



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Projet de Fin d'Étude

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologie

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Thème

**" Application de la technique MIMO-OFDM sur le système de
communication par lumière visible "**

Présenté par :

- BEDRA Fatma
- FEZZAI Mosbah
- YUCEF Yakoub
- CHENNOUF Ishac

Devant le jury composé de :

Président : Dr Khalil Abdellatif

Examineur : Prof Madjori Abdelkader

Encadreur : TOUHAMI Ridha

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au doyen du Collège, au directeur du Département de génie électrique, au superviseur, ainsi qu'à tous les professeurs qui se sont joints à nous et nous ont enseigné au cours de nos études. Vous avez tous joué un rôle crucial en fournissant les conseils, l'éducation et le soutien nécessaires.

Nous nous considérons chanceux d'apprendre de vos précieuses expériences et des leçons que vous nous avez fournies. Je suis reconnaissant pour l'opportunité de grandir en tant qu'individus et professionnels.

Je vous souhaite plein succès dans votre vie professionnelle et personnelle.

Résumé

Ce mémoire fournit une étude détaillée sur l'application du système MIMO-OFDM dans le contexte de communication par lumière visible (VLC). MIMO-OFDM est une combinaison de multiplexage spatial (MIMO) et de changement de fréquence de l'interféromètre (OFDM)

Le système MIMO-OFDM offre des avantages importants pour VLC en termes d'amélioration des performances de transport et de gestion des effets de diffusion optique complexes.

Ce mémoire met en évidence les résultats des simulations réalisées à l'aide du logiciel MATLAB, évaluant la performance du système MIMO-OFDM en termes de taux d'erreur binaire (BER) et de rapport signal-bruit (SNR). Les simulations ont montré que le système MIMO-OFDM de VLC est capable de fournir des performances supérieures par rapport aux systèmes de communication traditionnels.

Mot clés : Système MIMO-OFDM, communication par lumière visible (VLC), simulations, (BER), rapport signal sur bruit (SNR),

Abstract

This Dissertation provides a detailed study on the application of the MIMO-OFDM system in the context of visible light communication (VLC). MIMO-OFDM is a combination of spatial multiplexing (MIMO) and interferometer frequency changing (OFDM).

The MIMO-OFDM system provides significant advantages for VLC in terms of improving transportation performance and managing complex optical diffusion effects.

Dissertation highlights the results of simulations conducted using MATLAB software, assessing the performance of the MIMO-OFDM system in terms of binary error rate (BER) and signal-to-noise ratio (SNR). Simulations showed that VLC's MIMO-OFDM system is capable of providing superior performance compared to traditional communication systems.

Keywords:

MIMO-OFDM system, visible light communication (VLC), simulations, binary error rate (BER), signal-to-noise ratio (SNR),

الملخص

تقدم المذكرة دراسة مفصلة عن تطبيق نظام MIMO-OFDM في سياق الاتصالات الضوئية المرئية VLC. (MIMO-OFDM) هو مزيج من تعدد الإرسال المكاني (MIMO) وتغيير التردد المتعامد (OFDM). يوفر نظام MIMO-OFDM مزايا كبيرة لـ VLC من حيث تحسين أداء النقل وإدارة تأثيرات الانتشار البصري المعقدة. تسلط المذكرة الضوء على نتائج عمليات المحاكاة التي أجريت باستخدام برنامج MATLAB، وتقييم أداء نظام MIMO-OFDM من حيث معدل الخطأ الثنائي (BER) ونسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR). وأظهرت عمليات المحاكاة أن نظام MIMO-OFDM الخاص بـ VLC قادر على توفير أداء متفوق مقارنة بنظم الاتصالات التقليدية.

الكلمات المفتاحية:

نظام MIMO-OFDM، اتصال بالضوء المرئي (VLC)، المحاكاة، معدل الأخطاء الثنائية (BER)، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)

Sommaire

Sommaire

Remerciements.....	I
Résumé	II
Sommaire	VI
Liste des figures	VIII
Liste des symboles.....	X
Introduction générale.....	1

Chapitre I : La technique MIMO

Introduction.....	4
I.1 Rappel Historique	5
I.2 Techniques MIMO	5
I.3 Architecture de la technologie MIMO.....	8
I.3.1 Multiplexage Spatial	8
I.3.2 Architecture H-BLAST.....	9
I.3.3 Architecture V-BLAST.....	10
I.3.3 Architecture D-BLAST	11
I.4 Capacité du canal	12
I.4.1 SISO.....	12
I.4.2 SIMO	13
I.4.3 MISO	15
I.4.4 MIMO	17
I.5 Classifications des systèmes de communication sans fil à antennes multiples.....	19
I.5.1 Classification par nombre d'antennes utilisées	19
I.5.2 Classification par distribution des antennes émetteurs et récepteurs	19
I.5.3 Classification par échelle de système.....	20
I.5.4 Classification par fonction	21
I.5.5 Classification selon la disponibilité de l'information sur l'état du canal	23
I.6 Avantages et inconvénients de la technologie MIMO.....	24
Conclusion	26

Chapitre II : OFDM-VLC

Introduction.....	28
II.1 Historique de L'OFDM	29
II.2. Définition de L'OFDM	29
II.3 Principe de L'OFDM.....	29
II.4 Caractéristiques de signal OFDM	30
II.4 .1 L'intervalle de garde.....	30
II.4 .2 L'interférence entre symboles	31
II.4 .3 L'interférence entre porteuses	31

II.5 Communication par lumière visible (VLC):.....	31
II.6 Histoire du VLC:	32
II.7 L'architecture d'un système VLC:	32
II.8 Canal VLC:	33
II.8.1 Considérations générales sur le canal VLC:	34
II.9 Principe.....	34
II.10 Technologies présentes de la lumière visible	34
II.11 Avantages de la lumière visible.....	35
II.12 Sécurité du VLC:.....	37
II.12.1 Sécurité humaine	36
II.13 cinquième génération	37
II.13.1 la relation entre la vlc et la 5g:.....	37
II.14 Le système OFDM-VLC utilise	38
II.14.1 Justification de l'utilisation du système OFDM-VLC:	40
II.14.2 Application OFDM dans VLC	40
II.15 Types d'OFDM – VLC:.....	41
II.15.1 ACO-OFDM.....	40
II.15.2 Utilisation ACO-OFDM	41
II.15.3 DCO-OFDM.....	42
II.15.4 Utilisation DCO-OFDM	43
II.16 L'amélioration des performances de VLC-OFDM	44
Conclusion	45

Chapitre III : Simulation et résultat

Introduction.....	47
III.1 Principe système VLC-OFDM-MIMO	48
III .3 Métriques de performance	51
III .3 Comparaison de deux systèmes MIMO et SISO.....	58
Conclusion	59
Conclusion générale.....	61
Bibliographie.....	634

Liste des figures

Figure I.1 : Scénario de transmission par antenne mull	6
Figure I.2: Architecture d'un émetteur H-BLAST	10
Figure I.3: Architecture d'un émetteur V-BLAST	11
Figure I.4: Architecture d'un émetteur D-BLAST	12
Figure I.5 : Architecture modèle SISO	13
Figure I.6: Architecture modèle SIMO	14
Figure I.7: Représentation géométrique des signaux SIMO	14
Figure I.8 : Architecture modèle MISO	15
Figure I.9: Modèle de signal MISO précédé	16
Figure I.10: Architecture modèle MIMO	17
Figure I.11: Classification des systèmes MIMO par nombre d'antennes utilisées Systèmes MIMO distribués.....	20
Figure I.12 : Systèmes de communication MIMO mono-utilisateur et multiutilisateur Où BS=Base Station. UE=User Equipment	21
Figure II.1: chemin bloc OFDM[34].....	30
Figure II.2: Intervalle de garde.....	30
Figure II.3: Interférence entre symbole.....	31
Figure II.4: les interférences entrent porteuses	31
Figure II.5 :Schéma basique du système VLC.....	34
Figure II.6 Le spectre électromagnétique.....	36
Figure II.7: système ACO-OFDM	42
Figure II.8: système DCO-OFDM	43
Figure III.1: Schéma fonctionnel du système VLC adaptatif MIMO OFDM.....	48
Figure III.2: Représente Signal OFDM.....	53
Figure III.3: Représente Sortie IFFT et signal continu après conversion	53
Figure III.4: Comparaison de AWGN NOISE avant et après la transmission Comparaison de QPSK démodulation.....	55
Figure III.5: signal transmission les led	56
Figure III.6: Performances BER vs SNR obtenues avec la technique MIMO-OFDM pour VLC system pour QAM-4/QAM-16/QAM-64.....	57
Figure III.7: Performances BER vs SNR obtenues avec la technique SISO-OFDM pour VLC system pour QAM-4/QAM-16/QAM	57

Liste Des Tableaux

III .4.1 Paramètre de simulation.....	52
---------------------------------------	----

Liste des symbols

AM: Amplitude Modulation.

BLAST: Bell Laboratoires Layered Space-Time.

BER: Binary Error Rate.

CSI: Channel State Information.

CDMA: Code Division Multiple Access.

CST: Channel State Information.

CIR : Channel Impulse Response.

CMOS: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.

D-BLAST: Diagonal-Bell Laboratories Layered Space-Time.

DAB Digital Audio Broadcasting.

DVB-T: Terrestrial Digital Video Broadcasting.

FM: Frequency Modulation.

FFT: Fast Fourier Transform.

H-BLAST: Horizontal-Bell Laboratories Layered Space-Time.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ICI: Inter Code Interference.

ISI: Inter-Symbol Interference.

LAN: Local Area Network.

LTE: Long-Term Evolution.

LED: Light Emitting Diode.

LI-FI: Light Fidelity.

LOS: Line Of Sight.

MRT: Maximum Ratio Transmitter.

MRC: Combinaison par rapport maximal.

MRC Maximum Ratio Combiner.

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output.

MISO: Multiple Input Single Output.

NSS: Network Sub-System.

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

OLED: Organic Light-Emitting Diode.

QAM : Quadrature Amplitude Modulation.

QAM: Quadrature Amplitude Modulation.

RF: Radio Fréquence.

SISO: Single Input Single Output.

SIMO: Single Input Multiple Output.

STBC: Space-Time Block Coding.

SDM: Spatial Division Multiplexing.

SNR: Signal to Noise Ratio.

VLC: Visible Light Communication.

V-BLAST: Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time.

Wi-Fi: Wireless Fidelity.

ZF: Zero Forcing.

.

Introduction générale

Introduction générale

La technologie a connu une évolution rapide qui a transformé tous les aspects de la vie humaine, y compris les communications sans fil. Les progrès constants dans les domaines des communications, des technologies de l'information et de l'électronique ont repoussé les frontières de la communication, de la vitesse des données et de la qualité des échanges. Ces avancées ont conduit à l'émergence d'une nouvelle technologie de communication visible révolutionnaire, connue sous le nom de VLC (Visible Light Communication). Cette technologie utilise la lumière pour transmettre des données, offrant des avantages tels que la bande passante élevée, une sécurité accrue et une faible interférence électromagnétique. Elle a ouvert de nouvelles perspectives dans des domaines tels que l'éclairage intelligent, la communication à grande vitesse et l'intégration des systèmes de communication dans notre environnement quotidien.

Parmi les défis auxquels VLC peut faire face figurent l'interférence des signaux optiques et l'impact de facteurs environnementaux tels que la réfraction et la dispersion, l'absorption du signal optique par certains matériaux, ce qui réduit l'efficacité du système. MIMO et OFDM sont donc une solution prometteuse aux défis associés à la VLC, MIMO est une technologie de communication sans fil avancée, utilisant une gamme d'antennes de transmission et de réception pour améliorer la qualité de communication et augmenter la capacité de transmission. L'OFDM est une technologie clé dans le domaine de la télécommunication sans fil qui utilise la division du signal en un ensemble de jetons à chevauchement étroit appelées sous-charges par lesquelles les données sont transmises permettant une capacité de transmission accrue.

Ce mémoire vise à approfondir notre compréhension du système MIMO-OFDM sur VLC et en évaluant ses performances au moyen de simulations réalisées à l'aide du logiciel MATLAB. Les résultats de cette étude fourniront des informations précieuses pour le développement et l'utilisation optimale des systèmes de communication optique MIMO-OFDM.

Le premier chapitre traite de la technologie MIMO la plus prometteuse en termes d'histoire, de classifications et autres. et son importance dans le domaine des communications sans fil.

Le deuxième chapitre présente une exploration détaillée de la technologie VLC-OFDM en termes de principes, d'utilisations et d'autres détails de ce système.

Introduction générale

Au chapitre troisième Le système VLC-OFDM est examiné et analysé en évaluant les performances de BER et SNR.

Enfin, nous résumerons toutes les connaissances acquises dans la conclusion finale concernant cette mémoire.

Chapitre I: La technique MIMO

Introduction

La technologie MIMO (multi-input multi-output) est une technologie de transmission sans fil qui utilise plusieurs antennes pour améliorer les performances du système de communication. Il est devenu un pilier important dans les réseaux sans fil modernes,

Dans ce chapitre, nous commencerons par une revue historique du MIMO et de son évolution dans le temps, et nous aborderons sa structure et la capacité de son canal, et puis nous nous réjouissons du classement de MIMO aussi ses avantages et inconvénients.

I.1 Rappel Historique:

Voici un résumé des principaux événements historiques à l'origine du MIMO :

- En 1984, Jack Winters de Bell Laboratoires a déposé un brevet relatif aux communications sans fil. Utilisant plusieurs antennes. Jack Wi Winters inters en a présenté une étude de limitations fondamentales. Sur le taux de transmission de plusieurs systèmes d'antennes dans un environnement d'évanouissement de Rayleigh.
- En 1993, Arogyaswami swami Paulraj et Thomas Kailath ont suggéré le concept du multiplexage par MIMO.
- Plusieurs articles axés sur le concept MIMO ont été publiés dans la période de 1986 à 1995. Cela a été suivi par le travail de Greg Raleigh et Gérard Joseph Foschini en 1996 qui a inventé de nouvelles approches impliquant des techniques de codage spatio-temporel. Il a été prouvé que ces approches augmentaient l'efficacité spectrale des systèmes MIMO.
- En 1999, Thomas L. Marzetta et Bertrand M. Hochwald ont publié une communication présente une étude rigoureuse du lien d'évanouissement MIMO Rayleigh en tenant compte des aspects de l'informatique.
- Le premier système commercial de MIMO a été mis au point en 2001 par Iospan Wireless Inc.
- Depuis 2006, des entreprises comme Broad om et Intel en ont lancé une nouvelle technologie de communication reposant sur la technologie MIMO afin d'améliorer le rendement des réseaux locaux sans fil (LAN). La nouvelle norme Wireless LAN Le nom des systèmes est IEEE 802.11n.

Aujourd'hui, les systèmes MIMO sont implantés dans de nombreuses technologies de pointe telles que diverses les propositions standard concernant les systèmes sans fil et de communication de quatrième génération LTE. On a démontré que la technologie MIMO améliore la capacité du système de communication et améliorer la fiabilité de la liaison de communication grâce à l'utilisation de multiples systèmes de diversité en dehors de la diversité spatiale. [1]

I.2 Techniques MIMO:

Dans la communication sans fil, les signaux transmis sont souvent affaiblis en raison de phénomènes tels que la propagation à trajets multiples et l'ombrage causé par des obstacles importants entre l'émetteur et le récepteur. Cela représente un défi majeur pour établir une communication fiable. Pour surmonter ces difficultés, la transmission par antennes multiples est une technique de diversité largement reconnue qui permet d'améliorer la résilience du système de communication lorsqu'un même signal est transmis ou reçu par plusieurs antennes.

Une autre approche prometteuse consiste à utiliser plusieurs antennes pour transmettre simultanément plusieurs flux de données, ce qui permet d'obtenir un gain de multiplexage significatif et d'améliorer considérablement le débit de communication. Au cours des dernières décennies, les systèmes MIMO ont suscité un intérêt considérable et ont été intégrés à plusieurs normes sans fil de nouvelle génération.

Lorsque de nombreuses antennes sont utilisées dans un système de communication, le canal de transmission devient riche en liens entre les antennes communicantes. En raison de la séparation suffisante entre les antennes du réseau [2], chaque signal capté par le récepteur a traversé un canal de décoloration de Rayleigh indépendant pour chaque antenne d'émission, et possède un gain de canal indépendant. Cette séparation d'antenne, définie comme $\lambda/2$ [3], offre une certaine redondance. Dans ce scénario, comme illustré à la figure I. 1.1 , si un chemin entre les antennes communicantes est effacé ou bloqué, d'autres chemins peuvent toujours être disponibles pour transmettre un signal de l'émetteur au récepteur. Cette technique, connue sous le nom de diversité spatiale, présente de nombreux degrés de liberté qui peuvent être exploités pour améliorer les performances du système. [4]

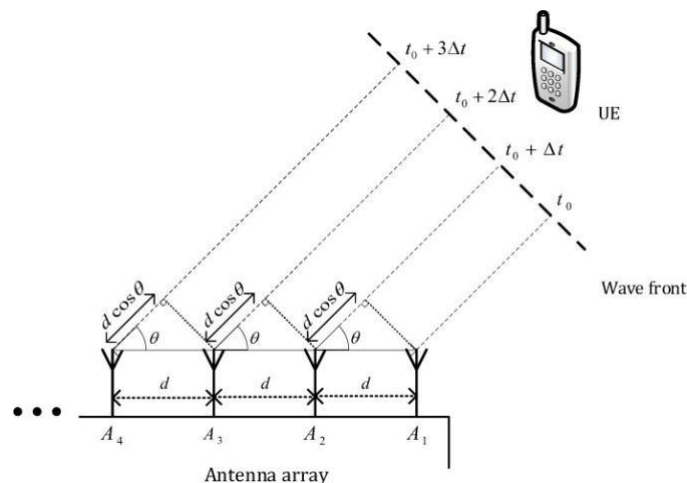


Figure I.1 : Scénario de transmission par antenne mul.[2]

Lorsque le signal est transmis, il atteint le récepteur par divers chemins, ce qui entraîne une superposition des signaux reçus. Cette superposition peut conduire à un renforcement ou à une annulation des signaux. Lorsque le nombre de signaux superposés est important, le théorème de la limite centrale peut être appliqué, et une approximation gaussienne peut être considérée [5]. Ce phénomène est attribué à des variations microscopiques dans l'environnement de propagation, telles que les mouvements du récepteur, de l'émetteur ou d'autres objets, et est connu sous le nom de décoloration à petite échelle. D'autre part, la variance est interprétée comme la décoloration à grande échelle, qui englobe des facteurs tels que les gains d'antenne, l'ombrage, la perte de trajectoire et les pertes de pénétration dans la propagation non visuelle.[2]

Le schéma MIMO de diversité de transmission qui utilise deux antennes d'émission, et il se distingue par sa simplicité et sa capacité à améliorer considérablement le signal reçu, sans nécessiter de connaissance préalable du canal de transmission. Il peut être considéré comme le schéma le plus simple de codage en bloc avec diversité spatiale (STBC).

Malgré l'utilisation de seulement deux antennes d'émission et un traitement de signal simple au récepteur, ce schéma offre une amélioration nette des performances du système. L'ordre de diversité obtenu avec cette technique est équivalent à celui obtenu avec le maximum ratio combiner (MRC) utilisant deux antennes de réception. De plus, il est possible d'étendre ce schéma pour le cas où il y a deux émetteurs et N antennes de réception, ce qui permettrait d'obtenir un ordre de diversité de $2N$. [6]

Les avantages de disposer de plusieurs antennes peuvent être encore améliorés lorsque l'émetteur et le récepteur sont capables de connaître la réponse du canal de communication. Cette connaissance permet au récepteur de combiner de manière cohérente les signaux reçus de toutes les antennes, ce qui est connu sous le nom de combinaison de réception. Si cette information est également disponible du côté de l'émetteur, le signal peut être prétraité afin de réduire la complexité de l'égalisation nécessaire du côté du récepteur. Cette technique est appelée pré codage. Ainsi, l'estimation précise de la réponse du canal devient un aspect clé dans les systèmes à antennes multiples. De plus, l'utilisation de plusieurs antennes du côté émetteur peut être exploitée pour réaliser une formation de faisceaux, où des ondes électromagnétiques sont additionnées de manière constructive pour produire un signal d'amplitude plus élevée à un point spécifique dans l'espace, tandis que l'interférence est minimisée. [7]

L'utilisation de plusieurs antennes d'émission pour envoyer des copies du même signal permet d'obtenir de multiples observations et d'améliorer ainsi l'estimation du signal émis. Ce principe constitue la base de la technique de diversité de transmission, qui peut également être étendue à la diversité de réception, où plusieurs antennes sont utilisées du côté récepteur pour obtenir plusieurs mesures du même signal. Toutes ces techniques permettent d'améliorer significativement les performances du système, mais cela implique un coût supplémentaire en termes de traitement du signal, de taille de l'émetteur/récepteur, de consommation d'énergie et de coût des antennes elles-mêmes. [8]

Ainsi, il est essentiel de trouver un équilibre entre les performances souhaitées du système et les ressources disponibles, afin de choisir le système approprié en fonction des contraintes et des objectifs spécifiques. [9]

I.3 Architecture de la technologie MIMO:

L'architecture de la technologie MIMO peut varier en fonction du nombre d'antennes utilisées et du type de configuration utilisé pour la transmission des signaux. Voici quelques exemples d'architectures MIMO:

MIMO spatial : cette architecture utilise plusieurs antennes à la fois pour émettre et recevoir des signaux. Les signaux sont envoyés simultanément à partir de différentes antennes, ce qui permet d'augmenter le débit de transmission et de réduire les interférences.

MIMO à diversité spatiale : cette architecture utilise plusieurs antennes uniquement pour la réception des signaux. Les signaux sont reçus à partir de différentes antennes, ce qui permet de réduire les perturbations dues aux interférences.

MIMO multi-utilisateurs : cette architecture permet à plusieurs utilisateurs d'utiliser simultanément une même fréquence radio. Les signaux sont transmis à partir de différentes antennes, ce qui permet de réduire les interférences entre les utilisateurs.

MIMO à antennes intelligentes : cette architecture utilise des antennes directionnelles pour concentrer la puissance du signal dans une direction spécifique, ce qui permet d'augmenter la portée et la qualité de la transmission.

Ces différentes architectures MIMO peuvent être combinées pour obtenir des performances encore meilleures en matière de débit, de fiabilité et de qualité de la transmission.

I.3.1 Multiplexage Spatial :

Le multiplexage spatial, également connu sous le nom de " spatial division multiplexing" (SDM) en anglais, est une technique utilisée en transmission de données sans fil pour augmenter le débit de transmission en exploitant la capacité de plusieurs antennes pour transmettre simultanément des flux de données différents.

En utilisant le multiplexage spatial, plusieurs flux de données sont transmis simultanément sur des antennes différentes, chaque flux étant associé à un canal spatial différent. Cette technique utilise la diversité spatiale pour améliorer les performances de transmission en exploitant les chemins de propagation différents des signaux entre les antennes de transmission et de réception.

Le multiplexage spatial est largement utilisé dans les systèmes MIMO où plusieurs antennes sont utilisées pour la transmission et la réception de données. Les antennes peuvent être placées sur une seule station de base ou sur plusieurs stations de base (dans le cas de systèmes d'antennes distribuées).

Le multiplexage spatial offre des avantages considérables pour les communications sans fil en termes de débit de transmission et de fiabilité de la transmission. Il permet de transmettre plusieurs flux de données simultanément sans augmenter la bande passante

nécessaire, ce qui permet d'augmenter le débit de transmission global du système. De plus, en utilisant plusieurs antennes pour la transmission et la réception de données, le multiplexage spatial permet de réduire l'effet des interférences et des perturbations sur les signaux de transmission, ce qui améliore la qualité et la fiabilité de la transmission.

En résumé, le multiplexage spatial est une technique de transmission de données sans fil qui utilise plusieurs antennes pour transmettre simultanément des flux de données différents, en exploitant les chemins de propagation différents des signaux entre les antennes de transmission et de réception. Cette technique est largement utilisée dans les systèmes MIMO pour améliorer les performances de transmission en termes de débit et de fiabilité de la transmission..[10]

I.3.2 Architecture H-BLAST:

L'architecture H-BLAST se compose de plusieurs couches, chacune utilisant des antennes à la fois pour la transmission et la réception de données. Les couches sont hiérarchiques en ce sens qu'elles utilisent des codes différents et des modulations différentes pour transmettre les données.

Plus précisément, chaque couche utilise une technique différente de modulation et de codage de canal pour transmettre les données. Les couches supérieures transmettent des données à un débit plus élevé avec une modulation plus complexe et un codage de canal plus sophistiqué, tandis que les couches inférieures transmettent des données à un débit plus faible avec une modulation plus simple et un codage de canal plus rudimentaire.

Les couches sont organisées de manière à minimiser les interférences entre les antennes de chaque couche. Cela est possible grâce à l'utilisation de codes de matrice d'espacement de l'antenne qui permettent aux antennes d'une couche de ne pas interférer avec celles des autres couches.

En résumé, l'architecture H-BLAST utilise une approche hiérarchique pour améliorer les performances de transmission de données sans fil en utilisant des codes et des modulations différents pour chaque couche. Cette approche permet de minimiser les interférences entre les antennes de chaque couche et d'améliorer la qualité de la transmission.[11]

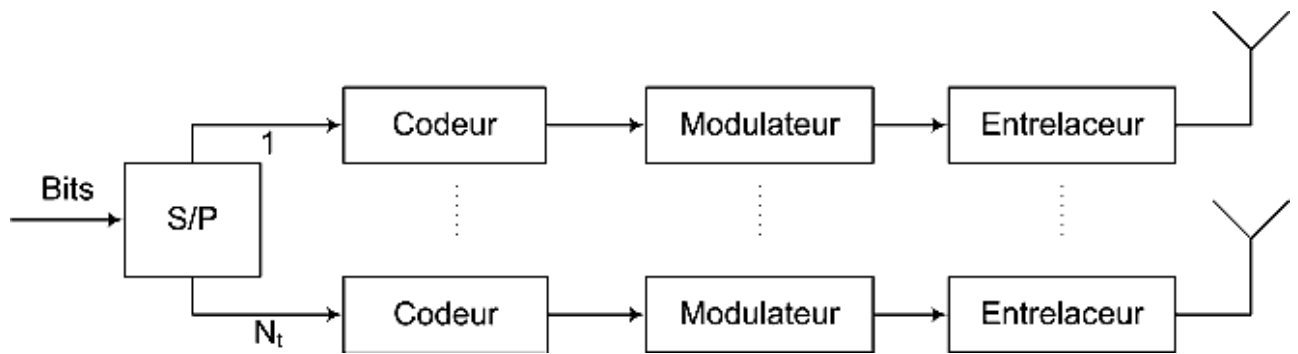


Figure I.2: Architecture d'un émetteur H-BLAST.[11]

I.3.3 Architecture V-BLAST:

V-BLAST est une architecture MIMO proposée par Bell Labs qui utilise une approche verticale pour améliorer les performances de transmission de données sans fil.

L'architecture V-BLAST utilise plusieurs antennes pour la transmission et la réception de données, mais contrairement à H-BLAST, elle n'utilise qu'une seule couche. Cependant, chaque antenne est considérée comme une couche indépendante, et les données sont transmises simultanément à partir de toutes les antennes.

Le principe de base de V-BLAST est de décomposer le signal MIMO en plusieurs signaux indépendants qui sont transmis simultanément à partir de chaque antenne. Cette décomposition est réalisée en utilisant une technique appelée décomposition QR, qui décompose la matrice de canal en une matrice orthogonale Q et une matrice triangulaire supérieure R .

En suite, les données sont transmises simultanément à partir de chaque antenne en utilisant une technique de modulation et de codage de canal appropriée. Les données sont ensuite démodulées et décodées à la réception en utilisant une technique inverse de décomposition QR.

L'avantage de V-BLAST est qu'il permet d'augmenter le débit de transmission de données sans fil en transmettant simultanément des données à partir de plusieurs antennes tout en minimisant l'interférence entre les signaux transmis à partir de chaque antenne. Cela peut améliorer considérablement la qualité de la transmission et la fiabilité des communications sans fil.

En résumé, l'architecture V-BLAST utilise une approche verticale pour améliorer les performances de transmission de données sans fil en transmettant simultanément des données à partir de plusieurs antennes tout en minimisant l'interférence entre les signaux transmis à partir de chaque antenne.

H-BLAST est une architecture MIMO proposée par Bell Labs qui utilise une approche hiérarchique pour améliorer les performances de transmission de données sans fil.[12]

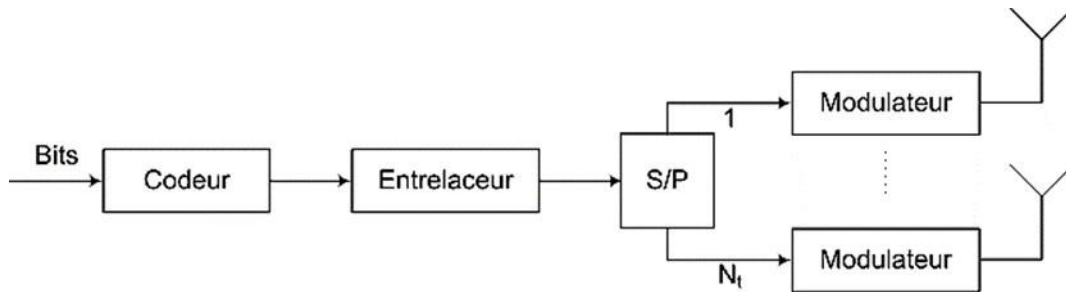


Figure I.3: Architecture d'un émetteur V-BLAST.[12]

I.3.3 Architecture D-BLAST:

L'architecture D-BLAST est une technique MIMO multi-utilisateur qui permet d'augmenter la capacité du canal en utilisant plusieurs antennes à la fois sur l'émetteur et le récepteur.

Le système D-BLAST est conçu pour fonctionner dans un environnement multi-utilisateur où plusieurs utilisateurs doivent transmettre simultanément des données à travers le même canal de transmission. Le système utilise un codage spatial pour séparer les signaux émis par les différents utilisateurs.

Dans l'architecture D-BLAST, chaque utilisateur dispose de plusieurs antennes d'émission et de réception, et les signaux sont codés en utilisant un codage spatial pour séparer les signaux émis par les différents utilisateurs. Le codage spatial permet d'augmenter la capacité du canal en utilisant la diversité spatiale pour améliorer la qualité de la liaison et réduire les interférences.

Le système D-BLAST utilise également un codage temporel en couches, qui permet de transmettre des données à différents débits en fonction de la qualité de la liaison. Les couches de codage temporel permettent d'adapter le débit de transmission en fonction des conditions du canal de transmission.

L'architecture D-BLAST est utilisée dans une variété d'applications sans fil, notamment dans les réseaux WiFi, les réseaux cellulaires, la radiodiffusion numérique, la transmission de données et la communication satellite. Elle est particulièrement efficace dans les environnements multi-utilisateur où plusieurs utilisateurs doivent transmettre simultanément des données à travers le même canal de transmission.[13]

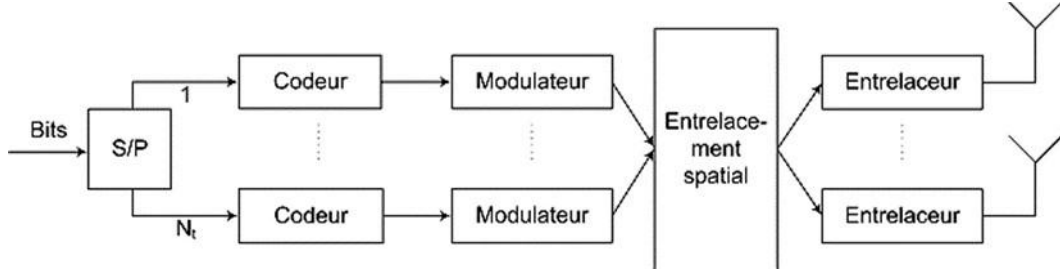


Figure I.4: Architecture d'un émetteur D-BLAST .[13]

I.4 Capacité du canal:

La capacité est l'une des principales mesures pour caractériser les performances des systèmes sans fil, et elle sert également pratiquement de guide pour concevoir correctement les signaux transmis ainsi que le traitement des signaux reçus [14]. Différentes implémentations concernant l'utilisation de plusieurs antennes ont été envisagées afin d'étudier l'augmentation de capacité la plus efficace. Des antennes peuvent être ajoutées à l'émetteur, au récepteur ou aux deux côtés du système de transmission. Comme le sait la théorie de l'information, la notion de capacité de canal a été introduite par Claude Shannon par une expression souvent connue sous le nom de capacité de Shannon:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{p|h|^2}{B \cdot N_0} \right) \quad (1)$$

où c est la capacité du canal en bits par seconde, b est la bande passante du canal en hertz, p est la puissance du symbole, h est le gain du canal, et n_0 est la variance du bruit .

Considérant la limite supérieure théorique, où $E[|h|^2] = 1$. et en supprimant la bande passante du canal fixe, nous pouvons alors simplifier l'expression comme:

$$C = \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (2)$$

où la capacité C est maintenant mesurée en bits/hertz et $\text{SNR} = p/n_0$ est le rapport signal sur bruit au niveau du récepteur.

I.4.1 SISO:

Le cas où nous avons un seul canal de communication est considéré comme Single-Input Single-Output (SISO), et ce scénario est illustré à la figure I. 5 , où le signal d'information x est convolué avec la réponse impulsionnelle du canal h dans le domaine temporel et le bruit gaussien n est ajouté par la suite. Dans le domaine fréquentiel, le signal reçu Y est donné par:

$$Y = HX + N \quad (3)$$

où Y désigne la transformée de Fourier du signal reçu Y , H est la réponse en fréquence du canal, X la transformée de Fourier du signal transmis x , et N désigne le bruit. Avec une seule antenne d'émission et une seule antenne de réception, il n'y a qu'un seul canal de

communication et toutes les variables sont des scalaires, de sorte que la capacité du système est donnée par l'équation 2.

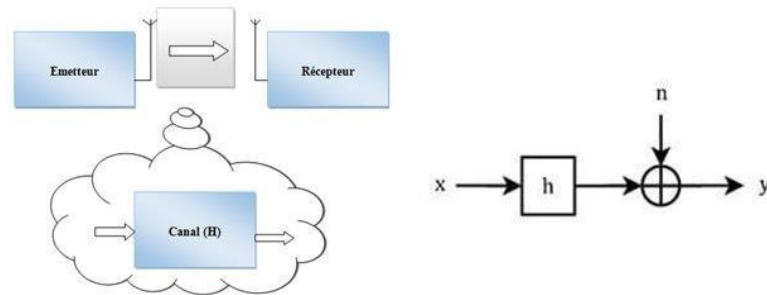


Figure I.5 : Architecture modèle SISO.[15]

I.4.2 SIMO:

L'ajout de plusieurs antennes d'un côté du système de communication peut être considéré comme SIMO lorsque des antennes sont ajoutées du côté récepteur ; ou MISO

lorsque des antennes sont utilisées du côté émetteur. L'ajout d'antennes R du côté réception entraînera des liaisons de canal R ; ou est le gain complexe entre chaque antenne émettrice et réceptrice .

Dans le cas SIMO; représenté à la Figure I. 6 Le signal reçu peut être défini comme la convolution de X avec la canal respectif et la sommation du bruit gaussien,. Ayant des antennes de réception R . Chaque signal reçu peut être décrit dans le domaine fréquentiel comme:

$$\mathbf{Y}_r = \mathbf{H}_r \mathbf{X} + \mathbf{N}_r \quad (4)$$

N_r et H_r étant réponse en fréquence du canal et le bruit entre l'antenne émettrice et r th l'antenne réceptrice , respectivement . Il est commode de compacter les signaux multiples et de les représenter par des vecteurs comme:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_1 \\ \vdots \\ H_r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

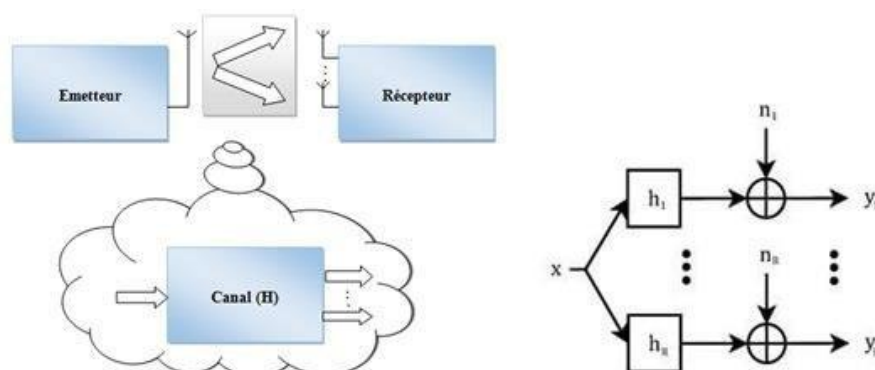


Figure I.6: Architecture modèle SIMO.[16]

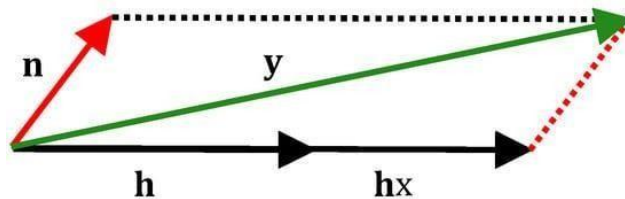
Cette représentation nous permet d'écrire le vecteur de signal reçu dans le domaine fréquentiel comme:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (6)$$

Où $\mathbf{Y}$ est le vecteur de dimension R représentant la réponse en fréquence du canal, $\mathbf{X}$ le symbole d'information et le vecteur de bruit de dimensions R . À partir de l'équation 7, nous pouvons conclure que le vecteur de signal reçu est la somme de deux vecteurs :

Le vecteur de canal mis à l'échelle plus le vecteur de bruit. En considérant ce point de vue géométrique, on peut conjecturer que le vecteur reçu doit être évalué dans la direction du vecteur.

cette approche géométrique est illustrée à la Figure I. 3.7.

**Figure I.7: Représentation géométrique des signaux SIMO.[16]**

Il convient de noter que la direction de ce vecteur n'a aucune relation physique avec la direction dans l'espace (au moins simple), car nous parlons d'un vecteur R dimensionnel.

Côté récepteur, nous avons l'intention de récupérer le symbole d'information X basé sur le vecteur de signal. Puisque nous savons que les informations doivent être dans la direction du vecteur de canal, tout ce qui pointe dans une autre direction ne peut être considéré que comme du bruit.

Pourtant, une partie de ce bruit peut pointer dans la direction du canal. À cette fin, nous devons projeter le vecteur dans la direction de, représenté mathématiquement comme le produit interne des vecteurs.

Dans les communications sans fil, cette technique est considérée comme une combinaison de réception. Pour cet exemple, nous décrirons la technique de combinaison considérée comme MRC pour maximiser le SNR au récepteur. Cette méthode et d'autres méthodes de combinaison seront analysées plus en détail à la pré codage MRT [16] nous pouvons formuler la capacité de canal du système SIMO comme:

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{p|h|^2}{n_0} \right) \quad (7)$$

Où la norme au carré du vecteur de canal est définie comme la somme de la valeur absolue au carré de chaque gain de canal, de sorte que nous pouvons réécrire l'expression précédant comme:

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{p\|h\|^2}{n_0} \right) \quad (8)$$

Il convient de noter que les termes de bruit R sont ajoutés non pas de manière constructive mais de manière aléatoire, nous avons donc la même variance de bruit. considérant la limite supérieure où tous les canaux ont le même gain unitaire, la formule de capacité peut être simplifiée comme suit:

$$C = \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (9)$$

Nous pouvons conclure qu'un signal R fois plus fort est reçu en utilisant des antennes de réception R et un algorithme de combinaison côté récepteur. ce gain est appelé gain de diversité spatiale car il provient des antennes de réception spatialement séparées.

I.4.3 MISO :

Le scénario suivant est caractérisé par plusieurs antennes du côté de l'émetteur et un récepteur avec une seule antenne, comme illustré à la Figure I.8.

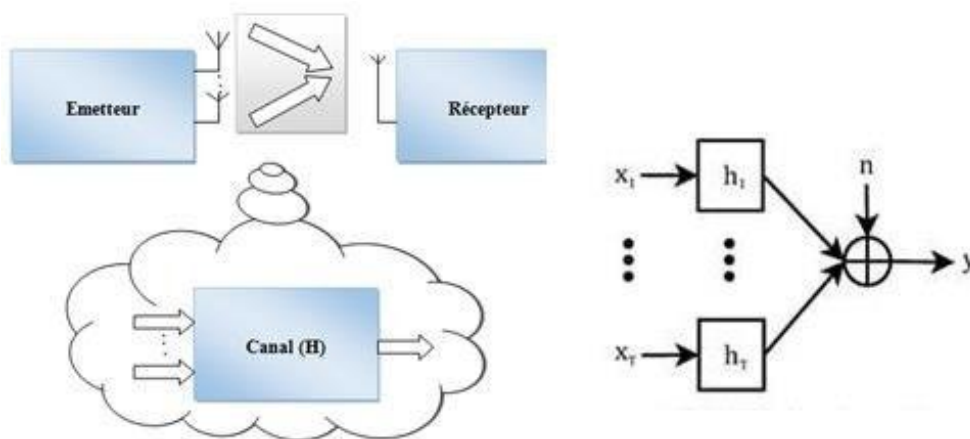


Figure I.8 : Architecture modèle MISO.[17]

Dans ce modèle, les multiples antennes T seront alimentées avec un vecteur de signal $X = [x_1; x_2; \dots; x_n]$ où chaque entrée x_r sera multipliée par la réponse en fréquence du canal respectif H_r . tous ces signaux seront ensuite additionnés au niveau du récepteur avec un terme scalaire de bruit N . nous pouvons représenter le signal reçu dans le domaine fréquentiel comme:

$$\mathbf{Y} = \sum_{t=1}^T \mathbf{H}_t \mathbf{X}_t + \mathbf{N} \quad (10)$$

Encore une fois, il est commode de représenter ce modèle en utilisant des vecteurs, donc nous avons

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_T \end{bmatrix}; \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_T \end{bmatrix} \quad (11)$$

Dans ce modèle, les antennes multiples T seront alimentées par un vecteur de signal

$$\mathbf{Y} = \sum_{t=1}^T \mathbf{H}_t \mathbf{X}_t + \mathbf{N} \quad (12)$$

Encore une fois, il est pratique de représenter ce modèle à l'aide de vecteurs, nous avons donc:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_T \end{bmatrix}; \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_T \end{bmatrix} \quad (13)$$

Où X est le vecteur d'informations de dimension H et est le vecteur de canal de dimension T contenant chaque réponse H_r en fréquence de canal. ainsi, le signal reçu peut être réécrit comme:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}^T \mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (14)$$

Nous pouvons faire la même analyse géométrique que dans le cas SIMO et remarquer que, en effectuant le produit intérieur, le vecteur d'informations est projeté dans la direction du vecteur de canal. Cela signifie qu'il est impossible d'envoyer des informations dans aucune "direction" autre que le vecteur de canal. Avoir cette information à l'esprit, nous pouvons concevoir le vecteur d'informations pour correspondre à la direction du vecteur de canal. Cette technique de traitement de signal est considérée comme préconisation. Le vecteur précédent, défini comme, est multiplié par le symbole de l'information, afin que nous ayons

$$\mathbf{X} = \mathbf{w} \mathbf{x} \quad (15)$$

$\mathbf{x}$ être le vecteur transmissible effectif et le vecteur précédé $\mathbf{w}$ t-dimensionnel de l'affaire MISO. cette architecture est illustrée à la Figure I.9.

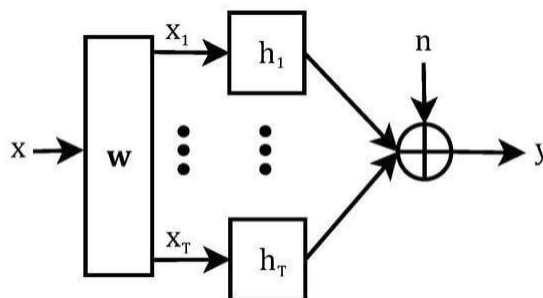


Figure I.9: Modèle de signal MISO précédé.[17]

En utilisant une technique similaire comme scénario précédent, considéré ici comme émetteur de rapport maximal (MRT), le vecteur pré-dosage $\mathbf{W}$ est défini comme:

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{H}^*}{\|\mathbf{H}\|} \quad (16)$$

Ainsi, le signal reçu peut être ensuite réécrit comme:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{X} + \mathbf{N} = \|\mathbf{H}\| \mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (17)$$

Et la capacité du système MISO sera formulée comme:

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{p}{n_0} \sum_{n=0}^T |h_n|^2 \right) \quad (18)$$

qui peut être simplifié comme:

$$C = \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (19)$$

Dans les deux cas, le SNR augmente linéairement avec le nombre d'antennes supplémentaires.

On peut observer que ce gain est réalisé de différentes manières : Dans le cas du SIMO, de multiples observations de signaux sont combinées de façon constructive au récepteur, de sorte que ce gain est atteint par la diversité spatiale du récepteur ; dans le cas de MISO, le signal est préalablement adapté au canal pour assurer une forte directivité du signal. Cette technique est étiquetée comme pré codage, plus précisément comme formation de faisceaux.

I.4.4 MIMO:

Pour le cas d'un canal MIMO de la Figure I.10, on considère T antennes d'émission et R antennes de réception.

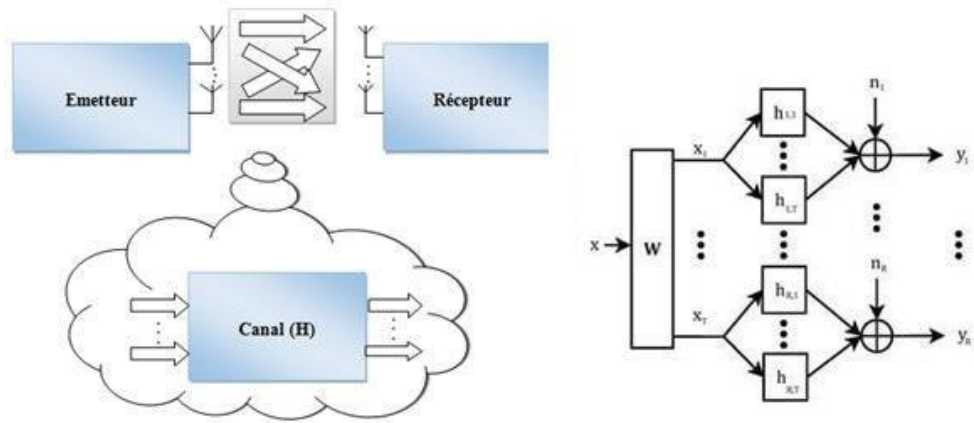


Figure I.10: Architecture modèle MIMO.[18]

Comme le montre la Figure I.10, le gain complexe à $h_{r,t}$, correspondant à la réponse du canal de l'antenne émettrice t th aux antennes réceptrices r th est indiqué comme à $h_{r,t}$. Chaque signal x_t sera transmis d'une antenne à des antennes de réception R et ainsi le signal de domaine de fréquence reçu à chaque antenne de réception Y_r peut être formulé comme suit :

$$\mathbf{Y}_r = \sum_{t=1}^T \mathbf{H} \mathbf{r}_t \mathbf{X} \mathbf{t} + \mathbf{N} \quad (20)$$

Comme nous aurons des réponses de canal R T. et des signaux multiples, il est commode de représenter ce modèle en utilisant des vecteurs et des matrices. Le modèle peut alors être représenté par:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1, 1 & \dots & \mathbf{H}_1, T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_r, 1 & \dots & \mathbf{H}_r, T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{N}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{N}_r \end{bmatrix} \quad (21)$$

ou simplement par:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (22)$$

où Y. est le vecteur de signal reçu R-dimensionnel, H. la matrice de canal R T. des réponses de fréquence, X. le vecteur T-dimensionnel défini comme FFT du signal précédé x.[17] , et N. le vecteur de bruit R-dimensionnel. Compte tenu des scénarios précédents, il est évident qu'un certain traitement du signal sera nécessaire sur l'émetteur et

$$C = \log_2(1 + \sum_{k=1}^S \frac{q_k}{N_0}) \quad (23)$$

où q_k . est la puissance d'émission, s_k . la valeur singulière respective, et N_0 . la densité spectrale de puissance de bruit. Comme il existe des canaux parallèles S, la capacité totale sera la somme de chaque capacité. Afin de la maximiser, la puissance allouée à chaque sous-canal doit être optimisée, en gardant à l'esprit l'équation de capacité suivante :

$$C = \max_{\mathbf{q}} \log_2 \left(1 + \sum_{k=1}^S \frac{q_k}{N_0} \right) \quad (24)$$

$$q_1 \geq 0, \dots, q_S \geq 0$$

$$\text{S.T. } \sum_{k=1}^S q_k = q$$

Il a déjà été montré dans [18] que l'allocation de puissance optimale est donnée par la méthode de remplissage d'eau, qui attribuera des puissances plus élevées aux canaux avec de meilleures conditions. Il peut être défini comme:

$$q_k^{\text{opt}} = \max \left(\mu - \frac{N_0}{s_k^2}, 0 \right) \quad (25)$$

La capacité MIMO peut ensuite être réécrite comme suit :

$$C = \sum_{k=1}^S \log_2 \left(1 + \frac{q_k^{\text{opt}} s_k^2}{N_0} \right) \quad (26)$$

qui dans le cas de valeurs singulières égales peuvent être simplifiées comme:

$$C = S \cdot \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (27)$$

Le gain MIMO est obtenu par un gain de multiplexage, ce qui signifie que, si le canal de propagation a suffisamment de degrés de liberté, la capacité varie linéairement avec $\min(R, T)$. et logarithmiquement avec SNR. , ce qui peut conduire à d'énormes gains de capacité lorsque le nombre d'antennes est important. Cependant, comme le canal de

propagation agira comme facteur limitant.[18]

I.1 Classifications des systèmes de communication sans fil à antennes multiples:

Les systèmes de communication MIMO multi-antennes sont classés en types, aidant à comprendre le rôle de ces systèmes dans la résolution des problèmes et des défis de la conception de différents réseaux de communication sans fil. Ils sont classés de différentes façons, selon la norme de classification, et les classifications suivantes peuvent être indiquées selon différents critères.[19]

I.5.1 Classification par nombre d'antennes utilisées:

- Systèmes MIMO : émetteur à antennes multiples (entrées), récepteur à antennes multiples (sorties). Ces systèmes assurent la divergence dans la transmission, et la divergence dans la réception.

- Systèmes MISO : émetteur à antennes multiples (entrées), antenne unique dans le récepteur (sortie). Améliorer la fiabilité du système MISO si l'information sur l'état du canal est disponible à l'émetteur, en ajustant la puissance fournie pour chaque antenne à la qualité du canal, cherchant ainsi à rendre le signal rapport au bruit dans le futur supérieur.

- Systèmes SIMO : antenne unique dans émetteur (entrée), récepteur multi- antennes (sorties). Ces systèmes assurent une divergence de réception seulement, et le rapport de référence au bruit augmente, donnant un bénéfice en capacité, améliorant ainsi la performance et la fiabilité du système.

Selon la méthode de classification précédente, les systèmes d'antennes multiples sont les plus génériques et les formations SIMO, MISO ainsi que les systèmes SISO ont une antenne à transmission unique et une antenne à récepteur unique.

La figure I.11 montre la structure des différents systèmes de communication sans fil classés précédemment. Il montre comment le nombre d'antennes pour l'expéditeur et le récepteur change selon la classification.

I.5.2 Classification par distribution des antennes émetteurs et récepteurs:

Les systèmes MIMO outrepassent les points de contrôle: En contournant les systèmes MIMO, les antennes et récepteurs de transmission sont dépassés et font partie d'une matrice d'antennes, par exemple (une station de base et un terminal de communication mobile).

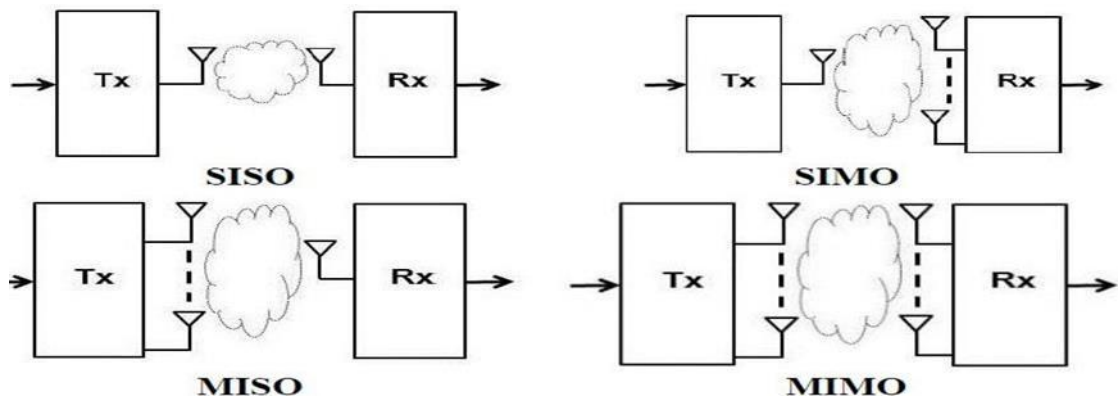


Figure I.11: Classification des systèmes MIMO par nombre d'antennes utilisées

Systèmes MIMO distribués:[19]

Les antennes et les récepteurs sont situés dans plusieurs raccords et distribués pour former une matrice d'antenne virtuelle, et on parle de systèmes de communication coopérative

Communications coopératives

Il convertit les points d'entrée et de sortie uniques (SISO) en un système MIMO virtuel. Dans ce système, l'utilisateur (expéditeur/récepteur), entrée et sortie unique explore les utilisateurs adjacents, de sorte qu'ils agissent comme points de rediffusion pour son signal, créant ainsi un système MIMO virtuel multi-g. Entrées et sorties.

I.5.3 Classification par échelle de système:

Les systèmes MIMO prennent en charge un seul utilisateur. Ici, les informations envoyées à l'avenir sont collectées et traitées de la manière la plus appropriée pour assurer la fiabilité des communications, et ce modèle est classé par connexion point à point.

Les systèmes MIMO prennent en charge les utilisateurs à deux mains. Dans ce cas, le système de connectivité est encore compliqué par les nombreux et variés chevauchements qui découlent de la prestation simultanée du service à plusieurs utilisateurs, et une méthode appropriée est suivie pour atteindre l'accès multiple, séparation des utilisateurs.

Systèmes multicellulaires MIMO. Comme un système de communication cellulaire qui se compose principalement d'une station de base stationnaire, et de nombreux utilisateurs mobiles.

Ainsi, le modèle de communication évolue comme suit:

- ✓ Connexion point à point : par exemple, une borne de connexion avec une station de base.
- ✓ connexion en un point à plusieurs points, par exemple, transmission de la diffusion de la station de base aux terminaux en mouvement par la liaison descendante.
- ✓ Connexion à plusieurs points : par exemple, connexion de terminaux mobiles à une station de base par le canal de liaison ascendante.

✓ Direction de plusieurs points vers plusieurs points, comme la connectivité entre plusieurs terminaux mobiles et plusieurs stations de base.

La Figure I.12 montre la structure des systèmes de communication mono-utilisateur et multi-utilisateur de MIMO. Le système à utilisateur unique se compose d'une station de base et d'un terminal, chacun avec plusieurs antennes, tandis que dans le système multi-utilisateurs, il y a plusieurs terminaux gérés par une station de base, et les deux terminaux sont multi-antennes.

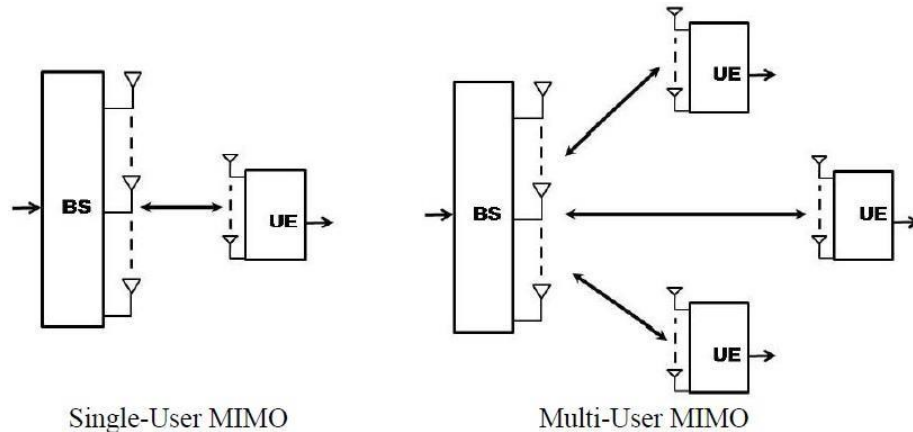


Figure I.12 : Systèmes de communication MIMO mono-utilisateur et multiutilisateur Où BS=Base Station. UE=User Equipment.[19]

I.5.4 Classification par fonction:

Selon la fonction, les techniques MIMO peuvent être classées dans les thèmes principaux suivants:

- **Techniques d'espacement de la diversité:**

La divergence vise à accroître la fiabilité de la communication en augmentant le rapport signal-bruit. Elle peut être divisée en deux principaux types de divergence de transpondeur, l'espacement du récepteur, et le principe de base de la divergence est qu'il y a plusieurs copies de la même séquence de données par transmission d'antenne NT, lorsque le gain en divergence se rapporte à la mesure dans laquelle ces sous-contrats de divergence sont asymétriques ou incohérents, Corrélé dans le sens qu'ils vont tous mal ensemble, le profit en divergence devient zéro. S'ils sont indépendants les uns des autres, le profit de la divergence devient complet et égal. ($N_t N_r$) où N_r est le nombre d'antennes de réception, et N_t le nombre d'antennes de transmission et pratiquement le bénéfice de l'espacement est entre les deux valeurs modernes précédentes. Sachant que le codage de masse spatiale STBC peut atteindre un bénéfice progressif total.

L'espacement entraîne une certaine répétition de la dimension spatiale, et les algorithmes pour les techniques de divergence de réception sont des méthodes connues de

collecte de signaux, et les algorithmes de codage spatio-temporel de Statant sur l'émetteur sont un exemple de divergence de transmission.

• **Techniques de multiplexage spatial:**

Les techniques d'amplification spatiale visent à augmenter le taux de transmission des données, augmentant ainsi l'efficacité spectrale

Le nombre de bits envoyés par seconde par Hz (bits/s/Hz), par la transmission subsidiaire de données. Ceci est fait lorsque les canaux formés à la suite de la transmission MIMO ne sont pas connectés. Le principe de base de l'amplification spatiale est que la séquence des bits d'entrée est divisée en NSS, modifiée et envoyée ensemble en même temps par l'antenne de transmission N_t , de sorte qu'il est (N_s supérieur ou égal à N_t)

Sans la nécessité de pouvoir visualiser un champ supplémentaire, le débit total de données a doublé N_s par rapport au débit de données d'une seule antenne de transmission. Dans la réception, les chevauchements sont supprimés et les différents signaux envoyés sont ensuite séparés. L'application typique de l'amplification spatiale est alors construite d'une manière BLAST, par exemple, le protocole spatial- temporel vertical des laboratoires V-BLAST peut atteindre le plus grand profit d'inflation possible.

• **Techniques de formation de faisceaux:**

L'information sur l'état du canal CSI est utilisée dans l'émetteur et le récepteur pour obtenir la formation d'un colis en vue d'obtenir une ouverture angulaire de rayonnement transitoire pour guider le colis de transmission dans une direction souhaitable et supprimer les signaux dans d'autres directions, et ils ressemblent à une sorte de signal manipulé spatialement et sont efficaces, utiles et applicables que les canaux soient corrélés ou spatialement indépendants. La formation du paquet conduit à une augmentation du rapport de référence au bruit de SNR à l'avenir, et est capable de supprimer différentes interactions et interférences résultant du canal adjacent CO- permettant ainsi la formation du paquet pour supporter plusieurs utilisateurs si une séparation angulaire (spatiale) entre eux est possible. Accès multiple à la Division de l'espace

Les techniques d'accès multiples SDMA bénéficient de la réponse pulsée du canal Responce Impulse Channel (CIR).

Par exemple, l'un des canaux résultant de l'utilisation de plusieurs antennes spécialise un canal spécifique, de sorte que les utilisateurs sont séparés par des réponses impulsions à différents canaux, de cette façon, l'accès multiple permet le soutien de nombreux utilisateurs, communiquer simultanément et dans le même espace de fréquence. Les réponses d'impulsion de chaque canal utilisateur sont connues de l'expéditeur et du futur. Le principal défi pour ces

systèmes est la conception de réactifs pour détecteurs multi-utilisateurs, ainsi que la conception d'émetteurs pour plusieurs utilisateurs.

• **Modulation spatiale:**

Le réglage spatial active une ou plusieurs antennes de transmission à chaque moment de transmission, selon les paramètres de l'entrée. Plus clairement, la séquence des bits d'information envoyés est liée au numéro d'antenne. L'indépendance des canaux diminués associés aux antennes de transmission est utilisée, par exemple, par déplacement.

Saisie du décalage spatial

Bien que la sortie augmente seulement pour garitmia avec le nombre d'antennes de transmission, la modification spatiale est capable de réduire la complexité à la fois de l'expéditeur et du récepteur. En plus d'atteindre une efficacité spectrale élevée avec l'aide d'un nombre suffisant et important d'antennes et d'idées liées à cette espèce se trouve dans

Technologies multifonctionnelles multi fonctionnelles MIMO:

Les technologies MIMO multifonctionnelles combinent les avantages et les caractéristiques de nombreuses technologies précédentes, elles peuvent bénéficier du gain résultant de la progression, du gain résultant de l'intégration, et du gain résultant de la formation du paquet. Une délégation a mentionné plus tôt que V-BLAST est en mesure d'atteindre le plus grand profit possible d'accréditation, et que STBC a accès à un profit spatial complet, si les canaux sont indépendants de faible, car de nombreuses études et recherches combinent actuellement plusieurs techniques, comme les codes d'espace piloté en couches du CTSSL.

Ainsi, pour obtenir à la fois les bénéfices de la divergence, le profit de l'intégration (le profit de l'efficacité spectrale), et le profit de façonner le paquet.

I.5.5 Classification selon la disponibilité de l'information sur l'état du canal

• **Les systèmes CSTT à anneau ouvert MIMO ne sont pas disponibles :**

Dans les systèmes MIMO à boucle ouverte, l'information sur l'état du canal CSI n'est pas disponible à l'expéditeur, auquel cas l'information sur l'état du canal peut être extraite à l'avenir, au moyen de techniques d'évaluation à l'aide de codes expérimentaux pilotes.

Inversement, la discrétion de réception peut être évitée en utilisant des techniques de détection différentielle, auquel cas les techniques MIMO incohérentes peuvent accéder aux bénéfices d'intégration, aux bénéfices de débordement, aux bénéfices de débordement de réception ou aux bénéfices de formation de rayonnement de réception.

Les systèmes MIMO homologués Ring CSTT sont disponibles :

Dans les systèmes MIMO en boucle fermée, l'information sur l'état des canaux CSI est

disponible pour l'émetteur et le récepteur, et CSTT aide à devenir accessible au paquet de formation de profit dans la transmission; Évidemment, avec l'information complète sur l'état des canaux CSTT à l'expéditeur, le système MIMO en boucle fermée offre de meilleures performances que le système MIMO en boucle ouverte selon toutes les mesures de performance.

I.2 Avantages et inconvénients de la technologie MIMO:

La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) offre plusieurs avantages par rapport aux systèmes de transmission de données sans fil traditionnels qui utilisent une seule antenne. Voici quelques-uns des avantages de la technologie MIMO :

Débit de transmission amélioré : En utilisant plusieurs antennes pour transmettre et recevoir des signaux, la technologie MIMO peut augmenter considérablement le débit de transmission. Cela est possible car les signaux peuvent être transmis simultanément à partir de différentes antennes, ce qui permet d'augmenter la quantité de données transmises en même temps.

Fiabilité accrue : Les systèmes MIMO utilisent plusieurs antennes pour la réception des signaux, ce qui permet de réduire les perturbations causées par les interférences et les pertes de signal. Cela se traduit par une amélioration de la qualité de la transmission et une réduction des erreurs de transmission.

Couverture étendue: Les systèmes MIMO peuvent augmenter la portée de la transmission sans fil en utilisant des antennes directionnelles pour concentrer la puissance du signal dans une direction spécifique. Cela permet de transmettre des signaux sur de plus longues distances avec une qualité de transmission satisfaisante.

Utilisation efficace du spectre : Les systèmes MIMO peuvent utiliser efficacement le spectre radio en permettant à plusieurs utilisateurs d'utiliser simultanément une même fréquence radio. Cela augmente la capacité du système sans avoir besoin de disposer d'une largeur de bande supplémentaire.

En somme, la technologie MIMO offre une performance supérieure et une meilleure qualité de transmission dans les réseaux sans fil, en permettant d'augmenter la capacité et la fiabilité de transmission tout en utilisant efficacement le spectre radio.

Bien que la technologie MIMO présente de nombreux avantages, elle comporte également certains désavantages, tels que :

Complexité de la mise en œuvre : La mise en œuvre de la technologie MIMO peut être complexe en raison du grand nombre d'antennes et de la nécessité de synchroniser les signaux entre les antennes. Cela peut rendre la conception, l'installation et la maintenance des

systèmes MIMO plus difficiles et plus coûteuses.

Besoin de canaux de propagation multiples : La technologie MIMO est plus efficace lorsque le signal peut être transmis via plusieurs trajets (canaux) entre les antennes de transmission et de réception. Dans les environnements où il n'y a qu'un seul trajet possible, les avantages de la technologie MIMO peuvent être limités.

Interférences entre les antennes :

La présence de plusieurs antennes dans un espace limité peut causer des interférences entre les antennes. Cela peut affecter la qualité de la transmission des signaux et réduire les avantages de la technologie MIMO.

Consommation d'énergie plus élevée :

Les systèmes MIMO utilisent plusieurs antennes pour transmettre et recevoir des signaux, ce qui peut augmenter la consommation d'énergie par rapport aux systèmes sans fil traditionnels qui utilisent une seule antenne.

En somme, bien que la technologie MIMO offre des avantages significatifs en termes de débit, de fiabilité et de qualité de transmission, sa complexité de mise en œuvre, ses exigences en matière de canaux de propagation multiples, les interférences entre les antennes et la consommation d'énergie accrue peuvent constituer des inconvénients potentiels.

Conclusion

Ce Chapitre donne un aperçu de la technologie d'MIMO. Nous avons discuté de l'histoire et de la création de MIMO, de la capacité de se canal, de sa classification et des avantages et inconvénients de cette technologie. Il est devenu une composante essentielle des réseaux sans fil modernes en raison de ses avantages importants en termes de débit de données et de qualité du signal.

Chapitre II : le système VLC-OFDM

Introduction

OFDM est la technique de conversion des formes d'onde utilisée dans les systèmes de communication. L'OFDM utilise Plusieurs vecteurs qui fonctionnent simultanément et délibérément dans la gamme de fréquences, où la gamme est divisée en petits canaux orthogonaux appelés sous-porteurs. Les données sur ces sous-porteurs sont transférées en les modifiant à l'aide de diverses techniques de chiffrement et de modification.

VLC est une sorte de technologie de communication sans fil qui utilise la lumière visible comme moyen de transmission des données. Cette technologie repose sur l'utilisation de sources de lumière telles que les LED pour transmettre des signaux de données en ajustant l'intensité de la lumière rapidement et visiblement à l'œil humain.

Tout d'abord, nous commencerons par expliquer la technologie OFDM et le système VLC et leurs principes de base, et après l'histoire de la communication à travers la lumière visible.

II.1 Historique de L'OFDM:

Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est une technique de modulation numérique multi porteuse qui a été proposée pour la première fois dans les années 1960 par Chang. Cependant, ce n'est que dans les années 1990 que l'OFDM a commencé à être largement utilisé, en particulier dans les systèmes de communication sans fil. L'une des premières applications de l'OFDM était dans les systèmes de diffusion audio numérique (DAB), qui utilisaient l'OFDM pour transmettre plusieurs stations de radio sur une seule bande de fréquences. À la fin des années 1990, l'OFDM a également été adopté pour les systèmes de diffusion de télévision numérique (DVB-T), permettant des émissions de télévision de haute qualité avec une meilleure réception dans les environnements urbains.

OFDM est également utilisé dans une variété de normes de communication sans fil, notamment Wi-Fi, LTE et 5G. L'un des principaux avantages de l'OFDM est sa capacité à faire face aux interférences par trajets multiples, qui sont causées par les signaux réfléchis par les bâtiments et autres obstacles dans les environnements urbains. En divisant le signal en plusieurs sous-porteuses et en les transmettant simultanément, l'OFDM peut améliorer la fiabilité et l'efficacité des communications sans fil. Au fil des ans, les chercheurs ont continué à affiner et à améliorer la technique OFDM, en développant de nouveaux algorithmes et en optimisant ses performances pour différentes applications. Aujourd'hui, l'OFDM est largement utilisé dans de nombreux domaines différents, notamment les télécommunications, la radiodiffusion et la transmission audio et vidéo numérique.

II.2. Définition de L'OFDM:

OFDM est une technique utilisée pour diviser le canal de fréquence en plusieurs petits canaux perpendiculaires appelés sous-porteuses. L'OFDM se caractérise par sa capacité à traiter efficacement le brouillage et le brouillage des fréquences en distribuant des données à plusieurs canaux avec une bande passante étroite. L'OFDM offre également une meilleure résistance à la décoloration des canaux et réduit l'interférence entre les symboles (Inter-symbole Interférence).

II.3 Principe de L'OFDM:

Le principe de base de l'OFDM est de diviser un flux de données à haut débit en plusieurs flux de données à débit plus faible et de les transmettre simultanément sur des porteuses orthogonales. Contrairement aux modulations classiques telles que la modulation de fréquence (FM) ou la modulation d'amplitude (AM), qui transmettent les données sur une seule porteuse, l'OFDM transmet les données sur plusieurs porteuses, chacune porteuse étant

modulée à une vitesse plus faible.

En divisant le flux de données à haut débit en plusieurs flux de données à débit plus faible, l'OFDM permet de réduire les effets de la dispersion inter-symbole et de l'interférence inter-canal, améliorant ainsi la qualité de la transmission. De plus, l'utilisation de porteuses orthogonales permet de minimiser les interférences entre les sous-porteuses, ce qui permet une utilisation plus efficace du spectre de fréquences.[21]

II.4 Caractéristiques de signal OFDM:

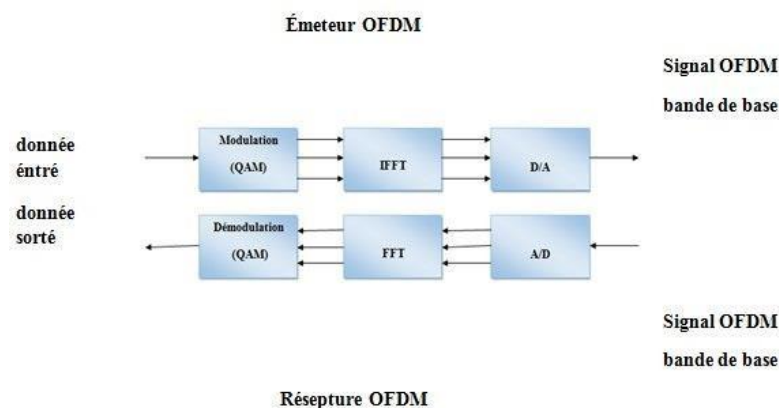


Figure II.1: Schéma bloc OFDM[34]

II.4 .1 L'intervalle de garde :

Cet intervalle est ajouté pour éliminer (réduire) le problème du brouillage entre les symboles. [21] (ISI). Celle-ci est ajoutée au début de chaque cadre OFDM, en fonction de l'insertion de l'intervalle. Garder l'interférence entre deux symboles est réduit. La figure suivante représente des trams OFDM et des intervalles de garde :

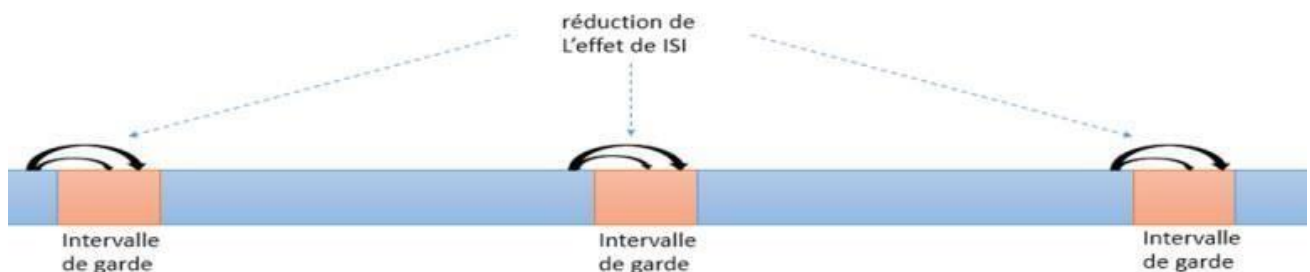


Figure II.2: Intervalle de garde.[21]

Il existe deux méthodes pour réduire (ou supprimer) l'effet de voyage multiple :

II.4 .1.1 Le préfixe cyclique:

Un signal de temps redondant à émettre est ajouté (aux niveaux de portée de. Conserver un exemplaire de la fin du symbole OFDM devant être transmis).

II.4 .1.2 Zéro pudding:

Il consiste à insérer des échantillons de valeurs nulles entre les symboles OFDM. [22]

II.4 .2 L'interférence entre symboles:

Ce phénomène est produit lors de la propagation sur un canal à trajets multiples de nombreux. réplique de l'onde transmise, les signaux reçus avec des amplitudes et des délais différents. Le signal a (tardif r) chevauche le signal b et c.

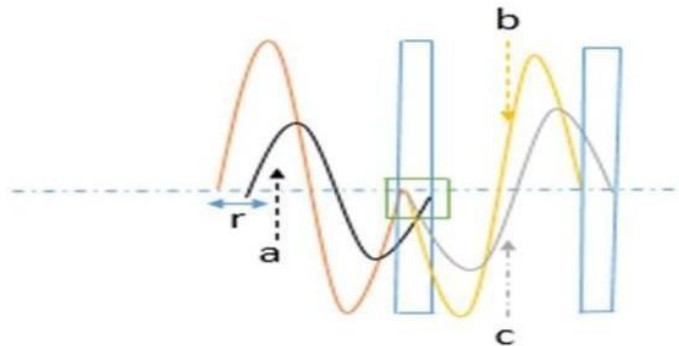


Figure II.3: Interférence entre symbole.[22]

II.4 .3 L'interférence entre porteuses:

Si le préfixe inséré au début d'une trame OFDM est muet (sans aucun signal), des interférences entre porteuses vont se produire. Pour expliquer ce phénomène, il est beaucoup plus facile de raisonner dans le domaine fréquentiel plutôt que dans le domaine temporel, non échantillonné. [22]

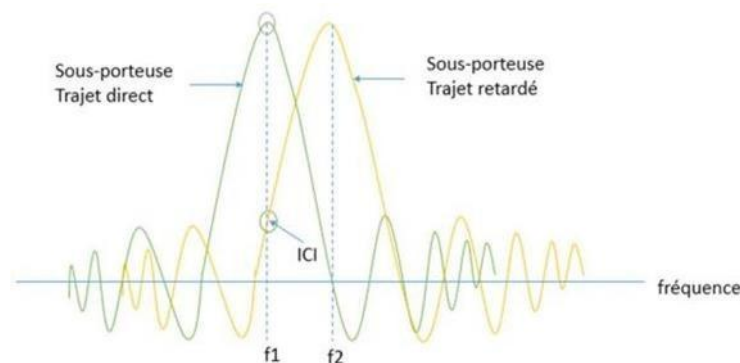


Figure II.4: les interférences entre porteuses.[22]

II.5 Communication par lumière visible (VLC):

La communication par lumière visible est le processus de transmission de signaux optiques d'une source à un récepteur via une fibre optique. La communication par lumière visible repose sur l'utilisation de fibres optiques pour transmettre des signaux optiques à grande vitesse, avec précision et fiabilité. Les fibres optiques sont souvent utilisées dans les

réseaux de communication, les systèmes d'éclairage intérieur et extérieur, les capteurs et d'autres applications.

Les signaux optiques sont convertis en signaux électroniques lorsqu'ils atteignent le récepteur et peuvent être utilisés pour afficher des images, des vidéos et d'autres données sur des écrans. Les fibres optiques se caractérisent par des vitesses de transfert de données élevées pouvant atteindre des centaines de gigabits par seconde, ce qui les rend idéales pour transmettre des données sur de longues distances avec un rendement élevé. Les fibres optiques sont également plus sûres et plus fiables que les fils de cuivre traditionnels et réduisent considérablement les risques d'interférences électromagnétiques.

En conclusion, la communication par lumière visible est une technologie émergente avec de nombreuses applications et avantages prometteurs. Ses taux de transfert de données élevés, sa sécurité et son immunité aux interférences en font une technologie prometteuse pour l'avenir de la communication sans fil.[23]

II.6 Histoire du VLC:

L'histoire de la communication par lumière visible (VLC) remonte au début du XXe siècle, où elle a été utilisée pour la première fois dans les systèmes de commande industriels. Dans les années 1960, la technologie VLC a été utilisée dans les communications inter-organisationnelles militaires et diplomatiques.

En 2000, le chercheur allemand Harald Haas a présenté l'idée d'utiliser la modulation de l'intensité de la lumière émise par les LED pour transmettre des données par liaison sans fil, lors d'une conférence à l'Université d'Édimbourg. Depuis lors, de nombreux chercheurs ont travaillé sur le développement et l'amélioration de la technologie VLC, qui a été utilisée dans de nombreuses applications pratiques.

En 2011, Haas a fondé la société Pure LiFi pour développer et commercialiser la technologie VLC, et depuis lors, des systèmes de VLC commerciaux et industriels ont été développés et appliqués dans de nombreux domaines tels que les communications sans fil, le contrôle industriel, la médecine, le divertissement et les voitures.

Le développement de la technologie VLC se poursuit, avec des entreprises et des chercheurs travaillant à améliorer les performances des systèmes et à développer de nouvelles applications. Il est prévu que la technologie VLC continuera de se développer et de se simplifier, et se répandra davantage dans l'avenir.[24]

II.7 L'architecture d'un système VLC:

L'architecture d'un système VLC est généralement composée de trois parties principales

: la source de lumière, le modulateur de données et le récepteur.

La source de lumière est généralement constituée de LED qui émettent une lumière visible et peuvent être modulées en intensité pour transporter des données.[23]

- **L'émetteur de VLC:**

Le modulateur de données est utilisé pour convertir les signaux de données en signaux optiques, qui peuvent être transmis par la source de lumière. Cela peut être réalisé par des techniques de modulation telles que l'OFDM ou la modulation d'amplitude.

- **Le récepteur VLC:**

Le récepteur reçoit le signal optique et le convertit en signal de données utilisable. Cela peut être réalisé par des photos détectrices telles que les photodiodes ou les phototransistors, qui convertissent la lumière en courant électrique. Le signal électrique est ensuite amplifié et démodulé pour récupérer les données d'origine.

En plus de ces trois parties principales, un système de VLC peut également inclure des éléments tels que des circuits de contrôle et des antennes pour améliorer la portée et la fiabilité du système.

En fonction de l'application spécifique, l'architecture d'un système de VLC peut varier en termes de complexité et de fonctionnalités, mais les éléments de base décrits ci-dessus sont couramment utilisés.

II.8 Canal VLC:

Un canal VLC est un canal de communication sans fil qui utilise des sources de lumière, telles que les LED, pour transmettre des données à travers l'air. Le canal VLC est souvent utilisé comme alternative ou complément à d'autres canaux de communication sans fil, tels que les ondes radio ou les micro-ondes, en raison de ses avantages en termes de sécurité, de bande passante et de faible interférence électromagnétique.

Le canal VLC peut être affecté par divers facteurs environnementaux tels que la distance entre les émetteurs et les récepteurs, l'angle de réception, la réflexion, la dispersion et l'absorption de la lumière. Ces facteurs peuvent entraîner une atténuation ou une distorsion du signal optique, ce qui peut affecter la qualité de la communication.

Pour améliorer la qualité de la communication dans le canal VLC, des techniques telles que l'utilisation de plusieurs sources de lumière, la modulation adaptative, le suivi de la position et de l'orientation du récepteur, et l'utilisation de la polarisation de la lumière peuvent être utilisées. Ces techniques peuvent aider à surmonter les obstacles environnementaux et à améliorer la robustesse et la fiabilité de la communication.[25]

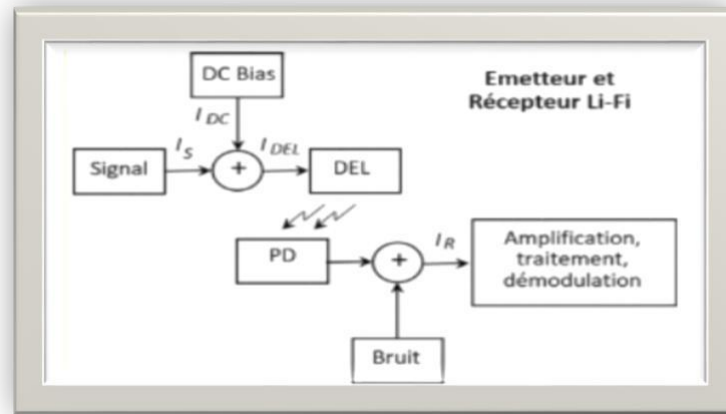


Figure II.5 : Schéma basique du système VLC.[24]

II.8.1 Considérations générales sur le canal VLC:

- Environnement système et emplacement :
- émission / réflexion
- Dépendance à la longueur d'onde
- nombre de réflexions

II.9 Principe:

Le fonctionnement du VLC repose sur la modulation de la lumière visible émise par une source de lumière, généralement une LED. La modulation est utilisée pour transporter des données en modifiant l'intensité lumineuse à des fréquences élevées, souvent des dizaines ou des centaines de mégahertz.

Le signal optique modulé est ensuite reçu par un récepteur qui peut utiliser un photo détecteur pour convertir la lumière en signal électrique. Le signal électrique est ensuite démodulé pour récupérer les données d'origine.

Il existe différentes techniques de modulation qui peuvent être utilisées pour transporter les données à travers la lumière visible. Les techniques de modulation les plus courantes sont la modulation d'amplitude (AM) et la modulation de fréquence (FM). La modulation OFDM est également une technique populaire dans les systèmes de communication VLC.[26]

II.10 Technologies présentes de la lumière visible:

Il existe plusieurs technologies qui peuvent être utilisées pour la communication à travers la lumière visible dans les systèmes de VLC. Les technologies les plus courantes sont:

LED (Light Emitting Diode) : Les LED sont les sources de lumière les plus couramment utilisées dans les systèmes VLC. Les LED ont l'avantage d'être petites, économes en énergie et offrent une grande flexibilité dans la modulation de la lumière.

OLED (Organic Light Emitting Diode) : Les OLED sont des diodes électroluminescentes organiques qui peuvent être utilisées comme sources de lumière dans les systèmes VLC. Les OLED offrent des avantages tels qu'une haute qualité d'image et une grande flexibilité de conception.

Laser : Les lasers sont utilisés dans certains systèmes VLC pour transmettre de grandes quantités de données à haute vitesse. Cependant, les lasers nécessitent des contrôles de sécurité stricts en raison de leur potentiel de dangerosité pour les yeux.

Phosphorescence : La phosphorescence est une technique qui consiste à utiliser des matériaux phosphorescents pour émettre de la lumière visible. Cette technique est encore en développement et offre un potentiel pour des applications spécifiques telles que la signalisation d'urgence.

Plasma : La technologie de plasma peut être utilisée pour produire de la lumière visible en excitant les gaz ionisés. Cependant, cette technologie est encore en développement et n'est pas encore largement utilisée dans les systèmes de communication VLC.

Chacune de ces technologies a ses avantages et ses limites, et leur choix dépendra des besoins spécifiques de chaque application.[27]

II.11 Avantages de la lumière visible:

La lumière visible offre plusieurs avantages pour la communication sans fil par rapport aux technologies de communication sans fil traditionnelles, telles que le Wi-Fi, Bluetooth ou les réseaux cellulaires. Voici quelques avantages de la lumière visible pour la communication sans fil :

Sécurité : Les signaux de lumière visible ne peuvent pas traverser les murs et les objets solides, ce qui signifie que les communications sont plus difficiles à intercepter ou à pirater. Cela rend la technologie de communication visible plus sécurisée que les technologies sans fil traditionnelles.

Interférence électromagnétique réduite : Les signaux de lumière visible ne créent pas d'interférences électromagnétiques avec les autres appareils électroniques, contrairement aux ondes radioélectriques utilisées dans les technologies sans fil traditionnelles.

Capacité : La lumière visible offre une bande passante plus large que les technologies sans fil traditionnelles, ce qui permet de transmettre des données plus rapidement et de manière plus efficace.

Faible coût : La technologie de communication visible utilise des LED, qui sont peu coûteuses et faciles à produire en grande quantité.

Disponibilité : La lumière visible est partout autour de nous, ce qui signifie qu'elle est disponible dans presque tous les endroits où nous avons besoin de communiquer sans fil.

Ces avantages font de la communication par lumière visible une technologie prometteuse pour diverses applications, telles que la communication sans fil à courte portée à l'intérieur des bâtiments, la communication automobile, la communication industrielle et la communication d'appareils électroniques.

Enfin la technologie utilisée pour travailler avec des longueurs d'ondes du domaine visible est la technologie CMOS, une technologie déjà très largement maîtrisée.[28]

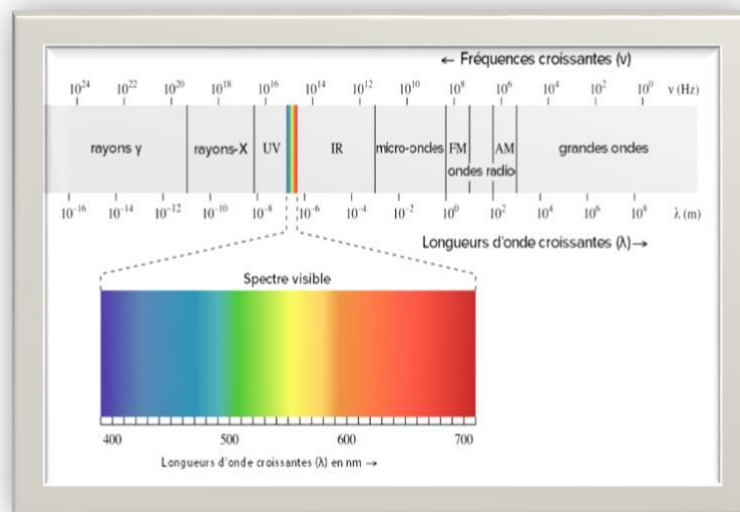


Figure II.6 Le spectre électromagnétique.[28]

II.12 Sécurité du VLC:

La sécurité est l'un des avantages clés de la communication à travers la lumière visible (VLC) en comparaison avec les technologies de communication sans fil traditionnelles telles que le Wi-Fi et le Bluetooth.

II.12.1 Sécurité humaine:

En ce qui concerne la sécurité humaine, la communication par la lumière visible (VLC) est considérée comme une technologie sûre car elle utilise des longueurs d'onde de lumière visibles qui ne sont pas nocives pour les êtres humains.

Contrairement aux technologies de communication sans fil traditionnelles qui utilisent des ondes radio ou micro-ondes, la VLC ne produit pas d'ondes électromagnétiques (EM) qui peuvent avoir des effets sur la santé humaine à long terme. De plus, la VLC n'a pas d'effet sur les dispositifs médicaux tels que les stimulateurs cardiaques, qui peuvent être perturbés par les

Signaux électromagnétiques.

II.12.2 Sécurité réseau:

En ce qui concerne la sécurité réseau, la communication par la lumière visible (VLC) présente certains avantages et défis.

D'une part, la VLC utilise un canal de communication physique qui ne peut pas être facilement intercepté à distance, contrairement aux technologies de communication sans fil traditionnelles qui peuvent être piratées ou interceptées par des attaquants à distance. Cela peut rendre la VLC plus sécurisée pour les applications nécessitant un niveau élevé de confidentialité et de sécurité, telles que les systèmes de communication militaires et gouvernementaux.

En somme, la VLC présente certains avantages en termes de sécurité réseau, notamment en raison de son canal de communication physique qui est difficile à intercepter à distance. Cependant, la VLC peut être sujette à des attaques de type MITM ou de brouillage, qui nécessitent la mise en place de techniques de sécurité pour les prévenir.[27]

II.13 Cinquième génération:

La 5G est la cinquième génération de technologie de réseau mobile sans fil. Elle est considérée comme une évolution majeure par rapport aux générations précédentes de technologie de réseau mobile (2G, 3G et 4G) en raison de sa capacité à fournir des connexions ultra-rapides, une latence ultra-faible et une connectivité massive de l'Internet des objets .

II.13.1 la relation entre la VLC et la 5g:

La relation entre la VLC et la 5G est étroite car ces deux technologies ont des avantages et des limites complémentaires. La 5G est une technologie sans fil qui permet une connectivité à haut débit sur de longues distances, tandis que la VLC utilise la lumière visible pour transmettre des données à courte portée et peut être utilisée à l'intérieur des bâtiments où la 5G peut avoir des difficultés à pénétrer. [28]

En combinant ces deux technologies, on peut créer des réseaux hybrides qui offrent une connectivité rapide et fiable dans toutes les situations. Par exemple, la 5G peut être utilisée pour la communication à longue distance à l'extérieur des bâtiments, tandis que la VLC peut être utilisée à l'intérieur pour fournir une connectivité à haut débit et faible latence.

De plus, la VLC peut également aider à améliorer la sécurité et la confidentialité des réseaux de communication. Étant donné que les signaux de VLC ne peuvent pas traverser les murs, ils sont plus difficiles à intercepter et à pirater. Cela peut être particulièrement important dans les environnements sensibles tels que les hôpitaux, les centres de données et les établissements militaires.

En somme, la relation entre la VLC et la 5G est une relation de complémentarité qui peut être utilisée pour améliorer la connectivité et les capacités de communication dans un large éventail de contextes et d'applications. [28]

II.14 Le système VLC-OFDM :

Le système VLC-OFDM est une technique de communication optique qui combine les avantages de la communication à large bande OFDM et de la communication optique sans fil VLC. [30]

Le système VLC-OFDM utilise la modulation OFDM pour diviser la bande passante en sous-porteuses qui sont modulées individuellement, puis transmises simultanément. Cela

permet une utilisation efficace de la bande passante disponible, ce qui rend la transmission plus rapide et plus fiable.

Le système VLC-OFDM utilise également la modulation de l'intensité de la lumière visible pour transmettre les signaux de communication. Cette technique utilise la plage de fréquence visible de la lumière, qui est considérée comme une bande de fréquence non réglementée. De plus, la transmission de données via la lumière visible ne présente pas de risques pour la santé car elle ne contient pas d'ondes électromagnétiques nocives comme les ondes radio.

Le système VLC-OFDM est principalement utilisé pour les applications de communication sans fil à courte portée dans des environnements fermés tels que les bâtiments, les avions et les trains. Il offre des avantages tels que la haute vitesse de transmission, la sécurité, la faible interférence et l'immunité aux interférences électromagnétiques.

Le système VLC-OFDM est également utilisé dans les applications de communication pour les véhicules intelligents (V2X), qui peuvent fournir une connectivité fiable pour les communications de voiture à voiture (V2V) et de voiture à infrastructure (V2I). [30]

II.14.1 Justification de l'utilisation du système VLC-OFDM :

Le système OFDM-VLC utilise des LED pour transmettre des données, elles sont disponibles et peu coûteuses. En outre, la technologie est capable de fournir des communications sans fil dans des zones où les communications sans fil traditionnelles peuvent être limitées.

L'OFDM offre une efficacité énergétique et une bande passante élevées, permettant de transmettre de grandes quantités de données par le canal de communication visuelle. Grâce à

cette technologie, la bande passante est divisée en plusieurs sous-contrats étroits et multiples, permettant une transmission de données simultanée et efficace.

OFDM-VLC est utilisé dans plusieurs applications telles que la communication sans fil à l'intérieur, l'éclairage intelligent, le contrôle matériel, la connectivité Internet léger, la direction interne et d'autres applications modernes.[31]

II.14.2 Application OFDM dans VLC :

La technologie OFDM est intégrée à VLC pour assurer efficacement la transmission de données sans fil via la lumière visible. OFDM VLC utilise un canal de lumière visible pour transmettre les hauteurs de crête auto-perpendiculaires générées par OFDM.

Génération de sous-porteuses: Les hauteurs auto-aiguës sont créées dans OFDM VLC en utilisant des conversions inverses Fast Fourier Transfer (IFFT). Les données à transmettre sont distribuées aux hauteurs perpendiculaires du pic et un préfixe perpendiculaire y est ajouté pour traiter le chevauchement entre les symboles.

Modulation de signal: Le signal OFDM est modifié en lumière visible en utilisant des techniques de modification appropriées telles que la modulation d'amplitude d'impulsion - PAM ou le multiplexage orthogonal de division de fréquence - OFDM. Les techniques de modification sont utilisées pour encoder les données et les convertir en un signal lumineux qui peut être reçu par la lumière visuelle.

Réception du signal: Le signal VLC OFDM est reçu à l'aide de récepteurs optiques compatibles qui reçoivent des signaux optiques et récupèrent les données transmises. Des techniques de réception appropriées telles que la modulation d'amplitude d'impulsion - PAM ou le multiplexage orthogonal de division de fréquence - OFDM sont utilisées pour récupérer les données originales du Signal optique.

- La technologie OFDM est compatible avec la communication par la lumière visible (VLC):

Lorsqu'elle est utilisée pour transmettre des données via la lumière visible en utilisant des lampes LED comme moyen de transmission. Dans l'OFDM, la bande passante est divisée en sous-canaux étroits et la modulation à fréquence orthogonale est utilisée pour transmettre les données de manière parallèle et synchronisée.

Lorsque le signal OFDM est converti en signal lumineux, des lampes LED sont utilisées pour convertir le signal électrique en signal lumineux. L'intensité lumineuse émise par la lampe LED est ajustée en fonction du signal OFDM transmis. Les bits numériques sont convertis en différents niveaux de luminosité, où chaque niveau représente une valeur spécifique des bits.

Le signal OFDM traverse les lampes LED grâce à un courant électrique appliqué sur les

lampes LED. Ce courant électrique provoque des variations dans l'intensité lumineuse émise par la lampe LED en fonction du signal OFDM transmis. Le récepteur reçoit le signal lumineux et le convertit en signal électrique traitable pour récupérer les données d'origine.

Ce processus nécessite une synchronisation précise entre le signal OFDM et la lampe LED pour assurer une transmission correcte des données. Il nécessite également des techniques spécifiques pour gérer les interférences résultant de l'utilisation de plusieurs sous-canaux et de la dégradation du canal dans l'environnement.

II.15 Types d'OFDM – VLC:

II.15.1 ACO-OFDM :

est une technique de modulation utilisée dans les systèmes de communication optique pour atteindre la transmission de données à grande vitesse sur les fibres optiques. C'est une variante de OFDM qui est spécifiquement conçue pour la transmission par fibre optique à modulation d'intensité.

Dans ACO-OFDM, le signal optique est divisé en plusieurs sous-porteuses, chacune transportant une partie des données. Ces sous-porteuses sont modulées en multiplexage orthogonal par division de fréquence, ce qui permet une utilisation efficace de la bande passante disponible. Les sous-porteurs sont généralement espacés à intervalles réguliers pour éviter les interférences entre eux.

Une caractéristique clé de l'ACO-OFDM est l'utilisation d'une technique de coupure asymétrique.

Le signal est coupé asymétriquement à l'émetteur pour réduire le rapport de puissance de crête à la moyenne (PAPR). Cette coupure supprime la partie négative du signal, entraînant une forme d'onde non symétrique. En coupant le signal de manière contrôlée, le PAPR peut être considérablement réduit, améliorant l'efficacité énergétique du système.

Au récepteur, le signal subit des processus de démodulation et de décodage pour extraire les données transmises. L'ACO-OFDM exige l'utilisation de techniques de traitement numérique des signaux (DSP) pour gérer le signal coupé asymétriquement. Ces techniques consistent à compenser la distorsion causée par l'écrêtage et la restauration des données d'origine.

L'ACO-OFDM offre plusieurs avantages dans les systèmes de communication optique. Il offre une efficacité spectrale élevée en utilisant efficacement la bande passante disponible grâce à la modulation OFDM. La technique de coupure asymétrique permet de réduire le

PAPR, ce qui permet d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire la distorsion du signal. Il offre également une robustesse contre les non-linéarités de fibres, ce qui le rend adapté à la transmission de fibres optiques à longue distance.

II.15.2 Utilisation ACO-OFDM:

ACO-OFDM peut être utilisé dans diverses applications dans les systèmes de communication optique. Certaines de ses applications communes comprennent:

1. Communication par fibre optique : L'ACO-OFDM convient bien à la transmission de données à haute vitesse par fibres optiques. Il peut être utilisé dans les liaisons de communication optique à longue distance, telles que les réseaux de base et les réseaux de régions métropolitaines (MAAN), pour atteindre des taux de données élevés et une transmission fiable.

2. Réseaux d'accès : ACO-OFDM peut être utilisé dans les réseaux d'accès, comme les systèmes de fibre optique à domicile (FTTH) ou de fibre optique à l'immeuble (FTTB). Il permet une transmission efficace des données à plusieurs abonnés, soutenant l'accès à Internet haute vitesse, la diffusion vidéo en continu et d'autres services à large bande.

3. Communication optique sans fil : ACO-OFDM peut être utilisé dans les systèmes de communication optique sans fil, aussi appelés communications optiques en espace libre. Il offre une solution de transmission robuste et rapide pour les applications où le déploiement de fibres optiques est difficile, telles que les liaisons terrestres sans fil urbaines, les réseaux maillés sans fil et les réseaux de capteurs sans fil

4. Communication de la lumière visible (VLC) : ACO-OFDM peut être utilisé dans les systèmes VLC où la lumière visible est utilisée pour la transmission de données. En modulant l'intensité de la lumière, l'ACO-OFDM permet une communication à haute vitesse dans les environnements intérieurs, comme les bureaux, les hôpitaux et les espaces commerciaux, pour des applications comme le positionnement intérieur, l'éclairage intelligent et la connectivité sans fil.

5. Systèmes radio sur fibre (RoF) : L'ACO-OFDM peut être utilisé dans les systèmes RoF pour transporter des signaux radiofréquences (RF) sur des fibres optiques. Il permet la transmission efficace de plusieurs signaux RF simultanément, soutenant des applications telles que les liaisons terrestres sans fil pour les réseaux cellulaires, les systèmes d'antennes distribuées (DAS) et l'accès sans fil à large bande.

La flexibilité, l'efficacité spectrale élevée et la robustesse de l'ACO-OFDM contre les non-linéarités de fibres le rendent adapté à une large gamme de communications optiques.

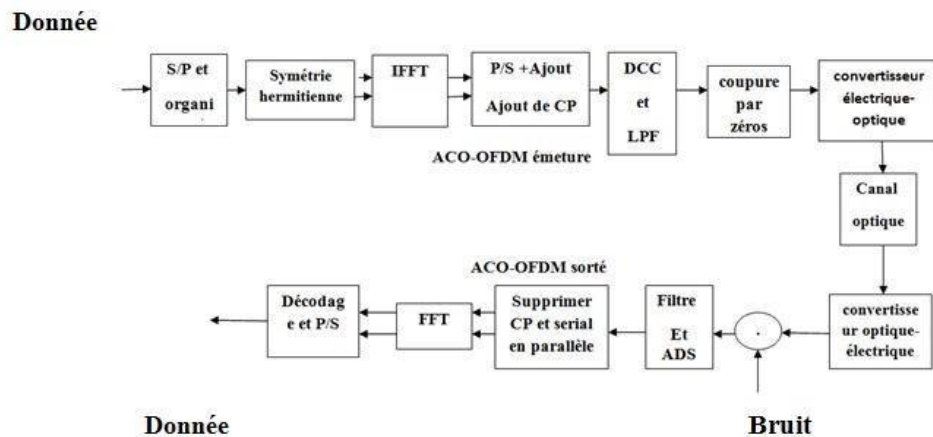


Figure II.7: système ACO-OFDM.[32]

II.15.3 DCO-OFDM:

Dans le DCO-OFDM, les données sont transmises à l'aide de multiples sous-porteuses, semblables au OFDM traditionnel. Chaque sous-porteuse est modulée à l'aide de techniques de modulation d'amplitude et de décalage de phase (APSK) ou d'amplitude d'impulsion (PAM).

Cependant, contrairement au MRCO traditionnel, le MRCO-MRFO fonctionne dans un canal optique non linéaire où la composante de courant continu (CC) est présente.

La présence du composant CC résulte de l'utilisation de la modulation d'intensité et de la détection directe (IM/DD) dans les systèmes VLC. En VLC, la source lumineuse est modulée pour encoder les données, et l'intensité lumineuse est directement détectée par un photo détecteur au niveau du récepteur. En raison du comportement non linéaire des composants optiques, le composant CC est affecté par la variation de l'intensité de la lumière transmise, entraînant une interférence dans le signal reçu.

Le DCO-OFDM corrige ce brouillage en compensant intentionnellement les fréquences des sous-porteuses à partir de la composante CC. Ce décalage crée une bande de garde entre le composant CC et les sous-porteuses, permettant au récepteur de les séparer efficacement. En évitant les interférences avec le composant DC, DCO-OFDM améliore les performances et augmente les débits de données dans les systèmes VLC.[32]

Donnée

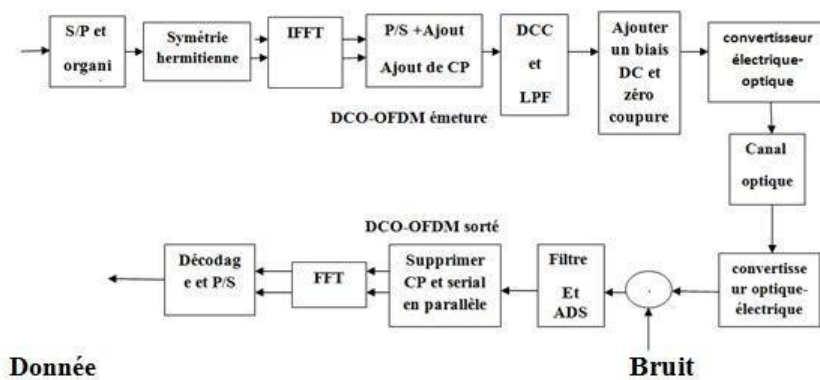


Figure II.8: système DCO-OFDM.[33]

II.15.4 Utilisation DCO-OFDM:

DCO-OFDM est principalement utilisé dans les systèmes de communication par lumière visible (VLC). Le VLC utilise des diodes électroluminescentes (DEL) ou d'autres sources de lumière visible pour transmettre des données, ce qui permet la communication dans des environnements où la communication sans fil par radiofréquence traditionnelle peut ne pas être appropriée ou autorisée, comme les hôpitaux, les cabines d'avions ou sous l'eau.

Le principal avantage du DCO-OFDM dans les systèmes VLC est sa capacité à atténuer les interférences causées par la présence du composant à courant continu (CC).

La composante CC est un niveau de signal optique constant qui représente l'intensité lumineuse moyenne du signal transmis. Cependant, en raison des non-linéarités dans les composants optiques et des variations dans les conditions d'éclairage ambiant, le composant CC peut introduire des interférences et des distorsions dans le signal reçu.

En compensant les fréquences des sous-porteuses par rapport au composant CC, DCO-OFDM crée une bande de garde qui aide à séparer les sous-porteuses du composant CC. Cette bande de protection garantit que les variations du composant CC n'affectent pas les sous-porteuses de données, ce qui permet une communication fiable.

Le DCO-OFDM règle également la gamme dynamique limitée des systèmes VLC en ajustant la puissance du signal pour éviter la distorsion et la saturation du signal dans le récepteur. Ce contrôle de puissance adaptatif assure une utilisation optimale de la plage dynamique disponible et améliore les performances globales du système.

En plus du VLC, le DCO-OFDM peut être utilisé dans d'autres systèmes de communication optique, comme les communications sous-marines, où le décalage du courant direct peut être causé par la turbidité de l'eau ou d'autres facteurs environnementaux. En gérant efficacement les interférences causées par le composant DC, DCO-OFDM permet une

transmission de données fiable et efficace dans des environnements aussi difficiles. [33]

II.16 L'amélioration des performances de VLC-OFDM

Il existe plusieurs façons d'améliorer les performances de VLC-OFDM [34], en voici quelques-unes :

Égalisation de canal : l'une des principales difficultés de VLC-OFDM est la propagation multipath due aux réflexions et à la diffusion de la lumière. Pour atténuer ce phénomène, des techniques d'égalisation de canal telles que le zéro forcing, le minimum de moyenne quadratique et le maximum de vraisemblance sont utilisées pour réduire les effets de l'interférence inter symbole.

Modulations : le choix de la modulation a une incidence sur les performances de VLC-OFDM. L'utilisation de modulations de plus haut ordre telles que 16-QAM et 64-QAM peut améliorer le débit de données du système, mais au détriment d'une sensibilité accrue au bruit aux perturbations de canal.

Contrôle de puissance : pour maintenir une liaison de communication fiable et stable, des techniques de contrôle de puissance peuvent être utilisées pour ajuster la puissance du signal transmis en fonction des conditions de canal.

Systèmes hybrides VLC-RF : les systèmes hybrides VLC-RF peuvent être utilisés pour améliorer les performances de VLC-OFDM. En combinant les technologies VLC et RF, le système peut obtenir une meilleure couverture et une meilleure fiabilité, notamment dans les zones où le trajet en ligne de mire (LOS) est obstrué.

Formation de faisceau : les techniques de formation de faisceau peuvent être utilisées pour améliorer la couverture et la qualité du signal des systèmes VLC-OFDM. En dirigeant le signal transmis vers le récepteur à l'aide de plusieurs antennes, le système peut réduire les interférences et améliorer le rapport signal sur bruit (SNR).

Ce sont quelques-unes des façons d'améliorer les performances de VLC-OFDM. En utilisant ces techniques, VLC-OFDM peut atteindre des débits de données élevés et une communication sans fil Fiable en utilisant la lumière visible. [34]

Conclusion

Ce chapitre a présenté une exploration détaillée de la technique VLC-OFDM. Nous avons examiné les principes fondamentaux de l'OFDM-VLC, les avantages qu'elle offre, ainsi que les défis et les limites auxquels elle est confrontée.

Chapitre III : Simulation et résultats

Introduction

Les communications par lumière visible (VLC) deviennent populaires en raison de leur capacité à fournir à la fois un éclairage et des communications de données. Cependant, la VLC est confrontée à de nombreux défis, tels que la réduction du signal et la présence d'obstacles causant des interférences inter symboles pour les transmissions à grande vitesse. Pour remédier à cela, la technique de transmission par multiplexage orthogonal de fréquence avec entrées et sorties multiples (MIMO-OFDM) est considérée comme une technique prometteuse pour les systèmes VLC.

Dans ce chapitre nous évaluons les performances du système MIMO-VLC-OFDM.

III.1 Principe système VLC-OFDM-MIMO :

Dans VLC-OFDM-MIMO, ces trois principes sont combinés comme suit :

Utilisation de plusieurs LED : Des LED multiples sont utilisées comme sources de lumière pour la transmission, permettant ainsi le multiplexage spatial. Chaque LED agit comme un émetteur indépendant, ce qui permet la transmission simultanée de différents flux de données.

Modulation OFDM : Les données à transmettre sont divisées en plusieurs sous-porteuses utilisant la modulation OFDM. Chaque sous-porteuse est modulée de manière indépendante, permettant ainsi la transmission parallèle des données sur différentes sous-porteuses. Cela augmente le débit de données global.

Techniques MIMO : Plusieurs antennes sont utilisées du côté du récepteur pour recevoir les signaux transmis par différentes LED. Les techniques MIMO telles que le multiplexage spatial et la diversité sont utilisées pour améliorer la qualité du signal, augmenter la capacité et atténuer les effets de brouillage et de décoloration.

En combinant la communication par lumière visible (VLC), l'OFDM et le MIMO, les systèmes VLC-OFDM-MIMO peuvent atteindre des débits de données plus élevés, une efficacité spectrale accrue et une fiabilité améliorée dans les scénarios de communication par lumière visible.

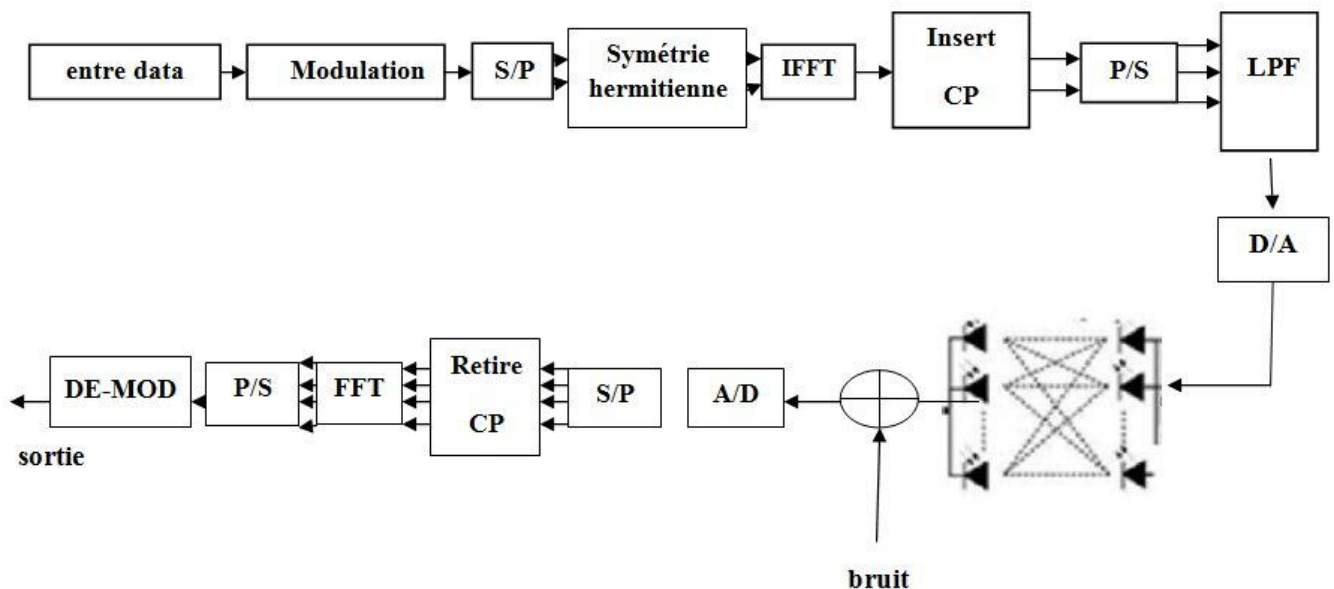


Figure III.1: Schéma fonctionnel du système VLC adaptatif MIMO OFDM

III.2 Analyse du système MIMO-OFDM-VLC:

MIMO-OFDM-VLC est un système sans fil qui comprend plusieurs étapes pour la transmission du signal. Voici les grandes étapes du diagramme.

Codage (Encoding) :

Les données à envoyer sont encodées en utilisant des techniques de codage MIMO pour exploiter la diversité spatiale entre les antennes émettrices et réceptrices, améliorant ainsi la qualité du signal et augmentant le débit de données.

Modulation :

Le signal traité est modulé en utilisant la technique OFDM. Des techniques telles que la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) ou la modulation par déplacement de phase (PSK) sont utilisées pour convertir les bits encodés en un signal fréquentiel transmissible.

Allocation de sous-porteuses (Subcarrier Allocation) :

La bande passante disponible est divisée en canaux secondaires appelés sous-porteuses. Chaque sous-porteuse est assignée pour transporter différentes données.

Encodage des données (Data Encoding) :

Les données à envoyer sont encodées selon une méthode spécifique avant d'être transmises sur les sous-porteuses. Des techniques comme la correction d'erreurs vers l'avant (Forward Error Correction) peuvent être utilisées pour accroître la résistance du système aux interférences et aux erreurs.

Mappage des données aux fréquences (Mapping to Frequencies) :

Les données encodées sont associées aux fréquences des sous-porteuses. Des techniques telles que la transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) sont utilisées pour convertir les données encodées du domaine temporel au domaine fréquentiel.

Décalage de la fréquence porteuse (Carrier Frequency Shifting) :

La fréquence porteuse de chaque sous-porteuse est décalée pour correspondre aux fréquences requises dans la plage de communication.

Ajout d'une garde temporelle (Guard Interval Addition) :

Une période de temps vide appelée garde temporelle est ajoutée entre chaque symbole OFDM et le symbole suivant. Cette garde temporelle permet de gérer les retards dus à la propagation multi-trajet et de combattre les interférences entre les symboles.

Ajout d'un préfixe cyclique (Cyclic Prefix Addition) :

Une partie répétée du début de chaque symbole OFDM, appelée préfixe cyclique, est

ajoutée. Ce préfixe cyclique aide à traiter les interférences ultérieures dans le canal.

Transmission du signal (Signal Transmission) : Les symboles OFDM traités, y compris le préfixe cyclique, sont transmis à travers le canal sans fil. Le canal sans fil peut être un milieu radio ou un milieu optique, comme une fibre optique.

Communication par lumière visible (VLC) :

À cette étape, le signal traité à partir des fréquences radio est converti en un signal lumineux visible en utilisant des ampoules LED. L'intensité de la lumière est modulée pour représenter le signal d'information transmis.

Canal optique (Optical Channel) :

Le signal lumineux émis se propage à travers le canal optique, pouvant être de l'air ou tout autre milieu permettant à la lumière visible de communiquer. Pendant le passage à travers le canal optique, le signal peut être affecté par le bruit du canal, la perte de lumière et d'autres conditions d'éclairage extérieur.

Réception de la lumière visible (Visible Light Reception) :

À cette étape, le signal lumineux qui a traversé le canal optique est reçu à l'aide d'un récepteur de lumière visible. Le signal lumineux est converti en un signal électrique à l'aide d'un capteur de lumière.

Réception du signal (Signal Reception) :

Les symboles OFDM transmis sont reçus à travers le canal sans fil par le récepteur. Le préfixe cyclique et la garde temporelle sont supprimés, et le signal est converti dans le domaine fréquentiel à l'aide de la transformée de Fourier rapide(FFT).

Récupération des données (Data Recovery) :

Les données originales sont récupérées à partir du signal traité. Des techniques telles que les transformées inverses matérielles sont utilisées pour convertir le signal encodé dans le domaine fréquentiel en domaine temporel, et pour décoder les données afin de récupérer les données originales.

Élimination des interférences et du bruit (Interference and Noise Removal):

Des techniques telles que le filtrage, le contrôle de puissance et les techniques de correction d'erreurs sont appliquées pour éliminer les interférences et le bruit causés par le canal et les conditions perturbatrices.

Décodage (Decoding) :

Les données récupérées sont décodées pour récupérer les données originales.

Ces étapes représentent les principales étapes du schéma de transmission du signal pour le système MIMO-OFDM-VLC. Il est important de noter que ces étapes peuvent varier légèrement selon les différents systèmes de communication et leurs applications, mais le

concept général de la transmission du signal suit les mêmes principes.

III.3 Métriques de performance:

• **AWGN** : (Additive White Gaussian Noise) est un modèle couramment utilisé pour représenter le bruit dans les systèmes de communication. C'est une forme idéalisée de bruit qui est caractérisée par deux propriétés principales : il est additif, ce qui signifie qu'il est ajouté au signal d'origine, et il suit une distribution gaussienne (normale).

exprimé par l'équation suivante :

$$N(t) = \sqrt{N_0/2} * (X(t) + jY(t))$$

où :

- $N(t)$ représente le signal de bruit au temps t .

- N_0 est la densité de puissance du bruit.

- $X(t)$ et $Y(t)$ sont des échantillons aléatoires indépendants et distribués selon une distribution gaussienne avec une moyenne nulle et une variance unitaire.

$\sqrt{N_0/2}$ est un facteur d'ajustement de la densité de puissance pour maintenir la puissance du bruit ajouté.

• **BER** : BER signifie Bit Error Rate. C'est une métrique utilisée pour mesurer les performances d'un système de communication numérique en quantifiant le nombre de bits mal reçus par rapport au nombre total de bits transmis, c'est-à-dire .

$$\text{BER} = (\text{bits d'erreur}) / (\text{nombre de bits transmis})$$

• **SNR** : Le SNR est le rapport de l'énergie du bit (**E_b**) à la puissance du bruit densité spectrale (**N_0**) et s'exprime en **db**.

$$\text{SNR} = E_b / N_0$$

• Pour tout schéma de modulation, le BER est exprimé en termes de SNR. Le BER est mesuré en comparant le signal transmis avec le signal reçu, et calculer le nombre d'erreurs sur le nombre total de bits transmis.

Il est important de noter que les caractéristiques spécifiques de la courbe AWGN dépendront du système de communication, du schéma de modulation, des paramètres de bruit et des techniques de traitement du signal utilisées.

• modulation utilisée dans les systèmes de communication numérique. Elle permet de transmettre des données en utilisant quatre états de phase différents.

• La modulation **QPSK** : La modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) est une technique de QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) peut être représentée mathématiquement par les équations suivantes :

Pour la modulation :

$$\checkmark s(t) = \text{Re}\{[A\cos(2\pi f_c t) + jB\sin(2\pi f_c t)] * e^{j\theta(t)}\}$$

où :

$s(t)$ est le signal modulé QPSK dans le domaine temporel,

A et B sont les amplitudes des composantes en quadrature (I et Q) du signal,

f_c est la fréquence porteuse,

$\theta(t)$ est la phase instantanée du signal qui dépend des bits d'information à transmettre.

Pour la démodulation cohérente (dans des conditions idéales sans bruit) :

$$\checkmark r(t) = s(t) * e^{-j\theta(t)}$$

où :

$r(t)$ est le signal reçu,

$s(t)$ est le signal modulé QPSK,

$\theta(t)$ est la phase instantanée du signal reçu.

III .4 Résultats de simulation :

Tableau III .4.1 Paramètre de simulation

Paramètres	Valeur
Modulation	4-QAM ; 16-QAM ; 64-QAM
Taille IFFT (N)	64
nombre de transmission LEDs	2
nombre de photodiodes de réception	2

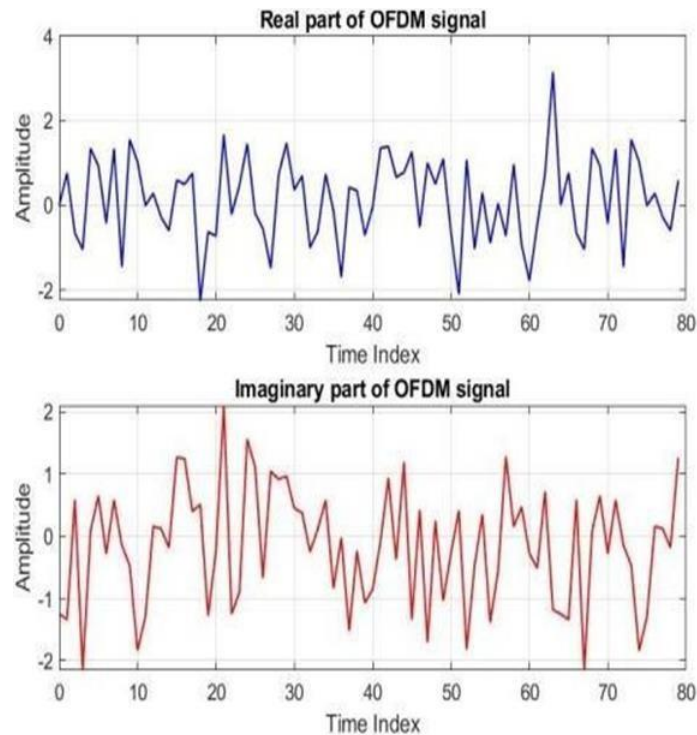


Figure III.2: Représente Signal OFDM

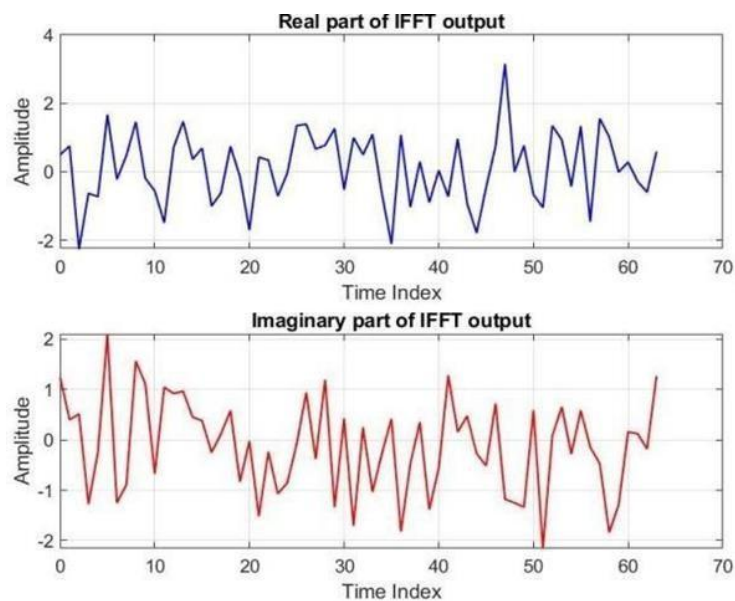
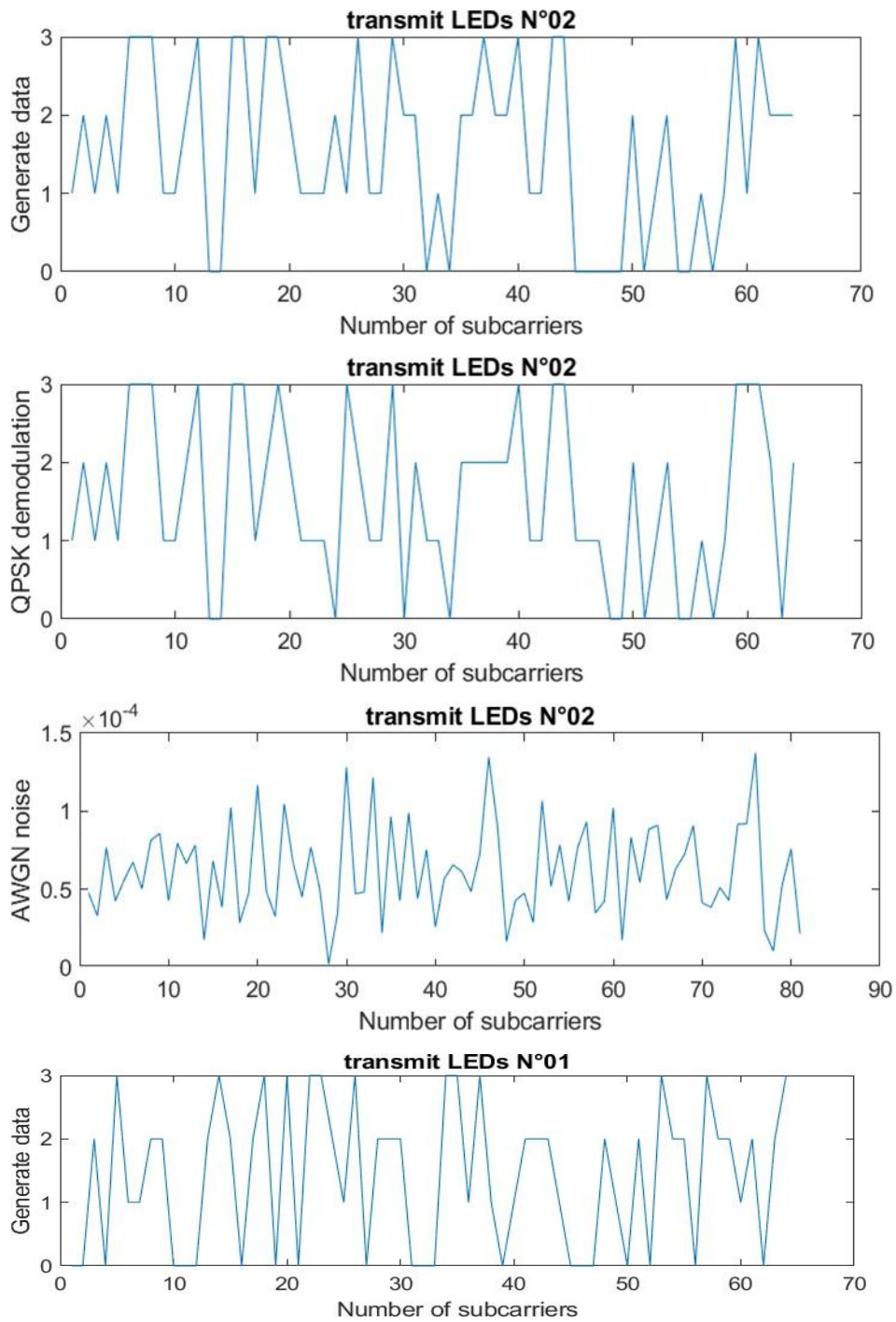


Figure III.3: Représente Sortie IFFT et signal continu après conversion

Dans la figure III.3 nous ayons un système OFDM avec 64 sous-porteuses et une taille d'IFFT de 64 points. Après avoir effectué l'IFFT, nous obtenons un signal de sortie de l'IFFT qui est une séquence temporelle de 64 échantillons. Ce signal de sortie représente la combinaison des sous- porteuses représenté graphiquement dans le domaine temporel.



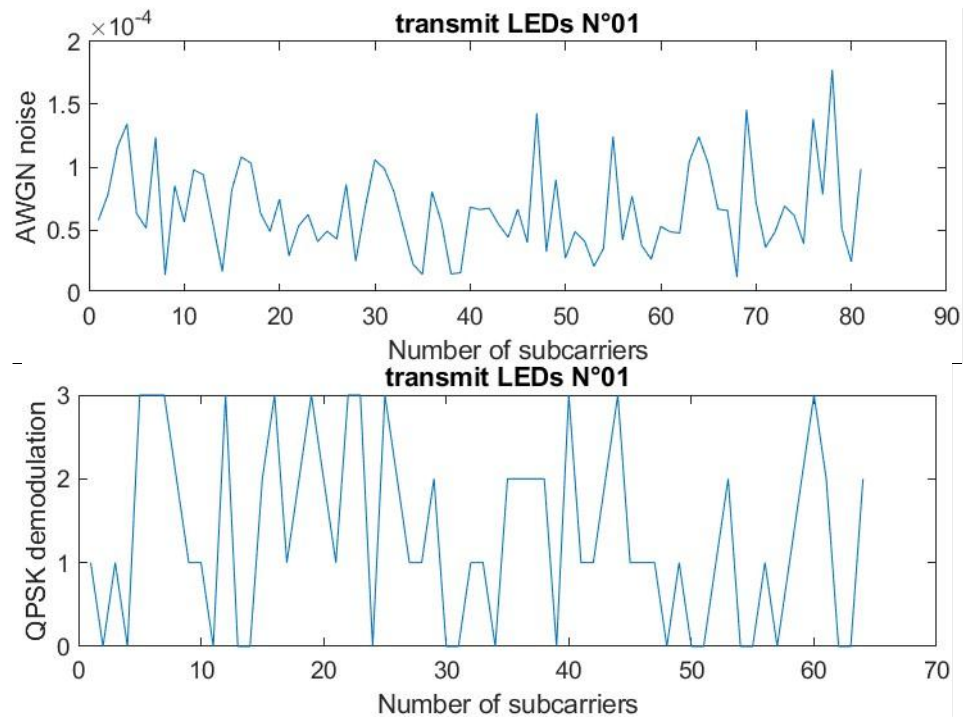
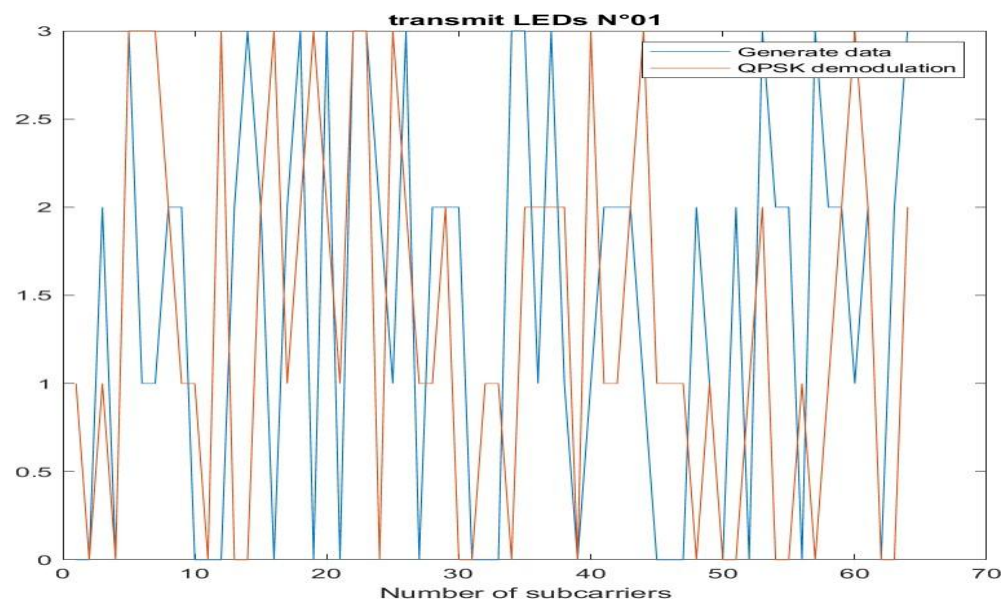


Figure III.4



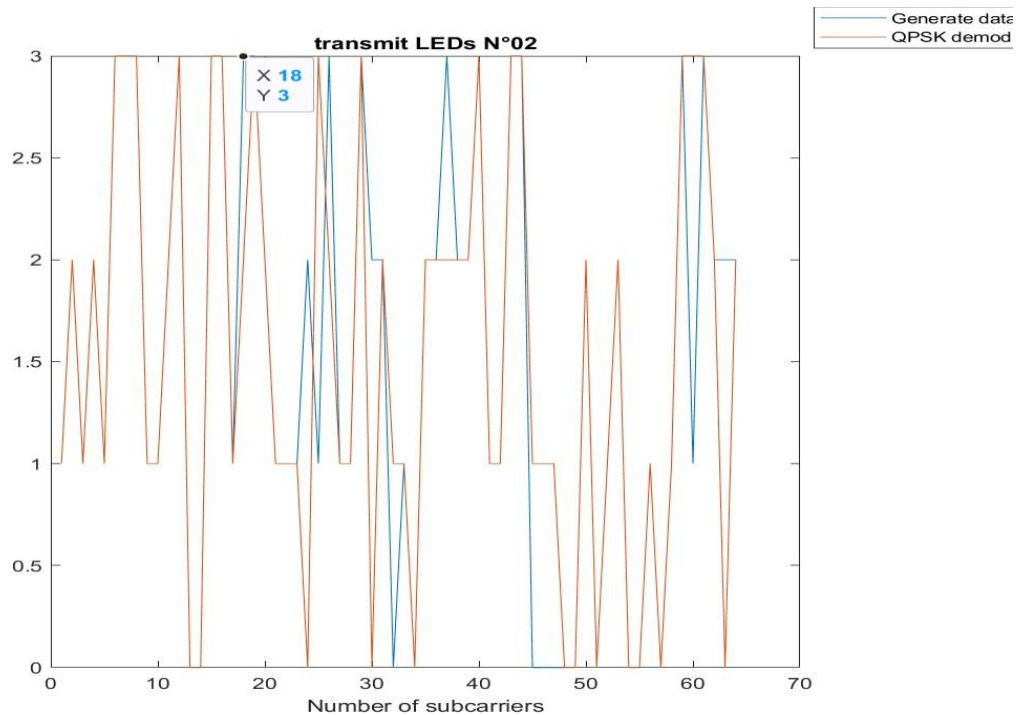


Figure III.5: signal transmit par les LEDs.

Pour analyser la courbe de conversion du signal LED, nous pouvons mesurer l'intensité lumineuse émise par la LED en fonction du temps.

Lorsque le bit "1" est transmis, l'intensité lumineuse de la LED sera élevée, tandis que pour le bit "0", l'intensité lumineuse sera faible.

Les impulsions lumineuses correspondant aux bits "1" auront une intensité élevée, tandis que celles correspondant aux bits "0" auront une intensité faible.

En analysant cette courbe, nous pouvons mesurer des paramètres importants tels que la durée des impulsions lumineuses, l'amplitude des impulsions lumineuses, le taux de transmission des bits et la qualité du signal.

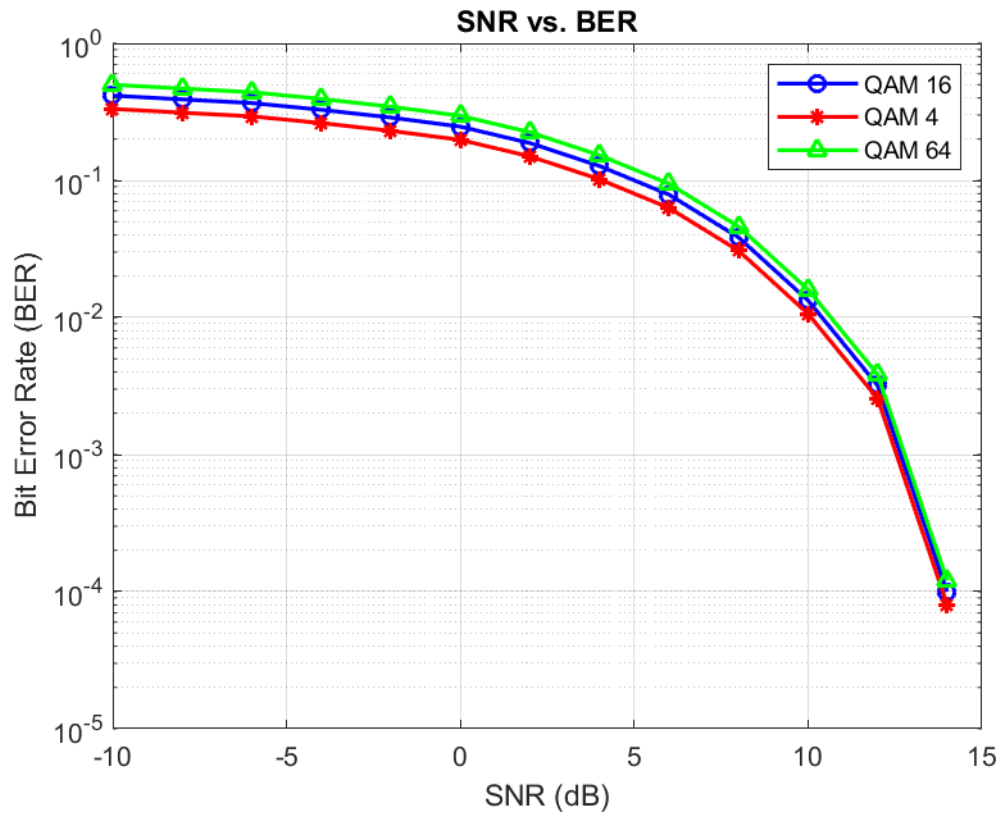


Figure III.6: Performances BER vs SNR obtenues avec la technique MIMO-OFDM pour système VLC avec QAM-4/QAM-16/QAM-64

La figure III.6 illustre les performances BER du système VLC-OFDM pour QAM-4, QAM-16, QAM-64 avec différentes valeurs de QAM. A titre d'exemple, pour $BER = 10^{-1}$, le SNR correspondant est d'environ 4dB, 5dB, 6dB, pour QAM-4, QAM-16, QAM-64 respectivement. Il est clair que le BER diminue avec l'augmentation de SNR.

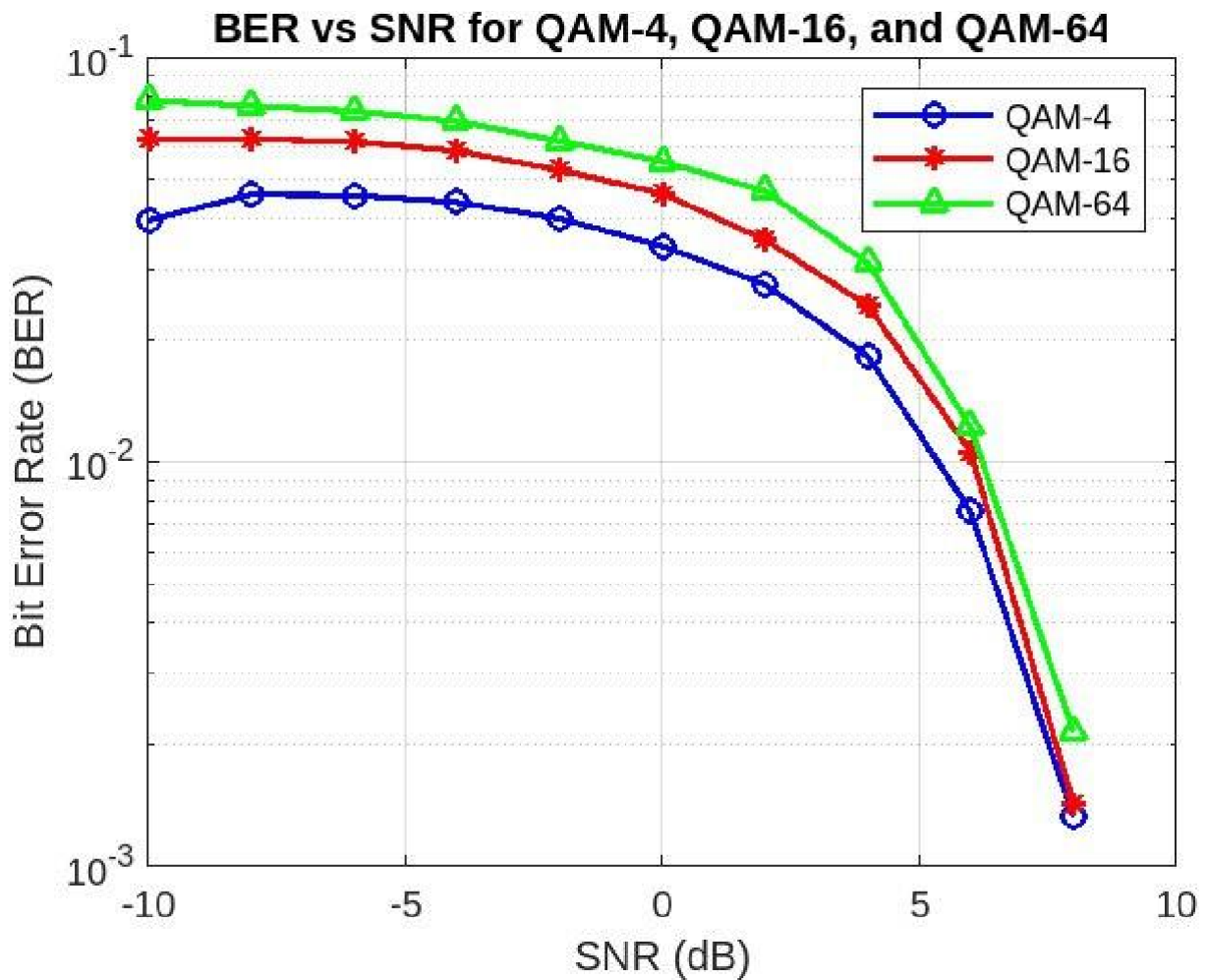


Figure III.7: Performances BER vs SNR obtenues avec la technique SISO-OFDM pour system VLC avec QAM-4/QAM-16/QAM-64

La figure III.7 illustre Les performances BER du système VLC-OFDM pour QAM-4, QAM-16, QAM-64 avec différentes valeurs de QAM. A titre d'exemple, pour $BER = 10^{-2}$, le SNR correspond est d'environ 5dB, 6dB, 7dB, pour QAM-4, QAM-16, QAM-64 respectivement. Il est clair que le BER diminue avec l'augmentation de SNR.

Comparaison parmi deux systèmes MIMO et SISO

- Le SISO-OFDM utilise une seule LED pour la transmission et une seule photodiode à la réception, tandis que le MIMO-OFDM utilise plusieurs LED et PDS pour améliorer la performance de communication.
- En général, le MIMO-VLC-OFDM peut offrir une meilleure capacité de transmission, une plus grande robustesse face aux interférences et une plus grande capacité à gérer les conditions de canal difficiles par rapport au SISO-VLC-OFDM.
- Les performances BER vs SNR obtenues avec le MIMO-VLC-OFDM peuvent montrer des niveaux d'erreur plus faibles à des SNR donnés par rapport au SISO-VLC-OFDM.

Conclusion

Le système MIMO-OFDM dans le contexte de la communication VLC a montré des performances supérieures, ce qui a un impact significatif sur la qualité de communication et l'efficacité de transmission des applications VLC. Les résultats de la simulation mettent en évidence les avantages du système MIMO-OFDM-VLC par rapport aux systèmes (SISO).

Par rapport aux systèmes SISO, le MIMO-OFDM-VLC offre une meilleure efficacité de transmission et un débit de données plus élevé. Cela est dû à l'exploitation des multiples chemins de propagation et à la capacité de transmettre plusieurs flux de données simultanément. En conséquence, le MIMO-OFDM-VLC peut prendre en charge des applications VLC qui nécessitent des débits de données plus élevés et une transmission plus fiable.

Conclusion générale

Conclusion générale

La communication par lumière visible est l'une des technologies les plus prometteuses dans les communications sans fil. La technologie VLC utilise des signaux optiques pour transmettre des données par lumière visible, ce qui signifie que les systèmes d'éclairage qui existent déjà dans l'infrastructure existante peuvent être exploités pour fournir la connectivité et la communication des données.

Avec une demande accrue de vitesses de données sans fil et une qualité de communication améliorée, le développement du système VLC est devenu important pour répondre à ces exigences. La technologie MIMO-OFDM est une technologie qui peut être utilisée pour améliorer les performances du système VLC.

Cette technologie dépend de l'utilisation d'une gamme d'antennes pour envoyer et recevoir des signaux optiques, en divisant la fréquence utilisée en plusieurs parties pour transmettre des données en parallèle. Grâce à cette division, des vitesses de transmission élevées peuvent être atteintes et la qualité de connectivité du système VLC améliorée.

La présente note vise à étudier la performance du système MIMO-OFDM dans l'amélioration de la performance du système VLC. Les performances du système seront analysées en fonction de critères de performance tels que le taux d'erreur binaire (BER) et le rapport signal-bruit (SNR), et différentes techniques de chiffrement telles que QAM-4, QAM-16 et QAM-64 seront utilisées pour évaluer les performances du système dans différentes conditions.

En comprenant l'impact de la technologie MIMO-OFDM sur les performances du système VLC, il est possible d'améliorer la vitesse des données et la qualité des communications, permettant ainsi de nouvelles utilisations avancées du système VLC dans des domaines tels que les communications sans fil intérieures, l'éclairage intelligent, les communications robotisées.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Maha, B. Z., & Kosai, R. (2013). Multi User MIMO Communication: Basic Aspects, Benefits and Challenges. *Recent Trends in Multi-user MIMO Communications*, 3-24.
- [2] Ngo, H.Q.; Larsson, E.G.; Marzetta, T.L. Aspects of favorable propagation in Massive MIMO. In Proceedings of the 2014 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lisbon, Portugal, 1–5 September 2014. [[Google Scholar](#)].
- [3] Foschini, G.J.; Gans, M.J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas. *Wirel. Pers. Commun.* **1998**, *6*, 311–335. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
- [4] Coelho, F.; Dinis, R.; Souto, N.; Montezuma, P. On the impact of multipath propagation and diversity in performance of iterative block decision feedback equalizers. In Proceedings of the 2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, WiMob'2010, Niagara Falls, ON, Canada, 11–13 October 2010; pp. 246–251. [[Google Scholar](#)].
- [5] Goldsmith, A.; Jafar, S.; Jindal, N.; Vishwanath, S. Capacity limits of MIMO channels. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **2003**, *21*, 684–702. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)].
- [6] Alamouti, S.M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **1998**, *16*, 1451–1458. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
- [7] Alkhateeb, A.; Mo, J.; González-Prelcic, N.; Heath, R.W. MIMO precoding and combining solutions for millimeter-wave systems. *IEEE Commun. Mag.* **2014**, *52*, 122–131. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
- [8] Castanheira, D.; Lopes, P.; Silva, A.; Gameiro, A. Hybrid Beamforming Designs for Massive MIMO Millimeter-Wave Heterogeneous Systems. *IEEE Access* **2017**, *5*, 21806–21817. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
- [9] Heath, R.W.; Gonzalez-Prelcic, N.; Rangan, S.; Roh, W.; Sayeed, A.M. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems. *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.* **2016**, *10*, 436–453. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
- [10] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 10, no. 6, pp. 585-595, November/December 1999.
- [12] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, March 1998.

[11] J. C. Preisig, S. A. Jafar, and A. Paulraj, "MIMO communication for wireless networks: Hierarchical codes and beyond," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 6, pp. 104-114, June 2003.

[12] Hochwald, B. M., & Marzetta, T. L. (2000). Unitary space-time modulation for multiple-antenna communications in Rayleigh flat fading. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2), 543-564. DOI: 10.1109/18.825825.

[13] Larsson, E.G.; Edfors, O.; Tufvesson, F.; Marzetta, T.L. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Commun. Mag.* **2014**, 52, 186–195. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version].

[14] Maaref, A.; Aïssa, S. Closed-form expressions for the outage and ergodic Shannon capacity of MIMO MRC systems. *IEEE Trans. Commun.* **2005**, 53, 1092–1095. [Google Scholar] [CrossRef].

[15] Fatema, N.; Hua, G.; Xiang, Y.; Peng, D.; Natgunanathan, I. Massive MIMO Linear Precoding: A Survey. *IEEE Syst. J.* **2018**, 12, 3920–3931. [Google Scholar] [CrossRef].

[16] Marzetta, T.L.; Hochwald, B.M. Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading. *IEEE Trans. Inf. Theory* **1999**, 45, 139–157. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version].

[17] Zhang, Q.; Jin, S.; McKay, M.; Morales-Jimenez, D.; Zhu, H. Power Allocation Schemes for Multicell Massive MIMO Systems. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* **2015**, 14, 5941–5955. [Google Scholar] [CrossRef]

[18] Sanguinetti, L.; Björnson, E.; Hoydis, J. Toward Massive MIMO 2.0: Understanding Spatial Correlation, Interference Suppression, and Pilot Contamination. *IEEE Trans. Commun.* **2020**, 68, 232–257. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version].

[19] عبد الناصر زونل، نظام متعدد المداخل والمخارج **mimo** مكييف لؤزوات النص اللت المنقورة
الخنوت، الم عهد العالي للعلوم التطبؤية والتكنولوجيا، قسم النص اللت، سوريا، 2015-2014.

[20] KH. Daoud, "simulation comparative des techniques TBMC et OFDM pour les réseaux 5G," , Mémoire de Master, université de Tlemcen, Juin 2016

[21] N. Larbi, "Détection multiutilisateurs dans le contexte de communication mobile, Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA," Thèse de doctorat, Université d'Oran mohamedboudiaf. 2015.

[22] S. Dimitrov and H. Haas, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 16, pp. 2771-2783, 2014

Bibliographie

- [23] Haas, H. (2011). Wireless data from every light bulb. TEDGlobal. Retrieved from https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb?language=en
- [24] UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO, CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN FISICA DELLE TECNOLOGIE AVANZATE
- [25] L. Li, H. Arnon, and J. Chen, "Visible light communication: modulation schemes and applications," *Communications Surveys&Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1672-1690, 2013.
- [26] M. Uysal and D. Capsoni, "Visible light communications: a survey on architectures, applications and technological challenges," *IEEE Communications Surveys&Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1679-1717, 2013
- [27] Monographie Li-Fi[en ligne], consulté le 14 mai 2017, disponible sur : <http://Li-Fi.insa-rennes.fr/wp-content/uploads/2015/04/Monographie-Li-Fi-VersionFinale1.pdf>
- [28] "5G-VLC: When 5G Meets VLC Technology" par Wasiiu O. Popoola, ZabihGhassemlooy et SujunRajbhandari, publié dans le journal *IEEE Wireless Communications*.
- [29] Li, X., Zhang, J., Li, C., Wang, Z., Wang, Y., & Chi, N. (2017). Performance analysis of OFDM-based visible light communication systems with different modulation schemes. *Optik*, 143, 60-65.
- [30] Khan, M. R., Ghassemlooy, Z., Rajbhandari, S., & Ijaz, M. (2019). Performance analysis of an OFDM-based VLC system in the presence of inter-symbol interference. *Optik*, 185, 14-20.
- [31] Title: Performance Analysis of DCO-OFDM Systems for Visible Light Communication Authors: R. N. Thiagarajan, S. Chenniappan Conference: 2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and.
- [32] Title: Visible Light Communication: Challenges, Opportunities, and Implementation Perspectives Authors: Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari Journal: *IEEE Communications Magazine*, Volume 50, Issue 3, March 2012
- [33] Li, C., Li, X., Zhang, J., Wang, Z., & Chi, N. (2019). A novel visible light communication system based on OFDM and polarization division multiplexing. *Optik*, 191, 184-190.
- [34] D. S. P. Karthikeyan, R. OFDM Signal Improvement Using Radio over Fiber for Wireless System, *IJCNWC*, vol. 3, no. June, pp. 287-291, 2013