systèmes plus complexes se focalisant principalement sur les formes d'ondes assurant une meilleure pureté et efficacité spectrale pour les futures applications 5G

BIBLIGRAPHIQUES

- [1] M. Rjiba et K. Habbouli, Apprentissage et optimisation des réseaux mobiles 5G, rapport de projet, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2017.
- [2] «Poser les jalons de la 5G: perspectives et difficultés,» Union internationale De Télécommunication, 2018.
- [3] E. M. Roche, B. H. Dickens-Jr et W. Townes, La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation), Netcom Association, p. 139-162, 2018.
- [4] S. E. Hajri, L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs, thèse doctorat, Paris: Université Paris-Saclay, 2018.
- [5] H. Hallak Elwan, Optical systems for next wireless standard (5G) generation delivery, thèse doctorat, Grenoble: Université grenoble alpes, 2017.
- [6] S. Bergren, Design Considerations for a 5G Network Architecture, Université Oklahoma State, 2018
- [7] LES ENJEUX DE LA 5G, Autorité de régulation des communications électroniques et des postes, France, Mars 2017.
- [8] C. Lagane, Fujitsu double les capacités des small-cell full-duplex, 9 septembre 2015.
- [9] K. Hettak et G. Y. Delisle, Conception et réalisation d'antennes intelligentes, rapport annuel, Laboratoire de Radiocommunications et de Traitement du Signal, 1999.
- [10] K. C. Kao et G. A. Hockham, «Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies», Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 113
- [11] M. Joindot, Les télécommunications par fibre optique, Dunod, Paris, France, 1996.
- [12] IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 3: Carrier Sense Multiple.
- [13] Z. Toffano, « Optoélectronique, Composant photoniques et fibres optiques », © Ellipses édition marketing S.A, 32 rue Bargue 75740 Paris cedex 15, Vol.316, 2001, ISBN 2-7298-0703-9.
- [14] <https://optiwave.com/optisystem-overvie> 2022.

- [15] M.A. ELAJI, “Etude et modélisation d’un système de transmission radio-surfibre,” Master’s thesis, 2009.
- [16] M. Benzazaa, “Etude d’architectures de systèmes de transmission de signaux ULB RF et millimétriques avec lien optique : application à la radio-sur-f
- [17] M. Tornatore, G.-K. Chang, and G. Ellinas (Fiber-wireless convergence in next-generation communication networks) : systems, archit
- [18] H. B. Kim, “Radio over fiber based network architecture,” 2005.
- [21] S. BENAMEUR, “La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d’onde centrale réglable,” phdthesis, Université de Limoges, 2016.
- [22] M. Strasser, “FTTA fiber-to-the-antenna–technology change in mobile communications,” 2008.
- [23] B. Ftaich, “Aide à la conception et à la caractérisation expérimentale de composants optoélectroniques pour les interfaces RF-optique à très haut débit : Optimisation du packaging associé par une approche hybride électromagnétique-circuit,” phd thesis, Limoges, 2010
- [24] T. Baykas, C. Sum, «the first IEEE wireless standard for data rates over 1 gb/s,» IEEE Communications Magazine, vol. 49, n°117, pp. 114- 121, 2011.
- [25] Radio over Fiber, https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_over_fiber consulté le 07 août 2016.
- [26] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger, and L. Dittmann, “Cloud RAN for mobile networks—a technology overview,” vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2015.
- [27] J. Bebert, “Simulation d’une liaison FTTA (fiber to the antenna) utilisant une transposition en fréquence optique,” Master’s thesis, 2016.
- [28] L. J. Vimala Reddy, “Radio over fiber (RoF) technology an integration of microwave and optical network for wireless access,” 2015.
- [29] I. E. Zaldívar-Huerta, A. García-Juárez, D. F. Pérez- Montaña, P. Hernández-Nava, and A. Vera Marquina, “Proposal and performance evaluation of a fiber-to-the-antenna system for video distribution operating in the s-band,” vol. 71, pp. 89–94, 2015.
- [30] J. Meyzonnette, Radiométrie et détection optique. G. Roblin, éditeur scientifique, fév. 2002.
- [31] B. FTAICH-FRIGUI, «Aide à la conception et à la caractérisation expérimentale de composants optoélectroniques pour les interfaces RF Optique à très haut débit. Optimisation du packaging associé par une approche hybride électromagnétique-circuit,» Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2010
- [32] F. Parésys, « Etude du mélange optoélectronique par photodiode en vue d’applications radio sur fibre à 60 GHz,» Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2012..

- [33] I. Chiali, Etude d'une transmission d'un signal modulé directement par une source optique laser a un debit de 10Gbit/s, mémoire master 2, Tlemcen: Université Abou-Bekr Belkaid, 2013.
- [34] 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.
- [35] . G. TESSERAULT et G. TESSERAULT, Modélisation multi-fréquences du canal de propagation, thèse doctorat ,Ecole doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur & Aéronautique, 11 Décembre 2008.
- [36] Y. Chenichene, Intégration de système radio sur fibre dans les réseaux optiques passifs, mémoire master 2, Guelma: université 8mai1945, 2018.
- [37] A. Vander Vorst, Transmission, propagation et rayonnement. Bibliothèque des universités, 1995.
- [38] P. Pepeljugoski, S. Golowich, A. Ritger, P. Kolesar et A. Risteski, « Modeling and simulation of next-generation multimode fiber links », Lightwave Technology, Journal of, vol. 21,
- [39] P. Pellat-Finet, Ondes électromagnétiques 1. Université de Bretagne Sud (UBS), 2000.
- [40] P. Pellat-Finet, Ondes électromagnétiques 2. Université de Bretagne Sud (UBS), 1999.
- [41] X. L , F. B et R. W. Tkach, «Improving the nonlinear tolerance of polarizationDivision-Multiplexed CO-OFDM in long-haul fiber transmission,,» Journal of Lightwave Technology,vol27 , issus 16, pp. 3632 - 3640, Aug.15, 2009.
- [42] G. E-S , J.P. Dubois et J. S. Daba, «performance analysis in 5th generation massive multiple-input-multiple-output system,» Journal of Electronics and Communication Engineering, vol12, No:16p. 4, 2018.
- [43] L. M , M. B et A. N , «Spectrally-Efficient 100 Gb/s Transmission in Next Generation Optical Access Networks Employing Directly Detected Optical-OFDM,» chez Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, Auckland, New Zealand, 31 Oct.-3 Nov. 2010.
- [44] J. G, Radio over Fiber (RoF) for the future home area networks, thèse doctorat, Paris: University Paris-Est, 2012.