



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

**Optimisation de la qualité de service (QoS) signal 5G
pour le réseau d'accès radio (RAN - Radio Access Network).**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

BASSAM ZAHREDDINE

SEPTEMBRE 2023

REMERCIEMENTS

À l'achèvement de cette étude, je souhaiterais exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont eu confiance en moi et qui m'ont soutenu tout au long de ma thèse.

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, le professeur Nahi Kandil, pour sa confiance initiale, ses nombreux conseils et sa contribution scientifique.

Je tiens également à remercier mon codirecteur de thèse, le professeur Nadir Hakem, pour son soutien et son encouragement constants tout au long de cette recherche. Je suis particulièrement reconnaissant pour le temps qu'il a consacré à superviser mon travail.

Je tiens également à remercier l'ingénieur Mr. Mohamed Ailas pour son aide précieuse dans mon projet. Sa connaissance approfondie et son expérience ont été d'une grande aide pour atteindre mes objectifs.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers ma famille pour leur soutien inconditionnel et leur amour tout au long de cette formation. De plus, je tiens à remercier mes collègues Ali Issa, Mohammad El Hajj Khalil, Mohamad Madi, Nabih Allaw et Ali Khalaf, pour l'atmosphère agréable et conviviale qu'ils ont créée. Leur présence et leur collaboration ont rendu cette formation extrêmement enrichissante et mémorable.

TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction</i>	4
I. Motivation et problématique:	4
II. Solutions proposées :.....	5
III. Méthodologie :.....	7
IV. Hypothèses :	10
<i>Chapitre 1</i>	11
<i>État de l'Art:</i>	11
1.1. Suppression de l'effet du bruit impulsionnel sur les systèmes de communication MMwave :	11
1.1.1. Aperçu:	11
1.1.2. Description du modèle de system de communication:.....	12
1.1.3. Résultat.....	14
1.2. Analysis of Signal Noise Reduction by Using Filters:.....	15
1.2.1. Aperçu :	15
1.2.2. System model et résultats :	16
1.2.3. Conclusion :	17
1.3. Filtered OFDM Systems, and Performance Analysis for 5G and Beyond: 18	
1.3.1. Aperçu.....	18
1.3.2. Description du model et résultats :	19
<i>Chapitre 2</i>	22
<i>Outils et Ressources pour la Simulation et l'Implémentation de la 5G:</i>	22
2.1. Aperçu:	22
2.2. Matériel et logiciel :.....	23

2.2.1	Matlab et Simulink	23
2.2.2	GNU Radio :	24
2.2.3	Software Defined Radios (SDR):.....	26
Chapitre 3		31
CONSTRUCTION DE L'ARCHITECTURE 5G OFDM POUR RAN :.....		31
3.1.	System OFDM 5G:.....	32
3.2.	Bruit impulsionnelle (IN):.....	37
3.3.	Canaux de transmission:.....	39
3.3.1	Canal Bruit blanc gaussien additif (AWGN) :.....	40
3.3.2	Canal de Rayleigh Fading :	42
3.3.3	Canal de Rician Fading :	45
3.4.	Filtre passe-bass FIR (Finite Impulse Response) :.....	49
3.5.	Calcul d'Erreur :.....	55
3.5.1	Le Taux d'erreur Binaire (BER).....	56
3.5.2	L'erreur vectorielle de magnitude (EVM).	58
3.6.	System dans GNU radio.....	60
Chapitre 4		63
Tests et Résultats		63
4.1.	Simulation:	63
4.1.1	QPSK modulation :	64
4.1.2	QAM16 Modulation.....	72
4.2.	Simulation souterraine dans la mine de Cité De L'Or {à Val-D'or}	84
Conclusion.....		97
Références		100

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: SCHÉMA FONCTIONNEL.....	9
FIGURE 2:DIAGRAMME SIMPLIFIÉ D'UN RÉCEPTEUR DE STATION DE BASE (BS) MMWAVE.....	13
FIGURE 3:BER vs SNR SOUS IN.....	14
FIGURE 4:DIAGRAMME FONCTIONNEL D'UN SIGNAL NUMÉRIQUE.....	16
FIGURE 5:COMPARAISON ENTRE FILTRE PASSE-BAS, MOYENNE MOBILE FILTRE ET FILTRE FIR.	17
FIGURE 6: MODEL F-OFDM.....	19
FIGURE 7: SIMULATION RÉSULTATS F-OFDM.....	20
FIGURE 8: USRP N210	26
FIGURE 9:ANTENNE OMNIDIRECTIONNELLE.....	28
FIGURE 10:CARTE MÈRE RFX2400.....	29
FIGURE 11: DIAGRAMME DU SYSTEM OFDM 5G	32
FIGURE 12: CYCLIQUE PRÉFIX	36
FIGURE 13:MODEL BRUIT IMPULSIONNELLE IN	37
FIGURE 14:MODEL AWGN.....	40
FIGURE 15: LES 2 CAS DE FADING RÉSULTANT DE MULTI-TRAJETS.....	48
FIGURE 16: FIR FILTRE	50
FIGURE 17: GNU RADIO SYSTEM	60
FIGURE 18:QPSK BER AWGN.....	64
FIGURE 19:QPSK BER RICIAN.....	65
FIGURE 20:QPSK BER RAYLEIGH.....	67
FIGURE 21:QPSK EVM AWGN.....	68
FIGURE 22:QPSK EVM RICIAN.....	69
FIGURE 23:QPSK EVM RAYLEIGH	71
FIGURE 24: QAM16 BER AWGN	72
FIGURE 25:QAM16 BER RICIAN.....	73
FIGURE 26:QAM16 BER RAYLEIGH	75
FIGURE 27:QAM16 EVM AWGN.....	76
FIGURE 28:QAM16 EVM RICIAN.....	77
FIGURE 29:QAM16 EVM RAYLEIGH	78
FIGURE 30:QAM256 BER AWGN.....	79
FIGURE 31:QAM256 BER RICIAN.....	80

FIGURE 32:QAM256 BER RAYLEIGH	81
FIGURE 33:QAM256 EVM AWGN	82
FIGURE 34:QAM256 EVM RAYLEIGH	82
FIGURE 35:QAM256 EVM Rician	82
FIGURE 36: CARTES MINIÈRES	85
FIGURE 37:SNR vs DISTANCE	86
FIGURE 38:EXPERIENCE SOUTERRAIN AVEC UNE VOITURE	88
FIGURE 39:TEST DANS LA MINE	89
FIGURE 40:SIGNAL FILTRÉE	92
FIGURE 41: BER vs DISTANCE	93
FIGURE 42: EVM vs DISTANCE	95

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I:PARAMÈTRE DE USRP N210.....	27
TABLEAU II:PARAMÈTRE DE ANTENNE.....	28
TABLEAU III:PARAMÈTRE DE OFDM 5G.....	33
TABLEAU IV:PARAMÈTRE DE FILTRE FIR LPF.....	49
TABLEAU V:DÉLAI DU FILTRE POUR CHAQUE ORDRE.....	52
TABLEAU VI:PARAMÈTRES DES PC,5G, WLAN.....	61
TABLEAU VII:BER DANS 3 CANAUX AVEC 3 SCENARIOS.....	83
TABLEAU VIII:SCÉNARIO DANS LA MINE.....	90

RÉSUMÉ

La 5G, cinquième génération de technologie de télécommunications mobiles, offre des débits de données accrus, une latence réduite et une connectivité améliorée pour les appareils connectés, comparée au réseau 4G. Au Canada, la 5G est devenue un élément essentiel dans le secteur minier industriel, contribuant à l'amélioration de la productivité et assurant la communication entre les mineurs. Cependant, l'optimisation de la qualité de service (QoS) pour le réseau d'accès radio (RAN) demeure un défi pour garantir une expérience utilisateur optimale.

Dans ce mémoire, nous proposons une approche pour améliorer la QoS du RAN en utilisant la technologie 5G. Nous mettons l'accent sur l'impact du bruit sur la qualité du signal dans les communications souterraines et développons des filtres pour l'améliorer. Nous calculons des métriques de performance, telles que le taux d'erreur binaire (BER) et l'erreur vectorielle de modulation (EVM), pour évaluer l'efficacité de notre approche.

De plus, nous menons des expériences pour analyser les métriques BER et EVM en fonction de la distance dans une mine souterraine, afin d'évaluer la qualité du signal dans des environnements complexes. L'objectif de cette recherche est d'optimiser la QoS du RAN grâce à la technologie 5G, procurant ainsi une expérience utilisateur satisfaisante et améliorant par conséquent la productivité de l'industrie minière.

ABSTRACT

5G, the fifth generation of mobile telecommunications technology, provides higher data speeds, lower latency, and improved connectivity for connected devices compared to the 4G network. In Canada, 5G has become a crucial element of the mining industrial process, enhancing productivity and ensuring communication among miners. However, optimizing the Quality of Service (QoS) for the Radio Access Network (RAN) remains a challenge to ensure a satisfactory user experience.

In this thesis, we propose an approach to improve the QoS for the RAN using the 5G signal. We focus on the impact of noise on the quality of the signal in underground communications and design filters to enhance it. We calculate performance metrics, such as the Bit Error Rate (BER) and the Error Vector Magnitude (EVM), to assess the effectiveness of our approach.

Additionally, we conduct experiments to analyze the BER and EVM metrics as a function of distance in an underground mine, with the aim of evaluating the signal quality in complex environments. The objective of this research is to optimize the QoS for the RAN using the 5G signal, thus providing a satisfactory user experience while improving the productivity of the mining industry.

LISTE DES VARIABLES

5G	5th generation mobile network (réseau mobile de cinquième génération)
RAN	Radio Access Network (Réseau d'Accès Radio).
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (Modulation de Phase en Quadrature)
QAM16	Quadrature Amplitude Modulation 16.
SNR	Signal to Noise Ratio.
BER	Bit Error Rate (Taux d'Erreur de Bits).
EVM	Error Vector Magnitude.
LPF	Low-Pass Filter (Filtre passe-bas).
FIR	Finite Impulse Response (Réponse impulsionnelle finie).
USRP	Universal Software Radio Peripheral.
SDR	Software Defined Radio.
AWGN	Additive White Gaussian Noise Channel.
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Rapport Signal sur Bruit).
LOS	Line of Sight.
NLOS	Non-Line of Sight.
FFT	Fast Fourier Transform.
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform.
CP	Cyclic Prefix.
IN	Impulsive Noise.

INTRODUCTION

I. Motivation et problématique:

L'industrie minière canadienne se présente comme un secteur économique clé, engendrant une contribution tant directe qu'indirecte de milliards de dollars au PIB du pays en 2021. Elle offre des emplois bien rémunérés dans des régions éloignées, notamment dans les mines souterraines. Toutefois, il convient de souligner l'importance de l'établissement de moyens de communication souterrains afin de garantir la sécurité et l'efficacité des travailleurs. Dans ce contexte, l'instauration d'un réseau de communication dépourvu de fil s'est avérée être une nécessité impérieuse pour répondre à ces besoins [1].

La technologie 5G présente des avantages considérables par rapport à ses prédécesseurs, notamment des vitesses de transmission plus élevées, une plus grande flexibilité et une sécurité renforcée. Elle se révèle idéalement appropriée pour satisfaire les besoins des appareils connectés et des machines en activité au sein de zones exiguës qui requièrent un échange d'informations d'une importance cruciale [2]. Toutefois, l'un des défis majeurs à surmonter le déploiement réussi de la technologie 5G dans l'industrie minière réside dans la portée limitée des signaux dans les environnements souterrains.

Les couches épaisses de roche et d'autres matériaux formant les parois des mines souterraines sont susceptibles de constituer des entraves ou de restreindre l'intensité des signaux caractéristiques de la technologie 5G. Parallèlement, la coexistence d'éléments tels que l'eau, les gaz et diverses substances peut également exercer un effet sur les performances des réseaux [3]. En conséquence, une approche exigeant l'utilisation de des équipements et des techniques spécialisés s'avère nécessaire. Cette

démarche implique notamment d'infrastructures de réseau supplémentaires, telles que des stations de base et des points d'accès, pour étendre la couverture du signal et assurer une connectivité sans faille dans l'ensemble de la mine.

L'enjeu fondamental de cette étude réside dans l'optimisation de la qualité de service (QoS) du réseau d'accès radio (RAN) en utilisant le signal 5G dans des environnements souterrains. Notre travail vise à analyser l'impact du bruit sur la qualité du signal et à concevoir des filtres destinés à l'améliorer. Nous envisagerons de mesurer des indicateurs de performance, tels que le taux d'erreur binaire (BER) et l'erreur vectorielle de modulation (EVM), pour évaluer l'efficacité de notre approche. De plus, nous examinerons les performances du système dans des environnements souterrains complexes, en prenant en considération des facteurs, tels que la profondeur et les obstacles, afin d'évaluer la qualité du signal dans des conditions réalistes.

En surmontant ces défis, le déploiement réussi d'un réseau 5G dans l'industrie minière souterraine pourrait engendrer de nombreuses opportunités sur le plan économique et favoriser des innovations telles que l'Internet des objets, les villes intelligentes, les véhicules miniers automatisés, et les opérations minières télécommandées. Ces avancées contribueraient à la croissance de l'industrie minière canadienne et, de manière plus étendue, à l'économie du pays.

II. Solutions proposées :

Notre proposition visant à améliorer la qualité de service (QoS) du réseau d'accès radio (RAN) en utilisant le signal 5G dans les environnements souterrains repose sur une analyse détaillée des caractéristiques du signal 5G dans ces conditions spécifiques. Nous concevons et mettons en œuvre des filtres spécialisés dans le but d'atténuer le bruit et d'améliorer la qualité du signal, en nous basant sur des métriques de performance critiques pour évaluer l'efficacité de notre approche.

Notre méthodologie implique une revue de la littérature en vue d'identifier les défis associés à la communication sans fil dans les environnements miniers souterrains. Parallèlement, nous effectuons des simulations détaillées réalisées à l'aide d'outils avancés, tels que MATLAB et Simulink. Ces outils nous permettent de générer des signaux 5G OFDM QPSK, QAM16 et QAM256 accompagnés de bruit impulsionnel. Nous utilisons des filtres FIR LPF de différents ordres pour évaluer leur efficacité dans l'élimination du bruit impulsionnel, et nous retenons le filtre le plus performant pour la suite de notre étude.

Ensuite, nous procédons à la validation de notre approche en utilisant des plateformes de radio logicielle (SDR), notamment GNU Radio et Universal Software Radio Peripheral (USRP) fournies par Ettus Research, afin d'effectuer des tests en temps réel dans des environnements souterrains. Les résultats issus de ces tests attestent l'efficacité de notre solution pour améliorer la qualité du signal dans des conditions bruyantes et complexes, ouvrant ainsi la voie à une communication sans fil plus fiable et sécurisée au sein des mines souterraines.

En somme, notre approche rigoureuse et méthodique vise à surmonter les défis de la communication sans fil dans l'industrie minière souterraine en tirant parti avec discernement de la technologie 5G et des filtres adaptés. Les résultats de cette recherche pourraient avoir un impact significatif sur la sécurité et la productivité des travailleurs miniers, tout en contribuant aux progrès technologiques et économique de l'industrie minière canadienne.

III. Méthodologie :

Afin d'accomplir l'objectif envisagé, nous avons adopté une méthodologie structurée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, nous avons effectué une revue de la littérature afin de recueillir des données sur les caractéristiques du signal 5G et les types de bruit susceptibles de l'influencer dans les environnements souterrains.

Notre démarche de recherche a été initiée par une analyse exhaustive de la littérature scientifique se focalisant sur les communications sans fil au sein des environnements souterrains. Notre attention s'est concentrée sur les défis spécifiques liés à l'intégration de la technologie 5G dans ce contexte particulier. Cette revue documentaire a été menée à travers des articles scientifiques publiés dans des revues spécialisées, ainsi que de contributions présentées lors de conférences scientifiques et de publications académiques pertinentes. En acquérant une compréhension approfondie des caractéristiques du signal 5G au sein des environnements souterrains, ainsi que des facteurs de perturbation majeurs, tels que l'atténuation du signal et les interférences électromagnétiques, nous avons pu orienter notre recherche de manière éclairée et ciblée.

Afin d'évaluer l'efficacité de notre approche, nous avons recours à des outils de simulation avancés tels que MATLAB et Simulink. Ces logiciels nous ont permis de créer des scénarios de communication 5G réalistes dans des environnements souterrains. Nous avons soigneusement pris en considération une variété de paramètres, y compris les caractéristiques géologiques spécifiques aux mines souterraines, les distances de propagation, les niveaux d'atténuation du signal et les variations du bruit ambiant. En employant ces simulations détaillées, nous avons examiné l'influence de chaque paramètre sur la qualité du signal et identifié les facteurs essentiels qui exercent la plus grande influence sur les performances du réseau 5G.

Nous avons choisi d'utiliser des filtres à réponse impulsionnelle finie de type passe-bas (FIR LPF) afin d'améliorer la qualité du signal dans les environnements souterrains bruyants. Les filtres FIR ont été sélectionnés en raison de leur flexibilité et leur efficacité dans l'élimination du bruit. Afin de justifier notre choix concernant l'ordre du filtre FIR, nous avons effectué des expérimentations approfondies en faisant varier l'ordre du filtre et en évaluant les performances de chaque configuration. Cette étape nous a permis de déterminer le meilleur compromis entre l'efficacité du filtrage et la complexité du calcul, en vue d'obtenir des résultats optimisés.

Les performances du filtre FIR LPF ont été évaluées en mesurant des métriques de performance, telles que le taux d'erreur binaire (BER) et l'erreur de magnitude du vecteur (EVM). Ces tests ont été effectués sur trois types de canaux distincts : AWGN, Rician (LOS) et Rayleigh (NLOS). La diversité de ces canaux nous a permis de confirmer la performance de notre filtre dans une variété de scénarios de communication sans fil, renforçant ainsi la robustesse et la fiabilité de notre solution.

Suite à l'optimisation des performances du filtre FIR, nous avons procédé à son intégration en utilisant des plateformes de radio logicielle (SDR), telles que GNU Radio et Universal Software Radio Peripheral (USRP) fournies par Ettus Research. Nous avons réalisé des tests de performance en temps réel dans des environnements souterrains avec ces plateformes. Les résultats ont démontré une amélioration significative de la qualité du signal dans des conditions bruyantes grâce à notre solution.

En somme, notre méthodologie a intégré une revue exhaustive de la littérature, des simulations et des tests en temps réel pour élaborer une solution efficace destinée à améliorer la qualité de service (QoS) du réseau d'accès radio (RAN) en utilisant le signal 5G dans les environnements souterrains.

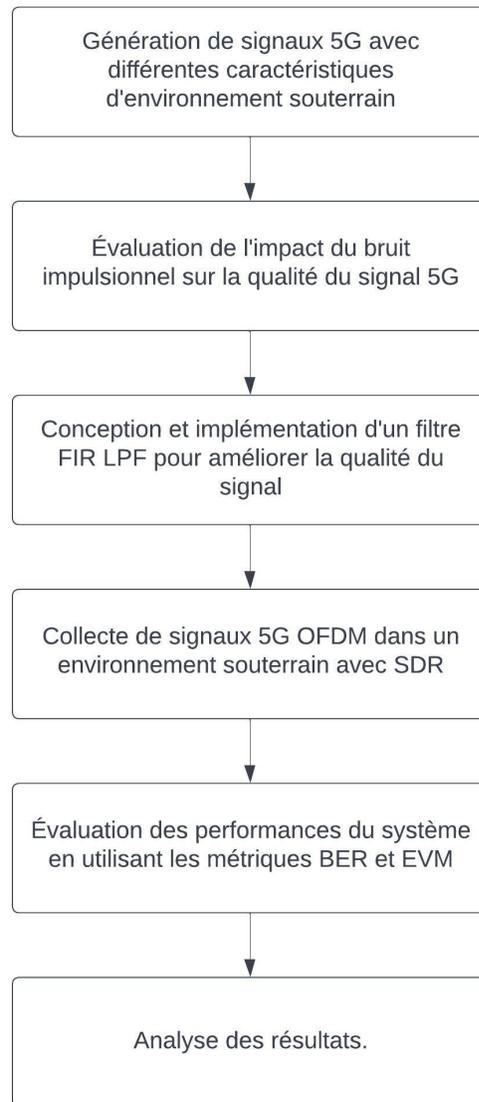


Figure 1: Schéma Fonctionnel.

IV. Hypothèses :

Hypothèse 1 : L'intégration d'un filtre passe-bas à réponse impulsionnelle finie (FIR LPF) pourrait entraîner une réduction significative du bruit impulsif au sein d'un système 5G utilisant la modulation par multiplexage orthogonal à répartition de fréquence (OFDM) avec les modulations de phase en quadrature (QPSK) et d'amplitude en quadrature (QAM16-256). Cette atténuation du bruit impulsif pourrait potentiellement améliorer la qualité du signal et renforcer la fiabilité de la transmission des données dans les réseaux de communication 5G.

Hypothèse 2 : L'application de filtres FIR LPF pourrait significativement améliorer la qualité du signal 5G dans les environnements souterrains. En atténuant l'effet du bruit impulsif et en augmentant la stabilité du signal, cette stratégie pourrait avoir un impact positif sur la sécurité et la productivité de l'industrie minière. Elle faciliterait une communication plus efficace entre les travailleurs et optimiserait l'utilisation des machines et des équipements, contribuant ainsi à une meilleure performance globale.

Hypothèse 3 : L'utilisation de l'Universal Software Radio Peripheral (USRP) N210, conjointement avec GNU Radio et une antenne émettrice-réceptrice (TX/RX), pourrait offrir des opportunités pour améliorer la qualité de la collecte et de l'analyse des données souterraines. En tirant parti de la flexibilité de l'USRP N210 et de la puissance de traitement de GNU Radio, il serait envisageable d'améliorer la transmission des signaux et d'appliquer des techniques de filtrage avancées pour réduire le bruit et accroître la précision des données souterraines.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART:

Le système de communication RAN 5G, qui recourt à la modulation par multiplexage orthogonal à répartition de fréquence (OFDM) et à la gestion du bruit impulsionnel, a manifesté sa pertinence au sein de l'industrie contemporaine. En effet, ces techniques sont déployées afin de garantir des connexions rapides et fiables dans une gamme variée d'environnements.

Dans cette partie, nous présentons plusieurs projets qui intègrent la technologie 5G OFDM en vue de la transmission de données, tout en contrecarrant les effets du bruit impulsionnel. Ces projets mettent en évidence l'efficacité des différentes techniques de traitement du signal pour atténuer l'impact du bruit impulsionnel, ce qui contribue à une amélioration qualitative de la communication. Par ailleurs, ils s'appuient également sur divers algorithmes et méthodes pour optimiser la performance du système en présence de bruit impulsionnel et d'autres défis associés aux environnements de communication complexes.

1.1. Suppression de l'effet du bruit impulsionnel sur les systèmes de communication MMwave :

1.1.1. Aperçu:

Cet article se concentre sur l'étude de l'atténuation de l'impact du bruit impulsif dans les systèmes de communication en ondes millimétriques, en particulier dans le contexte des réseaux de communication sans fil de cinquième génération (5G). Le bruit impulsif représente un défi conséquent pour les systèmes de communication sans fil,

du fait de sa propension à altérer les signaux, induisant par conséquent une augmentation du taux d'erreur binaire ainsi qu'une réduction de l'efficacité spectrale.

Pour contrecarrer cet effet, différentes méthodes sont explorées dans cet article, notamment l'application de techniques de rognage et d'écrêtage. Les auteurs [4] procurent une analyse approfondie de ces techniques et évaluent leur efficacité en termes de réduction du bruit impulsif et d'amélioration de la qualité du signal.

Les résultats expérimentaux présentés dans ce document permettent de confirmer l'efficacité de ces méthodes pour la suppression de l'effet du bruit impulsif. En effet, les techniques de rognage et d'écrêtage ont permis de réduire significativement le taux d'erreur binaire et d'améliorer l'efficacité spectrale des systèmes de communication à ondes millimétriques.

1.1.2. Description du modèle de system de communication:

Le système de communication en ondes millimétriques détaillé dans ce document met en œuvre des combinateurs RF et des combinateurs de bande de base pour traiter les signaux reçus par l'antenne. Le précodeur et le combinateur RF coordonnent les phases des signaux qui traversent des déphaseurs analogiques purs dans les éléments d'antenne, afin de générer plusieurs faisceaux orientés vers les trajectoires dominantes dans le champ millimétrique [5]. Les auteurs mènent également une exploration quant à la manière dont le bruit impulsif peut perturber ce système, proposant de ce fait diverses stratégies visant à amoindrir son impact.

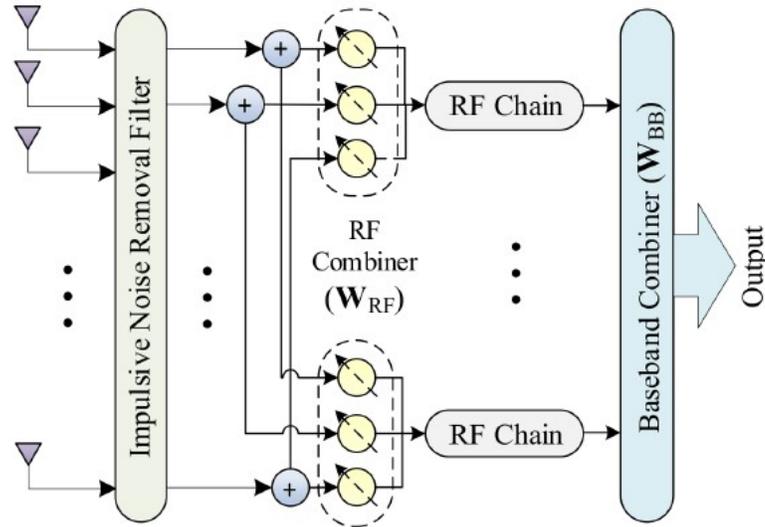


Figure 2: Diagramme simplifié d'un récepteur de station de base (BS) mmWave

Le modèle, illustré sur la figure 2, montre le système type pour un récepteur en ondes millimétriques. Le traitement du signal de l'antenne est divisé en deux sections : d'une part, le précodeur et le combineur RF ; d'autre part et combineur de bande de base. Le précodeur et le combineur RF coordonnent les phases des signaux qui traversent des déphaseurs analogiques purs dans les éléments d'antenne afin de générer plusieurs faisceaux orientés vers les trajectoires dominantes dans le champ millimétrique. Une telle configuration offre une meilleure résolution spatiale et améliore la capacité du système de communication en ondes millimétriques.

Le signal reçu est obtenu en traitant le signal à l'aide des combineurs RF et de bande de base, combinés en vue de former la matrice WT.

Le signal reçu y est alors calculé en multipliant la matrice WT par la matrice de canal HFTs et en ajoutant le bruit total n , qui est modélisé par un mélange gaussien approximant le modèle de bruit de classe A de Middleton [6].

$$y = W_T^H H F_T s + W_T^H n \quad (1)$$

Le bruit total n est composé d'un bruit additif blanc gaussien complexe (AWGN) w avec une probabilité de $1-\varphi$ et d'un bruit impulsif (IN) z avec une probabilité de φ . Les termes gaussiens sont dénotés par $N(0, \sigma_w^2)$ et $N(0, \sigma_z^2)$, respectivement. La distribution mixte du bruit total a la forme présentée dans la section ci-dessus.

$$n = w + z \quad (2)$$

1.1.3 Résultat

Les résultats de cette étude sont présentés par les auteurs qui analysent les données issues de leurs simulations. Ils ont procédé à l'évaluation de diverses approches visant à réduire l'influence du bruit impulsif, dont notamment l'usage de techniques de rognage et d'écrêtage. Les résultats indiquent que ces techniques peuvent réduire significativement l'impact du bruit impulsif sur la performance du système.

Les auteurs ont également abordé les limites de ces techniques et suggéré des perspectives pour des recherches futures.

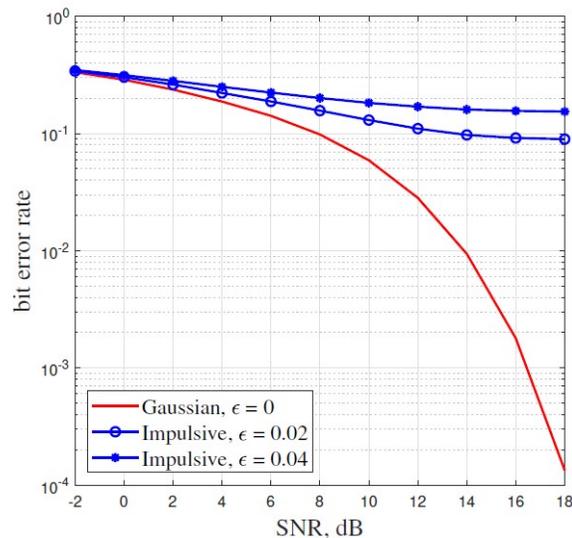


Figure 3: BER vs SNR sous IN

Les auteurs ont abouti à la conclusion que le bruit impulsif représente un défi majeur au sein des systèmes de communication à ondes millimétriques, tout

particulièrement dans le cadre des systèmes de communication sans fil de cinquième génération (5G). Dans cette optique, une investigation approfondie a été menée par les auteurs pour atténuer les effets préjudiciables du bruit impulsif. Parmi les stratégies examinées, l'exploitation de mécanismes de troncature et de compression a été notable. Les résultats ont démontré la capacité de ces méthodes à significativement atténuer l'influence néfaste du bruit impulsif sur les paramètres de performance du système. Parallèlement, l'étude a sondé les limitations intrinsèques de ces techniques, soulignant ainsi la nécessité de poursuivre les investigations ultérieures.

1.2. Analysis of Signal Noise Reduction by Using Filters:

1.2.1. Aperçu :

Ce document élabore une étude portant sur l'atténuation du bruit signal dans des contextes médicaux, spécifiquement pour les signaux électrocardiographiques (ECG). Les auteurs [7] ont procédé à une comparaison de trois méthodes distinctes de filtrage dans le dessein d'atténuer les effets du bruit sur les signaux ECG : le filtrage passe-bas, le filtrage à moyenne mobile et le filtrage numérique à réponse impulsionnelle finie (FIR). Les résultats expérimentaux attestent que le filtrage numérique FIR se révèle supérieur dans la réduction du bruit au sein des signaux ECG, en comparaison avec les autres approches de filtrage mises à l'épreuve. Le document incorpore également une revue de la littérature englobant les diverses méthodologies de filtrage adoptées pour réduire le bruit au sein des signaux ECG. Il expose en détail le modèle de système employé pour simuler les signaux ECG perturbés par le bruit, ainsi que pour évaluer l'efficacité des différentes méthodes de filtrage.

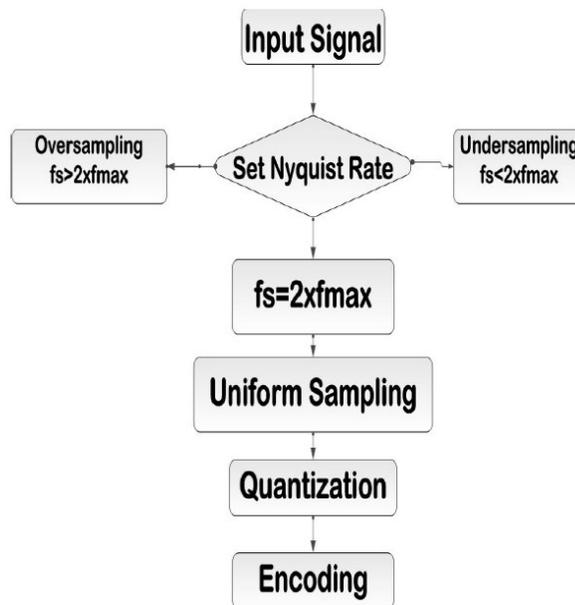


Figure 4: Diagramme fonctionnel d'un signal numérique

1.2.2. System model et résultats :

Le modèle de système utilisé dans cette étude est une simulation qui évalue l'efficacité de différentes méthodes de filtrage pour atténuer le bruit dans les signaux ECG. Les auteurs ont généré des signaux ECG bruités en ajoutant différents niveaux de bruit blanc gaussien au signal ECG original, puis ont appliqué chaque méthode de filtrage sur les signaux bruités. Le système fonctionne en simulant un signal ECG perturbé à l'aide d'un générateur de bruit blanc gaussien et d'un bruit impulsionnel superposé à un signal ECG original. Les auteurs ont ensuite mis en œuvre chaque méthode de filtrage (à savoir, le filtre passe-bas, le filtre moyenne mobile et le filtre numérique FIR) sur les signaux bruités, ceci dans l'optique d'évaluer leur pertinence en termes de réduction du bruit et d'amélioration de la qualité du signal.

Les résultats expérimentaux démontrent que le filtre numérique FIR est plus performant pour réduire le bruit dans les signaux ECG par rapport aux autres méthodes de filtrage testées. Les auteurs ont quantifié l'atténuation du bruit, la distorsion du signal et l'amélioration globale de la qualité du signal pour chaque méthode de filtrage afin d'évaluer leur performance.

Parameters	Comparison of filters		
	<i>Low pass filter</i>	<i>Moving Average filter</i>	<i>FIR filter</i>
Phase response	Non-linear	Non-linear	Linear
Noise reduction capability	Less	Medium	Large
Throughput	Good	Bad	Better
Quantization error	More	Less	More
Sampling reconstruction capability	Good	Bad	Better

Figure 5: Comparaison entre filtre passe-bas, moyenne mobile filtre et filtre FIR.

1.2.3 Conclusion :

En conclusion, cette étude a entrepris une comparaison entre trois modalités distinctes de filtrage dans l'objectif d'atténuer les effets nuisibles du bruit au sein des signaux électrocardiographiques (ECG) : le filtre passe-bas, le filtre moyenne mobile et le filtre numérique FIR. Les données expérimentales obtenues ont mis en exergue que le filtrage numérique FIR s'avère plus efficient en termes d'atténuation du bruit au sein des signaux ECG, en contraste avec les autres méthodes de filtrage soumises à évaluation. nt également apporté la constatation que le filtrage FIR confère une réponse

en phase linéaire (dépourvue de distorsion), alors que les autres modalités de filtrage, bien que plus simples dans leur mise en œuvre, présentent la potentialité d'évincer des composantes à haute fréquence du signal. Cette étude fournit ainsi des informations précieuses pour la conception de systèmes de filtrage performants dans des applications médicales telles que l'ECG.

1.3. Filtered OFDM Systems, and Performance Analysis for 5G and Beyond:

1.3.1. Aperçu :

Cet article présente une étude approfondie sur les systèmes F-OFDM (Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing) destinés aux réseaux de communication de cinquième génération (5G) et au-delà. Les auteurs proposent un modèle mathématique novateur pour les systèmes F-OFDM, instaurant par-là même de nouvelles perspectives propices à l'avancement de l'optimisation des communications sans fil [8]. Un aspect remarquable de cet article réside dans son approche pragmatique vis-à-vis de la résolution des problématiques tangibles auxquelles les systèmes F-OFDM font face. Parmi ceux-ci, l'insuffisance de l'intervalle de garde et la transmission asynchrone, des problématiques critiques dans les réseaux à haute densité, sont abordées avec des solutions innovantes.

Par ailleurs, les auteurs proposent un système F-OFDM multi-taux spécifiquement conçu pour des contextes de communication à faible coût, induisant ainsi un renforcement de l'efficacité économique des réseaux 5G. De manière complémentaire, des stratégies algorithmiques novatrices destinées à atténuer l'interférence inter-sous-bande sont exposées, ouvrant ainsi de nouvelles avenues pour une optimisation accrue de la gestion des ressources fréquentielles au sein des communications sans fil.

1.3.2 Description du model et résultats :

Le modèle mathématique proposé dans l'article pour les systèmes F-OFDM est utilisé pour dériver les conditions pour une égalisation de canal sans interférence. Les auteurs ont également analysé les performances des systèmes F-OFDM dans des scénarios pratiques tels que l'insuffisance de l'intervalle de garde et la transmission asynchrone. Ils ont également élaboré des équations analytiques visant à quantifier l'interférence inter-symbole, l'interférence inter porteuse et l'interférence de porteuse adjacente. En outre, ils ont proposé un système F-OFDM multi-taux spécifiquement adapté aux scénarios de communication à faible coût, tout en mettant à disposition des algorithmes destinés à annuler l'interférence inter-sous-bande. Enfin, l'article propose une matrice de compensation de puissance optimale pour les systèmes F-OFDM. Les résultats de l'analyse montrent que les systèmes F-OFDM peuvent offrir une meilleure efficacité spectrale et une meilleure flexibilité de service par rapport aux systèmes OFDM classiques.

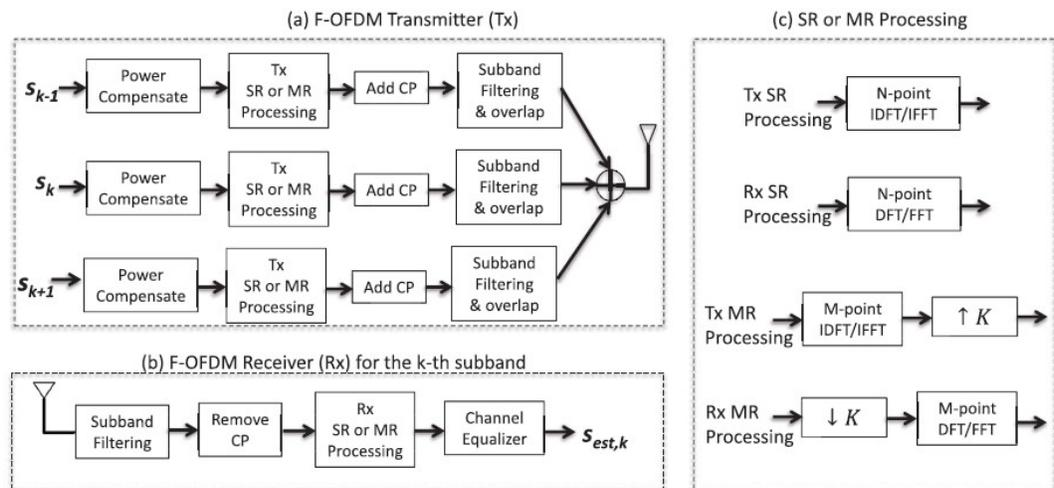


Figure 6: Model F-OFDM

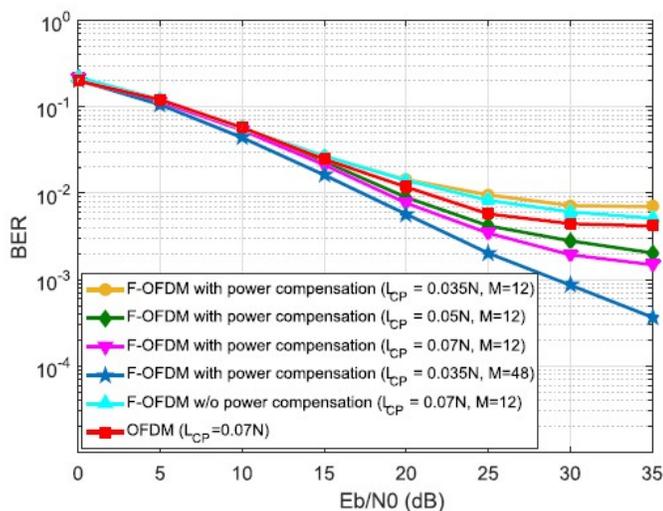


Figure 7: Simulation résultats F-OFDM

Les conclusions tirées de cette analyse mettent en évidence que les systèmes F-OFDM peuvent offrir une meilleure efficacité spectrale et une meilleure flexibilité de service par rapport aux systèmes OFDM classiques. Les auteurs ont démontré que les systèmes F-OFDM ont la capacité d'atteindre un état d'égalisation de canal exempt d'interférence dans des circonstances particulières, ce qui pourrait engendrer une amélioration des performances du système. Les auteurs ont de surcroît formulé une proposition de système F-OFDM à taux multiples, adaptée aux contextes de communication à faible coût. Ce système est susceptible de procurer une amélioration notable en termes d'efficacité spectrale ainsi que de flexibilité de service par comparaison avec les systèmes OFDM conventionnels. Les algorithmes avancés visant à supprimer l'interférence entre les sous-bandes ont le potentiel d'accroître les performances du système au sein des scénarios pratiques. Enfin, la matrice de compensation de puissance optimisée suggérée se profile comme un moyen d'améliorer la qualité de la transmission au sein des systèmes F-OFDM.

En conclusion, l'article présente une analyse détaillée des systèmes F-OFDM et de leurs performances dans des scénarios pratiques tels que l'insuffisance de l'intervalle

de garde et la transmission asynchrone. Les auteurs ont dérivé des expressions analytiques pour l'interférence inter-symbole, l'interférence interporteuse et l'interférence de porteuse adjacente, et ont proposé des algorithmes pour annuler l'interférence inter-sous-bande. Les résultats tirés de cette étude démontrent que les systèmes F-OFDM présentent la capacité d'assurer une amélioration notable en termes d'efficacité spectrale ainsi que de flexibilité de service par comparaison avec les systèmes OFDM conventionnels. De surcroît, les auteurs ont avancé un modèle de système F-OFDM multi-taux, spécifiquement conçu pour des contextes de communication économiques. Cette proposition présente le potentiel d'accroître significativement tant l'efficacité spectrale que la flexibilité de service par rapport aux systèmes OFDM traditionnels.

Pour conclure, la matrice de correction de puissance optimale suggérée se révèle susceptible de renforcer la qualité de la transmission au sein des systèmes F-OFDM. Les résultats issus de cette analyse offrent des indications théoriques qui pourraient guider la conception de systèmes 5G.

CHAPITRE 2

OUTILS ET RESSOURCES POUR LA SIMULATION ET L'IMPLÉMENTATION DE LA 5G:

2.1. *Aperçu:*

Dans le domaine des télécommunications, et plus spécifiquement dans le contexte de la cinquième génération de technologie mobile (5G), l'utilisation d'outils, de logiciels et de matériels adaptés pour la conception, la simulation, le test et la validation des systèmes de communication s'avère d'une importance cruciale. Ces ressources sont des alliés indispensables permettant aux ingénieurs et aux chercheurs d'approfondir leur compréhension des performances du système dans divers scénarios, d'optimiser les paramètres et d'évaluer l'efficacité des techniques de suppression du bruit impulsif.

L'objectif de ce chapitre est de présenter et de discuter des outils, logiciels et matériels employés pour la simulation, la mise en œuvre des systèmes de communication 5G, avec une mise en lumière particulière de leur application dans le contexte de notre projet de recherche. Dans un premier temps, nous examinerons les outils et logiciels qui permettent la simulation et la modélisation des systèmes 5G OFDM. Parmi ces derniers, MATLAB et Simulink occupent une place centrale.

Ces environnements de développement offrent une gamme d'outils permettant de simuler et de modéliser des systèmes complexes tels que ceux que l'on retrouve dans les réseaux 5G.

Ensuite, nous aborderons l'utilisation de GNU Radio, un logiciel libre de traitement du signal qui permet la génération et l'analyse des signaux. Du fait de sa capacité à intégrer une variété de sources de signaux et à mise en œuvre des chaînes de traitement

du signal, GNU Radio se distingue en tant qu'outil inestimable dans la sphère de la recherche et du développement dans le domaine des télécommunications.

Par la suite, l'accent sera porté sur le matériel employé pour concrétiser la mise en œuvre pratique du système, englobant les dispositifs SDR USRP N210, les ordinateurs portables ainsi que les antennes.

L'importance de ces éléments matériels dans la mise en œuvre des systèmes de communication 5G ne peut être sous-estimée, car ils permettent de passer de la théorie et de la simulation à la pratique.

2.2. *Matériel et logiciel :*

2.2.1 Matlab et Simulink.

Dans notre projet de recherche visant à optimiser les systèmes de communication RAN 5G, nous avons fait recours à MATLAB et Simulink pour élaborer et simuler le système 5G basé sur OFDM. MATLAB représente un environnement de programmation de niveau élevé autorisant la réalisation de calculs numériques, de simulations ainsi que d'analyses de données. En parallèle, Simulink se distingue comme un instrument de simulation et de modélisation graphique qui se trouve intégré au sein de MATLAB [9]. De manière spécifique, notre démarche a consisté à exploiter Simulink pour générer des modèles des systèmes 5G OFDM QPSK et 5G OFDM QAM16, en prenant en compte diverses configurations de canaux de communication, parmi lesquelles figurent les canaux AWGN, Rayleigh et Rician.

Ces modèles nous ont permis de tester et de valider les performances du système dans divers scénarios et conditions de bruit impulsionnel, et d'optimiser les paramètres pour obtenir les meilleures performances possibles en fonction des caractéristiques du canal utilisé.

Dans la perspective de renforcer davantage les performances du système en présence de bruit impulsionnel, nous avons également intégré un filtre à réponse impulsionnelle finie (FIR) de type passe-bas (LPF) dans notre modèle de système 5G OFDM. Le filtre FIR LPF est utilisé pour atténuer les composantes de bruit à haute fréquence dans le signal reçu, tout en préservant les informations du signal d'intérêt [10].

Grâce à MATLAB et Simulink, ainsi qu'à des boîtes à outils spécifiques telles que la 5G Toolbox et la Signal Processing Toolbox, nous avons pu concevoir, simuler et optimiser notre système de communication 5G OFDM et le filtre FIR LPF. Ces outils nous ont procuré la capacité d'évaluer l'impact des techniques de suppression du bruit impulsionnel sur les performances du système et de les améliorer en conséquence.

Les résultats de simulation ont montré que l'intégration du filtre FIR LPF permet d'améliorer considérablement les performances en termes de taux d'erreur binaire (BER) et d'erreur vectorielle moyenne (EVM) par rapport à un système sans filtre. Cette approche de filtrage contribue donc à améliorer la robustesse et la fiabilité de notre système de communication RAN 5G face aux défis posés par le bruit impulsionnel.

2.2.2 GNU Radio :

GNU Radio est un environnement de développement open-source pour la conception et la mise en œuvre de systèmes de communication sans fil [11]. Il offre une vaste bibliothèque de modules de traitement du signal et un cadre logiciel qui permet de créer et de déployer rapidement des applications de radio logicielle (SDR). GNU Radio est largement utilisé dans la recherche, le développement de systèmes de communication, l'enseignement et les applications industrielles.

Dans notre projet de recherche portant sur les systèmes de communication RAN 5G, GNU Radio a été utilisé en conjonction avec des dispositifs de radio logicielle USRP N210 pour mettre en œuvre et tester notre système 5G OFDM dans un environnement réel. Grâce à GNU Radio, nous avons pu générer des signaux 5G OFDM QAM16 et les transmettre à travers des canaux de communication réels, tels que les canaux Rayleigh (NLOS) et Rician (LOS).

En plus de la transmission et de la réception des signaux, GNU Radio a été utilisé pour effectuer des analyses en temps réel des signaux reçus et pour évaluer les performances du système en termes de taux d'erreur binaire (BER) et d'erreur vectorielle moyenne (EVM). Ces analyses ont permis de valider les résultats obtenus à partir des simulations MATLAB et Simulink, et de vérifier l'efficacité des techniques de suppression du bruit impulsionnel dans un environnement de communication réel.

Le recours à GNU Radio et aux dispositifs USRP N210 a également rendu possible la réalisation des tests souterrains dans le but d'évaluer les performances du système de communication 5G OFDM dans des conditions plus difficiles et représentatives du monde réel. Les données collectées lors de ces tests ont été utilisées pour affiner et optimiser davantage notre système de communication RAN 5G.

En résumé, GNU Radio a été un outil essentiel dans notre projet de recherche pour mettre en œuvre, tester et analyser les performances de notre système de communication 5G OFDM, en complément des simulations réalisées avec MATLAB et Simulink.

2.2.3 Software Defined Radios (SDR):

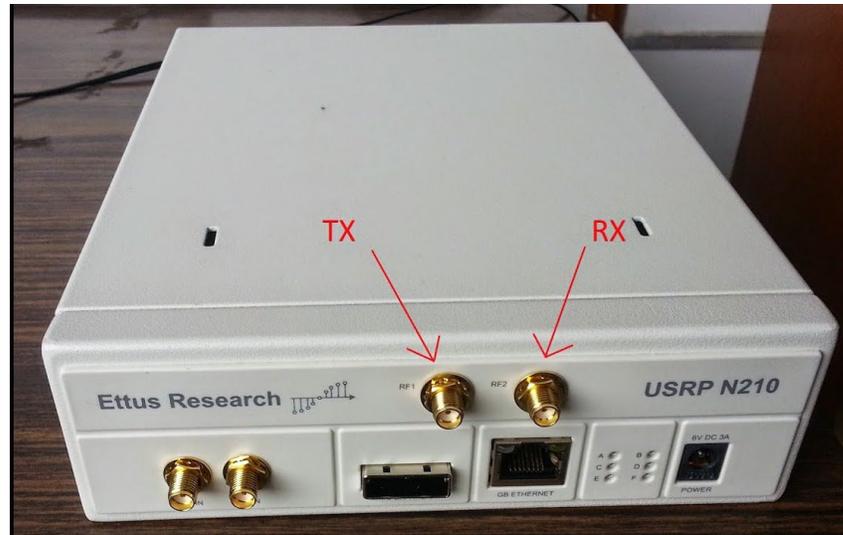


Figure 8: USRP N210

Les radios logicielles, ou Software Defined Radios (SDR), sont des dispositifs de communication sans fil dont les fonctionnalités sont définies et contrôlées par logiciel plutôt que par des composants électroniques spécialisés [12]. Les SDR offrent une grande flexibilité et permettent de mettre en œuvre et de tester rapidement différents types de systèmes de communication. Les SDR sont largement utilisés dans la recherche et le développement, ainsi que dans les applications industrielles et militaires [13]. Dans notre projet de recherche sur les systèmes de communication RAN 5G, nous avons utilisé des dispositifs SDR USRP N210 pour la mise en œuvre et l'évaluation de notre système 5G OFDM. Les USRP (Universal Software Radio Peripheral) N210 sont des dispositifs SDR polyvalents et performants qui offrent une large gamme de fréquences de fonctionnement, une haute résolution en échantillonnage et une interface de programmation conviviale.

Tableau I: Paramètre de USRP N210

USRP N210	Paramètre	Valeur
	Plage de fréquence	20MHz a 2.69 GHz
	Bande passante	Jusqu' a 50MHz
	Types d'antennes	SMA, BNC et UFL
	Connexions Ethernet	1 Gb/s
	Processeur	ARM9 a 500 MHz
	Mémoire	256 Mo DDR2 SDRAM
	Puissance de sortie maximale	10 dBm

Grâce aux USRP N210, nous avons pu mettre en œuvre et tester notre système 5G OFDM QAM16 dans un environnement souterrain. Les dispositifs USRP N210 ont été utilisés en combinaison avec deux ordinateurs portables et deux antennes pour transmettre et recevoir les signaux OFDM générés. Les antennes ont permis de couvrir les différentes bandes de fréquences requises pour les tests et les expérimentations du système de communication 5G OFDM. Par le biais des dispositifs SDR USRP N210, nous avons pu tester et valider les performances de notre système 5G OFDM dans divers scénarios et conditions de bruit, ainsi qu'évaluer l'efficacité des techniques de suppression du bruit impulsionnel et du filtre FIR LPF dans un environnement de communication réel.

Les antennes jouent un rôle crucial dans la mise en œuvre et le test des systèmes de communication sans fil, car elles permettent de transmettre et de recevoir les signaux entre les émetteurs et les récepteurs [14]. Dans notre projet, nous avons utilisé des antennes omnidirectionnelles extérieures pour réaliser nos expérimentations et tests.



Figure 9: Antenne omnidirectionnelle

Tableau II: Paramètre de Antenne

Antenne	Paramètre	Valeur
	Plage de fréquence	698-2700 MHZ
	Gain	9 dBi
	Maximum input Power	100W
	Connecter	N-F
	Puissance de sortie maximale	10 dBm
	Gain en utilisant un amplificateur de puissance	40 dB

Ces antennes ont été sélectionnées en raison de leur large plage de fréquences, qui couvre les fréquences requises pour nos tests et expérimentations de systèmes de communication 5G OFDM. Le gain élevé de l'antenne permet d'assurer une bonne qualité de réception et de transmission des signaux, même dans des conditions difficiles

ou à grande distance [15]. Les données collectées lors de ces tests ont été utilisées pour affiner et optimiser davantage notre système de communication RAN 5G, en complément des simulations réalisées avec MATLAB et Simulink.

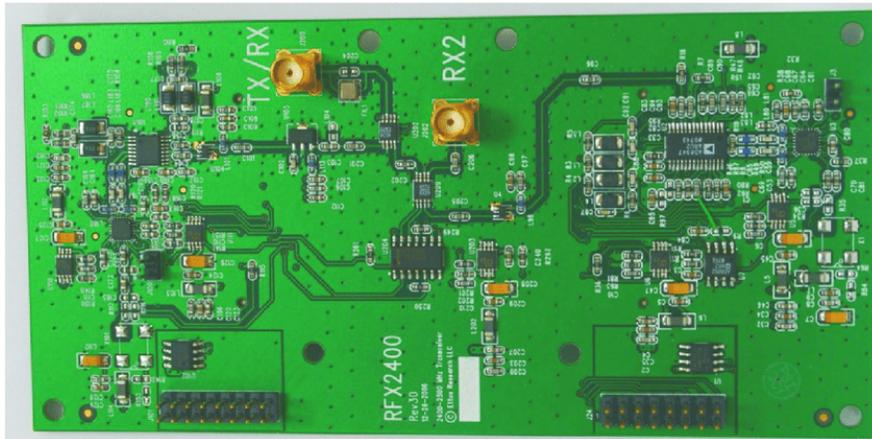


Figure 10: Carte mère RFX2400

La carte mère RFX2400 est un composant clé de l'USRP N210 utilisé dans ce projet. Cette carte est conçue pour fonctionner avec la plateforme de radio logicielle USRP (Universal Software Radio Peripheral) et se distingue par des performances de haute qualité pour les applications de communication sans fil. La RFX2400 prend en charge une large gamme de fréquences, allant de 2,3 GHz à 2,9 GHz, ce qui en fait un choix idéal pour les systèmes de communication 5G et d'autres technologies sans fil modernes [16]. La carte mère RFX2400 intègre un récepteur et un émetteur de haute qualité, ainsi que des convertisseurs analogique-numérique (ADC) et numérique-analogique (DAC) pour permettre une conversion précise des signaux entre le domaine numérique et le domaine analogique. De plus, la RFX2400 est conçue pour offrir une excellente sensibilité, une faible consommation d'énergie et une grande flexibilité dans la configuration de la chaîne de traitement du signal, ce qui en fait un élément essentiel pour les applications de radio logicielle. Dans ce projet, l'utilisation de la carte mère RFX2400 avec l'USRP N210 permet d'obtenir des performances de pointe pour les

expérimentations en communication 5G, offrant une plateforme fiable et évolutive pour la mise en œuvre et l'évaluation des algorithmes de traitement du signal et des techniques de modulation.

CHAPITRE 3

CONSTRUCTION DE L'ARCHITECTURE 5G OFDM POUR RAN :

Dans ce chapitre, nous plongerons plus en profondeur dans l'architecture et la conception du système 5G RAN OFDM. Nous procéderons à une étude approfondie des différents modèles de canaux employés dans notre projet et examinerons l'impact du bruit impulsionnel sur les performances du système. Pour ce faire, nous entreprendrons une analyse minutieuse des filtres et des techniques de suppression du bruit, lesquelles sont mises en œuvre pour améliorer tant la qualité du signal que la robustesse de notre système face aux défis engendrés par le bruit impulsionnel. De plus, nous explorerons les équations mathématiques qui formalisent les processus clés du système 5G OFDM, englobant la modulation, la démodulation et la gestion des erreurs.

En étudiant en détail les paramètres du système, nous serons en mesure d'approfondir notre compréhension des interactions complexes entre les différents éléments du système 5G RAN OFDM, et ainsi les optimiser en vue d'atteindre de meilleures performances possibles. Cette analyse approfondie nous permettra également de repérer les domaines où des améliorations supplémentaires s'avèrent nécessaires et de concevoir des solutions novatrices pour surmonter les défis rencontrés.

3.1. System OFDM 5G:

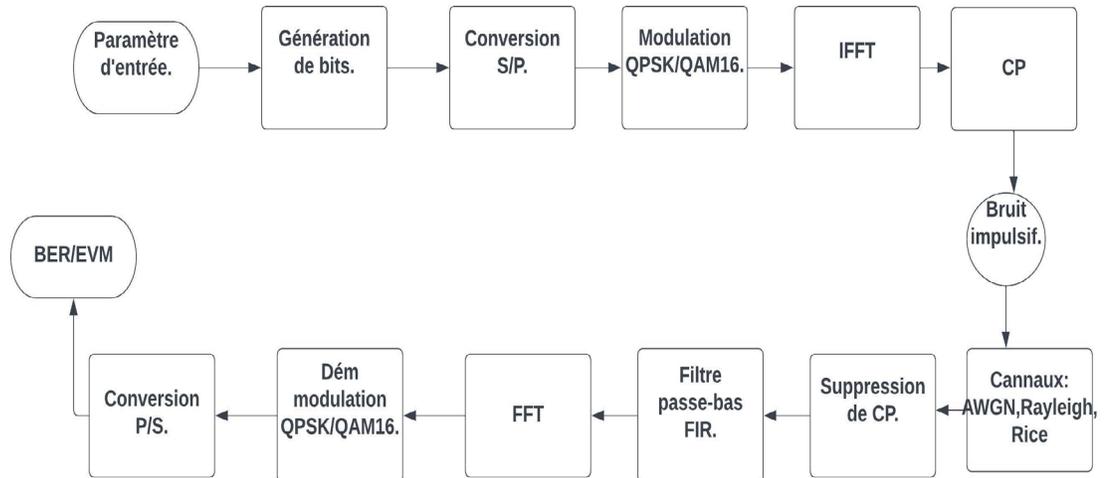


Figure 11: Diagramme du System OFDM 5G

Dans cette partie, nous allons décrire en détail les différentes étapes impliquées dans la conception et l'implémentation du système 5G RAN OFDM en utilisant MATLAB. Les étapes de ce processus sont énumérées ci-dessous :

- Paramètre d'entrée : Cette étape consiste à définir les paramètres de base du système, tels que la taille de la FFT, le taux de codage, la modulation utilisée (QPSK ou QAM16-256) et les paramètres du canal (AWGN, Rayleigh, Rice et bruit impulsionnel).

Tableau III: Paramètre de OFDM 5G

Paramètre	Value
Espacement des sous-porteuses	30 KHZ
Taille de FFT	1024
Préfixe cyclique	1/4 of FFT symbol size
Modulation	QPSK/QAM16/QAM256
Taux de codage	$\frac{1}{2}, \frac{3}{4}$
Plage de SNR	-5: 15 dB
Canaux de bruit	AWGN, Rayleigh, Rician.
Largeur de bande	40 MHZ
Fréquence porteuse	2.6 GHZ

- Génération de bits : Les bits de données sont générés aléatoirement en fonction des paramètres d'entrée définis.
- Conversion S/P (série-parallèle) : Les bits de données sont convertis d'un flux série en blocs parallèles pour être traités par la modulation.
- Modulation QPSK/QAM16-256 : Les blocs de données parallèles sont modulés en utilisant la modulation QPSK ou QAM16-256 selon le choix effectué dans les paramètres d'entrée. Après la modulation QPSK/QAM16-256, les sous-porteuses sont combinées pour former le signal OFDM en utilisant l'équation suivante :

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{K=0}^{N-1} X(K) e^{(j2\pi n \frac{K}{N})} \quad (3)$$

Où

- $X(k)$ représente le symbole de données QPSK/QAM16 modulé pour la k -ième sous-porteuse dans le domaine fréquentiel.
- N est le nombre total de sous-porteuses et t est l'indice de temps.

- $e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)nk}$: Le terme exponentiel complexe qui lie les domaines temporel et fréquentiel.
- La sommation est effectuée sur toutes les sous-porteuses de 0 à N-1.

Dans cette expression, $x(n)$ représente le signal OFDM après l'application de la transformée de Fourier inverse rapide (IFFT), qui est ensuite utilisé pour la transmission sur le canal [17].

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) et QAM16 (16-QAM ou Quadrature Amplitude Modulation avec 16 états) sont des techniques de modulation numérique utilisées dans les systèmes de communication pour transmettre des données en modifiant certains paramètres du signal porteur. Voici une explication de chaque technique de modulation et de son fonctionnement :

- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) : La modulation QPSK est une extension de la BPSK, où quatre phases différentes sont utilisées pour représenter les quatre combinaisons possibles de deux bits (00, 01, 10 et 11) [18]. Dans la QPSK, le signal porteur est modulé en changeant sa phase de 0, 90, 180 ou 270 degrés pour représenter les différentes combinaisons de bits. Comparée à la BPSK, la QPSK permet de transmettre deux fois plus de données sur le même signal porteur, offrant une meilleure efficacité spectrale. Cependant, elle est légèrement moins résistante au bruit que la BPSK [19].

$$S_{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t + (i-1)\frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

Où :

- $S_{QPSK}(t)$: Le signal de sortie modulé QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).
- E_s : l'énergie moyenne par symbole.
- T_s : la durée d'un symbole.

- f_c : la fréquence de la porteuse.
 - i : entier tel que $i=1, 2, 3$ ou 4 .
- QAM16/256 (16-QAM) : La modulation 16-QAM est une technique de modulation qui combine la modulation d'amplitude et de phase pour représenter les données binaires. Dans le cas du 16-QAM, le signal porteur est modifié en utilisant 16 états différents, chacun représentant une combinaison unique de quatre bits (0000, 0001, 0010, ..., 1111) [20]. Chaque état est caractérisé par une amplitude et une phase spécifique. Le 16-QAM permet de transmettre quatre fois plus de données que la BPSK et deux fois plus de données que la QPSK sur le même signal porteur, offrant une efficacité spectrale encore plus élevée. Cependant, en raison de la proximité des états, la 16-QAM est plus sensible au bruit et aux interférences par rapport à la QPSK.

$$S_i(t) = a_{i,j} \cos(2\pi f_c t) + b_{i,j} \sin(2\pi f_c t) \quad (5)$$

- $S_i(t)$: le signal modulé QAM 16/256.
 - $a_{i,j}$ et $b_{i,j}$: sont les amplitudes des signaux en quadrature pour chaque symbole de modulation, où $i = 1, 2, 3, 4$ et $j = 1, 2, 3, 4$.
 - f_c : la fréquence de la porteuse
- IFFT (Transformée de Fourier inverse rapide) : Les symboles modulés sont transformés dans le domaine temporel en utilisant l'IFFT pour créer le signal OFDM [21]. L'IFFT convertit efficacement les données modulées dans le domaine fréquentiel en un signal temporel, qui est ensuite utilisé pour la transmission sur le canal.

- CP (Préfixe cyclique) : Le préfixe cyclique est une technique utilisée pour prévenir les interférences entre symboles (ISI) et les interférences entre porteuses (ICI) dans les systèmes de communication OFDM. Le préfixe cyclique consiste à copier une partie du signal OFDM à la fin de chaque symbole et à l'ajouter au début de ce symbole. En faisant cela, le signal OFDM est rendu périodique, ce qui permet de réduire l'effet des échos et de la dispersion temporelle sur le signal reçu [22]. L'ajout d'un préfixe cyclique crée un intervalle de garde entre les symboles OFDM consécutifs, ce qui permet d'éviter l'ISI. De plus, la périodicité du signal OFDM après l'ajout du préfixe cyclique permet de conserver l'orthogonalité entre les sous-porteuses, ce qui réduit l'ICI. Dans notre projet, nous avons choisi d'utiliser un préfixe cyclique correspondant à $1/4$ de la taille du symbole FFT. Cette valeur est couramment utilisée dans les systèmes de communication OFDM, car elle offre un bon compromis entre la protection contre les interférences et la durée du préfixe cyclique, qui affecte la capacité et l'efficacité spectrale du système.

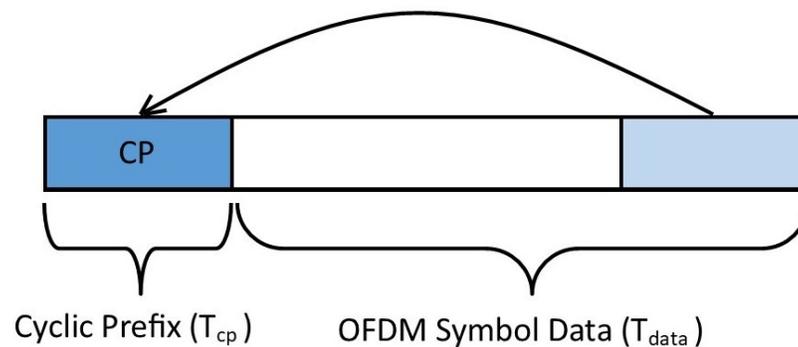


Figure 12: cyclique préfix

3.2. Bruit impulsionnelle (IN):

Le bruit impulsif est un type de bruit non-gaussien caractérisé par des impulsions de grande amplitude et de courte durée. Dans les systèmes de communication, ce bruit impulsif peut provenir de sources naturelles, comme les décharges électrostatiques, ou artificielles, telles que les interférences électromagnétiques émises par d'autres équipements électroniques. Le bruit impulsif peut avoir un impact considérable sur les performances des systèmes de communication, surtout dans des environnements où les impulsions sont à la fois fréquentes et intenses [23].

Dans le cadre de notre projet, nous avons intégré du bruit impulsif au signal OFDM afin de simuler des conditions réelles de bruit et d'évaluer son impact sur les performances du système. Pour modéliser ce bruit impulsif, nous avons adopté le modèle Bernoulli-Gaussian, largement employé pour décrire le bruit impulsif dans les systèmes de communication. Ce modèle est défini par deux paramètres : la probabilité d'occurrence des impulsions (p) et le bruit gaussien ($N(t)$) [24].

Le bruit impulsif de Bernoulli-Gaussian, noté $I(t)$, généré à l'aide de l'équation suivante :

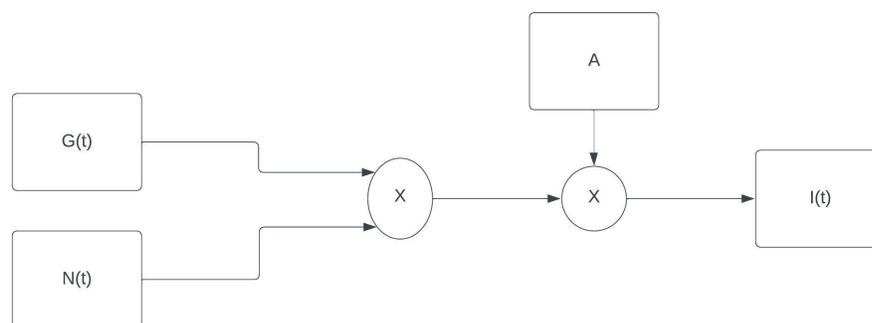


Figure 13: Model bruit impulsionnelle IN

$$I(t) = AG(t)N(t) \quad (6)$$

Où :

- A est l'amplitude des impulsions.
- G(t) est un processus de Bernoulli, qui génère des impulsions avec une probabilité p.
- N(t) est un processus gaussien de moyenne nulle et de variance unité.
- P : $0 \leq p \leq 1$.

Le processus de Bernoulli, G(t), est un processus stochastique discret qui prend la valeur 1 avec une probabilité p et la valeur 0 avec une probabilité 1-p. En d'autres termes, G(t) génère des impulsions (valeur 1) avec une probabilité p et n'en génère pas (valeur 0) avec une probabilité 1-p [25].

Le paramètre p est lié à la fréquence d'apparition des impulsions dans le bruit impulsif. À mesure que la valeur de p augmente, le bruit impulsif contient davantage d'impulsions.

En combinant le processus de Bernoulli G(t) avec le processus gaussien N(t), nous obtenons un modèle de bruit impulsif qui présente des impulsions de grande amplitude et de courte durée, avec une fréquence d'apparition des impulsions déterminée par la probabilité p. L'ajout de ce bruit impulsif au signal OFDM permet de simuler les effets du bruit impulsif sur le système de communication 5G OFDM et d'évaluer les performances du système dans des conditions de bruit réalistes.

Pour ajouter le bruit impulsif Bernoulli-Gaussian au signal OFDM, nous avons généré un échantillon de bruit impulsif I(t) en utilisant l'équation mentionnée précédemment et nous l'avons combiné au signal OFDM après le préfixe cyclique, comme suit :

$$r_i(t) = s(t) + I(t) \quad (7)$$

Où

- $r_i(t)$ représente le signal OFDM QPSK bruité.
- $s(t)$ représente le signal OFDM QPSK original sans bruit.
- $I(t)$ est le bruit impulsif.

Cette étape permet de simuler l'effet du bruit impulsif sur le signal OFDM lors de la transmission sur le canal de communication, offrant une représentation réaliste des conditions de bruit auxquelles le système peut être confronté.

En étudiant l'impact du bruit impulsif Bernoulli-Gaussian sur le système de communication 5G OFDM, nous avons pu évaluer les performances du système dans des conditions de bruit réalistes et identifier les techniques de suppression du bruit les plus efficaces. Grâce à cette analyse, nous avons été en mesure d'optimiser notre système pour offrir les meilleures performances possibles face à ce type de bruit, renforçant ainsi la robustesse de notre système de communication 5G OFDM dans des environnements soumis à des conditions de bruit réalistes.

3.3. *Canaux de transmission:*

Les canaux de transmission sont essentiels pour comprendre et analyser les performances des systèmes de communication sans fil parce qu'ils définissent la façon dont les signaux sont transmis entre l'émetteur et le récepteur. Ils sont influencés par divers facteurs environnementaux, tels que la distance, les obstacles, la réflexion et la diffraction des signaux, susceptibles de dégrader la qualité du signal et réduire les performances du système [26].

Dans notre étude sur le système de communication 5G OFDM, nous avons examiné l'impact de trois types de canaux de transmission sur les performances du système : le bruit blanc gaussien additif (AWGN), Rayleigh et Rician. Chacun de ces canaux représente des scénarios de propagation réalistes couramment rencontrés dans les réseaux de communication sans fil.

3.3.1 Canal Bruit blanc gaussien additif (AWGN) :

Le bruit blanc gaussien additif (AWGN) est un modèle de bruit de base utilisé pour simuler les effets du bruit thermique et d'autres sources de bruit électronique dans les systèmes de communication [27]. Il se distingue par une densité spectrale de puissance constante sur toute la bande de fréquences et une distribution de probabilité gaussienne de la tension du bruit à tout instant.

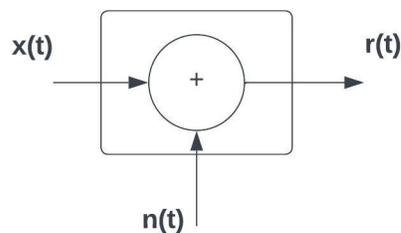


Figure 14: Model AWGN

Dans le domaine temporel, le bruit AWGN, noté $n(t)$, est défini par une distribution gaussienne de moyenne nulle et de variance σ^2 , comme suit :

$n(t) \sim N(0, \sigma^2)$, où $N(0, \sigma^2)$ est la distribution normale de moyenne 0 et de variance σ^2 .

Le rapport signal sur bruit (SNR) est un paramètre clé pour caractériser la qualité du signal dans un canal AWGN. Il est défini comme le rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit. Dans le cas d'un système de communication 5G OFDM, le SNR est un facteur important qui influence la qualité du signal reçu et, par conséquent, les performances globales du système.

Dans notre projet de système de communication 5G OFDM, nous avons étudié l'impact de deux scénarios de bruit différents sur les performances du système : d'une part, le canal AWGN en lui-même, et, d'autre part le canal combinant AWGN et bruit impulsif. Notre objectif était d'évaluer l'efficacité des techniques de filtrage pour réduire l'impact du bruit impulsif sur les performances du système.

Dans un premier temps, nous avons examiné le cas du canal AWGN seul. Nous avons généré un échantillon de bruit AWGN, $n(t)$, en fonction du SNR souhaité et ajouté ce bruit au signal OFDM :

$$r_1(t) = x(t) + n(t) \quad (8)$$

Nous avons ensuite évalué les performances du système en termes d'erreur de taux de bits (BER) et de rapport signal sur bruit (SNR) pour ce scénario. Par la suite, nous avons examiné le cas du canal combinant AWGN et bruit impulsif. Pour ce faire, nous avons généré un échantillon de bruit AWGN, $N(t)$, ainsi qu'un échantillon de bruit impulsif, $I(t)$, en utilisant le modèle de bruit impulsif choisi. Nous avons ensuite ajouté ces deux échantillons de bruit au signal OFDM :

$$r_2(t) = r_i(t) + n(t) \quad (9)$$

Où

- $r_i(t)$ représente le signal OFDM QPSK bruité.

Dans ce scénario, nous avons appliqué des techniques de filtrage pour atténuer l'impact du bruit impulsif sur les performances du système. Nous avons évalué l'efficacité de ces techniques en comparant les performances du système (en termes de BER et de SNR) avant et après l'application du filtrage. En comparant les résultats obtenus dans les deux scénarios, nous avons pu déterminer l'efficacité des techniques de filtrage pour réduire l'impact du bruit impulsif sur les performances du système de communication 5G OFDM.

3.3.2 Canal de Rayleigh Fading :

Le canal de Rayleigh est un modèle de canal de transmission sans fil largement utilisé pour simuler les conditions de propagation en environnement à trajets multiples. Dans un environnement à trajets multiples, les signaux se propagent entre l'émetteur et le récepteur en suivant plusieurs chemins différents, résultant de réflexions, de diffractions et de diffusions sur des objets tels que des bâtiments, des collines et des arbres [28].

Ces trajets multiples peuvent provoquer des interférences constructives et destructives, entraînant des variations rapides de l'amplitude et de la phase du signal reçu. Le canal de Rayleigh est particulièrement adapté pour modéliser les environnements où il n'y a pas de trajet direct (ligne de vue) entre l'émetteur et le récepteur. Dans le modèle de canal de Rayleigh, l'amplitude du signal reçu suit une distribution de Rayleigh, tandis que la phase suit une distribution uniforme entre 0 et 2π [28].

Le gain complexe du canal de Rayleigh, noté $h_1(t)$, peut être représenté comme suit :

$$h_1(t) = R(t)e^{j\Phi(t)} \quad (10)$$

Où

$R(t)$ est une variable aléatoire suivant une distribution de Rayleigh, dont la densité de probabilité (PDF) est définie par la formule suivante [29] :

$$p_1(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)} & \text{pour } (0 \leq r \leq \infty) \\ 0 & \text{pour } r < 0 \end{cases} \quad (11)$$

- r : L'amplitude du signal reçu. Dans un environnement à trajets multiples, l'amplitude du signal reçu est une variable aléatoire qui résulte des interférences constructives et destructives entre les différents trajets. La distribution de Rayleigh décrit la probabilité que l'amplitude du signal reçu soit égale à r , où r varie de 0 à ∞ .
- σ : Le paramètre d'échelle de la distribution de Rayleigh. Il est lié à la puissance moyenne du signal reçu et détermine la forme de la distribution. Plus précisément, σ^2 représente la puissance moyenne des signaux reçus. Un σ plus grand signifie une puissance moyenne plus élevée, ce qui entraîne une fonction de densité de probabilité plus étalée.
- $\Phi(t)$ est une variable aléatoire suivant une distribution uniforme entre 0 et 2π , et j est l'unité imaginaire.

Le signal reçu $y_{r1}(t)$ dans un environnement de canal de Rayleigh est donné par la formule suivante :

$$y_{r1}(t) = h(t) * x(t) + n(t) \quad (12)$$

Où

- $x(t)$ le signal transmis (dans notre cas, le signal OFDM).
- $n(t)$ le bruit présent dans le canal de communication.
- $h(t)$ le gain complexe du canal.

Le signal reçu $y_{ri1}(t)$ dans un environnement de canal de Rayleigh avec bruit impulsionnelle est donné par la formule suivante :

$$y_{ri1}(t) = h_1(t) * r_i(t) + n(t) \quad (13)$$

Où

- $r_i(t)$ représente le signal OFDM QPSK bruité.

Le rapport signal sur bruit (SNR) et le taux de Doppler maximum (f_D) sont deux paramètres clés pour caractériser un canal de Rayleigh. Le SNR détermine la qualité du signal reçu et est défini comme le rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit.

Dans notre système de communication 5G OFDM, nous avons utilisé le modèle de canal de Rayleigh pour simuler les conditions de propagation à trajets multiples et évaluer l'impact de ces conditions sur les performances du système. En transmettant le signal OFDM à travers un canal de Rayleigh, nous avons pu observer les effets des trajets multiples, tels que les interférences constructives et destructives, sur la qualité du signal reçu. Cette analyse nous a permis d'identifier les techniques de compensation de canal les plus efficaces et d'optimiser notre système de communication 5G OFDM pour offrir les meilleures performances possibles dans des environnements à trajets multiples.

3.3.3 Canal de Rician Fading :

Le canal de Rician est un modèle de canal de transmission sans fil qui tient compte de la présence d'un composant direct (ligne de vue) entre l'émetteur et le récepteur, en complément des trajets multiples indirects [30].

Dans le modèle de canal de Rician, le gain complexe du canal, noté $h(t)$, est composé de deux parties, une partie déterministe correspondant au trajet direct et une partie stochastique correspondant aux trajets indirects. Le gain complexe $h_2(t)$ peut être représenté comme suit :

$$h_2(t) = s + R(T) * e^{(j\Phi(t))} \quad (14)$$

Où

- S est le composant déterministe.
- R(t) est une variable aléatoire suivant une distribution de Rayleigh.

La distribution de Rician décrit la probabilité de l'amplitude du signal reçu dans un environnement de canal de Rician et est définie par la formule suivante :

$$h_2(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{(r^2+A^2)}{2\sigma^2}} I_0 \frac{Ar}{\sigma^2} & \text{pour } A \geq 0, r \geq 0 \\ 0 & \text{pour } r < 0 \end{cases} \quad (15)$$

- r : L'amplitude du signal reçu. Dans un environnement à trajets multiples avec une composante directe, l'amplitude du signal reçu est une variable aléatoire qui résulte des interférences constructives et destructives entre les différents trajets et la composante directe. La distribution de Rician décrit

la probabilité que l'amplitude du signal reçu soit égale à r , où r varie de 0 à ∞ .

- A : L'amplitude de crête du signal dominant (composante directe). Dans un environnement à trajets multiples avec une composante directe, le signal reçu comprend une composante déterministe et une composante aléatoire due aux trajets multiples. A représente l'amplitude de la composante déterministe.
- σ : Le paramètre d'échelle de la distribution de Rician. Il est lié à la puissance moyenne du signal reçu et détermine la forme de la distribution. Plus précisément, σ^2 représente la puissance moyenne des signaux reçus. Un σ plus grand signifie une puissance moyenne plus élevée, ce qui entraîne une fonction de densité de probabilité plus étalée.
- I_0 : La fonction de Bessel modifiée de première espèce et d'ordre zéro. Cette fonction mathématique apparaît dans la formule de la distribution de Rician et joue un rôle important dans la modélisation des propriétés statistiques des signaux dans un environnement à trajets multiples avec une composante directe.

La distribution de Rice est souvent décrite en termes d'un paramètre K qui est défini comme le rapport entre la puissance du signal déterministe et la variance du trajet multiple [30]. Elle est donnée par :

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (16)$$

- Le paramètre K est connu sous le nom de facteur Rician et spécifie complètement la distribution Rician.

Lorsque $K=0$, cela signifie qu'il n'y a pas de composante déterministe dans le signal et la distribution de Rician se réduit à une distribution de Rayleigh.

Dans ce cas, le signal est entièrement composé de la composante aléatoire due aux trajets multiples.

Lorsque $K=10$, cela indique qu'il y a une forte composante déterministe dans le signal par rapport à la composante aléatoire due aux trajets multiples. Cela peut se

produire dans les environnements de propagation où il y a une ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur, et où le signal peut subir une faible atténuation. Lorsque K tend vers l'infini, cela indique qu'il y a une composante déterministe très forte par rapport à la composante aléatoire due aux trajets multiples.

Le signal reçu $y_{rc}(t)$ dans un environnement de canal de Rician est donné par la formule suivante :

$$y_{rc}(t) = h_2(t) * x(t) + n(t) \quad (17)$$

Où

- $x(t)$ est le signal transmis .
- $n(t)$ est le bruit présent dans le canal de communication.

Le signal reçu $y_{rci}(t)$ dans un environnement de canal de Rician avec le bruit impulsif est donné par la formule suivante :

$$y_{rci}(t) = h_2(t) * r_i(t) + n(t) \quad (18)$$

Dans notre système de communication 5G OFDM, nous avons utilisé le modèle de canal de Rician pour simuler les conditions de propagation en présence d'un trajet direct et de trajets indirects. L'analyse des performances du système dans un environnement de canal de Rician nous a permis d'identifier les techniques de compensation de canal les plus efficaces pour les différentes conditions de propagation. Par exemple, dans les situations où le facteur K est élevé et le composant direct domine, des techniques de compensation de canal spécifiques aux canaux de Rician peuvent être appliquées pour améliorer les performances du système de communication 5G OFDM.

En résumé, le canal de Rician est un modèle de canal sans fil qui tient compte de la présence d'un trajet direct et de trajets multiples indirects entre l'émetteur et le récepteur. Le facteur K est un paramètre clé pour caractériser un canal de Rician et

détermine l'importance relative du trajet direct par rapport aux trajets indirects. L'utilisation du modèle de canal de Rician dans notre système de communication 5G OFDM nous a permis d'analyser les performances du système dans diverses conditions de propagation et d'optimiser les techniques de compensation de canal en fonction des.

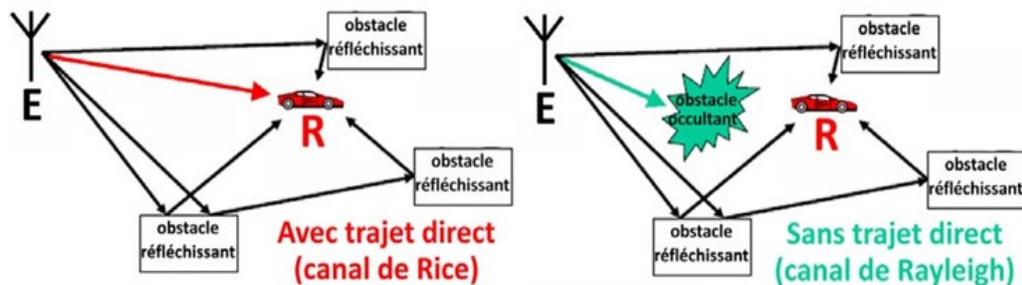


Figure 15: Les 2 cas de fading résultant de multi-trajets

- Suppression de CP : Après avoir traversé le canal de transmission, le signal reçu au niveau du récepteur contient toujours le préfixe cyclique. La suppression de CP est une étape essentielle dans le processus de réception pour récupérer le signal OFDM original. Cette opération est réalisée en supprimant simplement la partie correspondante au préfixe cyclique du signal reçu. Il est important de noter que la durée du préfixe cyclique doit être supérieure ou égale au retard maximum introduit par la propagation à trajets multiples pour éviter les problèmes d'interférences. Une fois que le préfixe cyclique a été supprimé, le signal OFDM original est récupéré, et les étapes de traitement suivantes peuvent être appliquées pour extraire les

3.4. *Filtre passe-bas FIR (Finite Impulse Response) :*

Le filtre passe-bas FIR (Finite Impulse Response) fonctionne en éliminant les composantes de bruit à haute fréquence du signal d'entrée, tout en laissant passer les fréquences inférieures à la fréquence de coupure [31]. Son efficacité réside particulièrement dans la diminution du bruit impulsif et des interférences, facteurs susceptibles d'altérer la qualité du signal reçu. Le bruit impulsif se caractérise par des impulsions de bruit de courte durée et de grande amplitude qui peuvent causer des erreurs dans la détection des symboles OFDM. Le filtre passe-bas FIR atténue ces impulsions en supprimant leurs composantes de haute fréquence.

Dans cette étude, nous avons mis en œuvre un filtre passe-bas FIR spécialement conçu pour optimiser la performance et la qualité du signal reçu dans un système de communication OFDM 5G.

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} (h[k] * x[n - k]) \quad (19)$$

Les paramètres clés du filtre ont été soigneusement choisis pour obtenir une atténuation efficace des composantes de bruit à haute fréquence, tout en préservant les caractéristiques essentielles du signal d'information. Les paramètres du filtre sont les suivants :

Tableau IV: Paramètre de Filtre FIR LPF

Paramètre	Valeur
Fréquence d'échantillonnage (Fs)	40 MHz
Fréquence de coupure (Fc)	4 MHz
Longueur du filtre (N)	10
Méthode de conception	Hamming
Fréquence normalisée	0.1

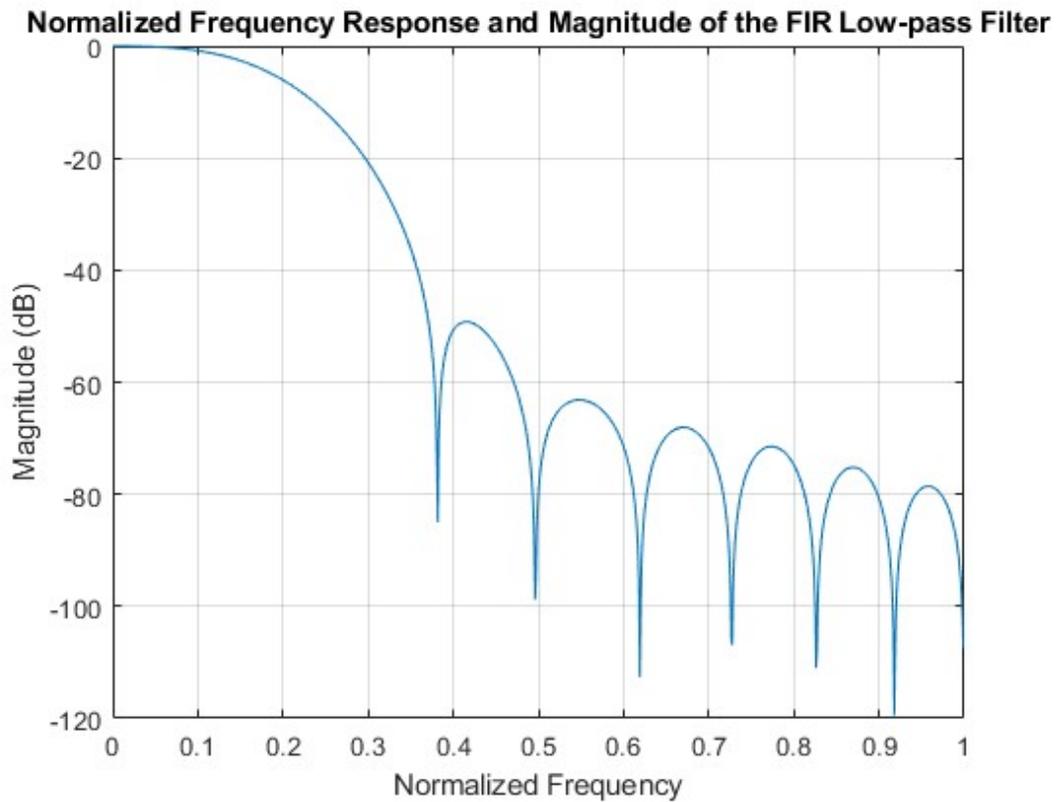


Figure 16: FIR filtre

La méthode de la fenêtre de Hamming est une technique couramment utilisée pour la conception de filtres FIR (Finite Impulse Response). Cette méthode est basée sur l'utilisation d'une fenêtre temporelle, en l'occurrence la fenêtre de Hamming, pour façonner la réponse impulsionnelle idéale du filtre passe-bas [32].

La fenêtre de Hamming est une fonction qui présente des caractéristiques particulières en termes de largeur de bande passante et d'atténuation des lobes latéraux, ce qui la rend appropriée pour la conception de filtres FIR.

La fenêtre de Hamming $w(n)$ est définie par l'équation suivante :

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (20)$$

Pour $n=0, 1, \dots, N-1$.

Où N est la longueur de la fenêtre et du filtre.

La réponse impulsionnelle idéale $h_{id}(n)$ d'un filtre passe-bas est définie comme suit :

$$h_{id}(n) = \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi\left(n-\frac{N-1}{2}\right)F_c}{f_s}\right)}{\pi\left(N-\frac{n-1}{2}\right)} \right) \quad (21)$$

Où

- F_c est la fréquence de coupure du filtre.
- f_s est la fréquence d'échantillonnage.
- N est la longueur du filtre.

La réponse impulsionnelle $h(n)$ du filtre FIR passe-bas conçu en utilisant la méthode de la fenêtre de Hamming est obtenue en multipliant la réponse impulsionnelle idéale $h_{id}(n)$ par la fenêtre de Hamming $w(n)$:

$$h(n) = h_{id}(n)w(n) \quad (22)$$

Les coefficients du filtre $b(k)$ sont les valeurs de la réponse impulsionnelle $h(n)$ aux instants k , c'est-à-dire $b(k) = h(k)$ pour $k = 0, 1, \dots, N-1$. Ces coefficients sont utilisés pour calculer la sortie $y(t)$ du filtre FIR à l'aide de la formule suivante :

$$y(t) = b(0)x(t) + b(1)x(t-1) + \dots + b(N-1)x(t-(N-1)) \quad (23)$$

- $y(t)$ est la sortie du filtre à l'instant t .
- $x(t)$ est l'entrée du filtre à l'instant t .
- $b(k)$ est le coefficient du filtre à l'instant k .

- N est la longueur du filtre (nombre de coefficients).

Une partie essentielle de l'évaluation des performances d'un filtre est la compréhension de son influence sur le délai du signal. Lorsqu'un signal traverse un filtre, il subit un décalage temporel qui peut avoir des implications significatives sur le fonctionnement du système de communication. Dans le cas d'un filtre FIR, ce décalage, aussi appelé délai de groupe, est typiquement de $\frac{N}{2}$ échantillons, où N est l'ordre du filtre [33].

Dans notre étude, nous avons analysé l'impact du délai du filtre sur le signal pour différents ordres de filtres, allant de N=2 à N=10. Pour chaque ordre de filtre, nous avons calculé le décalage en échantillons, converti ce décalage en temps en utilisant la période d'échantillonnage ($1/F_s$), et comparé le délai du signal filtré avec celui du signal original.

Le tableau suivant présente les résultats de cette analyse. Il est important de souligner que le délai augmente avec l'ordre du filtre. Cette augmentation peut avoir des conséquences sur la qualité du signal et doit être prise en compte lors de la sélection de l'ordre du filtre. Cependant, il faut également prendre en considération que des ordres de filtre plus élevés peuvent offrir une meilleure performance en termes de réduction du bruit, un facteur tout aussi important à considérer :

Tableau V: Délai du filtre pour chaque ordre

Ordre du filtre(N)	Décalage du filtre (échantillons)	Délai du filtre (microsecondes)	Délai par rapport au signal original (microsecondes)
2	1	0.025	0.05
4	2	0.05	0.1
6	3	0.0075	0.15
8	4	0.1	0.2
10	5	0.125	0.25

En somme, l'utilisation d'un filtre FIR passe-bas conçu avec la méthode de la fenêtre de Hamming permet d'améliorer significativement la qualité du signal reçu dans un système de communication OFDM 5G. En atténuant efficacement le bruit impulsif et les interférences, le filtre FIR contribue à une meilleure performance en termes de taux d'erreur binaire (BER) et d'erreur vectorielle moyenne (EVM), assurant ainsi une communication plus fiable et robuste dans des environnements à bruit élevé.

- La transformation rapide de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) est une méthode efficace pour calculer la transformation de Fourier discrète (DFT) d'un signal discret. La FFT est largement utilisée dans le traitement du signal et constitue une étape clé dans le récepteur OFDM pour convertir le signal filtré du domaine temporel au domaine fréquentiel [34]. Cette opération permet de récupérer les sous-porteuses modulées et de détecter les symboles OFDM transmis.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)nk} \quad (24)$$

- $X(k)$: La valeur du signal X dans le domaine fréquentiel à la fréquence k.
- $x(n)$: La valeur du signal x au temps n.
- N : La taille de l'échantillon du signal, qui représente le nombre de points de données dans le signal.
- k : L'indice fréquentiel pour le signal dans le domaine fréquentiel.
- n : L'indice temporel pour le signal dans le domaine temporel.
- $e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)nk}$: Le terme exponentiel complexe qui lie les domaines temporel et fréquentiel.

Démodulations QPSK/QAM16/QAM256 : Selon la technique de démodulation choisie (QPSK ou 16-QAM), chaque sous-porteuse est démodulée pour obtenir les bits de données correspondants. Pour la démodulation QPSK, les symboles complexes sont mappés sur une constellation à quatre points, où chaque point représente une combinaison unique de deux bits. Pour la démodulation 16-QAM, les symboles complexes sont mappés sur une constellation à 16 points, où chaque point représente une combinaison unique de quatre bits.

Le taux de codage est un paramètre essentiel dans les systèmes de communication numérique, car il indique le rapport entre le nombre de bits d'information et le nombre total de bits transmis après l'application d'une technique de codage d'erreur [35]. L'objectif du taux de codage est d'améliorer la fiabilité et la robustesse d'un système en ajoutant des bits de redondance aux données d'origine, permettant ainsi de détecter et de corriger les erreurs de transmission.

Dans notre système, différents taux de codage sont utilisés pour différentes modulations :

En utilisant la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), un taux de codage de $1/2$ est employé, ce qui implique l'addition d'un bit redondant pour chaque bit d'information, engendrant ainsi le doublement du volume total de bits transmis. Le taux de codage de $1/2$ offre un bon équilibre entre la protection contre les erreurs et l'efficacité spectrale, ce qui le rend adapté à la modulation QPSK.

Dans le cadre de la modulation QAM16 (Quadrature Amplitude Modulation à 16 états), un taux de codage de $3/4$ est employé. Ce choix implique l'adjonction d'un bit redondant pour chaque groupe de trois bits d'information, ce qui a pour effet d'accroître le nombre total de bits transmis de 33%. Le taux de codage de $3/4$ se distingue par une optimisation accrue de l'efficacité spectrale par rapport au taux de $1/2$, toutefois assortie d'une protection légèrement inférieure contre les erreurs.

Le processus de conversion parallèle-série (P/S) est une étape clé dans les systèmes de communication numérique, en particulier dans les systèmes OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Il sert à transformer les données parallèles en un flux de données série avant la transmission sur le canal de communication.

Dans le système OFDM, les données sont d'abord modulées sur plusieurs sous-porteuses orthogonales. Ces sous-porteuses sont traitées en parallèle, ce qui permet d'optimiser l'efficacité spectrale et de réduire les interférences inter symboles (ISI). Cependant, avant la transmission, les données modulées sur les sous-porteuses doivent être converties en un flux de données série pour faciliter la transmission sur un seul canal de communication.

La conversion P/S est réalisée en prenant les données modulées sur les sous-porteuses et en les combinant pour former un flux de données série. Ce flux de données est ensuite transmis sur le canal de communication à l'aide d'un transmetteur RF (Radio Fréquence). La conversion P/S est essentielle pour assurer que les données parallèles traitées dans le système OFDM peuvent être transmises de manière efficace et fiable sur un seul canal de communication.

3.5. *Calcul d'Erreur :*

Dans les systèmes de communication 5G OFDM, diverses sources d'erreurs peuvent affecter la qualité et la fiabilité de la transmission des données. trouvent leur genèse dans diverses perturbations telles que les interférences, la distorsion du signal, du signal, les erreurs de synchronisation, ainsi que d'autres variables susceptibles de dégrader les capacités de performance du système.

Pour évaluer et minimiser l'impact de ces erreurs, des métriques clés telles que le taux d'erreur binaire (BER) et l'erreur vectorielle de magnitude (EVM) sont utilisées.

3.5.1 Le Taux d'erreur Binaire (BER).

Le taux d'erreur binaire (BER) est une mesure clé de la performance d'un système de communication, qui quantifie le nombre d'erreurs de bits survenant lors de la transmission des données sur un canal de communication. Le BER est défini comme le rapport entre le nombre d'erreurs de bits détectées et le nombre total de bits transmis [36].

Une approche courante pour estimer le BER consiste à effectuer une simulation numérique, telle qu'une simulation MATLAB, qui modélise le système de communication et le canal de transmission.

Dans ce cas, le BER peut être calculé en comparant les bits transmis aux bits reçus après la filtration et démodulation, puis en comptant le nombre d'erreurs et en divisant ce nombre par le nombre total de bits transmis.

$$BER_{simulation} = \frac{\text{nombre d'erreurs de bits}}{\text{nombre total de bits transmis}} \quad (25)$$

Une autre approche pour estimer le BER est d'utiliser des formules théoriques basées sur des modèles mathématiques du système de communication et du canal de transmission.

Pour les systèmes utilisant la modulation QPSK ou QAM16, par exemple, on peut utiliser la fonction Q pour calculer le BER théorique à partir de la relation énergie par bit sur densité de bruit spectrale ($\frac{E_b}{N_o}$). Pour convertir le rapport signal sur bruit (SNR) en rapport énergie par bit sur densité de bruit spectrale ($\frac{E_b}{N_o}$), la formule suivante peut être utilisée :

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR - 10 \log_{10}(k) - 10 \log_{10}(R) \quad (26)$$

Où :

- SNR représente le rapport signal sur bruit (en décibels), qui est une mesure de la qualité du signal dans un système de communication.

$$SNR(dB) = 10 \log \frac{P_s}{P_n} \quad (27)$$

- P_s : puissance du signal.
- P_n : puissance du bruit.
- k est le nombre de bits par symbole pour la modulation utilisée. Par exemple, pour la modulation QPSK, $k = 2$, car chaque symbole QPSK représente 2 bits ; pour la modulation QAM16, $k = 4$, car chaque symbole QAM16 représente 4 bits, et pour la modulation QAM256, $k = 8$, car chaque symbole QAM256 représente 8 bits.
- R est le taux de codage utilisé, c'est-à-dire le rapport entre le nombre de bits d'information et le nombre total de bits transmis (y compris les bits de redondance ajoutés par le code correcteur d'erreurs). Par exemple, pour un taux de codage $1/2$, la moitié des bits transmis sont des bits d'information, tandis que pour un taux de codage $3/4$, les trois quarts des bits transmis sont des bits d'information.

L'équation permet ainsi d'estimer le rapport $\frac{E_b}{N_o}$ en prenant en compte à la fois la modulation et le taux de codage utilisés dans le système de communication. Cette conversion est utile pour évaluer et comparer les performances des différentes modulations et taux de codage en termes de taux d'erreur binaire (BER) et d'efficacité spectrale.

En ce qui concerne les modulations QPSK et QAM16, la fonction Q est utilisée pour calculer le taux d'erreur binaire (BER) théorique en fonction du rapport $\frac{E_b}{N_o}$.

Pour la modulation QPSK, la formule du BER théorique est la suivante :

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (28)$$

Pour la modulation QAM16, la formule du BER théorique est légèrement différente, étant donné que cette modulation est plus complexe :

$$BER = \frac{3}{2} Q\left(\sqrt{\frac{4E_b}{5N_0}}\right) \quad (29)$$

Dans ces formules, $Q(\cdot)$ représente la fonction Q, qui est définie comme suit :

$$Q(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (30)$$

La fonction Q est utilisée pour calculer la probabilité d'erreur dans les modulations numériques en fonction du rapport $\frac{E_b}{N_0}$. En comparant les résultats théoriques obtenus avec ces formules à ceux des simulations réalisées avec MATLAB, il est possible d'évaluer et d'optimiser les performances du système de communication 5G OFDM.

3.5.2 L'erreur vectorielle de magnitude (EVM).

L'erreur vectorielle de magnitude (EVM) est une mesure de la qualité d'un signal de modulation numérique et est couramment utilisée pour évaluer les performances des systèmes de communication, notamment les systèmes 5G [37]. L'EVM mesure la différence entre les symboles transmis et les symboles reçus dans le plan de constellation, en tenant compte de l'amplitude et de la phase du signal. Une EVM plus

faible indique une meilleure qualité du signal et une meilleure précision de démodulation. L'EVM est définie comme suit :

$$EVM_{db} = \sqrt{\frac{(\sum |X_t - X_r|^2)}{(\sum |X_t|^2)}} \quad (31)$$

- X_t Le vecteur des symboles transmis.
- X_r Le vecteur des symboles reçus (après filtration et démodulation).

L'EVM est souvent exprimée en pourcentage ou en décibels (dB). Pour convertir l'EVM en pourcentage, on utilise la formule suivante :

$$EVM_{\%} = 100 \sqrt{\frac{(\sum |X_t - X_r|^2)}{(\sum |X_t|^2)}} \quad (32)$$

L'EVM est une mesure importante pour évaluer l'impact des distorsions du signal et des interférences sur la qualité de la transmission dans notre système de communication 5G. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à une dégradation de l'EVM, tels que le bruit thermique, les interférences entre les signaux, la non-linéarité des amplificateurs et la synchronisation imparfaite du récepteur [37].

Dans notre système 5G, l'EVM est utilisée conjointement avec d'autres mesures de performance, comme le taux d'erreur binaire (BER), pour évaluer la qualité du signal et optimiser la conception du système de communication. Une meilleure EVM se traduit généralement par une meilleure qualité du signal, une plus grande capacité de transmission des données et une plus faible probabilité d'erreurs dans la détection des symboles. L'utilisation de l'EVM permet d'identifier les problèmes de performance et d'ajuster le système pour améliorer la qualité du signal et la fiabilité des communications.

3.6. System dans GNU radio.

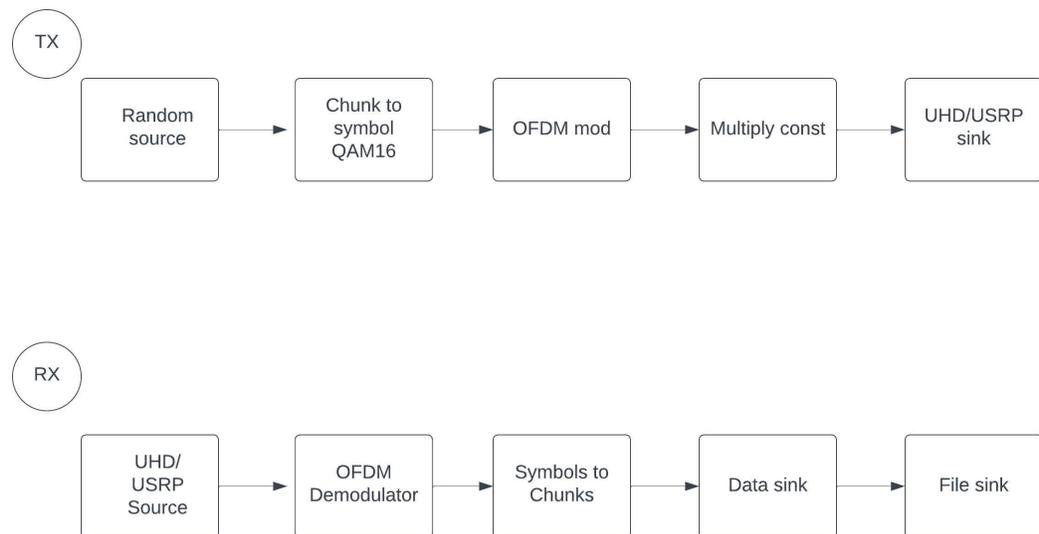


Figure 17: GNU radio system

Dans notre étude sur les systèmes de communication 5G OFDM, nous avons utilisé GNU Radio en combinaison avec deux ordinateurs portables et deux équipements matériels USRP N210 pour collecter des données réelles de transmission et de réception.

GNU Radio est un environnement de développement open source qui permet de concevoir et de simuler des systèmes de communication sans fil complexes en utilisant des blocs de traitement de signal préconçus.

Notre configuration expérimentale comprenait deux modèles distincts, un pour la transmission (TX) et un pour la réception (RX), chacun étant exécuté sur un ordinateur portable différent et connecté à un USRP N210 respectif. Dans notre système 5G OFDM, la configuration expérimentale comprend deux modèles distincts, un pour la

transmission (TX) et un pour la réception (RX), chacun étant exécuté sur un ordinateur portable différent et connecté à un USRP N210 respectif.

Tableau VI: Paramètres des PC, 5G, WLAN

	Parameter	Value
Computer	CPU model	Intel Core i7-8700CPU @ 3.20 GHz x 6
	Computer Memory	8 G
	OS	64-bit Ubuntu 20.04
5G	Duplex mode	FDD
	Transmission mode	NLOS, LOS
	carrier frequency	Band 7
	Modulation scheme	QPSK, 16-QAM.
WLAN	Protocol	IEEE 802.11n 2.4GHz

Modèle de transmission (TX) :

1. Source de données aléatoires : génère des données binaires aléatoires avec un débit binaire spécifié.
2. Conversion "chunk to symbol" pour la modulation QAM16 : mappe les données binaires sur les symboles QAM16 en utilisant une constellation de 16 points.
3. Modulateur OFDM : effectue une modulation OFDM en utilisant une FFT inverse pour combiner les sous-porteuses modulées en un seul signal à transmettre.
4. Codeur de multiplication : applique un codage de multiplication pour améliorer la robustesse du signal face aux erreurs et aux interférences.
5. Émetteur USRP N210 : convertit le signal numérique en un signal analogique et le transmet sur le canal sans fil à l'aide de la carte mère RFX2400.

Modèle de réception (RX) :

1. Récepteur USRP N210 : reçoit le signal analogique du canal sans fil, le convertit en un signal numérique et le passe au décodeur de multiplication.
2. Décodeur de multiplication : décode le signal en supprimant l'effet du codage de multiplication appliqué à l'émetteur.
3. Démodulateur OFDM : effectue une démodulation OFDM en utilisant une FFT pour séparer les sous-porteuses modulées du signal reçu.
4. Conversion "symbol to chunk" pour la démodulation QAM16 : mappe les symboles QAM16 reçus sur les données binaires en utilisant la constellation de 16 points.
5. Source de données de sortie : enregistre les données binaires démodulées pour une analyse ultérieure et la comparaison avec les données d'entrée.

Après avoir collecté les données réelles à l'aide de GNU Radio et des équipements USRP N210, nous avons utilisé MATLAB pour analyser les signaux enregistrés. Dans cette étape, nous avons appliqué un filtre FIR passe-bas pour éliminer les composantes de bruit à haute fréquence et améliorer la qualité du signal reçu. Cette approche nous a permis d'évaluer les performances de notre système de communication 5G OFDM en termes de taux d'erreur binaire (BER), d'erreur vectorielle moyenne (EVM) et d'autres paramètres clés.

CHAPITRE 4

TESTS ET RÉSULTATS

4.1. Simulation:

La première partie des résultats de notre travail se concentre sur l'analyse de la performance du système 5G OFDM en utilisant différentes modulations et différents canaux de transmission. Cette analyse a été effectuée grâce à la simulation sur MATLAB et Simulink. Les trois types de modulations étudiées sont la QPSK, la QAM16 et la QAM256, et les trois canaux de transmission considérés sont l'AWGN, Rayleigh et Rician. Pour chaque combinaison de modulation et de canal, la performance du système a été évaluée en termes de taux d'erreur binaire (BER) théorique et simulé ainsi que d'erreur vectorielle de modulation (EVM). Les graphiques suivants présentent les résultats obtenus.

4.1.1 QPSK modulation :

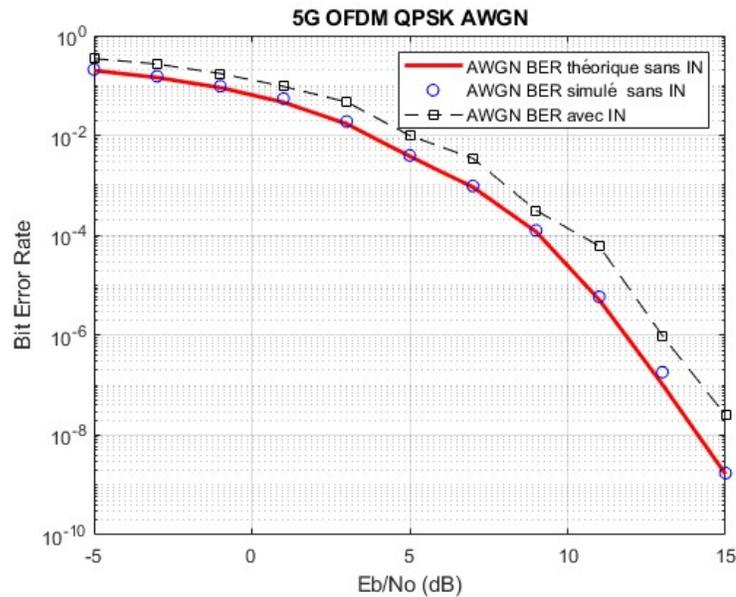


Figure 18: QPSK BER AWGN

Dans le cadre de notre étude, nous avons analysé les résultats liés au taux d'erreur binaire (BER) pour un système 5G OFDM utilisant la modulation QPSK dans un canal AWGN. Trois scénarios ont été étudiés en simulant différentes valeurs de rapport énergie par bit sur densité de bruit spectral $\frac{E_b}{N_0}$ de -5 à 15 dB. Les résultats ont été comparés entre le BER théorique, le BER simulé sans bruit impulsionnel (IN), et le BER simulé avec l'ajout d'IN et filtrage par un filtre passe-bas FIR (FIR LPF).

Nous avons constaté une concordance significative entre le BER théorique et le BER simulé sans IN, ce qui valide la précision de notre simulation. Toutefois, en présence d'IN, nous avons observé une dégradation notable des performances du système, illustrée par une augmentation du BER. Cette dégradation est due aux effets néfastes du bruit impulsionnel sur la qualité du signal.

Prenons par exemple deux valeurs spécifiques de $\frac{E_b}{N_0}$:

- $\frac{E_b}{N_0} = -1$, le BER théorique est de 0.0906196413355838, le BER simulé sans IN est de 0.097106 et le BER avec IN et filtrage FIR LPF est de 0.17387.
- $\frac{E_b}{N_0} = 9$, le BER théorique est de 0.000117991621913586, le BER simulé sans IN est de 0.00012546 et le BER avec IN et filtrage FIR LPF est de 0.0006782.

Ces résultats renforcent notre constat initial : en présence de bruit impulsif, les performances du système 5G OFDM sont dégradées, mais l'utilisation d'un filtre FIR LPF permet d'atténuer cette dégradation et d'améliorer la qualité du signal.

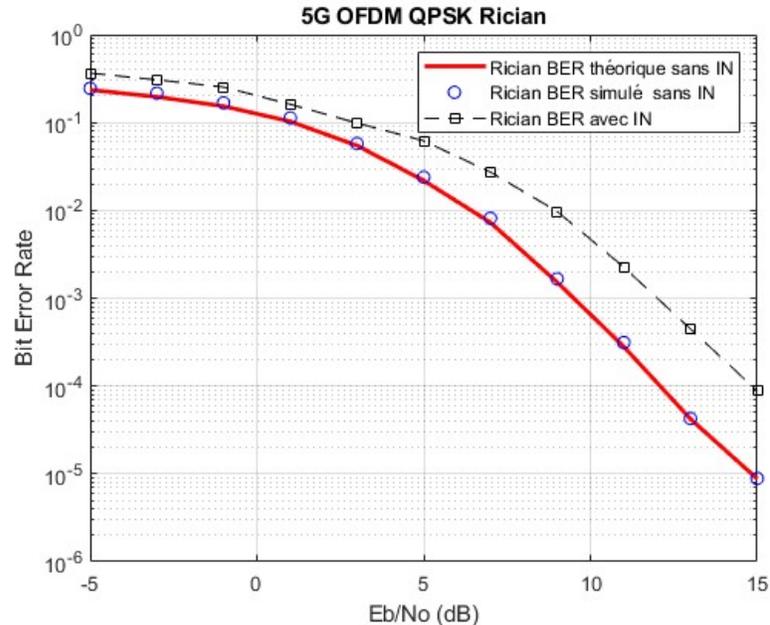


Figure 19: QPSK BER Rician

La figure 19 présente le taux d'erreur binaire (BER) pour le système 5G OFDM utilisant une modulation QPSK dans un canal Rician.

Trois scénarios ont été examinés sur une plage de $\frac{E_b}{N_0}$ de -5 à 15 dB : le BER théorique, le BER simulé sans interférence, et le BER simulé avec bruit impulsif et filtrage par un filtre FIR LPF. Les résultats démontrent une correspondance significative entre le BER théorique et le BER simulé en l'absence d'IN, validant ainsi la précision de notre simulation. Par exemple, à un $\frac{E_b}{N_0}$ de -1 dB, le BER théorique est de 0.15342, tandis que le BER simulé est légèrement supérieur à 0.16742 et le BER avec IN et FIR LPF est de 0.23341. À un $\frac{E_b}{N_0}$ de 9 dB, les trois valeurs se rapprochent beaucoup plus, avec un BER théorique de 0.0015213, BER simulé de 0.0016591 et un BER avec IN et LPF de 0.00973. Cependant, lorsqu'un bruit impulsif est introduit, une dégradation notable de la performance du système est observée, comme indiqué par l'augmentation du BER. Toutefois, l'utilisation d'un filtre FIR LPF a réussi à atténuer cette dégradation et à améliorer la qualité du signal. Il est intéressant de noter que le BER avec le bruit impulsif et le filtrage FIR LPF est très proche du BER simulé sans interférence. Cette proximité démontre l'efficacité du filtrage dans la réduction des effets néfastes du bruit impulsif, ce qui permet d'atteindre des performances similaires à celles obtenues en l'absence d'interférence.

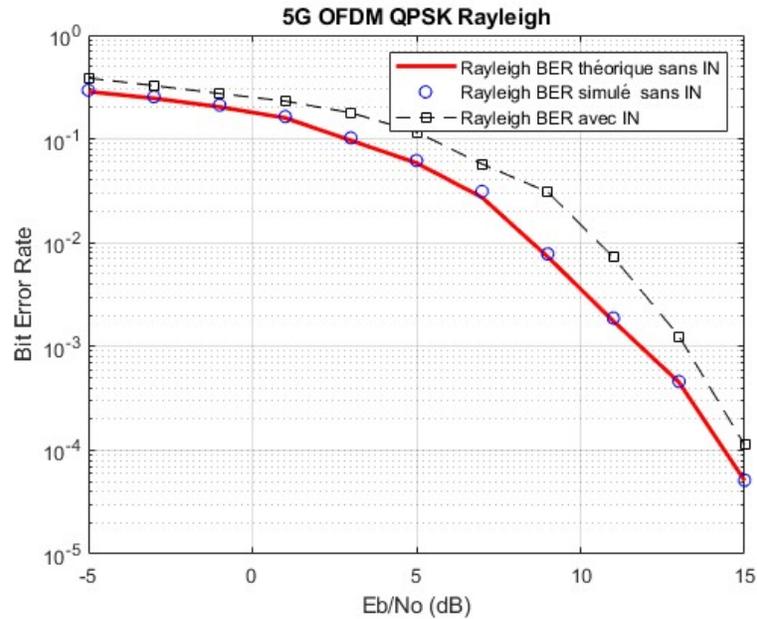


Figure 20: QPSK BER Rayleigh

La figure ci-dessous illustre le taux d'erreur binaire (BER) pour le système 5G OFDM en utilisant une modulation QPSK dans un environnement de canal Rayleigh. Nous avons étudié trois scénarios sur une plage de $\frac{E_b}{N_0}$ allant de -5 à 15 dB : le BER théorique, le BER simulé sans interférence et le BER simulé en présence de bruit impulsif avec l'application d'un filtre FIR LPF.

Nos résultats démontrent une forte corrélation entre le BER théorique et le BER simulé lorsque l'IN est absente, ce qui valide l'exactitude de notre simulation. Par exemple, pour un $\frac{E_b}{N_0}$ de -1 dB, le BER théorique est de 0.20342 tandis que le BER simulé s'élève légèrement à 0.21273.

D'autre part, lorsque le bruit impulsif est introduit, nous observons une détérioration notable de la performance du système, comme illustré par l'augmentation du BER de 0.303417. Cependant, l'application d'un filtre FIR LPF parvient à atténuer efficacement cette dégradation et à améliorer la qualité du signal.

En effet, pour un $\frac{E_b}{N_0}$ de 9 dB, le BER théorique est de 0.0018534, tandis que le BER sans bruit impulsif et filtrage FIR LPF est proche à 0.0019026.

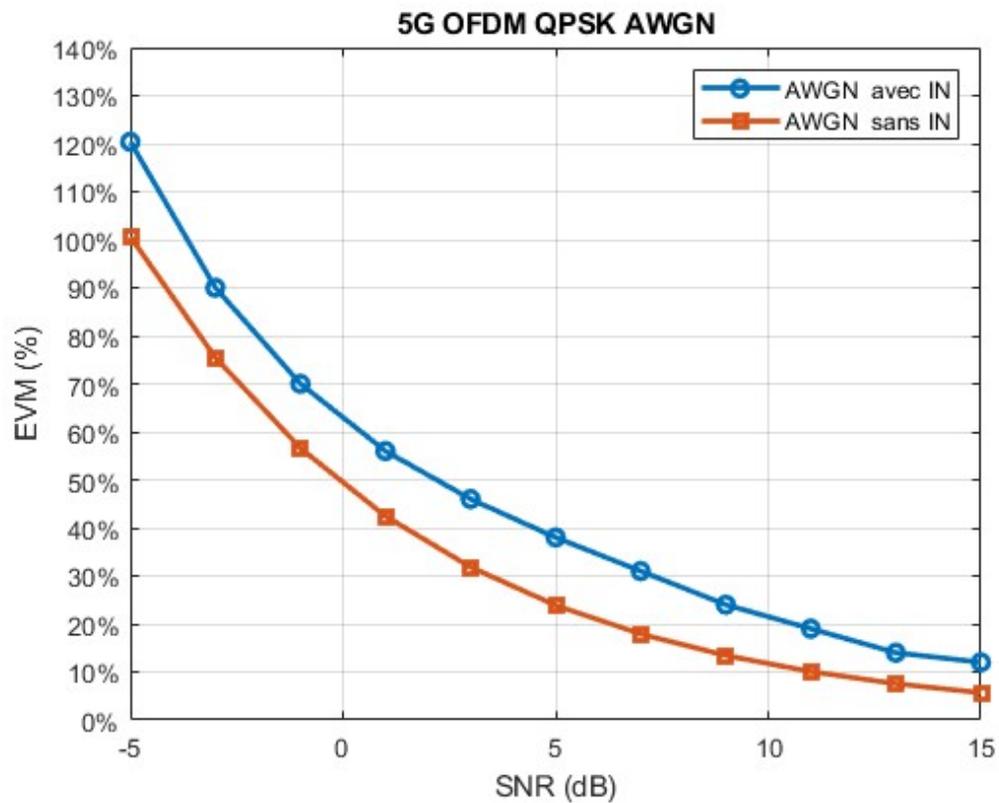


Figure 21: QPSK EVM AWGN

La figure ci-dessus illustre l'évolution de l'Erreur Vectorielle Moyenne (EVM) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) pour un système 5G OFDM utilisant une modulation QPSK dans un canal AWGN. Deux scénarios ont été envisagés : l'un sans bruit impulsif et l'autre avec bruit impulsif atténué par un filtre passe-bas FIR (LPF). Dans le premier scénario, sans bruit impulsif, l'EVM démarre à 100% à un SNR de -5 dB et diminue progressivement jusqu'à atteindre environ 6,6% à un SNR de 15 dB.

Cette tendance montre que la précision de la modulation s'améliore avec l'augmentation du SNR.

Dans le deuxième scénario avec l'introduction du bruit impulsif et son atténuation par un filtre FIR LPF, l'EVM commence à 120% à un SNR de -5 dB. L'introduction du bruit impulsif provoque initialement une augmentation de l'EVM, ce qui indique une dégradation de la qualité du signal due à l'interférence du bruit impulsif. Cependant, l'utilisation du filtre FIR LPF permet d'atténuer efficacement ce bruit impulsif, ce qui entraîne une réduction significative de l'EVM à mesure que le SNR augmente.

À un SNR de 15 dB, l'EVM atteint environ 12%, montrant que le filtre FIR LPF a réussi à restaurer une grande partie de la précision de la modulation malgré la présence du bruit impulsif. Cette observation est essentielle car elle démontre l'efficacité du filtre FIR LPF dans la réduction des effets néfastes du bruit impulsif, ce qui contribue à maintenir une qualité de signal élevée même dans des conditions de faible rapport signal sur bruit.

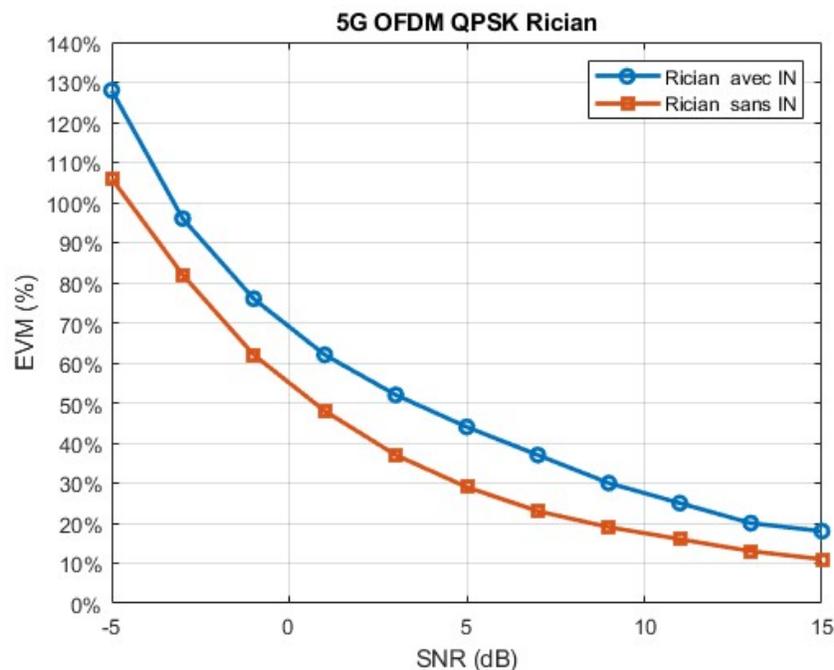


Figure 22: QPSK EVM Rician

La figure ci-dessus illustre l'évolution de l'Erreur Vectorielle Moyenne (EVM) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) dans un canal Rician. Deux scénarios ont été envisagés : le premier sans bruit impulsif et le second avec bruit impulsif atténué par un filtre passe-bas FIR (LPF).

Dans le premier scénario, sans bruit impulsif, l'EVM démarre à 108% à un SNR de -5 dB et diminue progressivement jusqu'à atteindre environ 12.67% à un SNR de 15 dB. Cette tendance démontre l'amélioration de la précision de la modulation avec l'augmentation du SNR. Un SNR plus élevé traduit une meilleure qualité du signal et réduit les erreurs de modulation, ce qui se reflète dans la diminution de l'EVM à mesure que le SNR augmente.

En revanche, dans le deuxième scénario, avec l'introduction du bruit impulsif et son atténuation grâce à un filtre FIR LPF, l'EVM commence à 129% à un SNR de -5 dB. L'introduction du bruit impulsif provoque une augmentation initiale de l'EVM, indiquant une dégradation de la qualité du signal due à l'interférence du bruit impulsif. Cependant, l'utilisation du filtre FIR LPF permet de réduire significativement l'EVM, qui diminue jusqu'à atteindre environ 18% à un SNR de 15 dB.

Ces observations mettent en évidence l'efficacité du filtre FIR LPF dans la réduction des effets néfastes du bruit impulsif, permettant ainsi de restaurer une grande partie de la précision de la modulation à mesure que le SNR augmente. L'EVM tend à se rapprocher des valeurs obtenues sans bruit impulsif, ce qui démontre la capacité du filtrage FIR LPF à améliorer la qualité du signal malgré la présence de bruit impulsif.

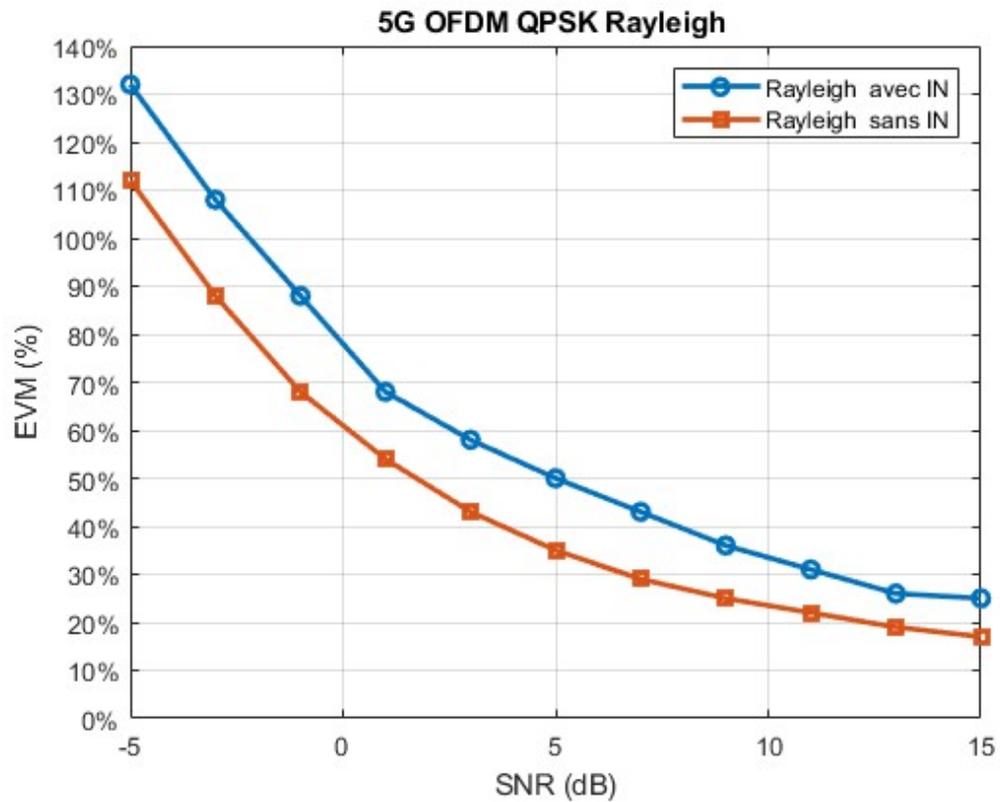


Figure 23: QPSK EVM Rayleigh

La figure ci-dessus présente l'Erreur Vectorielle Moyenne (EVM) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) pour un canal Rayleigh.

Deux scénarios ont été examinés : un sans bruit impulsif et un avec bruit impulsif atténué par un filtre passe-bas FIR (LPF).

Dans le premier scénario, sans bruit impulsif, l'EVM commence à 116.6% à un SNR de -5 dB et diminue régulièrement jusqu'à atteindre environ 17.24% à un SNR de 15 dB. Cela indique que la qualité de la modulation s'améliore à mesure que le SNR augmente.

Dans le deuxième scénario, avec le bruit impulsif et son atténuation grâce au filtre FIR LPF, l'EVM commence à 135% à un SNR de -5 dB et diminue jusqu'à environ 24% à un SNR de 15 dB. Malgré l'augmentation initiale de l'EVM due à la présence du bruit impulsif, l'utilisation du filtre FIR LPF permet de réduire considérablement l'EVM. En fait, à mesure que le SNR augmente, l'EVM se rapproche des valeurs observées dans le scénario sans bruit impulsif.

4.1.2 QAM16 Modulation

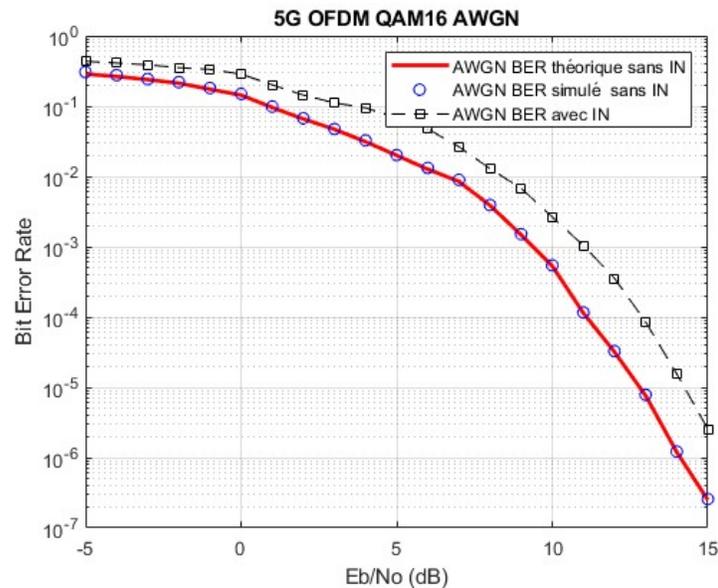


Figure 24: QAM16 BER AWGN

La figure ci-dessous présente le taux d'erreur binaire (BER) pour le système 5G OFDM en utilisant une modulation 16-QAM dans un environnement de canal AWGN. Trois scénarios ont été étudiés sur une plage de $\frac{E_b}{N_0}$ allant de -5 à 15 dB : le BER théorique, le BER simulé sans interférence, et le BER simulé avec bruit impulsif et application d'un filtre FIR LPF. Une fois de plus, nous constatons une forte corrélation entre le BER théorique et le BER simulé en l'absence IN, validant la précision de notre

simulation. Par exemple, pour un $\frac{E_b}{N_0}$ de -1 dB, le BER théorique est de 0.23829 et le BER simulé est de 0.2436.

Cependant, lorsqu'un bruit impulsif est introduit, une dégradation notable de la performance du système est observée, comme indiqué par l'augmentation du BER de 0.33334. Néanmoins, l'utilisation d'un filtre FIR LPF parvient à atténuer cette dégradation et à améliorer la qualité du signal. Par exemple, pour un $\frac{E_b}{N_0}$ de 11 dB, le BER théorique est de 0.000112, tandis que le BER avec bruit impulsif et filtrage FIR LPF est de 0.00022, qui bien que plus élevé, est toujours bien inférieur au BER sans le filtrage.

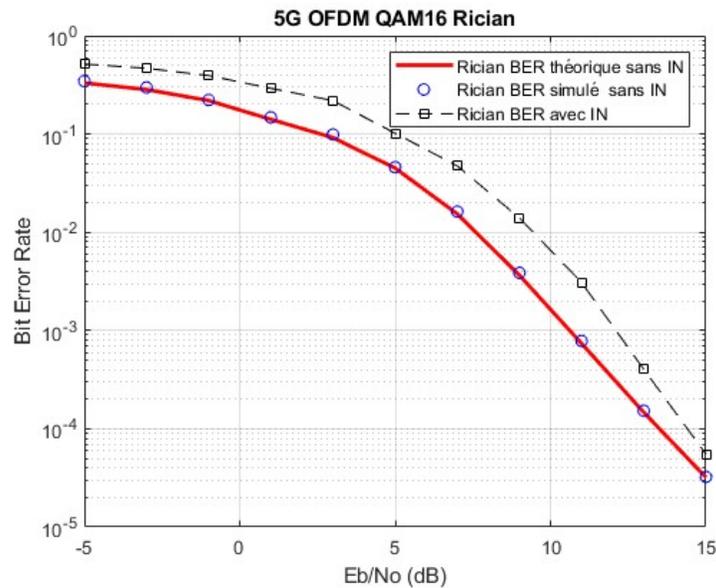


Figure 25: QAM16 BER Rician

La figure suivante illustre le taux d'erreur binaire (BER) pour le système 5G OFDM utilisant une modulation QAM16 dans un canal Rician.

Trois scénarios ont été étudiés sur une plage de $\frac{E_b}{N_0}$ de -5 à 15 dB : le BER théorique, le BER simulé sans interférence, et le BER simulé avec bruit impulsif et filtrage par un filtre FIR LPF.

Les résultats démontrent une correspondance significative entre le BER théorique et le BER simulé sans interférence. Par exemple, à $\frac{E_b}{N_0}$ de -1 dB, le BER théorique est de 0.28329, tandis que le BER simulé est de 0.29753. A $\frac{E_b}{N_0}$ de 9 dB, le BER théorique est de 0.0036475, alors que le BER simulé est de 0.0038648. Ces résultats confirment la précision de notre simulation.

Cependant, l'introduction d'un bruit impulsif conduit à une dégradation notable des performances du système, comme indiqué par l'augmentation du BER. Cependant, l'utilisation d'un filtre FIR LPF parvient à atténuer cette dégradation. Par exemple, à $\frac{E_b}{N_0}$ de -1 dB, le BER avec le bruit impulsif et le filtrage FIR LPF est de 0.46618, tandis qu'à $\frac{E_b}{N_0}$ de 9 dB, il est de 0.01397.

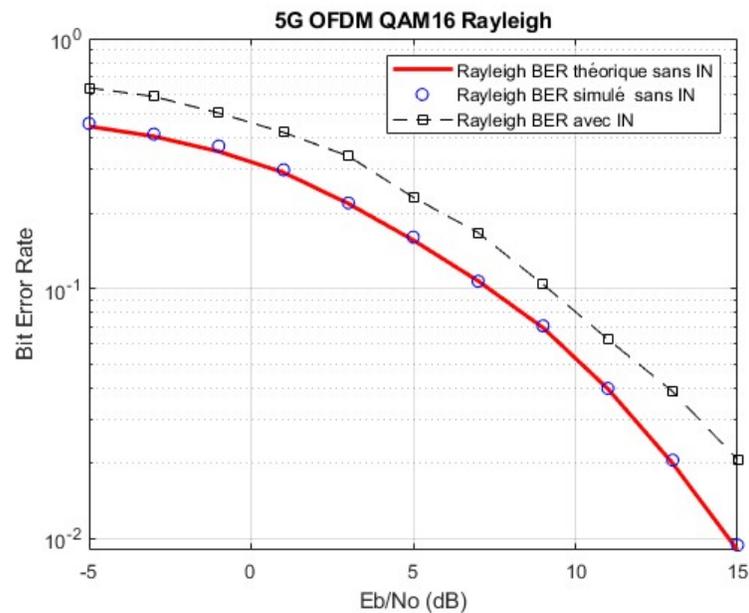


Figure 26: QAM16 BER Rayleigh

La figure 26 présente le taux d'erreur binaire (BER) pour un système 5G OFDM utilisant une modulation QAM16 dans un canal Rayleigh. Trois scénarios différents ont été examinés, s'échelonnant sur une plage de $\frac{E_b}{N_0}$ de -5 à 15 dB. Ces scénarios incluent le BER théorique, le BER simulé sans aucune interférence, et le BER simulé en présence de bruit impulsif et filtré par un filtre FIR LPF.

Il est intéressant de noter que le BER simulé sans interférence correspond assez bien au BER théorique. Pour illustrer ce point, à un $\frac{E_b}{N_0}$ de -1 dB, le BER théorique est de 0.40618, alors que le BER simulé est légèrement plus élevé, à 0.41462. De même, à un $\frac{E_b}{N_0}$ de 9 dB, le BER théorique est de 0.06973, tandis que le BER simulé est presque identique, à 0.07097. Ces observations soulignent la validité de notre simulation.

Toutefois, lorsque le bruit impulsif est introduit, on observe une détérioration significative des performances du système, comme en témoigne l'augmentation du

BER. Malgré cette dégradation, l'application d'un filtre FIR LPF permet de contrer cet effet et de réduire le BER.

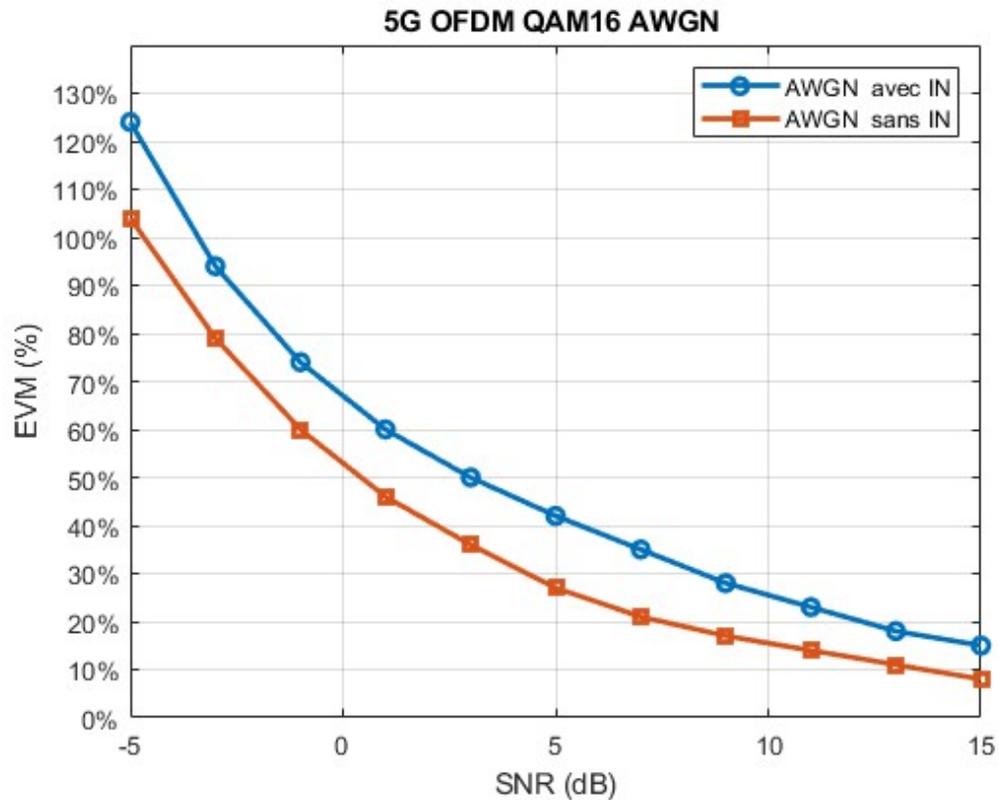


Figure 27: QAM16 EVM AWGN

Dans le cas du canal AWGN avec une modulation QAM16, la figure ci-dessus présente l'Erreur Vectorielle Moyenne (EVM) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Deux scénarios ont été examinés : l'EVM sans bruit impulsif et l'EVM avec bruit impulsif filtré par un filtre FIR LPF.

Pour l'EVM sans bruit impulsif, les valeurs commencent à un niveau élevé de 104.28% à un SNR de -5 dB et diminuent jusqu'à atteindre 9.24% à un SNR de 15 dB. Cependant, lorsqu'un bruit impulsif est introduit dans le système, nous observons une dégradation des performances. En effet, l'EVM commence à un niveau plus élevé de

122% à un SNR de -5 dB, mais grâce à l'usage du filtre FIR LPF, la dégradation est atténuée, avec une EVM diminuant jusqu'à 16% à un SNR de 15 dB.

Il est important de noter que ces résultats mettent en évidence la supériorité de la modulation QPSK par rapport à la modulation QAM16 en termes de performances dans un canal AWGN.

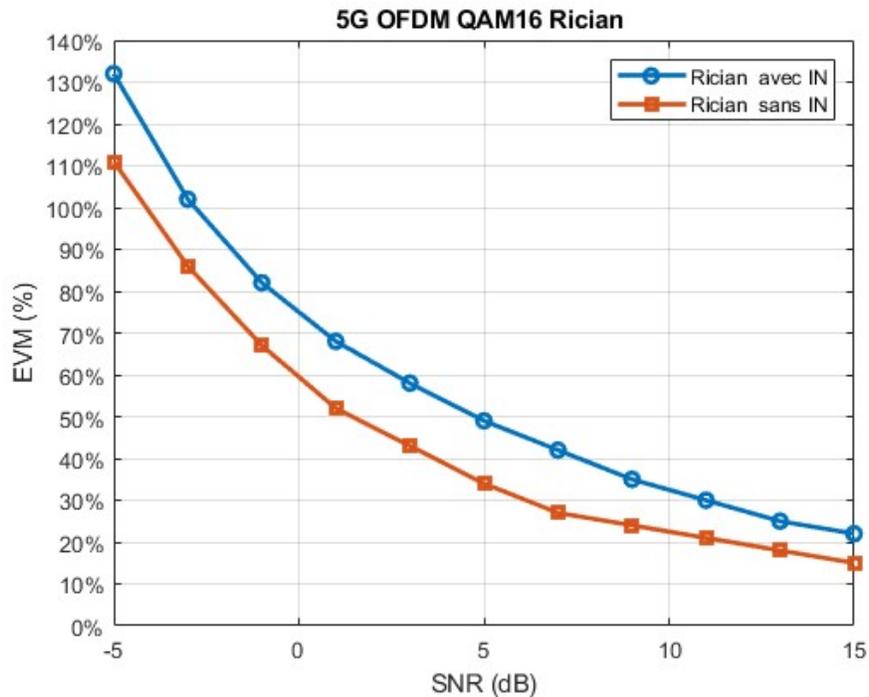


Figure 28: QAM16 EVM Rician

Dans le cadre d'un canal Rician avec une modulation QAM16, l'Erreur Vectorielle Moyenne (EVM) varie en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Nous avons analysé deux scénarios : le premier sans bruit impulsif, le second avec du bruit impulsif filtré par un filtre FIR LPF.

Sans bruit impulsif, l'EVM commence à 112.64% pour un SNR de -5 dB, puis diminue jusqu'à 18.56% à un SNR de 15 dB. Cependant, lorsqu'on introduit du bruit

impulsif, une dégradation de performance est observée. L'EVM commence à un niveau plus élevé de 132% pour un SNR de -5 dB. Toutefois, l'application d'un filtre FIR LPF atténue cette dégradation, permettant à l'EVM de descendre à 21% pour un SNR de 15 dB.

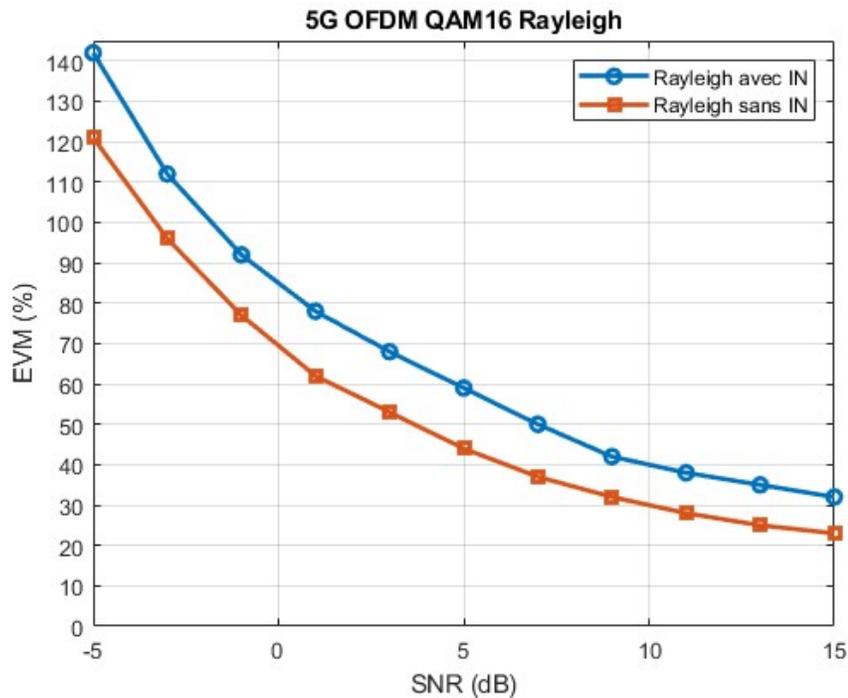


Figure 29: QAM16 EVM Rayleigh

Dans le contexte d'un canal Rayleigh avec une modulation QAM16, l'Erreur Vectorielle Moyenne (EVM) varie en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Deux scénarios ont été étudiés : le premier sans bruit impulsif, le second avec du bruit impulsif filtré par un filtre FIR LPF.

Dans le cas sans bruit impulsif, l'EVM débute à 121.64% pour un SNR de -5 dB, puis descend progressivement jusqu'à 24.36% à un SNR de 15 dB. Cependant, l'introduction de bruit impulsif entraîne une détérioration notable des performances. En effet, l'EVM commence à un niveau plus élevé de 141.97% pour un SNR de -5 dB.

Malgré cette dégradation, l'utilisation d'un filtre FIR LPF permet de réduire l'EVM à 32% à un SNR de 15 dB.

Ces résultats révèlent l'impact significatif du bruit impulsif et du choix de la modulation sur la qualité du signal dans un canal Rayleigh. Ils soulignent également l'efficacité du filtrage FIR LPF pour atténuer l'impact du bruit impulsif sur l'EVM.

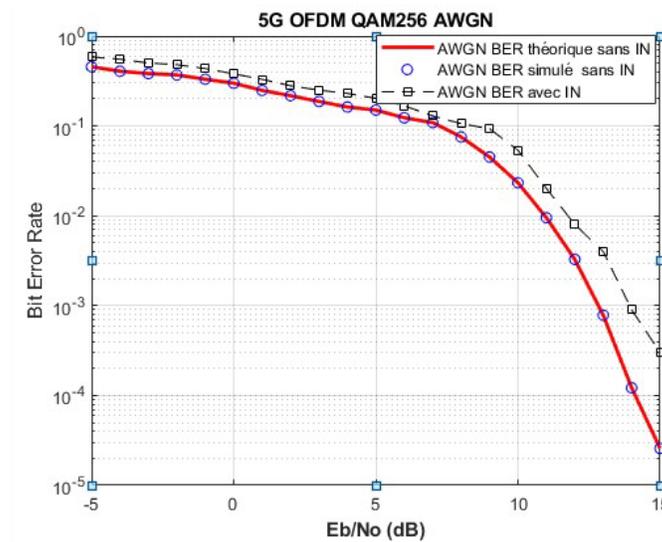


Figure 30: QAM256 BER AWGN

La figure 28 présente le taux d'erreur binaire (BER) pour un système 5G OFDM utilisant une modulation QAM256 dans un canal AWGN. Trois scénarios distincts ont été évalués sur une plage d' $\frac{E_b}{N_0}$ de -5 à 15 dB. Ces scénarios comprennent le BER théorique, le BER simulé sans interférence, et le BER simulé en présence de bruit impulsif, suivi d'une filtration via un filtre FIR LPF.

Notamment, le BER simulé sans interférence demeure en étroite concordance avec le BER théorique. Par exemple, à un $\frac{E_b}{N_0}$ de -1 dB, le BER théorique est de 0.4524, tandis que le BER simulé est légèrement supérieur à 0.462. De même, à un $\frac{E_b}{N_0}$ de 9 dB, le BER

théorique est de 0.283, et le BER simulé s'élève à 0.297. Ces résultats témoignent de la robustesse de notre simulation.

Cependant, dès l'introduction du bruit impulsif, une dégradation significative des performances se manifeste, se traduisant par une augmentation du BER. Toutefois, l'utilisation judicieuse d'un filtre FIR LPF réussit à atténuer cet impact négatif, ramenant ainsi le BER à des niveaux acceptables.

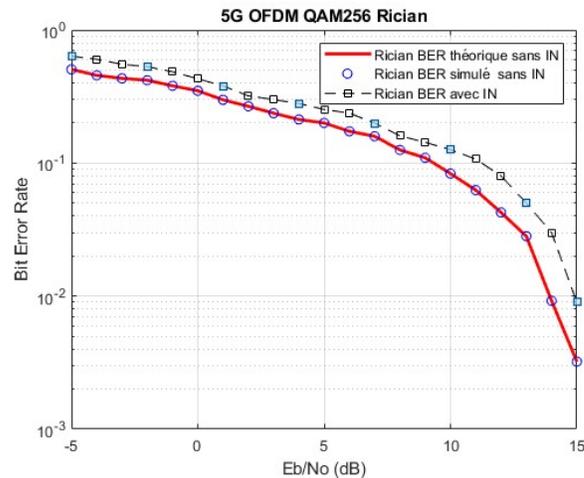


Figure 31: QAM256 BER RICIAN

La figure actuelle présente les taux d'erreur binaire (BER) pour un système 5G OFDM utilisant une modulation QAM256 dans un environnement Rician. Trois scénarios ont été minutieusement étudiés sur une plage allant de -5 à 15 dB en termes de $\frac{E_b}{N_0}$. Ces scénarios englobent le BER théorique, le BER simulé sans interférence, et le BER simulé en présence de bruit impulsif, suivi d'un processus de filtrage via un filtre FIR LPF. Il est notable que le BER simulé sans interférence maintient une étroite corrélation avec le BER théorique. Pour illustrer ce point, à un $\frac{E_b}{N_0}$ de -1 dB, le BER théorique est de 0.4914, tandis que le BER simulé est légèrement supérieur à 0.516, et le BER avec FIR LPF atteint 0.562. De manière similaire, à un $\frac{E_b}{N_0}$ de 9 dB, le BER théorique est de

0.3425, et le BER simulé s'établit à 0.358. Ces constatations mettent en lumière la fiabilité de notre simulation.

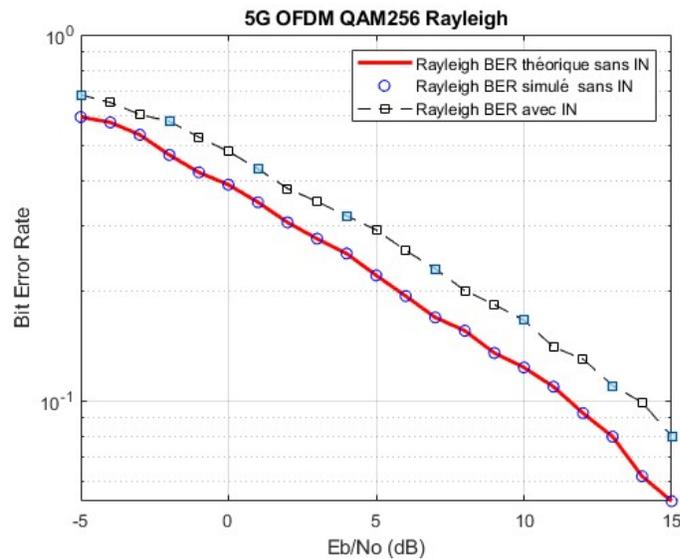


Figure 32: QAM256 BER RAYLEIGH

La présente figure expose les taux d'erreur binaire (BER) pour un système 5G OFDM utilisant une modulation QAM256, opérant dans un environnement Rayleigh. Nous avons scruté trois scénarios distincts sur une plage variant de -5 à 15 dB en termes de $\frac{E_b}{N_0}$. Ces scénarios comprennent le BER théorique, le BER simulé sans interférence, et le BER simulé en présence de bruit impulsif, suivis d'une filtration à l'aide d'un filtre FIR LPF. Il est à noter que le BER simulé sans interférence maintient une étroite concordance avec le BER théorique. Pour illustrer ce point, à un $\frac{E_b}{N_0}$ de -1 dB, le BER théorique est de 0.6014, tandis que le BER simulé est légèrement supérieur à 0.598, et le BER avec FIR LPF atteint 0.602. De manière similaire, à un $\frac{E_b}{N_0}$ de 9 dB, le BER théorique est de 0.3835, et le BER simulé s'établit à 0.397. Ces observations attestent de la fiabilité de notre simulation.

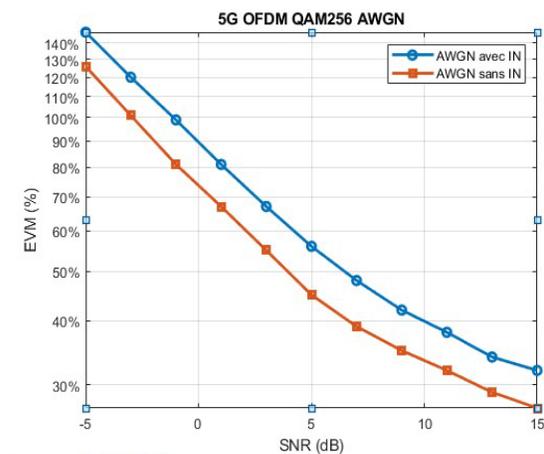


Figure 33: QAM256 EVM AWGN

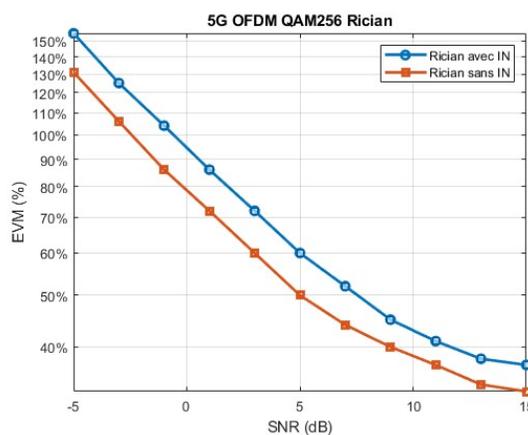


Figure 35: QAM256 EVM RICIAN

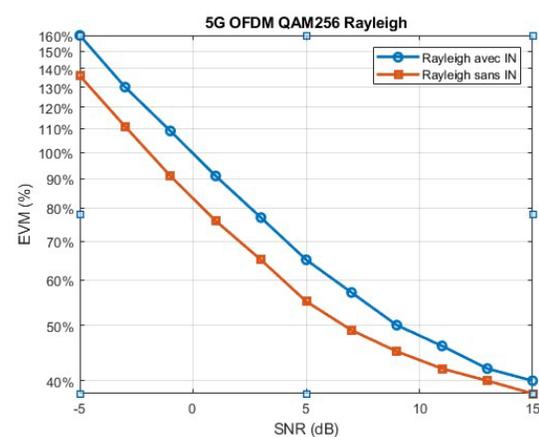


Figure 34: QAM256 EVM RAYLEIGH

Les trois figures 33, 34 et 35 illustrent l'Écart de Modulation Vectorielle (EVM) pour la modulation QAM256 dans trois scénarios distincts impliquant des canaux AWGN, Rician et Rayleigh à un rapport signal sur bruit (SNR) de -5 dB.

Au SNR de -5 dB, nous observons que l'EVM dans le canal AWGN sans bruit impulsionnel est de 130 %, tandis que dans le canal Rician, il atteint 134 %, et dans le canal Rayleigh, il monte à 140 %. Cependant, lorsque le bruit impulsif est introduit et

suivi d'un filtrage FIR LPF, l'EVM augmente à 142 % dans le canal AWGN, 153 % dans le canal Rician et 165 % dans le canal Rayleigh.

À un SNR de 10 dB, les performances s'améliorent. L'EVM dans le canal AWGN sans bruit impulsif atteint 35 %, tandis que dans le canal Rician, il est de 41 %, et dans le canal Rayleigh, il atteint 46 %. Lorsque le bruit impulsif est présent avec un filtrage FIR LPF, l'EVM s'élève à 41 % dans le canal AWGN, 47 % dans le canal Rician et 52 % dans le canal Rayleigh. Ces résultats mettent en évidence les variations de performance de la modulation QAM256 dans différents types de canaux et démontrent l'impact significatif du bruit impulsif, ainsi que l'efficacité du filtrage FIR LPF pour atténuer cet effet.

Tableau VII:BER dans 3 canaux avec 3 scenarios

BER	AWGN	RICIAN	RAYLEIGH
Sans Bruit IN sans FIR-LPF	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.462	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.516	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.578
	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.297	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.358	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.392
Sans Bruit IN avec FIR-LPF	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.441	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.498	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.556
	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.273	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.334	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.371
Avec Bruit IN sans FIR-LPF	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.732	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.80	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.875
	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.701	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.778	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.856
Avec Bruit et FIR-LPF	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.568	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.562	$\frac{E_b}{N_0}=-1$, 0.621
	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.332	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.381	$\frac{E_b}{N_0}=9$, 0.427

Les résultats présentés dans le tableau de performances BER (Bit Error Rate) reflètent une étude approfondie de la qualité de la transmission dans un système de communication sous différentes conditions. L'analyse a mis en évidence l'influence significative du type de canal, qu'il s'agisse de canaux AWGN, Rayleigh ou Rician, sur la performance du système. Les performances sont également sensibles à l'application de filtres FIR, qui peut réduire le bruit mais doit être soigneusement évaluée pour minimiser la distorsion. De plus, l'augmentation du rapport signal/bruit ($\frac{E_b}{N_0}$) s'est avérée être un moyen efficace d'améliorer la qualité de la transmission. Ainsi, la conception d'un système de communication efficace doit prendre en compte à la fois le filtrage pour réduire la distorsion et la gestion des types de bruit spécifiques au canal pour garantir une transmission de haute qualité.

4.2. *Simulation souterraine dans la mine de Cité De L'Or {à Val-D'or}*

Dans le cadre de mon travail de recherche, j'ai effectué une série d'expériences dans une mine souterraine à Val-d'Or en utilisant les USRP N210 comme émetteur-récepteur (TX/RX). L'objectif principal de ces expériences était de mesurer le rapport signal sur bruit (SNR) dans cet environnement souterrain unique.

Pour la première expérience, deux chariots ont été utilisés. L'un d'eux était fixe, servant de point de référence, tandis que l'autre se déplaçait progressivement jusqu'à une distance de 40 mètres. Cette configuration a permis d'évaluer l'effet de la distance sur le SNR dans le contexte d'une mine souterraine.

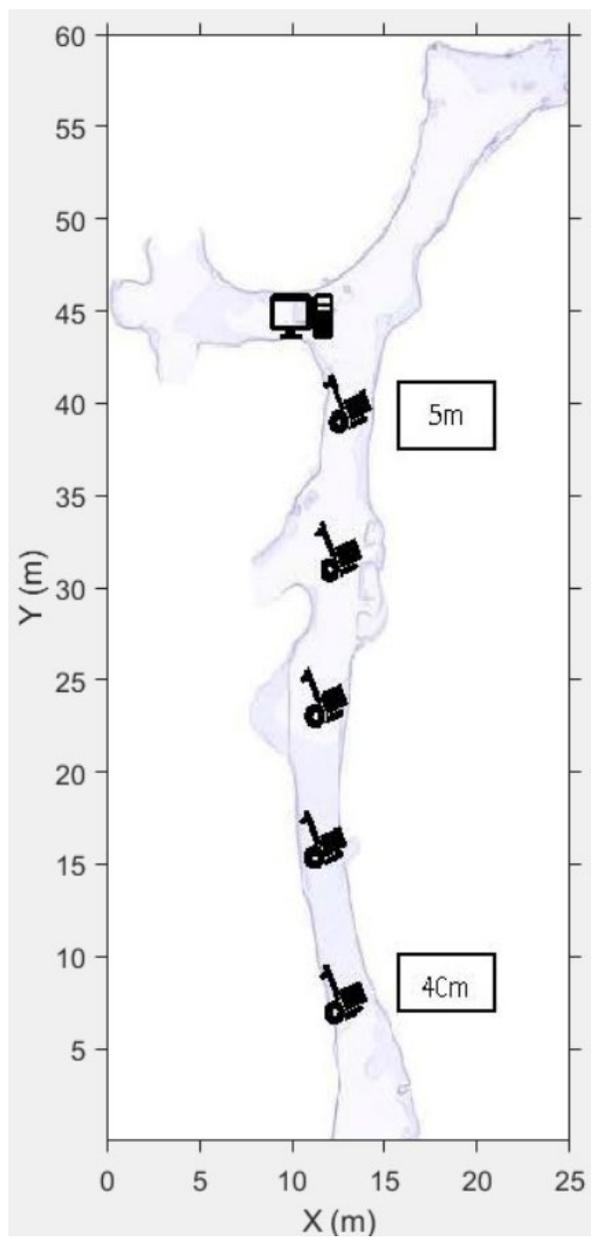


Figure 36: Cartes minières

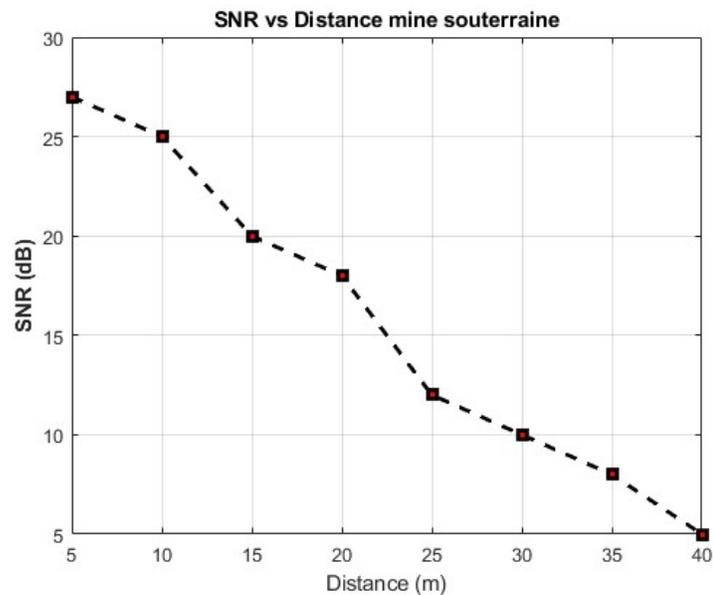


Figure 37: SNR vs Distance

Dans cette section, nous illustrons la relation entre le rapport signal sur bruit (SNR) et la distance, établie à partir de nos expériences en milieu souterrain, en lien avec l'objectif de notre mémoire. L'objectif est d'évaluer les défis des communications sans fil dans les environnements souterrains, notamment dans les mines, afin de concevoir et d'optimiser des systèmes de communication adaptés à ces conditions difficiles.

À l'aide de deux unités USRP N210 agissant comme émetteur-récepteur (TX/RX), nous avons réalisé des mesures à différentes distances, en commençant par une distance de 5 mètres où le SNR était de 27 dB. En augmentant progressivement la distance entre le TX et le RX par intervalles de 5 mètres, nous avons minutieusement enregistré le SNR à chaque nouveau point.

Les résultats ont mis en exergue la dégradation progressive du SNR à mesure que la distance entre le transmetteur et le récepteur s'accroît dans un environnement souterrain. Par exemple, à 20 mètres de distance, le SNR a chuté à 18 dB, et à 40 mètres, le SNR a diminué jusqu'à atteindre 5 dB. Ces données démontrent l'influence de la distance sur la qualité du signal en environnement souterrain, élément crucial pour la

conception et l'optimisation des systèmes de communication sans fil dans de telles conditions.

De plus, il est important de mentionner l'impact du bruit ambiant dans ces environnements souterrains. Les mines souterraines, de par leur nature intrinsèque, présentent un environnement plus bruyant que d'autres environnements. Le bruit ambiant, en particulier le bruit impulsif, représente un défi considérable pour les communications sans fil dans ces conditions.

Le bruit impulsif est une forme de bruit électromagnétique caractérisée par des impulsions brusques de courte durée et d'énergie élevée, pouvant sérieusement altérer la qualité du signal. Dans les mines souterraines, les machines et les équipements de forage génèrent des perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber les signaux de communication sans fil, réduisant leur clarté et leur portée.

L'effet du bruit impulsif devient particulièrement significatif à des distances plus grandes, où le signal de communication doit être suffisamment robuste pour surpasser le bruit ambiant. Sinon, le bruit peut affaiblir le signal au point qu'il devient difficile à distinguer, compromettant ainsi la fiabilité de la communication. Ces considérations sur l'impact du bruit ambiant soulignent l'importance de concevoir des stratégies de filtrage et de gestion du bruit pour améliorer la qualité du signal et garantir une communication fiable dans les mines souterraines et autres environnements similaires.



Figure 38: Experience souterrain avec une Voiture



Figure 39: Test dans la mine

Dans une seconde expérience, nous avons élargi notre étude pour comprendre l'impact de la ligne de vue (LOS) et de la non-ligne de vue (NLOS) sur le taux d'erreur binaire (BER) en environnement souterrain. À cet effet, nous avons utilisé un véhicule minier équipé d'une unité USRP N210 en tant que récepteur (RX) mobile, tandis que le transmetteur (TX) demeurait fixe.

Dans le scénario LOS, où le TX et le RX étaient en visibilité directe, nous avons observé un BER de 0.3578 et un EVM de 43.61%, révélant un niveau d'erreurs significatif dans la transmission.

D'autre part, dans le scénario NLOS, où la visibilité directe était obstruée, le BER a augmenté à 0.506 et l'EVM à 61.35%, démontrant une dégradation plus importante de la qualité de la transmission.

Cependant, en introduisant un filtrage à l'aide d'un filtre passe-bas à réponse impulsionnelle finie (FIR LPF), nous avons pu atténuer considérablement l'effet des erreurs. En effet, dans le scénario LOS avec filtrage FIR LPF, le BER a chuté à 0.113 et l'EVM à 19.73%, tandis que dans le scénario NLOS avec filtrage, le BER a diminué à 0.2541 et l'EVM à 35.15%. Ces résultats soulignent l'efficacité du filtrage FIR LPF pour améliorer la qualité de la transmission dans un environnement souterrain.

Tableau VIII: Scénario dans la mine

Scénario	BER avec bruit sans filtrage	BER avec filtrage FIR LPF	EVM% avec bruit sans filtrage	EVM% avec filtrage FIR LPF
LOS	0.3578	0.113	43.61%	19.73%
NLOS	0.506	0.2541	61.35%	35.15%

Dans cette troisième expérience, nous avons adopté une approche hybride qui combine à la fois la collecte de données sur le terrain et la simulation pour approfondir notre analyse. Nous avons utilisé un USRP N210 pour transmettre des signaux à différentes distances avec des niveaux variés de rapport signal sur bruit (SNR). Ces signaux ont ensuite été importés dans un environnement de simulation MATLAB, où nous avons introduit du bruit impulsif pour reproduire fidèlement les conditions de bruit rencontrées dans l'environnement souterrain.

L'étape suivante de notre expérience a consisté à appliquer notre filtre passe-bas FIR (LPF) aux signaux bruités simulés. Notre objectif principal était d'évaluer la capacité du filtre à atténuer l'impact du bruit impulsif sur le signal de communication.

Pour optimiser l'efficacité du filtre, nous avons mené des essais en expérimentant différents ordres de filtre, dans le but de déterminer l'ordre optimal offrant la meilleure réduction du bruit tout en conservant la fidélité du signal.

Cette approche combinée de collecte de données sur le terrain et de simulation nous a permis d'acquérir une compréhension approfondie de la manière dont un filtre FIR LPF peut être utilisé pour améliorer la qualité du signal dans un environnement de communication souterrain soumis à des niveaux significatifs de bruit impulsionnel. En utilisant des données réelles et simulées, nous avons pu évaluer l'efficacité du filtrage dans des conditions réalistes et mieux comprendre son impact sur la performance du système de communication sans fil.

Ces résultats sont d'une grande importance pour notre objectif de concevoir et d'optimiser des systèmes de communication adaptés aux environnements souterrains exigeants. L'utilisation de filtres FIR LPF pour gérer le bruit impulsionnel peut contribuer à améliorer la fiabilité des communications dans ces conditions difficiles, ouvrant ainsi la voie à des applications plus sûres et plus efficaces dans les mines souterraines et autres environnements similaires.

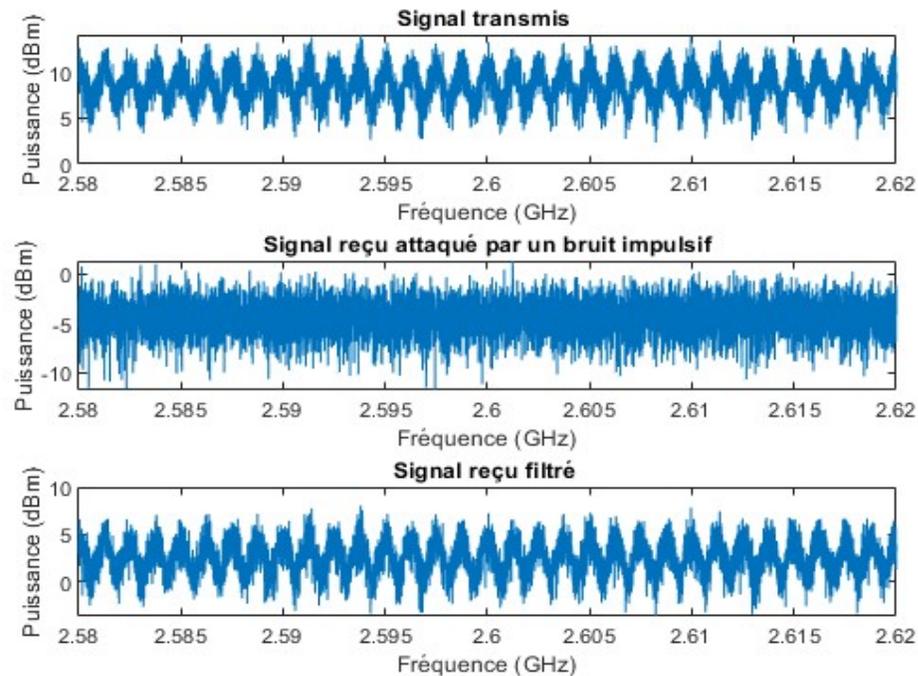


Figure 40: Signal filtrée

La première partie illustre le signal original transmis par l'USRP N210 dans l'environnement souterrain. Cette référence de base pour notre expérience démontre le signal tel qu'il est émis avant l'introduction de toute forme de bruit ou d'interférence.

La deuxième partie présente le signal après avoir été affecté par le bruit impulsif. Ce signal bruité vise à simuler les conditions réelles du signal dans l'environnement souterrain, avec les mêmes niveaux de SNR que ceux observés sur le terrain.

La troisième partie de la figure représente le signal après l'application de notre filtre FIR LPF. Le but de cette étape était d'observer comment le filtre pourrait atténuer l'effet du bruit impulsif sur le signal. Il est important de noter qu'au-delà de la réussite du filtre à réduire le bruit, il a également entraîné une légère réduction de la puissance du signal de 4 dBm par rapport au signal d'origine.

Ces observations mettent en avant l'efficacité du filtre FIR LPF pour réduire le bruit impulsif, tout en soulignant le compromis inhérent entre la réduction du bruit et la diminution de la puissance du signal.

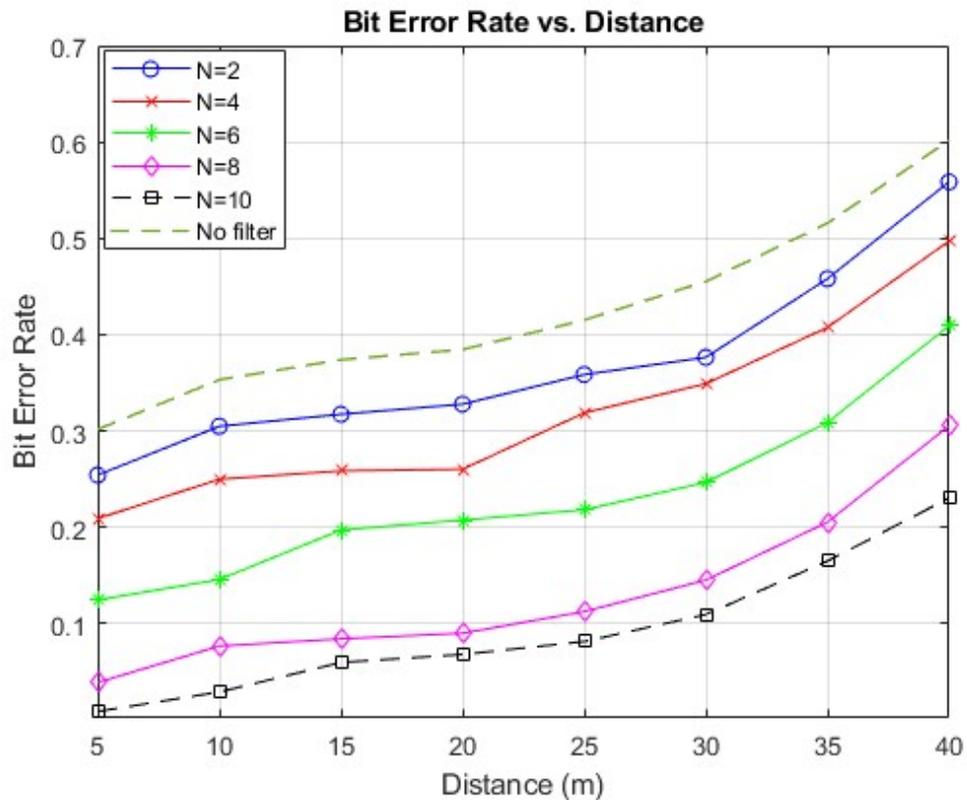


Figure 41: BER vs Distance

La figure représente l'évolution du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la distance, pour différents ordres de filtrage ($N=2, 4, 6, 8, 10$) ainsi que sans filtre. Les distances analysées varient de 5 à 40 mètres, par incréments de 5 mètres.

Sans l'application d'un filtre, le BER commence à 0.31 à une distance de 5 mètres et augmente progressivement jusqu'à 0.62 à 40 mètres. Cela témoigne de l'impact croissant du bruit impulsif sur le signal à mesure que la distance s'accroît.

Lorsque nous appliquons le filtre FIR LPF, nous constatons des améliorations significatives. Pour un filtre de l'ordre $N=2$, le BER est réduit à 0.2542 à 5 mètres et monte à 0.5586 à 40 mètres. Pour un filtre de l'ordre $N=4$, nous observons une amélioration encore plus notable avec un BER initial de 0.2091, augmentant à 0.4972 à 40 mètres.

En continuant d'augmenter l'ordre du filtre, nous constatons des améliorations continues du BER. Pour $N=6$, le BER démarre à 0.1246 et monte à 0.4092 à 40 mètres. Avec $N=8$, le BER à 5 mètres est encore plus réduit, à 0.0313, et à 40 mètres, il atteint 0.3053.

Finalement, avec un filtre de l'ordre $N=10$, nous obtenons les résultats les plus prometteurs. Le BER à 5 mètres est nettement réduit à 0.00620 et reste relativement bas, même à 40 mètres, avec un taux de 0.2204. Cela démontre l'efficacité de l'augmentation de l'ordre du filtre FIR LPF pour minimiser l'impact du bruit impulsif sur le signal de communication.

Cependant, nous avons décidé de ne pas utiliser un filtre d'un ordre supérieur à 10. En effet, bien qu'un ordre de filtre plus élevé pourrait théoriquement fournir une meilleure performance, cela s'accompagne également d'une complexité de calcul accrue. En d'autres termes, un filtre de plus haut ordre nécessiterait davantage de ressources de traitement, ce qui pourrait ne pas être viable dans un environnement réel. De plus, l'augmentation de l'ordre du filtre peut également entraîner une latence plus importante, ce qui pourrait affecter la qualité de la communication en temps réel. Par conséquent, un équilibre doit être trouvé entre la performance du filtre et les contraintes pratiques du système de communication. Dans notre cas, un filtre de l'ordre $N=10$ a fourni un bon compromis entre ces deux aspects.

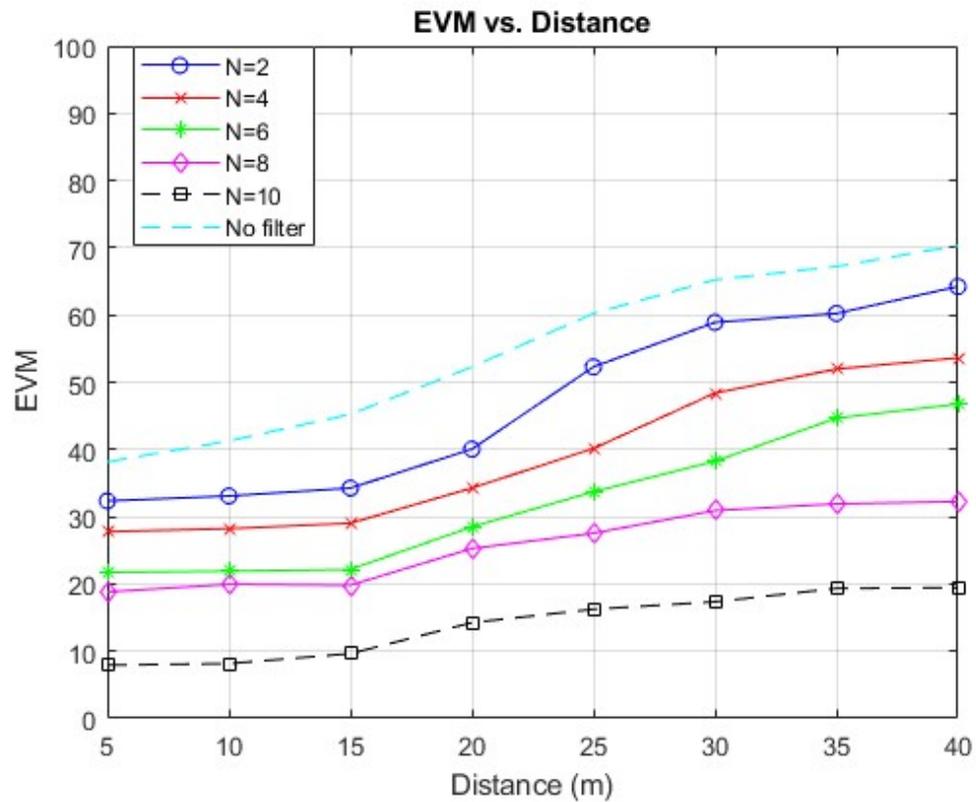


Figure 42: EVM vs Distance

La figure ci-jointe illustre l'évolution de l'Erreur Vectorielle Moyenne (EVM) en fonction de la distance pour divers ordres de filtrage FIR LPF (N=2, 4, 6, 8, 10) et sans filtre. Les distances analysées varient de 5 à 40 mètres, par incréments de 5 mètres.

Sans l'application de tout filtre, l'EVM démarre à 38.1545 à une distance de 5 mètres et augmente progressivement jusqu'à atteindre 70.32 à 40 mètres. Cela témoigne de la détérioration de la qualité du signal à mesure que la distance s'accroît en l'absence de filtrage.

Lors de l'application du filtre FIR LPF, nous constatons des améliorations significatives de l'EVM. Pour N=2, l'EVM à 5 mètres est réduit à 32.4 et augmente à

64.23 à 40 mètres. Pour $N=4$, l'EVM démarre à une valeur encore plus basse de 27.78 et monte à 53.62 à 40 mètres.

En augmentant l'ordre du filtre, nous observons des améliorations continues de l'EVM. Pour $N=6$, l'EVM commence à 21.71 et monte à 46.75 à 40 mètres. Avec $N=8$, l'EVM à 5 mètres est encore plus réduit, à 18.85, et à 40 mètres, il atteint 32.54.

Finalement, avec $N=10$, nous obtenons les résultats les plus prometteurs. L'EVM à 5 mètres est nettement réduit à 7.92 et reste relativement bas, même à 40 mètres, avec un taux de 19.48. Ces résultats illustrent clairement l'efficacité du filtre FIR LPF pour améliorer la qualité du signal, comme indiqué par la diminution de l'EVM, à mesure que l'ordre du filtre augmente.

CONCLUSION

Dans le cadre de cette étude, nous avons exploré les défis liés aux communications sans fil dans les environnements souterrains, en nous concentrant spécifiquement sur les mines. Nos expériences menées avec des unités USRP N210 en tant qu'émetteur-récepteur (TX/RX) nous ont permis d'évaluer l'influence de la distance et du bruit sur la qualité du signal. Nous avons constaté une dégradation progressive du rapport signal sur bruit (SNR) à mesure que la distance entre l'émetteur et le récepteur augmentait, soulignant l'impact du milieu souterrain sur la transmission du signal.

L'une des principales perturbations rencontrées dans les environnements souterrains est le bruit ambiant, en particulier le bruit impulsif. Ces perturbations électromagnétiques, provenant d'équipements de forage et d'autres sources, peuvent sérieusement altérer la qualité du signal de communication sans fil, compromettant ainsi sa clarté et sa portée. Nos expériences ont montré une augmentation notable du taux d'erreur binaire (BER) en présence de bruit impulsif. Pour surmonter ce défi, nous avons conçu et implémenté un filtre FIR LPF, expérimentant différents ordres de filtre pour trouver le meilleur équilibre entre efficacité de filtrage et complexité du système.

L'utilisation de notre filtre FIR LPF a considérablement amélioré le BER, en particulier à des distances plus grandes. Le filtre d'ordre 10 a donné des résultats particulièrement prometteurs, avec un BER réduit à seulement 0,0619 à 5 mètres et 0,1604 à 40 mètres. Ces résultats soulignent l'importance cruciale d'une conception minutieuse et d'une optimisation approfondie des systèmes de communication sans fil pour une utilisation en milieu souterrain, où la qualité du signal peut être grandement affectée par le bruit ambiant.

Nos simulations, réalisées sur MATLAB, ont mis en évidence l'efficacité des modulations 5G OFDM QPSK , QAM16 et QAM256 dans le cadre des communications sans fil en environnement souterrain. Les résultats obtenus ont indiqué que la modulation QPSK présente un taux d'erreur binaire (BER) plus faible dans les trois types de canaux testés, à savoir AWGN, Rayleigh et Rician. Cela suggère que la QPSK pourrait être une option plus fiable pour ces environnements spécifiques.

Dans l'ensemble, parmi les trois types de canaux, le canal AWGN a produit le BER le plus faible, tandis que le canal Rayleigh a montré le BER le plus élevé. Le canal Rician, quant à lui, a présenté un comportement intermédiaire.

Ces observations sont importantes car elles mettent en évidence que le canal Rician est plus efficace que le canal Rayleigh mais moins que le canal AWGN pour la transmission de signaux.

Ces résultats mettent en évidence l'importance d'une conception soignée et d'une optimisation approfondie des systèmes de communication sans fil pour une utilisation en milieu souterrain. Ils soulignent également le rôle crucial que peuvent jouer les techniques de filtrage pour améliorer la qualité du signal et garantir une communication fiable, même dans des conditions difficiles.

En envisageant des travaux futurs, nous avons l'intention d'élargir notre champ de recherche pour inclure l'exploration de systèmes de communication de nouvelle génération, tels que la 5G et la 6G. Ces systèmes offrent des capacités de bande passante élevées, une faible latence et une densité de connexions élevée, ce qui les rend particulièrement adaptés aux environnements difficiles comme les mines souterraines. Nous envisageons de configurer un réseau central en association avec un réseau d'accès radio (RAN) et un équipement utilisateur (UE) pour une mise en œuvre complète du système. En outre, compte tenu de notre expérience réussie avec le filtrage du bruit

impulsif, nous prévoyons de développer de nouveaux algorithmes de filtrage pour gérer le bruit dans ces systèmes de communication de nouvelle génération.

L'objectif est de développer une méthode robuste et efficace pour atténuer le bruit dans les systèmes de communication 5G et 6G. Si nous réussissons, cela pourrait considérablement améliorer la qualité des communications sans fil dans les environnements souterrains et autres environnements difficiles. Ainsi, nous espérons que nos efforts futurs continueront à contribuer à l'amélioration de la sécurité et de l'efficacité des opérations dans les mines et autres industries similaires.

RÉFÉRENCES

- [1] Facts and Figures of the Canadian Mining Industry (*Mining Association of Canada*)
- [2] Zhongmei, Lu, Huang Yu-Che, and Bangjun Cui. "A study for application research of 5G data acquisition and testing." In 2020 5th IEEE International Conference on Big Data Analytics (ICBDA), pp. 100-104. IEEE, 2020.
- [3] Abbasi Baghbadorani, Amin, John A. Hole, Jonathan Baggett, and Nino Ripepi. "Radar imaging of fractures and voids behind the walls of an underground mine." *Geophysics* 86, no. 4 (2021): H27-H41.
- [4] Shhab, Lara, Ahmet Rizaner, Ali Hakan Ulusoy, and Hasan Amca. "Suppressing the effect of impulsive noise on millimeter-wave communications systems." *Radioengineering* 29, no. 2 (2020): 376-385.
- [5] ALKHATEEB, A., AYACH, O. E., LEUS, G., et al. Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, vol. 8, no. 5, p. 831–846. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2334278.
- [6] WANG, X., POOR, H. V. Robust multiuser detection in non-Gaussian channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, vol. 47, no. 2, p. 289–305. DOI: 10.1109/78.740103.
- [7] Magsi, Hina, Ali Hassan Sodhro, Faheem Akhtar Chachar, and Saeed A. Khan Abro. "Analysis of signal noise reduction by using filters." In 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), pp. 1-6. IEEE, 2018.
- [8] Filtered OFDM Systems, Algorithms, and Performance Analysis for 5G and Beyond," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 3, pp. 1205-1218, Mars 2018, doi: 10.1109/TCOMM.2017.2771242.
- [9] Kurasov, D. "Mathematical modeling system MatLab." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1691, no. 1, p. 012123. IOP Publishing, 2020.
- [10] Li, Yujiao, Xiaodong Hu, Fujian Zhou, Yang Qiu, Zhuolong Li, and Yinghao Luo. "A new comprehensive filtering model for pump shut-in water hammer pressure wave signals during hydraulic fracturing." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 208 (2022): 109796.
- [11] Gawade, Mayur Shivaji, and Radhika D. Joshi. "Gnu radio and usrp b210 based software defined radio for ofdm data transmission." In 2021 IEEE International

- Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNBC), pp. 1-5. IEEE, 2021.
- [12] Kafetzis, Dimitrios, Spyridon Vassilaras, Georgios Vardoulas, and Iordanis Koutsopoulos. "Software-defined networking meets software-defined radio in mobile ad hoc networks: State of the art and future directions." *IEEE Access* 10 (2022): 9989-10014.
- [13] Uribe, José de Jesús Rugeles, Edward Paul Guillen, and Leonardo S. Cardoso. "A technical review of wireless security for the internet of things: Software defined radio perspective." *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences* 34, no. 7 (2022): 4122-4134.
- [14] Jiménez, S.A., Sanchez-Garcia, J. and Castillo-Soria, F.R., 2021. Self-Interference Cancellation on a Full Duplex DFTs-OFDM System using GNU Radio and USRP. *IEEE Latin America Transactions*, 19(10), pp.1781-1789.
- [15] Akhtar, Tafseer, Christos Tselios, and Ilias Politis. "Radio resource management: approaches and implementations from 4G to 5G and beyond." *Wireless Networks* 27 (2021): 693-734.
- [16] TajDini, Mahyar, Volodymyr Sokolov, and Volodymyr Buriachok. "Men-in-the-middle attack simulation on low energy wireless devices using software define radio." *arXiv preprint arXiv:1906.10878* (2019).
- [17] Sarowa, Sandeep, Harmanjeet Singh, Sunil Agrawal, and B. S. Sohi. "Design of a novel hybrid intercarrier interference mitigation technique through wavelet implication in an OFDM system." *Digital Communications and Networks* 4, no. 4 (2018): 258-263.
- [18] Gökçe, Muhsin Caner, Yahya Baykal, and Yalçın Ata. "Binary phase shift keying-subcarrier intensity modulation performance in weak oceanic turbulence." *Physical Communication* 37 (2019): 100904.
- [19] Thanushree, L.N. and Eswar, S., 2020. Performance Analysis of Modulation Schemes under Fading Scenario. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) NCETESFT*, 8(14).
- [20] Voudoukis, N., 2017. Performance Analysis, Characteristics, and Simulation of Digital QAM. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 1(1).
- [21] Wang, Kaihui, Li Zhao, and Jianjun Yu. "200 Gbit/s photonics-aided MMW PS-OFDM signals transmission at W-Band enabled by hybrid time-frequency domain equalization." *Journal of Lightwave Technology* 39, no. 10 (2021): 3137-3144.

- [22] Sondhi, Preeti, and Vinit Grewal. "Performance Analysis of Cyclic Prefix and Zero Padding Equalization Technique for MIMO-OFDM System." *International Journal of Advanced Science and Technology* (2017): 15-24.
- [23] Turpati, Suman, and Venkatanarayana Moram. "Improved performance of impulse active noise control using active function threshold with absolute harmonic variable step-size algorithm." *Microprocessors and Microsystems* 77 (2020): 103158.
- [24] Selim, Bassant, Md Sahabul Alam, Joao VC Evangelista, Georges Kaddoum, and Basile L. Agba. "NOMA-based IoT networks: Impulsive noise effects and mitigation." *IEEE Communications Magazine* 58, no. 11 (2020): 69-75.
- [25] Alam, M.S., Selim, B., Kaddoum, G. and Agba, B.L., 2020. Mitigation techniques for impulsive noise with memory modeled by a two state Markov-Gaussian process. *IEEE Systems Journal*, 14(3), pp.4079-4088.
- [26] Han, Kaifeng, and Kaibin Huang. "Wirelessly powered backscatter communication networks: Modeling, coverage, and capacity." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 16, no. 4 (2017): 2548-2561.
- [27] Silva, H.S., Alencar, M.S., Queiroz, W.J., Almeida, D.B. and Madeiro, F., 2019. Bit error probability of the M-QAM scheme subject to multilevel (double) gated additive white Gaussian noise and Nakagami-m fading. *Wireless Networks*, 25, pp.4359-4369.
- [28] Abed, Nabaa I., and Ghanim A. AL Rubaye. "PERFORMANCE OF QAM-OFDM SYSTEM OVER RAYLEIGH FADING CHANNEL IN WEI BULL NOISE DISTRIBUTION." *Journal of Engineering and Sustainable Development (JEASD)* 25, no. Special_Issue_2021 (2021).
- [29] Rappaport, Theodore S. "Wireless Communications--Principles and Practice, (The Book End)." *Microwave Journal* 45, no. 12 (2002): 128-129.
- [30] Baki, A. K. M., Md Wasif Absar, Tasnim Rahman, and KM Arif Ahamed. "Investigation of rayleigh and rician fading channels for state of the art (soa) lte-ofdm communication system." In *2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, pp. 325-329. IEEE, 2017.
- [31] Shao, Peng, Le Yang, and Xing Li. "Finite impulse response low-pass digital filter based on particle swarm optimisation for image denoising." *International Journal of Wireless and Mobile Computing* 20, no. 1 (2021): 41-47.
- [32] Ferdous, Jannatul, and M. Ali. "A Survey Report for Performance Analysis of Finite Impulse Response Digital Filter by Using Different Window Techniques." *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2, no. 12 (2013): 265-270.

- [33]Huang, X., Zhang, B., Qin, H. and An, W., 2017. Closed-form design of variable fractional-delay FIR filters with low or middle cutoff frequencies. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 65(2), pp.628-637.
- [34]Queiroz, Saulo, João P. Vilela, and Edmundo Monteiro. "Is FFT Fast Enough for Beyond 5G Communications? A Throughput-Complexity Analysis for OFDM Signals." *IEEE Access* 10 (2022): 104436-104448.
- [35]Dai, Jincheng, Ping Zhang, Kai Niu, Sixian Wang, Zhongwei Si, and Xiaoqi Qin. "Communication beyond transmitting bits: Semantics-guided source and channel coding." *IEEE Wireless Communications* (2022).
- [36]Kumar, Arun, and Hemant Rathore. "Design and implementation of OFDM system using QPSK & QAM." *Journal of Optical Communications* 42, no. 3 (2021): 507-511.
- [37] Zeng, Zhaohua, and Mi Shao. "Impact of EVM on network performance." In 2018 *International Conference on Sensor Networks and Signal Processing (SNSP)*, pp. 13-16. IEEE, 2018.