

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE

L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT GÉNIE ÉLECTRIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

EN VUE D'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER

OPTIONS RÉSEAUX ET SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS

Introduction du massive MIMO au réseau cellulaire 5G

Réalisé par :

Mlle.AOUGHLIS Nacera

Mlle.BENABDALLAH Sonia

Encadré par :

M.BELLAHSENE Hocine

Devant le jury composé de :

M.AZNI Mohamed

Mme.HAMZAOUI Dahbia

Promotion 2019 - 2020

RESUMÉ

La demande de débit sans fil, mobile et fixe, augmentera toujours. On peut prévoir que, dans cinq ou dix ans, des millions d'utilisateurs de réalité augmentée dans une grande ville voudront transmettre et recevoir de la vidéo haute définition personnelle 3D plus ou moins en continu, soit 100 mégabits par seconde et par utilisateur dans chaque sens. Massive MIMO également appelé systèmes d'antennes à grande échelle, est une technologie candidate prometteuse pour répondre à cette demande. Des améliorations de l'efficacité spectrale de 50 fois ou plus par rapport à la technologie de quatrième génération (4G) sont fréquemment mentionnées. Une multiplicité d'antennes physiquement petites et contrôlées individuellement effectue un multiplexage / démultiplexage agressif pour tous les utilisateurs actifs, en utilisant des caractéristiques de canal directement mesurées. Massive MIMO est évolutif à n'importe quel degré souhaité en ce qui concerne le nombre d'antennes de service. L'ajout d'antennes supplémentaires est toujours bénéfique pour un débit accru, une puissance rayonnée réduite, un service uniformément excellent partout dans la cellule et une plus grande simplicité dans le traitement du signal. Massive MIMO est une toute nouvelle technique actuellement utilisée dans certains pays où la technologie 5G vient d'être déployée.

ABSTRACT

The demand for wireless, mobile and fixed speed will always increase. It can be predicted that in five or ten years, millions of augmented reality users in a large city will want to transmit and receive personal high-definition 3D video in varying degrees continuous, or 100 megabits per second per user in each direction. Massive MIMO also referred to as large-scale antenna systems is a promising candidate technology to meet this demand, with spectral efficiency improvements of 50 times or more over fourth generation (4G) technology frequently mentioned. A multiplicity of physically small and individually controlled antennas performs aggressive multiplexing / demultiplexing for all active users, using directly measured channel characteristics. Massive MIMO is scalable to any desired degree with respect to the number of antennas in service. Adding additional antennas is always beneficial for increased throughput, reduced radiated power, consistently excellent service throughout the cell, and greater simplicity in signal processing. Massive MIMO is a brand new technique currently being used in some countries where 5G technology has just been deployed.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre tuteur pédagogique Hocine BELLAHSENE pour tout le temps qu'il nous a consacré, ses directives précieuses, et pour la qualité de son suivi.

Nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants de la formation Master 2 Réseaux et Systèmes De Télécommunication, qui, par leurs enseignements, leurs encouragements et leur aide, ont contribué à notre formation.

Nous souhaitons enfin remercier chaleureusement nos parents pour leur amour et leurs sacrifices, ainsi que toutes nos familles et en particulier nos frères, soeurs et nos amies, qui nous ont toujours épaulé durant nos années d'études. Qu'ils trouvent dans ces lignes le témoignage de notre éternelle reconnaissance.

TABLE DES MATIÈRES

Resumé	1
Abstract	2
Table des matières	IV
Liste des figures	VI
Listes des abréviations	VIII
Introduction générale	1
1 LA TECHNOLOGIE 5G	2
1.1 INTRODUCTION	2
1.2 HISTORIQUE	3
1.3 Techniques utilisées dans la 5G	4
1.3.1 Choix des ondes millimétriques	5
1.3.2 Déploiement de micros-cellules	6
1.3.3 Massive MIMO	7
1.3.4 Le beamforming	8
1.3.5 Le mode Full-duplex	9
1.4 La normalisation	10

1.5	Les fréquences retenues	11
1.6	Architecture globale de la 5G	12
1.7	Les domaines d'utilisation de la 5G	13
1.8	Les défis soulevés par la 5G	15
1.9	conclusion	16
2	MASSIVE MIMO	17
2.1	INTRODUCTION	17
2.2	Définition du massive MIMO	18
2.3	Système massive MIMO	18
2.3.1	Transmission de liaison montante (UpLink)	19
2.3.2	Transmission de liaison descendante (DownLink)	20
2.4	Le beamforming	20
2.4.1	Le Beamforming numérique (DBF)	21
2.4.2	Le Beamforming analogique (ABF)	22
2.4.3	Le Beamforming hybride	23
2.5	Précodage	24
2.5.1	Les techniques d'égalisation du massive MIMO en UL	24
2.5.1.1	Maximisation du SNR (MRC)	25
2.5.1.2	Minimisation de MUI (ZF)	26
2.5.1.3	Erreur quadratique moyenne minimale (MMSE)	27
2.5.2	Les techniques de beamforming massive MIMO en DL	27
2.5.2.1	Maximisation de la puissance reçue (MRT)	28
2.5.2.2	Minimisation de MUI (ZF)	28
2.5.2.3	Minimum Mean-Squared Error (MMSE)	29
2.6	Contamination des pilotes	29
2.7	Estimation du canal	30
2.7.1	Mode TDD (Time division duplex)	31
2.7.2	Mode FDD (frequency division duplex)	32
2.8	Efficacité spectrale	32
2.9	Les avantages de massive MIMO pour la 5G	33

2.10 Conclusion	34
3 PRINCIPE DE L'OFDM	35
3.1 INTRODUCTION	35
3.2 L'OFDM	36
3.3 Association MIMO-OFDM	37
3.3.1 chaîne de transmission MIMO-OFDM	37
3.3.2 Avantages de l'OFDM	38
3.3.3 Inconvénients de l'OFDM	39
3.4 Conclusion	39
4 Simulations et résultats	41
4.1 INTRODUCTION	41
4.2 Bit Error Rate (BER)	41
4.3 Signal-to-Noise Ratio (SNR)	41
4.4 La technologie 5G	42
4.4.1 Création d'une BS sur une fréquence de 28 GHz	42
4.4.2 Création d'un réseau d'antennes de station de base 8 par 12	43
4.4.3 Création d'un réseau d'antennes 3 par 3 sur le site du récepteur	44
4.4.4 Prédiction de la force du signal dans l'espace libre avec le beamforming	45
4.4.5 Transmission simultanée	46
4.4.6 Ajout de l'affaiblissement des trajets (Add Path Loss Impairments)	47
4.4.7 Performances dans la bande de 3,5 GHz	48
4.4.8 Les puissances à chaque site récepteur	48
4.5 Introduction du beamforming lors de la transmission	49
4.6 Précodage	50
4.6.1 En liaison montante	51
4.6.2 En liaison descendante	52
4.7 Comparaison entre MIMO-OFDM et le massive MIMO	53
4.8 Conclusion	55
Conclusion générale	56

A	57
A.1 New Generation Radio Acces Network (NG-RAN)	57
A.1.1 Le réseau cœur de la 5G (Core Network 5GC)	58
A.2 La nouvelle interface radio5G (New Radio	58
A.3 Types de modulation utilisés	59
B	60
B.1 Types de Massive MIMO	60
B.1.1 Single-User Massive MIMO	60
B.1.2 Multi-User Massive MIMO	61
B.1.3 Multi-User Massive MIMO avec scenario Multi-Cell	63
B.1.4 Massive MIMO distribuée	64
C	65
C.1 Définition du PAPR	65
C.2 Méthodes de réduction du PAPR	65
C.3 Principe des modulations multi-porteuses	66
C.4 Porteuse orthogonale	67
C.5 Interférences entre porteuses et symboles :	69
C.6 Intervalle de garde	70
C.6.1 Remplissage par des zéros	71
C.6.2 Préfixe cyclique	72
C.6.3 Suffixe cyclique	72
Bibliographie	73

LISTE DES FIGURES

1.1	Principe et techniques utilisés dans la technologie 5G [19].	5
1.2	Le spectre électromagnétique [19].	6
1.3	Station de base sous forme de Microcellules par Ericsson [20].	7
1.4	Massive MIMO[21].	8
1.5	Technologie full duplex [14].	10
1.6	Calendrier de la normalisation de la 5G [15].	11
1.7	Spectre des fréquences 5G[23].	12
1.8	Architecture de réseau 5G [17].	13
1.9	Répartition des applications 5G en trois domaines d'utilisation [24].	14
2.1	Illustration d'antennes basées sur le Massive MIMO [27].	18
2.2	Illustration de la transmission de liaison descendante et de liaison montante dans un système massive MIMO[14].	19
2.3	Beamforming pour le massive MIMO[14].	21
2.4	Beamforming numérique[8].	22
2.5	Beamforming analogique[8].	23
2.6	beamforming hybride[8].	24
2.7	Contamination du pilot[10]	30
2.8	Système TDD et FDD [14].	31

3.1	Principe de l'OFDM.	37
3.2	Schéma fonctionnel simplifié du système MIMO-OFDM[12].	38
4.1	Implémentation du réseau d'antennes.	43
4.2	Réseau d'antennes de station de base 8 par 12.	44
4.3	Réseau d'antennes 3 par 3 sur le site du récepteur	45
4.4	Transmission à tour de rôle.	46
4.5	Transmission simultanée	47
4.6	BER en fonction du SNR pour transmission sans fil avec et sans le beamforming.	50
4.7	Efficacité spectrale de liaison montante en fonction de nombre d'antennes M de BS pour des différents précodages [7].	51
4.8	Efficacité spectrale de liaison descendante en fonction du nombre d'antennes M de BS pour des différents pré-codages[7].	52
4.9	BER en fonction du SNR pour le massive MIMO et le MIMO-OFDM.. . . .	54
A.1	Architecture de NG-RAN [17].	57
B.1	SU Massive MIMO [2]	61
B.2	Système MU Massive MIMO. M-antennes de la BS desserve K UT[2].	62
B.3	La station de base dans la l^{me} cellule et le k^{me} utilisateur dans la j^{im} cellule[2].	64
C.1	Modulation OFDM.	66
C.2	Schéma de principe d'un modulateur OFDM[4].	67
C.3	Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.	68
C.4	Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse	69
C.5	Propagation des trames OFDM sans intervalle de garde : retards, trajets mul- tiples et interférences [5].	70
C.6	Intervalle de garde [5].	71
C.7	Préfixe cyclique.	72

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Évolution de la téléphonie au fil des générations [18]	4
1.2	Principales caractéristiques des domaines d'utilisation de la 5G[18].	15
4.1	les coordonnées GPS de la BS et les sites récepteurs	42
4.2	Les puissances reçues à chaque site récepteur	49
4.3	paramètres utilisés dans la transmission sans et avec beamforming.	49
4.4	Paramètres utilisés dans la liaison montante et descendante.	51
4.5	paramètres du système MIMO-OFDM.	53
4.6	paramètres utilisés dans le système massive MIMO	54

LISTES DES ABRÉVIATIONS

3GPP : 3rd **G**eneration **P**artnership **P**roject

5G : Cinquième **G**énération

ABF : Analogique **B**eam**F**orming Analogique

AN : **A**ccess **N**etwork

CDMA : **C**ode **D**ivision **M**ultiple**A**ccess

CP : **C**yclic **P**refix

CSI : **C**hannel **S**tate **I**nformation

DAC : **D**igital **A**nalog **C**onverter

DBF : **D**igital **B**eam**F**orming

DL : **D**ownlink

DVB : **D**igital **V**ideo **B**roadcasting

EDGE : **E**nhanced **D**ata **R**ate for **G**SM **E**volution

eNB : evolved **N**ode **B**

FDD : **F**requency **D**ivision **D**uplex

FFT : **F**ast **F**ourier **T**ransform

GSM : **G**lobal **S**ystem for **M**obile **C**ommunications

gNB : **N**ext generation **N**ode**B**

HD : **H**igh **D**efinition

HSPA : **H**igh **S**peed **P**acket **A**ccess

IEEE : **I**nstitute of **E**lectrical and **E**lectronics **E**ngineers

IFFT : Inverse Fast Fourier Transform

ICI : Inter Carrier Interference

IOT : Internet Of Things

ISI : Inter Symbol Interference

ISP : Internet Provider Service

LAN : Local Area Network

LTE : Long Term Evolution

M2M : Machine to Machine

MIMO : Multiple Input Multiple Output

MF : Matched Filter

MMSE : Minimum Mean Square Error

mMTC : massive Machine-Type Communication

MRC : Maximum Ratio Combining

MRT : Maximum Ratio Transmission

MU-MIMO : Multi User MIMO

NG-RAN : Next Generation Radio Access Network

NR : New Radio

MUI : Multi User Interference

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PAPR : Peak to Average Power Ratio

PDU : Protocol Data Unit

PRBS : Pseudo Random Binary Sequence

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

RF : Radio Frequency

RZF : Regularized Zero Forcing

SE : Spectral Efficiency

SIMO : Single Input Multi Output

SINR : Single to Interference plus Noise Ratio

SISO : Single Input Single Output

SMS : Short Message Service

SNR : Signal to Noise Ratio

SU-MIMO : Single User MIMO

UL : Up Link

UT : User Terminal

UIT : Union International Telecommunication

URLLC : Ultra Reliable Low Latency Communication

WLAN : Wireless Local Area Network

ZF : Zero Forcing

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La pénurie mondiale de bande passante dans le secteur des communications sans fil a motivé l'étude et l'exploration d'une technologie d'accès sans fil connue sous le nom de MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Actuellement, massive MIMO a fait son apparition pour être l'une des principales technologies habilitantes pour les réseaux de prochaine génération. Cette technique regroupe les antennes de l'émetteur et du récepteur pour fournir une efficacité spectrale et énergétique élevée tout en utilisant un traitement relativement simple. Obtenir une meilleure compréhension du système massive MIMO est l'un des objectifs de ce mémoire. Les systèmes Massive MIMO combinés aux technologies de réseaux d'antennes de beamforming devraient jouer un rôle clé dans les systèmes de communication sans fil pour la génération 5G actuellement en déploiement. De plus, les techniques d'antennes multiples à efficacité spectrale fait de l'OFDM un bon candidat pour surmonter les problèmes de sélection de fréquence. L'association qui en découle a fait apparaître le concept du MIMO-OFDM. Nous avons structuré ce mémoire consacré au massive MIMO pour le réseau cellulaire 5G en quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce projet est dédié à l'étude générale de la nouvelle technologie radio-mobile de 5ème génération. Dans ce contexte nous présentons un historique de l'évolution des réseaux mobile jusqu'à l'arrivée de la 5G. Par la suite, nous développons les points essentiels de la 5G. Nous terminons ce chapitre par une présentation des technologies clés des réseaux 5G.

Après avoir montré la modification apportée par la 5G (NR) aux systèmes de télécommunication, nous consacrons le deuxième chapitre à l'étude de la technologie massive MIMO en passant par le beamforming et ses différentes architectures.

Dans le troisième chapitre nous présentons l'OFDM ainsi que sa description générale, ses avantages et ses inconvénients avant de décrire la combinaison MIMO-OFDM.

Au final, notre mémoire s'achèvera par un chapitre qui sera consacré à la simulation sous Matlab de tous les concepts vus en théorie. L'étude sera d'abord portée sur la planification des antennes 5G puis une analyse graphique sur le beamforming, le MIMO-OFDM, le massive MIMO et ses différents précodeurs seront détaillés.

CHAPITRE 1

LA TECHNOLOGIE 5G

1.1 INTRODUCTION

Avec la mondialisation, les réseaux de télécommunications actuels sont confrontés à une forte demande de trafic et pour répondre à ces besoins, les systèmes cellulaires sont déployés à quelques centaines de mètres et les réseaux locaux sans fil (LAN) sont placés presque partout. Parallèlement à l'augmentation du service mobile à large bande, l'introduction de nouveaux concepts tels que l'Internet des objets (IoT) et la communication machine à machine (M2M) contribuent également à l'augmentation du trafic sans fil. Le déploiement mondial du service cellulaire cultive énormément les utilisateurs de téléphones portables pour qu'ils soient habitués aux données mobiles dans leur vie quotidienne. Les services comme les appels vidéo, les jeux en ligne, les applications de médias sociaux comme Facebook, Twitter, WhatsApp, ont radicalement changé notre vie avec les capacités de la troisième génération (3G) et de la quatrième génération (4G). Ce changement est encore plus accentué avec l'avènement de la cinquième génération (5G), qui a pour objectif, la réduction de la latence et l'augmentation du débit de données. Un monde entièrement connecté au téléphone portable est attendu dans les prochaines années, qui sera principalement caractérisé par la croissance des utilisateurs, une connectivité permanente et diversifiée, un volume de trafic de données croissant et une large gamme d'applications. Au cours des prochaines années, des technologies comme

la réalité augmentée, la réalité virtuelle, la vidéo ultra haute définition, la vidéo 3D et des fonctionnalités comme un cloud mobile deviendront populaires pour enrichir l'utilisateur ultime.

Ce chapitre va représenter une introduction à la 5G en commençant par un bref historique sur la téléphonie mobile, une explication du principe de fonctionnement de cette nouvelle technique avant de découvrir son architecture réseau, son domaine d'utilisation et ses objectifs.

1.2 HISTORIQUE

La technologie dans le domaine de la téléphonie mobile n'a pas cessé de se développer depuis ces 10 dernières années. En effet, en quelques décennies, la qualité des signaux a connu de grands changements en passant de la 1G à la 5G. Afin de comprendre les différences entre les générations, il serait intéressant de suivre l'évolution du téléphone portable à travers l'histoire. Tout a fait au début, le réseau de première génération 1G a été mis en place dans les années 70 aux États-Unis, en Europe et en Asie. Ce réseau qui fonctionne sur un système de communication analogique n'a pas connu le succès espéré à cause de certains problèmes de communication et de la qualité des téléphones mobiles de l'époque. L'arrivée du réseau 2G dans les années 80 a sonné la révolution de la téléphonie mobile. Cette technologie repose sur l'utilisation d'un système numérique par onde électromagnétique, une innovation qui a amélioré la qualité des communications tout en permettant l'intégration de nouveaux moyens de communication comme les SMS dans les années 90.

L'an 2000 a marqué le basculement des téléphones mobiles GSM vers les smartphones. Le déploiement de la 3G a permis aux terminaux mobiles de se connecter à internet. Cette évolution a été accentuée par l'arrivée du premier iPhone d'Apple en 2007. La 3G, toujours d'actualité, utilise une bande passante d'une fréquence variant de 1,6 à 2 GHz.

À partir de 2010, la 3G s'est vue bousculée par la 4G qui est actuellement le réseau standard dans les grandes villes. Il s'agit d'un réseau qui utilise une fréquence allant de 2 à 8 GHz et qui offre un débit pouvant atteindre les 100 Mb/s à 1 Gb/s. Les opérateurs de téléphonie mobile sont actuellement entrain de mettre en place le réseau 5G. Le déploiement de ce dernier est prévu pour l'année en cours. Cette technologie permettra de profiter d'une vitesse

de connexion de 5 Go/s sur une fréquence de 28 GHz. Grâce à une telle performance, la 5G sera utilisée dans différents domaines comme l'automobile, la domotique, les objets connectés ainsi que pour le visionnage de vidéo 4K. Le tableau ci-dessous donne une comparaison entre les générations précédemment décrites[13].

Génération	Vitesse théorique	La technologie	Caractéristiques
2G	9.6/14.4kbps	TDMA,CDMA	Les téléphones compatibles 2G étaient utilisés pour passer des appels et transférer des données.
3G	3.1 Mbps	CDMA 2000 (UMST, EDGE)	La 3G a permis une navigation rapide des données sur un appareil mobile et a ouvert la voie à la vidéoconférence et au streaming.
3.5G	14,4 Mbps	HSPA	Transfert de données encore plus rapide.
4G	100-300Mbps	WiMax LTE	Des vitesses de téléchargement incroyablement rapides, ouvrant la voie au streaming HD.
5G	10-30 Gbps	Développement	Internet ultra-rapide, faible latence et fiabilité améliorée.

TABLE 1.1 – Évolution de la téléphonie au fil des générations [18]

1.3 Techniques utilisées dans la 5G

Le réseau 5G englobe un ensemble de technologies correspondant à la 5G du standard pour la téléphonie mobile. Il est validé par l'ITU (l'International Télécommunications Union) et le consortium 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Il entre officiellement en vigueur en 2020. Il s'agit d'un ensemble de protocoles et méthodes de transmission de l'information qui doit offrir à la fois de la rapidité et un temps de latence extrêmement faible

qui permettra de développer de nouveaux services et aidera à l'amélioration des systèmes existants. La 5G doit également permettre l'arrivée de nombreuses nouvelles innovations, supporter la connexion de l'ensemble des véhicules autonomes et connectés et permettre un développement dans le le domaine de la santé [14].

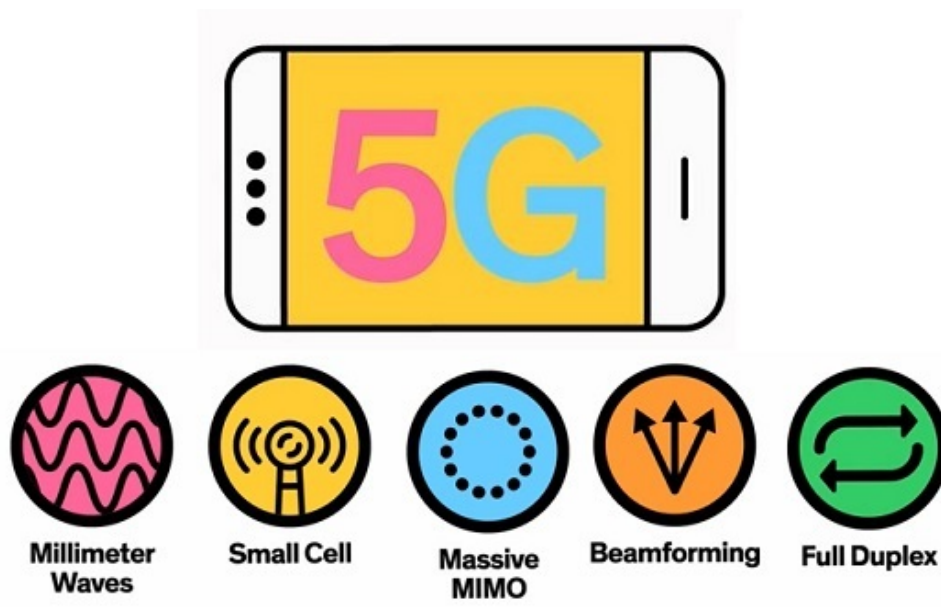


FIGURE 1.1 – Principe et techniques utilisés dans la technologie 5G [19].

1.3.1 Choix des ondes millimétriques

Au paravent, une fréquence inférieure à 6 GHz est utilisée pour la communication cellulaire, et une fréquence supérieure à celle-ci est principalement utilisée pour d'autres services comme l'imagerie médicale, la télédétection micro-ondes, la radio amateur, l'informatique terra hertz et la radio astronomie. Cependant, l'augmentation massive du trafic de données a congestionné le spectre des fréquences radio. Le résultat est que la bande passante est limitée pour un utilisateur, ce qui entraîne une connexion plus lente et peu fiable. Une façon de résoudre ce problème consiste à utiliser une bande de fréquences, qui n'a pas été utilisée précédemment et qui est supérieure à 6 GHz pour les communications sans fil. Le choix fut alors porté sur les ondes millimétriques et dont les fréquences sont comprises entre 30 GHz et 300 GHz. Les ondes millimétriques peuvent fournir une bande passante dix fois supérieure à celle de toute la bande cellulaire 4G. Ces ondes hautes fréquence sont utilisées dans certaines applications satellitaires, mais elles n'ont jamais été utilisées pour le haut débit mobile. Ce-

pendant les longueurs d'ondes millimétriques ne conviennent pas aux applications à longue portée. De plus, elles ne peuvent pas pénétrer dans les bâtiments et les obstacles, et ont tendance à être absorbées par la pluie [14].

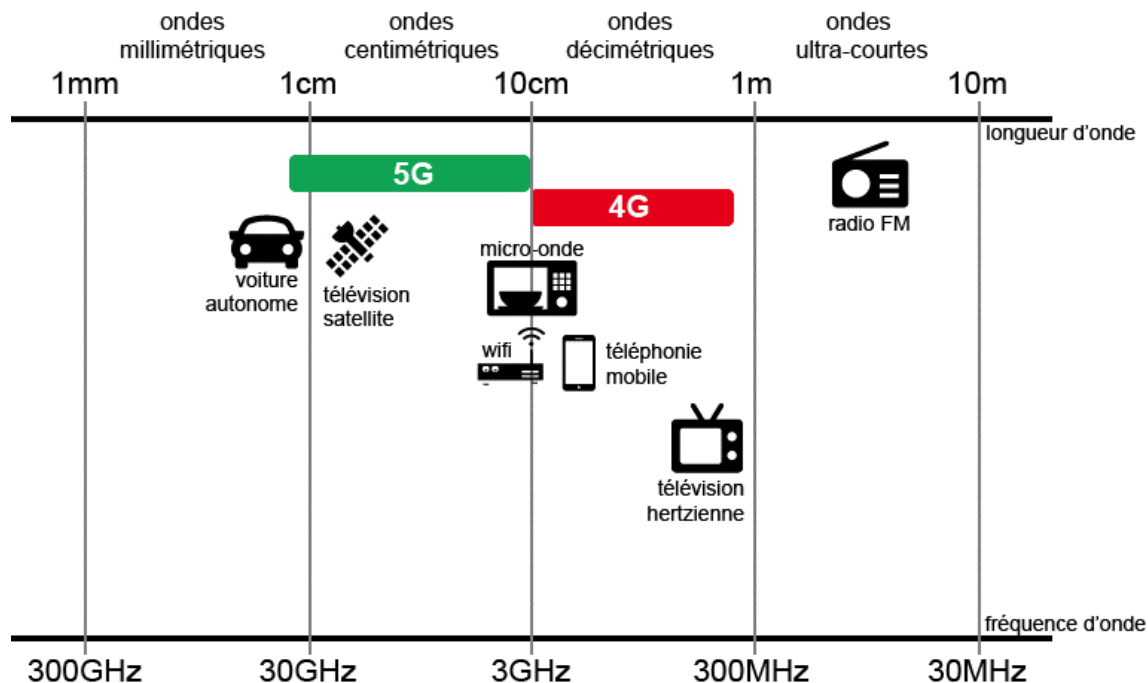


FIGURE 1.2 – Le spectre électromagnétique [19].

1.3.2 Déploiement de micros-cellules

La technique consiste à mettre en place de minuscules cellules formant des stations de base à faible puissance à 100 m d'intervalles pour couvrir de petites zones géographiques. Ces stations de base empêchent le signal de s'affaiblir dans les zones à forte demande de débit. Les petites cellules sont très légères et petites ; ainsi, elles peuvent être disposées aisément. Si nous utilisons des ondes millimétriques au lieu du spectre traditionnel inférieur à 6 GHz, la petite cellule peut devenir encore plus petite et peut être installée dans de minuscules endroits. Les petites cellules joueront un rôle important dans la fourniture du haut débit mobile et de la latence ultra faible pour la 5G. Les petites cellules peuvent être divisées en microcellules, femto-cellules et pico-cellules en fonction de la zone de couverture et du nombre d'utilisateurs qu'elle peut prendre en charge [14].

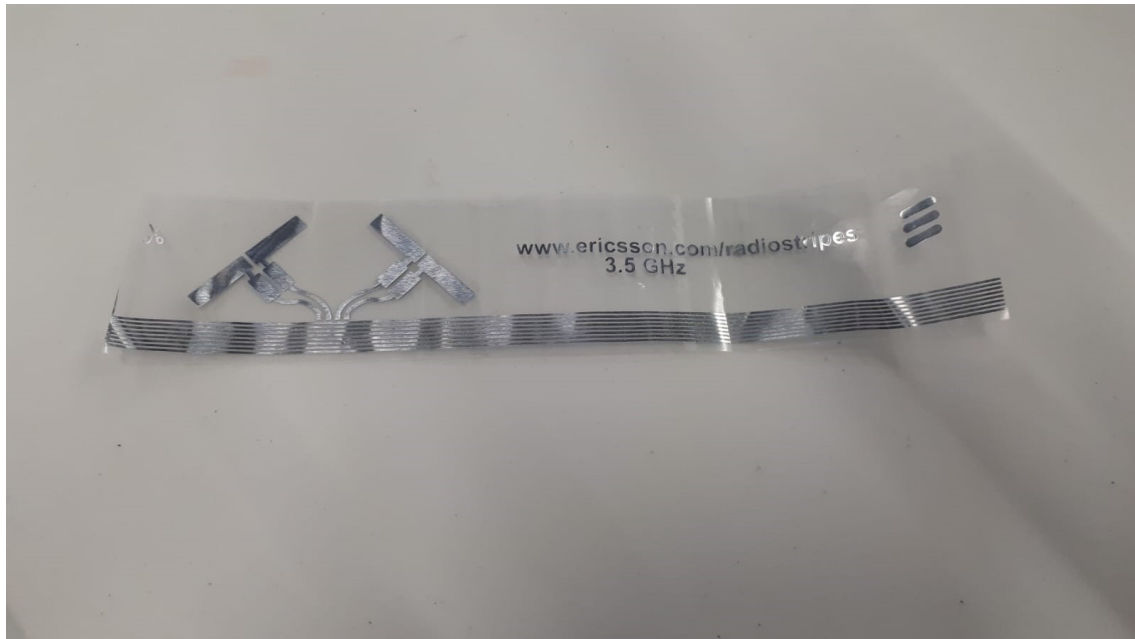


FIGURE 1.3 – Station de base sous forme de Microcellules par Ericsson [20].

1.3.3 Massive MIMO

Les systèmes MIMO font partie intégrante des systèmes sans fil actuels, et ces dernières années, ils ont été largement utilisés pour obtenir une efficacité spectrale et une efficacité énergétique élevées. Cette technique a permis de répondre à la demande accrue en débit pour un nombre d'utilisateurs très important. Pour ce faire, diverses nouvelles technologies MIMO comme le MIMO mono-utilisateur (SU-MIMO), le MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) ont été développés. Cependant, ces nouvelles technologies ne suffisent pas non plus à répondre à la demande toujours croissante. Les utilisateurs sans fil ont augmenté de façon exponentielle au cours des dernières années en produisant des milliards de données qui doivent être traitées efficacement et fiabilisées.

Massive MIMO est la technologie la plus captivante pour la 5G et au-delà de l'ère de l'accès sans fil. Massive MIMO est l'avancement des systèmes MIMO contemporains utilisés dans les réseaux sans fil actuels, qui regroupent des centaines voire des milliers d'antennes à la station de base et desservent des dizaines d'utilisateurs simultanément. Les antennes supplémentaires que le Massive MIMO utilise aideront à concentrer l'énergie dans une plus petite région de l'espace pour fournir une meilleure efficacité spectrale et un meilleur débit [14].

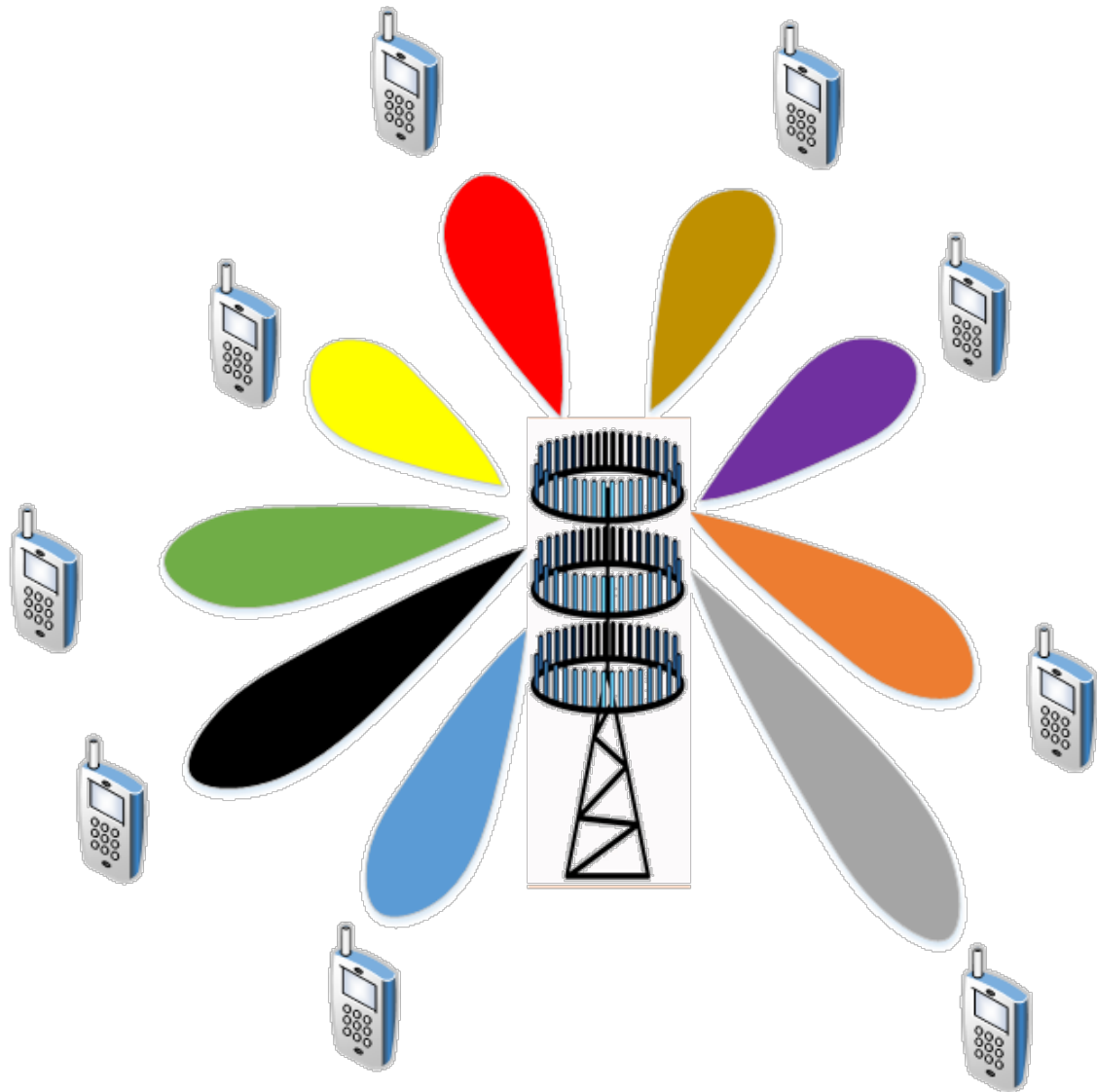


FIGURE 1.4 – Massive MIMO[21].

1.3.4 Le beamforming

C'est la capacité de la station de base à adapter le diagramme de rayonnement de l'antenne. Le beamforming aide la station de base à trouver un itinéraire approprié pour fournir des données à l'utilisateur, et elle réduit également les interférences avec les utilisateurs à proximité le long de l'itinéraire. Le beamforming présente plusieurs avantages pour les réseaux 5G et même plus. En effet, selon la situation, la technologie de beamforming peut être mise en œuvre de plusieurs manières différentes dans les futurs réseaux. Pour les systèmes massive MIMO, le beamforming aide à augmenter l'efficacité spectrale, et pour les ondes millimétriques, il aide à augmenter le débit de données. Dans les systèmes massive MIMO,

la station de base peut envoyer des données à l'utilisateur selon divers trajets, massive MIMO permet de synchroniser l'échange des paquets de données et l'instant d'arrivée permettant à plusieurs utilisateurs d'envoyer des données simultanément. Étant donné que les ondes millimétriques ne peuvent pas pénétrer à travers les obstacles et ne se propagent pas sur de plus longues distances en raison d'une longueur d'onde très courte, le beamforming aide ici à envoyer des faisceaux directs vers les utilisateurs. Cette technologie aide l'utilisateur à recevoir un signal fort sans interférences avec d'autres utilisateurs[14].

1.3.5 Le mode Full-duplex

Généralement, la transmission et la réception sans fil ne se font pas sur les mêmes bandes de fréquences pour éviter les interférences. Tout système bidirectionnel doit donc séparer le canal montant et le canal descendant en utilisant le domaine temporel TDD ou fréquentiel FDD pour obtenir des signaux orthogonaux sans interférences. Le full duplex fait référence à la transmission et à la réception simultanée sur la même bande de fréquences et en même temps, comme le montre **la figure 1.5**. Les réseaux 5G utiliseront le full duplex pour la transmission des signaux afin de potentiellement doubler la capacité du réseau. L'un des inconvénients de la technologie full-duplex est qu'elle augmente les interférences du signal avec un écho. Ce dernier est facilement éliminé avec les techniques d'égalisation au niveau du récepteur[14].

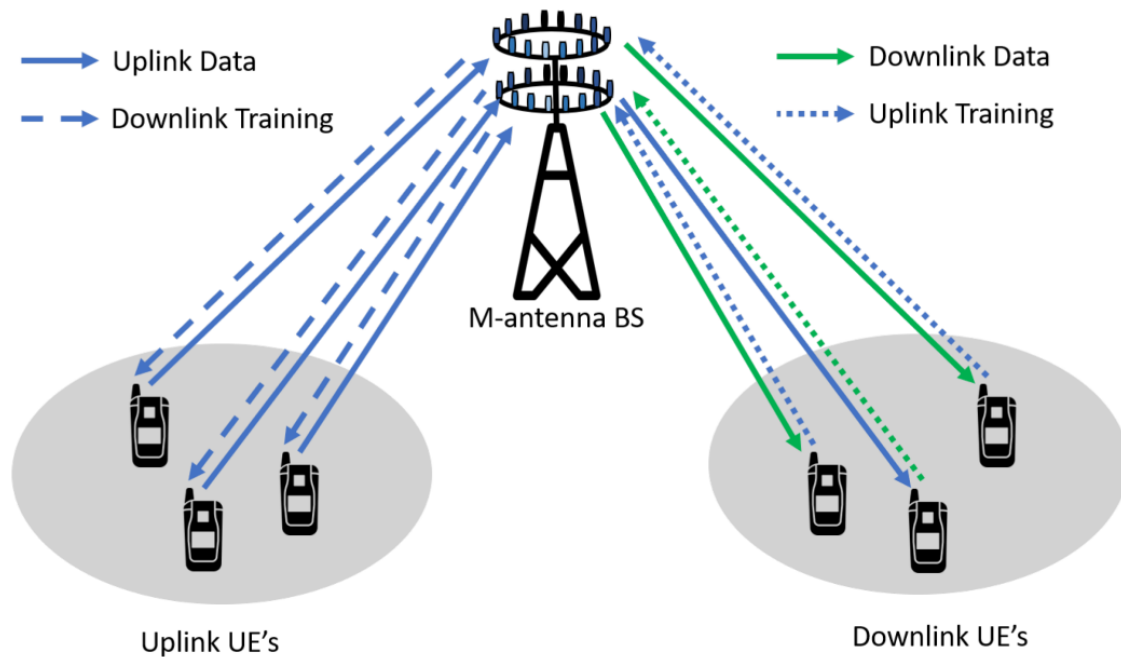


FIGURE 1.5 – Technologie full duplex [14].

1.4 La normalisation

L'organisme de normalisation 3GPP développe les spécifications et les normes du système 5G. Il s'agit d'une coopération d'organisations de normalisation et de représentants de l'industrie. Du point de vue organisationnel, le 3GPP fait partie de l'Institut Européen de Standardisation des Télécommunications (ETSI), basé dans le sud de la France. Contrairement aux précédents systèmes de radiocommunication, la 5G a été normalisée sur la base des domaines d'utilisation prédéterminés. La normalisation a permis d'obtenir des paramètres de communication flexibles afin d'offrir différents services de données pour les trois domaines d'utilisation décrits dans le **Tableau 1.2**. En juin 2018, le 3GPP a publié les spécifications 5G-NR pour le fonctionnement automatique (**figure ci-contre**). Il s'agit de la première spécification 5G [15].

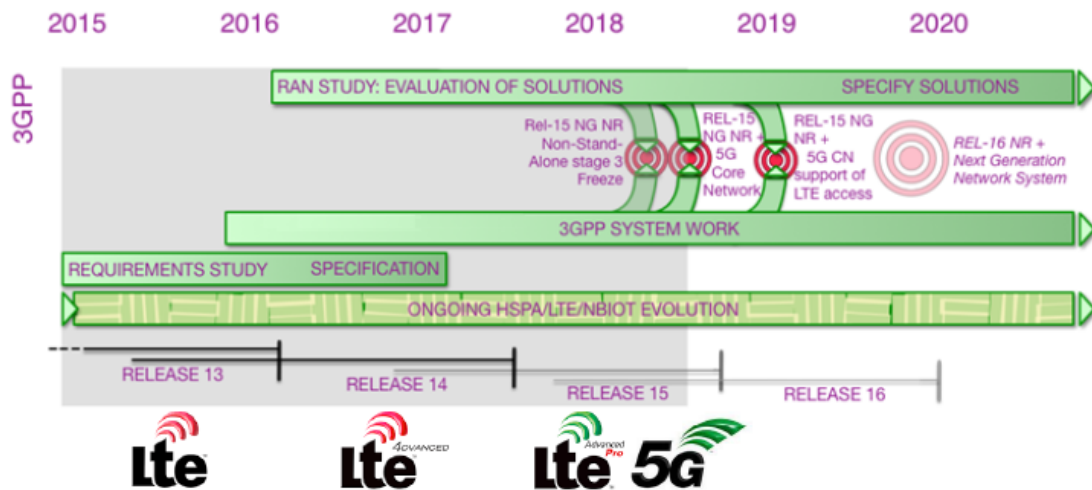


FIGURE 1.6 – Calendrier de la normalisation de la 5G [15].

1.5 Les fréquences retenues

Le choix d’une bande de fréquence représente toujours un compromis entre couverture qui est définie par la taille de la zone où le service est accessible et la capacité qui est elle-même caractérisée par exemple par le débit obtenu. Les fréquences basses sont privilégiées pour assurer une bonne couverture car elles permettent d’avoir de bonnes conditions de propagation. Pour augmenter la capacité, les fréquences hautes sont préférables car les largeurs de bandes disponibles y sont plus importantes, ce qui permet d’écouler plus de trafic. Cependant, les conditions de propagation sont plus difficiles à haute fréquence car l’environnement perturbe alors beaucoup la propagation, notamment à l’intérieur des bâtiments du fait d’une forte atténuation par les murs, ce qui limite la couverture.

Les réseaux de téléphonie mobile recherchent donc un équilibre entre bandes basses pour bien couvrir l’ensemble des abonnés et bandes hautes pour assurer une bonne capacité dans les zones où les demandes de trafic sont les plus importantes. Dans ce contexte, la 5G disposera d’une gamme élargie pour son déploiement : elle pourra réutiliser le spectre déjà alloué pour la téléphonie mobile, notamment les bandes basses autour de 1 GHz, pour assurer une bonne couverture et se verra également attribuer de nouvelles bandes de fréquences notamment dans les bandes millimétriques, utilisées pour la première fois pour des services grand public, qui permettront d’augmenter la capacité. (figure 1.7) donne le spectre des fréquences allouées

à la 5G. Du point de vue de l'exposition aux ondes radio fréquences, le recours à des largeurs de bandes plus grandes induira des puissances globales plus importantes. En effet, à densité spectrale de puissance égale (c'est-à-dire avec la même puissance par unité fréquentielle), si la 4G utilise typiquement 40 watts distribués sur 20 MHz, la 5G avec un ordre de grandeur typique de 100 MHz de largeur de bande dans les nouvelles bandes de fréquences, émettra 200 watts [16].

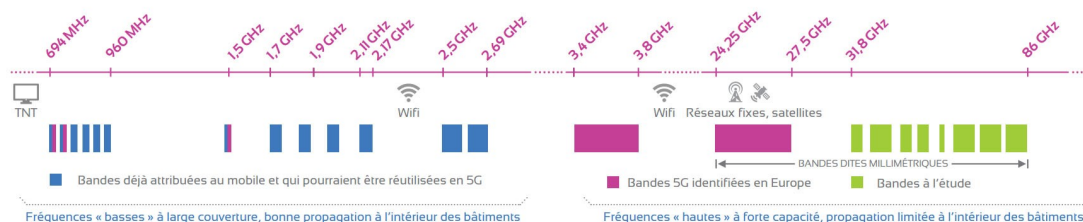


FIGURE 1.7 – Spectre des fréquences 5G[23].

1.6 Architecture globale de la 5G

Un réseau 5G est composé d'un réseau d'accès 5G AN et d'un réseau cœur 5G. Le réseau d'accès lui-même est constitué de la nouvelle génération de réseau d'accès radio NG-RAN, qui utilise la nouvelle interface radio 5G NR, et/ou un non 3GPP AN connecté au réseau cœur 5G. Les différentes entités du réseau sont connectées par un réseau de transport TCP/IP sous-jacents, qui prend en charge les fichiers QoS (Quality of Service). Comme dans les générations précédentes, un réseau 5G relie l'UE à des réseaux de données externes. Le service de connectivité 5G est nommé Session PDU. Du point de vue du transport, une session PDU est faite par une séquence de tunnels NG en 5GC (5G Core), et d'un ou plusieurs supports radio sur l'interface radio. Cet ensemble de tunnels connecte finalement l'UE à ses fonctions de contrôle et au réseau de données externes pour l'échange de trafic utilisateur (**figure 1.8**) (plus de détail sur l'annexe A). Une tâche majeure du réseau mobile est d'établir et de libérer dynamiquement les tunnels et les porteuses, afin de suivre les mouvements et les états des utilisateurs (inactifs, connectés, etc.) [17].

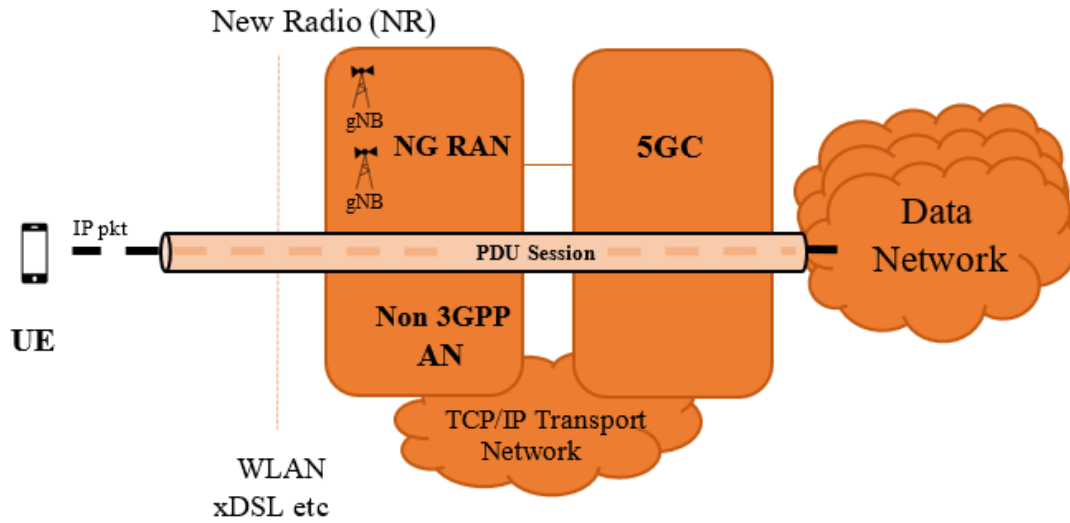


FIGURE 1.8 – Architecture de réseau 5G [17].

1.7 Les domaines d'utilisation de la 5G

L'UIT prévoit trois objectifs d'utilisation pour la 5G répartis en domaines : le haut débit mobile amélioré (eMBB), la communication ultra-fiable avec un temps de latence faible (URLLC) et la communication de masse de type machine (mMTC) (**figure 1.9**)[18]. Les principales caractéristiques des domaines d'utilisation sont décrites dans le **tableau 1.2**.

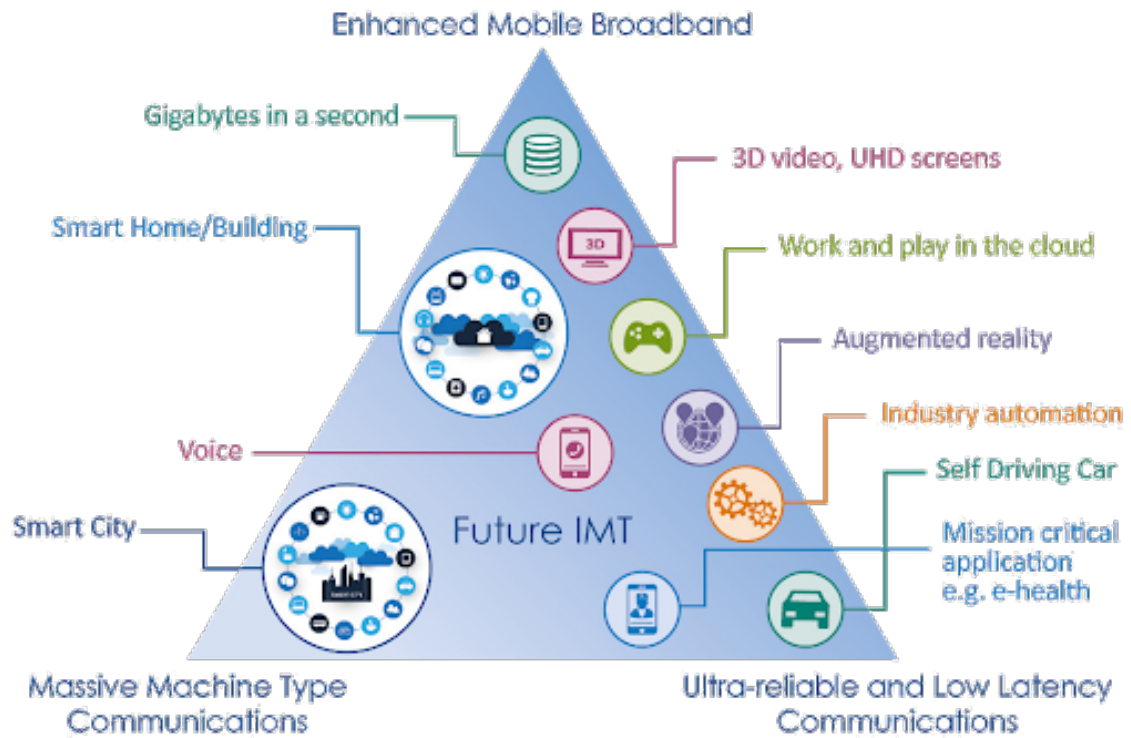


FIGURE 1.9 – Répartition des applications 5G en trois domaines d'utilisation [24].

Enhanced Mobile Broadband (eMBB)	Massive Machine-Type Communication (mMTC)	Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC)
Les principales caractéristiques de ce domaine d'utilisation sont : un débit de données élevé et variable (jusqu'à 20 Gbit/s), ainsi qu'une densité d'utilisateurs élevée et une grande mobilité (exemple TGV). L'accès mobile à haut débit amélioré assure une transition en douceur entre le réseau fixe et le réseau mobile.	Ce domaine d'utilisation se caractérise par un très grand nombre d'appareils connectés (Internet des objets (IoT)), qui transmettent généralement un faible volume (peu d'octets) de données et ne sont pas sensibles au temps . Les appareils doivent être avantageux et avoir une très grande autonomie (durée de vie des piles jusqu'à 10 ans).	Ce domaine est caractérisé par des connexions fiables et/ou sensibles au temps avec des vitesses de transmission garanties, des temps de latence assurés de quelques millisecondes et une probabilité de défaillance définie (exemples : commande à distance de machines, gestion de l'énergie dans les réseaux intelligents (smart grids) ou commande de véhicules autonomes).

TABLE 1.2 – Principales caractéristiques des domaines d'utilisation de la 5G[18].

1.8 Les défis soulevés par la 5G

Actuellement, les communications sans fil sont à une croisée de chemins. En effet, la demande de capacité toujours croissante et la prolifération d'appareils intelligents, avec des applications nécessitant des débits élevés, nécessitent de nouvelles générations de réseaux plus efficaces pour permettre une augmentation substantielle des performances. Les systèmes de communication mobile 5G émergent à grande vitesse pour répondre à un large éventail de défis apportés par la forte demande de nos sociétés actuelles et futures pour les communications sans fil. La 5G doit s'attaquer, en plus d'une augmentation du volume de trafic, au défi de connecter des milliards d'appareils avec des besoins de service hétérogènes[1]. L'objectif

de la 5G est de fournir les améliorations suivantes [1] :

1. **10 fois plus de débits expérimenté** : l'ère des débits de pointe plus uniformes et multi Gbps.
2. **10 fois moins de temps de latence** : les niveaux de latence devraient être aussi bas que 1 ms.
3. **10 fois plus de densité de connexion** : activation de la connectivité IoT avec peu de complexité et de surcharge de signalisation.
4. **Augmentation de 3 fois dans l'efficacité spectrale** : une utilisation plus efficace de la bande passante.
5. **100 fois plus de capacité de trafic** : réseaux très densifiés avec plus de points d'accès partout.
6. **100 fois plus d'efficacité du réseau** : réseaux énergétiquement efficace avec traitement de signal et matériel efficaces.

1.9 conclusion

Nous avons supervisé dans ce chapitre la technologie mobile 5G, son principe, les différentes techniques qu'elle utilise, son architecture globale et son type de modulation. Cette technologie ne cesse de changer notre monde ainsi que notre mode de vie personnel. Toujours dans ce sens, la 5G arrive à grand pas afin de répondre aux besoins de notre époque actuelle dont la rapidité et la haute disponibilité sont les plus grands critères.

CHAPITRE 2

MASSIVE MIMO

2.1 INTRODUCTION

Au cours des dernières années, le trafic de données (mobile et fixe) a connu une croissance exponentielle en raison de l'augmentation spectaculaire des smartphones, tablettes, ordinateurs portables et de nombreux autres appareils sans fil consommant des données. La demande de trafic de données sans fil sera encore plus importante à l'avenir. Pour cela une technologie d'accès sans fil efficace qui peut augmenter le débit de la zone sans augmenter la bande passante ou densifier la cellule est essentielle pour répondre aux demandes continues auxquelles sont confrontés les opérateurs sans fil. Les stations de base 4G d'aujourd'hui ont une douzaine de ports pour les antennes qui gèrent tout le trafic cellulaire : huit pour les émetteurs et quatre pour les récepteurs. Par contre les stations de base 5G emploient un nouveau système de transmission qui peut prendre en charge une centaine de ports, ce qui signifie que beaucoup plus d'antennes peuvent tenir sur une seule baie. Cette technique est appelée massive MIMO. C'est la technologie d'accès sans fil la plus pointue pour répondre aux besoins des réseaux 5G et au-delà. Dans ce chapitre nous allons voir ses différentes caractéristiques, son système et ses avantages pour le développement du monde actuel.

2.2 Définition du massive MIMO

La technique massive MIMO est une technologie MIMO multiutilisateurs dans laquelle chaque station de base (BS) est équipée d'un réseau à M éléments d'antennes actives et les utilise pour communiquer avec K terminaux à antenne unique en même temps et sur la même bande de fréquence. Le concept général de MIMO multi-utilisateurs existe depuis des décennies, mais l'idée de déployer des stations de base avec plus d'une poignée d'antennes de service est relativement nouvelle (voir la **figure 2.1**).

Grâce au traitement cohérent des signaux sur le réseau, le précodage de l'émission peut être utilisé sur la liaison descendante pour concentrer chaque signal sur le terminal souhaité et l'égalisation de la réception peut être utilisée sur la liaison montante pour distinguer les signaux envoyés par différents terminaux. Plus le nombre d'antennes utilisées est important, plus la focalisation spatiale peut être fine.[\[27\]](#)

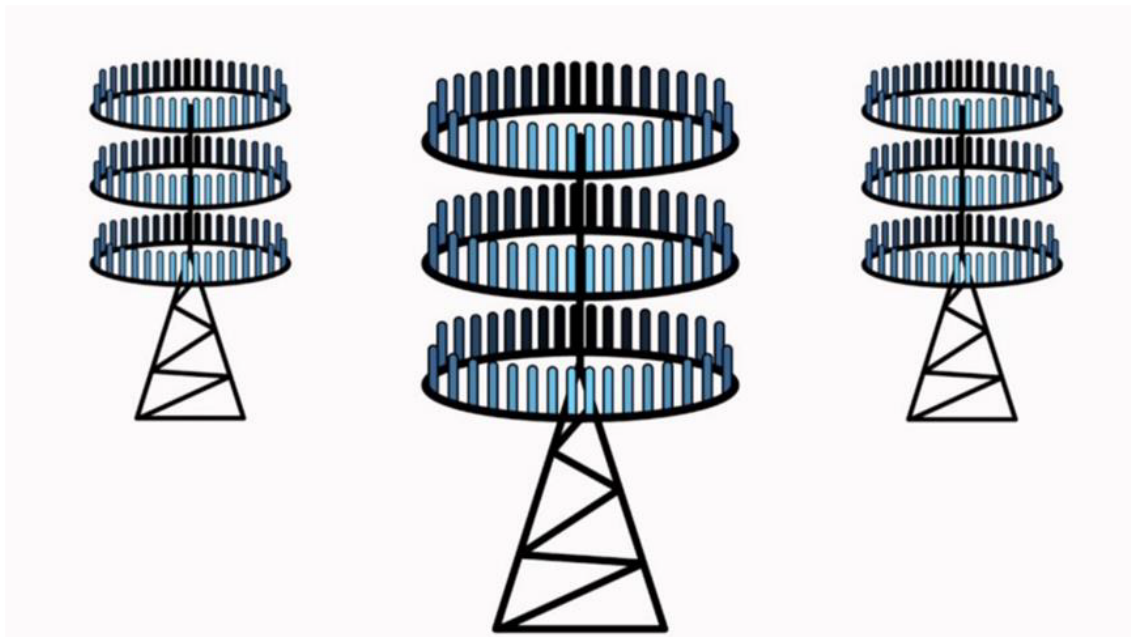


FIGURE 2.1 – Illustration d'antennes basées sur le Massive MIMO [\[27\]](#).

2.3 Système massive MIMO

Nous considérons un système MIMO qui se compose d'une BS et de K utilisateurs actifs. La station de base est équipée de M antennes, tandis que chaque utilisateur dispose d'une

seule antenne. En général, chaque utilisateur peut être équipé de plusieurs antennes. Cependant, pour simplifier l'analyse, nous nous limitons aux systèmes avec des utilisateurs à une seule antenne [14]. Voir la figure 2.2 :

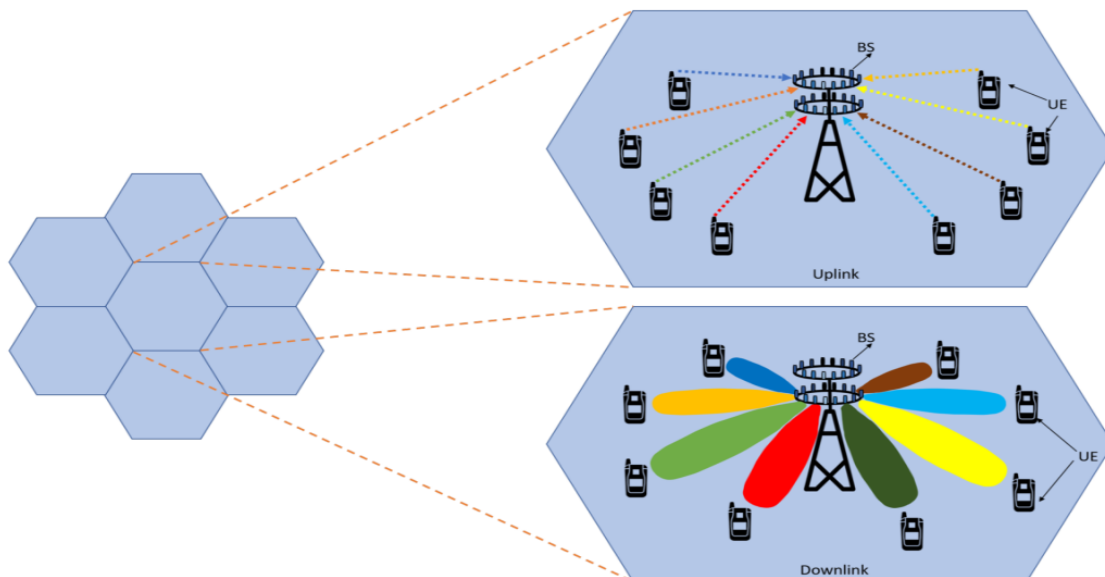


FIGURE 2.2 – Illustration de la transmission de liaison descendante et de liaison montante dans un système massive MIMO[14].

2.3.1 Transmission de liaison montante (UpLink)

La transmission en liaison montante (UL) est utilisée pour transmettre des signaux à partir des utilisateurs K à la station de base comme le montre la figure 2.2. Considérons un système massive MIMO de liaison montante équipé de M antennes à la station de base et communiquant simultanément avec K ($M > K$) utilisateurs d'une seule antenne. Si le signal transmis par l'utilisateur ou le signal pilote déterministe pour estimer le canal est $\mathbf{x} \in C^k$, le signal reçu à la station de base pendant la liaison montante est donné comme suit [14] :

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{N}_{UL} \quad (2.1)$$

où $\mathbf{y} \in C^M$ est le signal reçu à la station de base, \mathbf{H} est la matrice du canal entre 1'utilisateur et la station de base. Les éléments de $\mathbf{H} \in C^{M \times K}$ sont indépendants et identiquement distribués à moyenne nulle et une variance unitaire[14], c'est-à-dire $\mathbf{H} \sim CN(0, 1)$

Le terme supplémentaire $\mathbf{N}_{UL} \in C^M$ est l'ensemble des interférences de plusieurs trans-

missions et du bruit du récepteur. L'interférence ajoutée est indépendante du signal utilisateur x , mais elle peut dépendre du canal H

$$N_{UL} = n_{UL-interference} + n_{noise} \quad (2.2)$$

2.3.2 Transmission de liaison descendante (DownLink)

Le canal de liaison descendante (DL) est utilisé pour transmettre des données ou estimer le canal entre l'utilisateur et la station de base. La station de base utilise des porteuses pilotes pour estimer le canal. Une transmission en liaison descendante avec plusieurs UE est illustrée à **la figure 2.2**. Considérons un système massive MIMO en DL, où la station de base est équipée de M antennes desservant simultanément K utilisateurs à une seule antenne. La station de base envoie des informations indépendantes à plusieurs utilisateurs simultanément [14]. Le signal reçu, $Y_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ au $k^{\text{ième}}$ utilisateur est donné par l'équation 2.3

$$Y_k = h_k x_k + N_{DL} \quad (2.3)$$

où h_k est un vecteur représentant la réponse impulsionnelle du canal entre l'utilisateur et la station de base, dont les éléments sont indépendants et distribués de manière identique avec une variance unitaire et moyenne nulle, c'est-à-dire, $h \sim CN(0, 1)$. $x_k \in \mathbb{C}^M$ est le signal transmis par la station de base à l'utilisateur k et, N_{DL} est le bruit supplémentaire qui est composé du bruit du récepteur $n_{noise} \sim CN(0, \delta^2)$ et de l'interférence pendant la liaison descendante $n_{DL-interference}$ causée par la transmission simultanée à d'autres utilisateurs (équation 2.4) : [14]

$$N_{DL} = n_{DL-interference} + n_{noise} \quad (2.4)$$

2.4 Le beamforming

C'est un système de signalisation du trafic pour les stations de base cellulaires qui identifie la voie la plus efficace pour la transmission de données à un utilisateur particulier. Il permet de filtrer le signal pour créer une connexion directe entre l'appareil et l'antenne émet-

trice, autrement dit à avoir un signal dirigé voir (**figure 2.3**). A la station de base massive MIMO, des algorithmes de traitement de signal tracent le meilleur itinéraire de transmission par voie aérienne vers chaque utilisateur. Ils peuvent ensuite envoyer des paquets de données individuels dans de nombreuses directions différentes, en les renvoyant des bâtiments et d'autres objets selon un modèle parfaitement coordonné. Cela permet d'améliorer la stabilité du signal émis et sa puissance, notamment dans des endroits saturés, comme les lieux publics et il réduit les interférences pour les utilisateurs à proximité. Selon la situation et la technologie.[25]

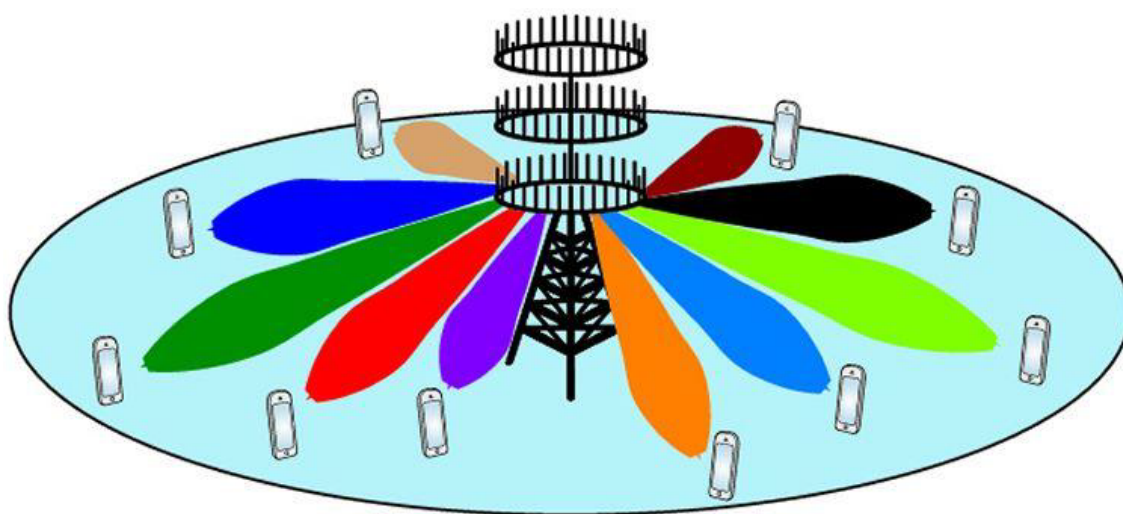


FIGURE 2.3 – Beamforming pour le massive MIMO[14].

Il existe plusieurs façons d'implémentation de beamforming pour les réseaux 5G, nous présentons les 3 différentes architectures sur les figures suivantes :

2.4.1 Le Beamforming numérique (DBF)

Le signal est précodé dans le traitement en bande de base avant la transmission RF. Plusieurs faisceaux (un par utilisateur) peuvent être formés simultanément à partir du même ensemble d'éléments d'antennes comme le montre la **figure 2.4** . Dans le contexte de la LTE/4G, DBF équivaut le MU-MIMO dans la 5G. Plusieurs chaînes de transmission, une pour chaque utilisateur MU-MIMO simultané, sont nécessaires dans la station de base. Le beamforming numérique (MU-MIMO) est utilisé dans le LTE Advanced Pro et dans la 5G NR. La mise en forme numérique du faisceau améliore la capacité de la cellule car les mêmes

PRBS (ressources en fréquence/temps) peuvent être utilisées pour transmettre des données simultanément pour plusieurs utilisateurs.[8]

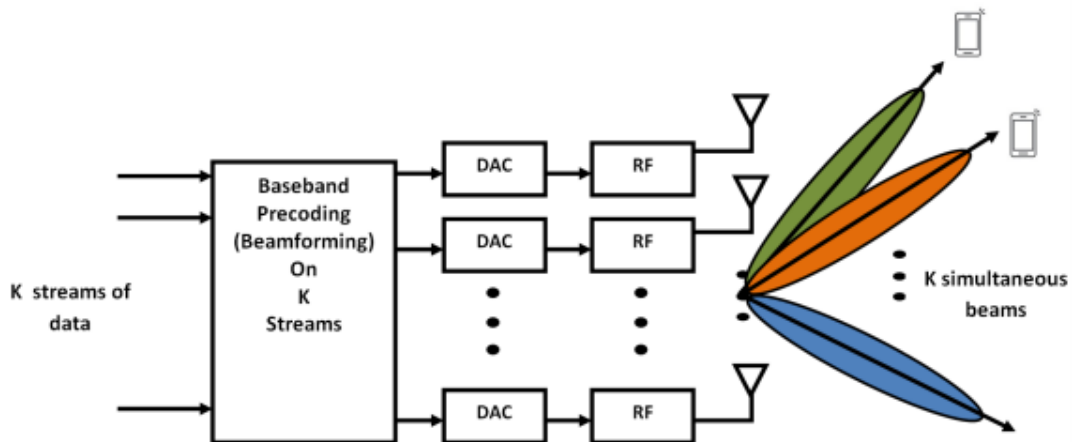


FIGURE 2.4 – Beamforming numérique[8].

2.4.2 Le Beamforming analogique (ABF)

L'ABF est plus simple mais peut être utilisé par un seul utilisateur . Le même signal est alimenté à chaque élément physique de l'antenne et les phases du signal sont ajustées dans la RF en utilisant des déphaseurs analogiques pour diriger le motif rayonnant du réseau dans une direction donnée. Les différentes copies du signal provenant des différents éléments du réseau sont filtrées de manière constructive à la réception pour former la direction du faisceau. C'est le principe de réseaux phases qui est connu depuis un certain temps. La principale différence avec Le DBF est principalement le traitement par lequel le DBF est appliqué sur le signal en bande de base (sur les flux de données K) tandis que le déphasage dans le formateur de faisceau analogique est appliqué après la conversion numérique-analogique (DAC) pour l'utilisateur de flux unique.[8]

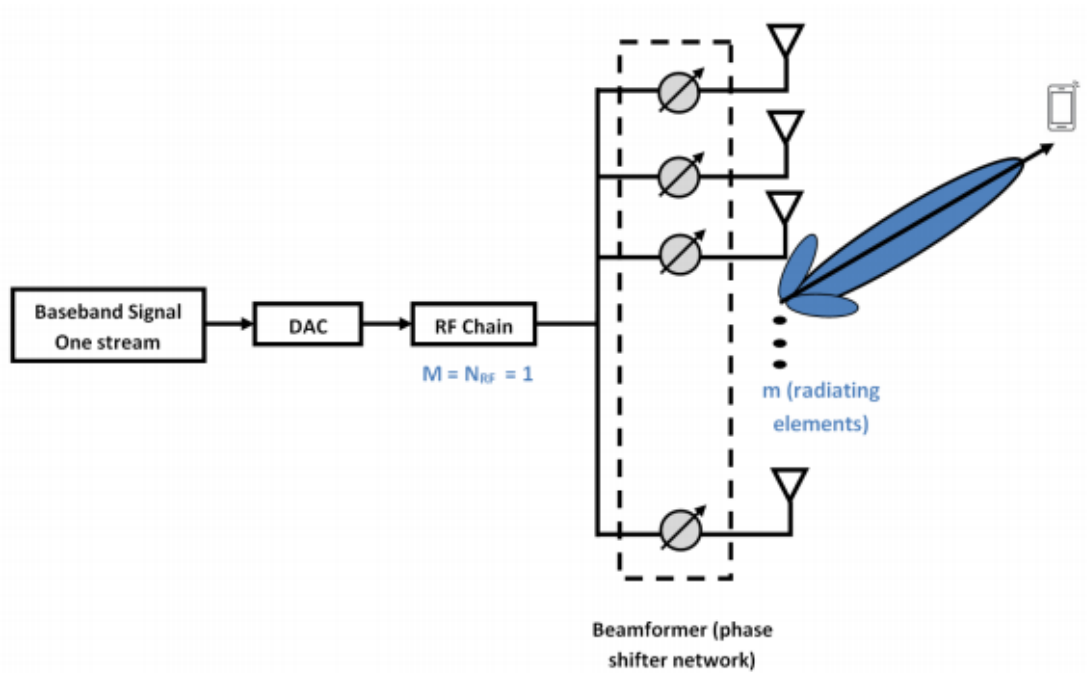


FIGURE 2.5 – Beamforming analogique[8].

2.4.3 Le Beamforming hybride

Le beamforming hybride combine le beamforming analogique et le numérique. Les stations de base 5G à ondes millimétriques utilisent une forme de beamforming hybride. Une approche consiste à utiliser le beamforming analogique pour le beamforming grossier, et à l'intérieur du faisceau analogique, à utiliser un schéma de beamforming numérique selon le cas, soit MU-MIMO ou SU-MIMO[26].

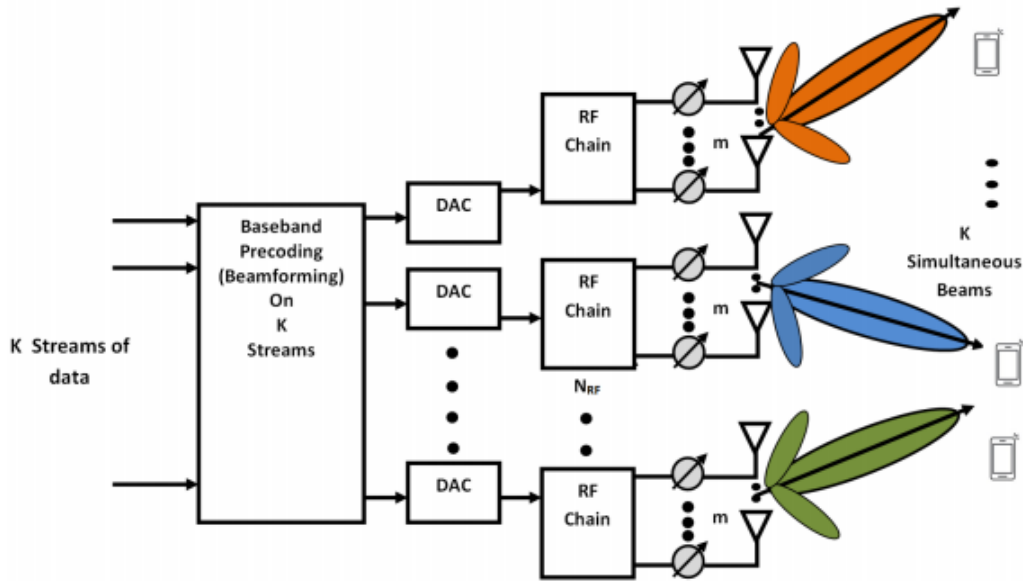


FIGURE 2.6 – beamforming hybride[8].

2.5 Précodage

Le précodage est une étape nécessaire dans la mise en place d'un système MIMO pour séparer les flux de données tout en minimisant autant que possible les interférences entre utilisateurs. Les différents précodeurs seront examinés dans la sous-section suivante, leurs caractéristiques et particularités. Le signal transmis de M antennes est une combinaison linéaire des symboles destinés aux K utilisateurs (consiste en superposition de plusieurs faisceaux correspondant à plusieurs flux de données en utilisant le multiplexage spatial).[14]

2.5.1 Les techniques d'égalisation du massive MIMO en UL

Pour la liaison montante, les utilisateurs communiquent simultanément avec une BS équipée d'un grand nombre d'antennes grâce à des techniques de combinaison massive MIMO. De nombreuses techniques de combinaison peuvent être utilisées du côté de la BS afin d'atténuer la puissance du bruit reçue et les interférences. Dans cette partie, nous limitons notre étude aux techniques d'égalisation simples car ce sont des techniques d'égalisations bien connues et de faible complexité. [9]

2.5.1.1 Maximisation du SNR (MRC)

La technique MRC (Maximum Ratio Combining), également appelée filtre adapté (MF), vise à maximiser le rapport signal/bruit (SNR)[9]. La matrice de décodage W pour le MRC est définie par :

$$W = H \quad (2.5)$$

H est la matrice du canal.

ξ_w peut être construit en fonction de la puissance instantanée reçue ,avec ξ_w étant une matrice diagonale de normalisation ou $(N_u \times N_u)$, où $\xi_w^{n_u}$ est la $(n_u, n_u)^{eme}$ entrée et $\xi_w^{n_u}$ est défini par :

$$\xi_w^{n_u} = P_H^{n_u} \left| (W^{n_u})^H H^{n_u} \right|^2 = P_H^{n_u} \left(\sum_{n_r=0}^{N_r-1} |H^{n_u, n_r}|^2 \right)^2 \quad (2.6)$$

$P_H^{n_u}$ est la $(n_u, n_u)^{eme}$ entrée de la matrice diagonale P_H ($N_u \times N_u$).

N_u nombre d'utilisateurs.

N_r nombre d'antennes de réception.

Afin de réduire la complexité du récepteur, la puissance moyenne reçue peut également être utilisée. La matrice de normalisation est alors définie par.[9]

$$\xi_w = N_r^2 P_H \quad (2.7)$$

La complexité de la technique MRC est relativement faible, ce qui en fait une technique très répandue. Cependant, pour les communications multi-utilisateurs avec un nombre limité d'antennes de réception, l'interface utilisateur mobile pénalise la technique MRC et certaines autres techniques d'égalisation peuvent être utilisées pour améliorer les performances des systèmes[9].

Avantage : le traitement du signal est très simple puisque la station de base ne fait que multiplier le vecteur reçu par le conjugué-transposé de la matrice canal H , et détecte ensuite chaque flux séparément[8].

Inconvénient : le MRC néglige l'effet des interférences entre utilisateurs multiples, il est peu performant dans les scénarios à interférences limitées[8].

2.5.1.2 Minimisation de MUI (ZF)

La technique d'égalisation ZF (zéro forcing) peut être utilisée afin de supprimer complètement le MUI (interférence multi-utilisateurs). La matrice d'égalisation est définie comme suit [9] :

$$W = H (H^H H)^{-1} \quad (2.8)$$

et

$$\xi_w = P_H \quad (2.9)$$

La matrice de données reçues \hat{c} est égale à :

$$\hat{c} = c + P_H^{-1/2} (H H^H)^{-1} H^H b \quad (2.10)$$

avec c matrice de données émises et b le bruit.

Le MUI est complètement supprimé, mais la matrice de données reçue est toujours affectée par la composante bruit. La technique d'égalisation ZF est généralement plus performante que la technique MRC au prix d'une complexité accrue. Cependant, pour un SNR faible, la puissance du bruit est prépondérante par rapport à la puissance MUI et la technique MRC peut surpasser la technique d'égalisation ZF. Pour les transmissions à utilisateur unique, on peut noter que la MRC avec normalisation de la puissance instantanée et la technique ZF sont équivalentes.[9]

Avantage : le traitement du signal est simple et le ZF fonctionne bien dans les scénarios à interférences limitées. Le SINR peut être élevé à volonté en augmentant la puissance d'émission.[8]

Inconvénient : comme le ZF néglige l'effet du bruit, il fonctionne mal dans les scénarios à bruit limité. De plus, si le canal n'est pas bien conditionné, le pseudo-inverse amplifie le bruit de manière significative, et donc, la performance est très faible. Par rapport au MRC, ZF a une plus grande complexité de mise en œuvre en raison du calcul du pseudo-inverse de la matrice de gain du canal.[8]

2.5.1.3 Erreur quadratique moyenne minimale (MMSE)

Un compromis entre le SNR et la puissance MUI peut être trouvé avec le détecteur appelé erreur quadratique moyenne minimale (MMSE). Avec cette technique, la matrice de décodage est définie comme suit : [9]

$$W = H^H (HH^H + \alpha I_{N_u})^{-1}, \alpha \in \mathfrak{R}^+ \quad (2.11)$$

I_{N_u} est la matrice d'identité $N_u \times N_u$ et

$$\xi_w^{n_u} = P_H^{n_u} \left| (W^{n_u})^H H^{n_u} \right|^2 \quad (2.12)$$

Si les utilisateurs se trouvent à la même distance de la BS, alors :

$$P_H^{n_u} = P_H, \forall \mathbf{n}_u \in [1, N_u - 1] \quad (2.13)$$

dans ce cas, on peut choisir

$$\alpha = \sigma_b^2 / (P_H \sigma_c^2) = \rho^{-1} \quad (2.14)$$

σ_b^2 la variance de b.

σ_c^2 la variance de c.

En effet, cette technique surpasse à la fois la technique MRC et la technique ZF. Comme pour la technique ZF, la complexité de la technique d'égalisation MMSE est plus élevée que celle de la technique MRC.[9]

2.5.2 Les techniques de beamforming massive MIMO en DL

Pour la liaison descendante, une station de base équipée d'un grand nombre d'antennes sert simultanément les utilisateurs grâce à des techniques de beamforming massive MIMO.[9] Les techniques d'égalisation MRT, ZF et MMSE sont utilisées respectivement pour maximiser la puissance reçue, pour minimiser la puissance MUI et pour avoir un compromis entre la puissance reçue et la puissance MUI.[9]

2.5.2.1 Maximisation de la puissance reçue (MRT)

La première stratégie consiste à maximiser la puissance reçue pour chaque UE sans tenir compte de la MUI. Cela se fait en utilisant le filtre adapté du canal, c'est-à-dire : [9]

$$W = H^H \quad (2.15)$$

Si ξ_w est défini comme ayant une puissance instantanée égale à δ_c^2 alors :

$$\xi_w = \sum_{n_t=0}^{n_t-1} \sum_{n_u=0}^{n_u-1} |H^{n_t, n_u}|^2 \quad (2.16)$$

La méthode du beamforming est connue sous le nom de transmission à rapport maximal (MRT), introduit pour la première fois pour une transmission MIMO à utilisateur unique. Cette matrice de précodage est en fait comparable à la technique de décodage MRC définie dans la partie précédente pour la liaison montante. [9]

-Avantages : Un traitement de signal simple qui permet d'obtenir le gain de réseau d'un système à utilisateur unique à faible SNR lorsque les interférences sont limitées [8].

- Inconvénients : Les performances sont médiocres lorsque la corrélation entre les utilisateurs est élevée et doivent être traitées avec prudence à un SNR élevé pour éviter les interférences entre utilisateurs [8].

2.5.2.2 Minimisation de MUI (ZF)

La deuxième stratégie consiste à minimiser le MUI. Cela peut être fait avec le précodeur ZF bien connu, également appelé égalisation du canal [9]

$$W = H^H (HH^H)^{-1} \quad (2.17)$$

Les chercheurs montrent que le facteur de normalisation moyen est difficile à utiliser car il pourrait être infini, par exemple lorsque $N_u = N_t$ C'est pourquoi un facteur de normalisation instantané est une meilleure option. Dans ce cas, cela devient :

$$\xi_W = \sum_{N_t=0}^{N_t-1} \sum_{N_u=0}^{N_u-1} |W^{n_t n_u}|^2 \quad (2.18)$$

La technique d'égalisation ZF supprime complètement le MUI. Lorsque le bruit est faible, le Décodeur ZF est connu pour être plus performant que le précodeur MRT car la performance

du MRT est limitée par le MUI. Cependant, en cas de forte puissance du bruit, le précodeur MRT surpasse le précodeur ZF. En effet, pour le précodeur ZF, le facteur de normalisation ξw peut être très élevé entraînant une faible puissance reçue. En outre, la technique ZF est plus complexe que la technique MRT car une inversion matricielle est effectuée [9].

2.5.2.3 Minimum Mean-Squared Error (MMSE)

Une façon d'améliorer les performances du précodeur ZF à forte puissance du bruit est de régulariser la matrice inverse. La matrice de précodage devient alors : [9]

$$W = H^H (HH^H + \alpha I_{N_u})^{-1}, \alpha \in \mathbb{R}^+ \quad (2.19)$$

I_{N_u} est la matrice d'identité ($N_u \times N_u$).

Le facteur de normalisation est également défini par 2.18. Cette méthode d'égalisation est connue sous le nom de transmission MMSE, transmission de filtre de Wiener ou RZF. Cette solution est en réalité un compromis entre l'égaliseur MRT et l'égaliseur ZF. En effet, pour une valeur élevée de α , W tend vers un égaliseur MRT, tandis que pour une valeur faible de α , il tend vers un égaliseur ZF. [9]

2.6 Contamination des pilotes

Dans un contexte multi-cellulaire, le gain du massive MIMO peut être affecté par la contamination du pilote. En fait, le nombre maximum de séquences pilotes orthogonales est limité par la durée de l'intervalle de cohérence divisée par le retard du canal. Ainsi, la même séquence pilote peut être réutilisée par les utilisateurs dans des cellules adjacentes, comme le montre la partie gauche de **la figure 2.7**. Ensuite, à la station de base, le résultat de l'estimation du canal contient également les informations des utilisateurs des autres cellules (ligne pointillée). Par conséquent, lorsque la station de base effectue un précodage du signal avec l'estimation du canal contaminé, une partie du signal sera adressée aux utilisateurs non désirés (ligne pointillée dans la partie droite de **la figure 2.7**) et agit comme une interférence intercellulaire [10].

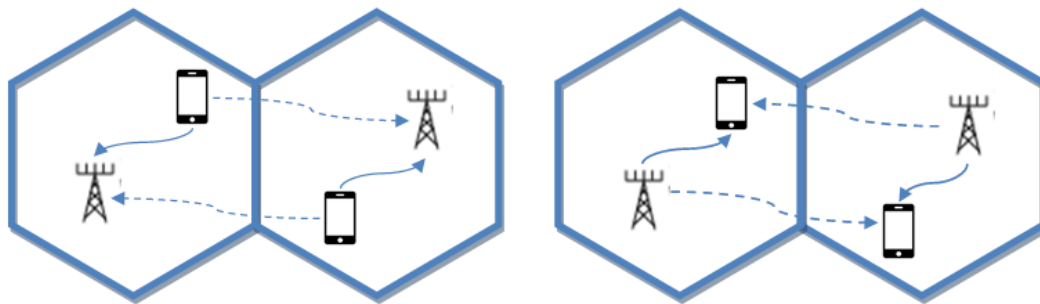


FIGURE 2.7 – Contamination du pilote[10]

Les interférences causées par la contamination du pilote augmentent avec le nombre d'antennes d'émission au même rythme que le signal utile. En conséquence, les performances du système sont limitées même lorsque le nombre d'antennes d'émission a tendance à être infini[9].

2.7 Estimation du canal

Pour la détection et le décodage des signaux, le massive MIMO s'appuie sur les CSI . Le CSI est l'information sur l'état de la liaison de communication entre l'émetteur et le récepteur et représente l'effet combiné de l'évanouissement, de la diffusion, etc (voir **la figure 2.8.b**). Si le CSI est parfait, la performance du massive MIMO croît de manière linéaire avec le nombre d'antennes d'émission ou de réception[8].

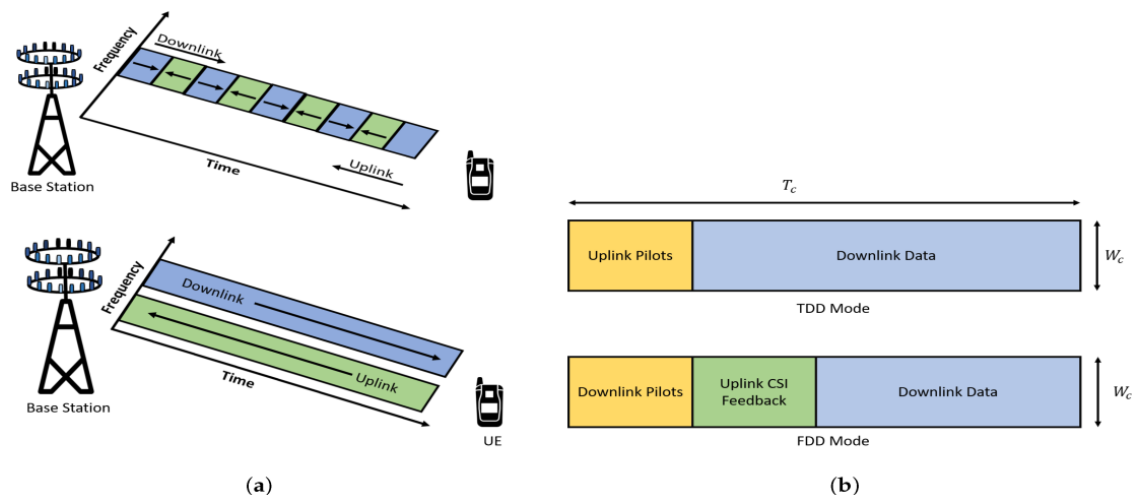


FIGURE 2.8 – Système TDD et FDD [14].

2.7.1 Mode TDD (Time division duplex)

Dans le système TDD, les communications UL et DL sont effectuées sur la même bande de fréquences, en utilisant des intervalles de temps différents (**la figure 2.8.a**). Cette technique, utilisée par plusieurs standards de télécommunications, a été initialement proposée pour le massive MIMO[8].

-Transmission UL : K utilisateurs envoient K séquences pilotes orthogonales et le canal est estimé sur la base des signaux pilotes reçus. Cette opération est connue sous le nom de training et nécessite l'utilisation de K canaux.

- Transmission DL : La BS a besoin de CSI pour pré-coder les signaux transmis afin de s'assurer que chaque utilisateur récupère ses propres données. En raison de la réciprocité supposée des canaux, le canal estimé à la station de base par les pilotes UL peut être utilisé pour précoder les symboles de transmission. Les limitations du temps de cohérence du canal peuvent créer un problème de contamination des pilotes, lorsque les séquences de pilotes utilisées par les utilisateurs dans les cellules voisines ne sont plus orthogonales à celles de la cellule. De plus, lorsque M est grand, les gains effectifs des canaux deviennent presque déterministes en raison du durcissement des canaux. Cette propriété améliore l'estimation du gain du canal DL et réduit la nécessité des pilotes DL[8].

2.7.2 Mode FDD (frequency division duplex)

Dans un système FDD représenté sur **la figure 2.8.a**, les transmissions en liaison montante et descendante utilisent deux fréquences différentes et, par conséquent, les canaux de liaison montante et descendante ne sont pas réciproques[8].

- Transmission UL : même procédure qu'en TDD et le processus nécessitera l'utilisation de K canaux[8].

- Transmission DL : Les antennes de la station de base M transmettent M séquences pilotes orthogonales à K utilisateurs et chaque utilisateur estime le canal sur la base du signal pilote reçu, puis l'estimation est renvoyée à la station de base via un canal de contrôle[8].

2.8 Efficacité spectrale

L'efficacité spectrale fait référence au débit de données réalisable sur une largeur de bande donnée dans un système de communication sans fil spécifique. D'après le théorème de Shannon, la capacité du système de communication sans fil est donnée Par [11] :

$$D = \log_2 (I_{NR} + PA^HG) \quad (2.20)$$

D est le débit de données réalisable.

I_{N_r} est une matrice d'identité ($N_r \times N_r$).

P représente la consommation d'énergie de transmission.

H est la matrice des canaux, A et G la matrices de précodage.

En introduisant les systèmes de précodage, la capacité moyenne du système s'écrit comme :

$$D^u = \sum_{k=1}^K \varepsilon \{ \log_2 (1 + SINR^u) \} \quad (2.21)$$

u Représente les systèmes de précodage, c'est à dire respectivement MMSE, ZF, MRC. Le rapport interférence signal sur bruit est donné par :

$$SINR_k^u = \frac{|\vec{a}^H \vec{g}_k^u|^2}{\sum_{j \neq k}^k |\vec{a}^H \vec{g}_j^u|^2 + \sigma^2} \quad (2.22)$$

σ^2 est la variance de la puissance du bruit, tandis que a_k est la k^{ieme} colonne de A.

2.9 Les avantages de massive MIMO pour la 5G

- efficacité spectrale : Le massive MIMO offre une meilleure efficacité spectrale en permettant à son réseau d'antennes de focaliser des faisceaux étroits vers un utilisateur. L'efficacité spectrale peut être dix fois supérieure à celle du système MIMO actuel utilisé pour la 4G/LTE;
- efficacité énergétique : Comme le réseau d'antennes est focalisé dans une petite section spécifique, il nécessite moins de puissance rayonnée et réduit les besoins en énergie des systèmes massive MIMO ;
- débit de données élevé : Le gain du réseau et le multiplexage spatial fournis par les massives MIMO augmentent le débit de données et la capacité des systèmes sans fil ;
- suivi des utilisateurs : Comme le massive MIMO utilise des faisceaux de signaux étroits vers l'utilisateur, le suivi de l'utilisateur devient plus fiable et plus précis ;
- faible consommation d'énergie : Le massive MIMO est construit avec des amplificateurs linéaires de très faible puissance, ce qui élimine l'utilisation d'équipements électroniques encombrants dans le système. Cette consommation d'énergie peut être considérablement réduite ;
- moins d'évanouissement : Le grand nombre d'antennes réparties au niveau du récepteur rend le massive MIMO résistant à l'évanouissement ;
- faible latence : La MIMO massive réduit la latence de l'interface radio ;
- robustesse : Les systèmes massive MIMO sont robustes contre les interférences involontaires et le brouillage interne. De plus, ces systèmes sont résistants à une ou plusieurs pannes d'antenne dues au grand nombre d'antennes ;
- fiabilité : Un grand nombre d'antennes dans un système massive MIMO offre un gain de diversité plus important, ce qui augmente la fiabilité de la liaison ;
- sécurité renforcée : Les massives MIMO offrent une plus grande sécurité physique grâce aux canaux orthogonaux des stations mobiles et aux faisceaux étroits ;
- traitement linéaire faiblement complexe : Un plus grand nombre d'antennes de station de base rend les détecteurs de signaux simples et les égaliseurs optimaux pour le système. [14]

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, l'étude d'un système massive MIMO a été réalisée. On a vu que l'estimation du canal constitue un point fondamental dans les performances d'un système de transmission et en particulier pour un système multi-antennes tels que le massive MIMO. On a pu voir aussi que la technologie massive MIMO offre beaucoup d'avantages en termes de débits mais aussi en termes d'efficacité énergétique et spectrale, de robustesse et de fiabilité. Sur ce, le système massive MIMO est la meilleure technologie qui est déployée actuellement dans les systèmes de communications 5G dans les pays pilotes et sera généralisée au reste de la planète.

CHAPITRE 3

PRINCIPE DE L'OFDM

3.1 INTRODUCTION

Le phénomène moderne de la soif accrue d'informations et la croissance explosive des nouvelles applications multimédias sans fil ont entraîné une demande accrue de technologies qui prennent en charge les très grands débits de transmission, la mobilité et l'utilisation efficace du spectre et des ressources de réseaux disponibles. L'OFDM est l'une des meilleures solutions pour atteindre cet objectif, elle offre un choix prometteur pour les futurs systèmes de débit de données à grande vitesse. L'OFDM a été normalisé dans le cadre des normes IEEE 802.11a et IEEE 802.11g pour la transmission de données à haut débit sur les réseaux locaux sans fil. Elle est intégrée dans d'autres applications et normes telles que la radiodiffusion sonore numérique (DAB), la radiodiffusion vidéo numérique (DVB), le système européen HIPERLAN/2 et le système japonais de communication d'accès mobile multimédia (MMAC). De plus, elle a également été utilisée par une variété d'applications commerciales telles que la ligne d'abonnés numérique (DSL), la diffusion vidéo numérique portable (DVB-H), (WiMAX) et l'évolution à long terme (LTE).

Dans ce chapitre, nous abordons l'OFDM de base, sa modulation et démodulation, ainsi que les techniques pour améliorer les performances de l'OFDM pour les communications sans fil. On terminera le chapitre avec l'association MIMO-OFDM, les avantages et les inconvénients

de l'OFDM.

3.2 L'OFDM

L'OFDM est une technique de transmission de données numérique. Cette dernière divise une bande de fréquence en plusieurs sous canaux appelés « porteuses », comme le montre **la figure 3.1**, espacés par des zones de taille fixes (intervalle de garde) pour émettre un signal, ces porteuses sont dites orthogonales car pour une transmission idéale, un symbole transmis sur une sous porteuse peut être démodulé sans interférence de la part des sous porteuses adjacentes. D'un point de vue d'implémentation numérique, les systèmes OFDM transmettent les données par blocs : le flux original de données de débit D est multiplexé en N flux parallèles de débit D/N . Il s'agit bien d'un multiplexage fréquentiel puisque les données sont transmises sur N canaux différents. Afin d'effectuer cette transmission, au lieu de transmettre les données en série comme le font les systèmes mono-porteuses, les schémas OFDM transmettent les données par bloc en introduisant aux informations utiles de la redondance (appelée intervalle de garde) dont la structure cyclique permet, à l'aide de transformées de Fourier, une inversion simple (scalaire) du canal de propagation.

Le principe de la modulation OFDM est de répartir des symboles modulés sur un ensemble de sous-porteuses et de les transmettre simultanément. Elle présente l'avantage d'améliorer l'efficacité spectrale en respectant la contrainte d'orthogonalité entre les porteuses, et pour cela l'implémentation de la transformée de Fourier inverse est nécessaire [3].

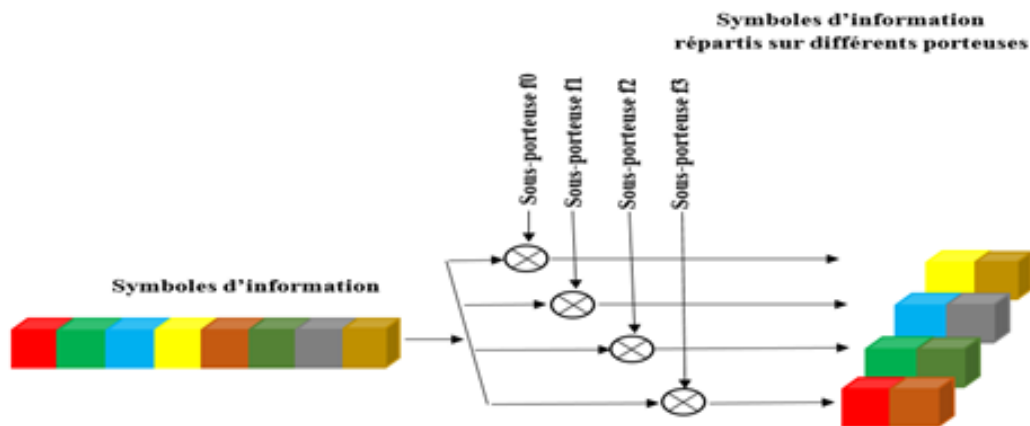


FIGURE 3.1 – Principe de l'OFDM.

3.3 Association MIMO-OFDM

L'association des deux systèmes MIMO et OFDM permet d'améliorer les performances d'un système de communication sans fil retenu pour la 4G. Afin de réaliser cette combinaison, on envoie les symboles d'OFDM sur plusieurs antennes qui transmettent les informations en parallèle[13].

3.3.1 chaîne de transmission MIMO-OFDM

L'envoi d'informations via le système MIMO peut entraîner une propagation par trajets multiples qui conduit à des interférences entre symboles lorsqu'un signal sans fil transmis atteint un récepteur par des trajets différents. Cela se produit généralement lorsque les signaux réfléchis rebondissent sur des surfaces en se réfractant par des obstacles, lorsque le signal sans fil se réfracte à travers des obstacles, et en raison des conditions atmosphériques. Ces trajets ont des trajets différents avant d'atteindre le récepteur, créant ainsi des versions différentes qui arrivent à des intervalles de temps différents. Le retard dans la transmission des symboles interférera avec la détection correcte des symboles. L'amplitude et/ou la phase du signal peuvent être déformées lorsque les différents trajets sont reçus pour des interférences supplémentaires. [12]

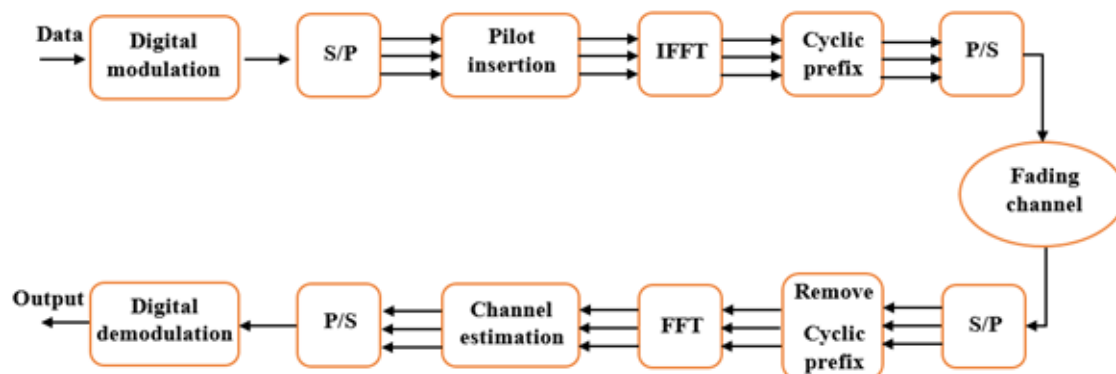


FIGURE 3.2 – Schéma fonctionnel simplifié du système MIMO-OFDM[12].

Le schéma de principe simplifié d'un système OFDM est donné par la **figure 3.2**. Au début, les bits entrants sont mappés sur des symboles de données selon un certain schéma de modulation tel que QPSK ou QAM. Ensuite, le flux de données série est converti en blocs de longueur N . Chaque bloc de symboles (y compris les symboles pilotes utilisés pour l'estimation ou la synchronisation du canal) sera transmis à l'IFFT et transformé en un signal OFDM. Par la suite, le signal OFDM sera augmenté d'un CP dont la longueur sera choisie plus grande que le retard du chemin le plus long du canal pour éliminer les ISI. Les blocs OFDM seront convertis en signaux série avant d'être envoyés.[12].

Au niveau du récepteur, en supposant une synchronisation parfaite du cadencement et de la fréquence porteuse, les signaux reçus seront d'abord convertis en signaux parallèles, puis le préfixe cyclique (CP) sera supprimé. Après avoir traversé le bloc FFT, les symboles de données sont détectés avec les informations de canal estimées. Après démodulation, le flux binaire transmis est récupéré[12].

3.3.2 Avantages de l'OFDM

L'OFDM a été utilisée dans de nombreux systèmes sans fil à haut débit en raison des nombreux avantages suivants :[12]

- immunité aux évanouissements sélectifs : l'un des principaux avantages de l'OFDM est qu'elle est plus résistante aux évanouissements sélectifs en fréquence que les systèmes

- à porteuse unique car elle divise le canal global en plusieurs signaux à bande étroite qui sont affectés individuellement en tant que sous-canaux à évanouissements plats ;
- résilience aux interférences : les interférences apparaissant sur un canal peuvent être limitées en bande passante, et de cette manière, n'affecteront pas tous les sous-canaux. Cela signifie que toutes les données ne sont pas perdues ;
 - résilience à l'ISI : Un autre avantage de l'OFDM est qu'elle est très résistante aux interférences inter-symboles et inter-trames. Cela résulte du faible débit de données sur chacun des sous-canaux ;
 - égalisation de canal plus simple : l'un des problèmes avec les systèmes CDMA était la complexité de l'égalisation de canal qui devait être appliquée sur l'ensemble du canal. Un avantage de l'OFDM est qu'en utilisant plusieurs sous-canaux, l'égalisation des canaux devient beaucoup plus simple[12].

3.3.3 Inconvénients de l'OFDM

Alors que l'OFDM est largement utilisée, il existe encore quelques inconvénients à son utilisation qui doivent être pris en compte et qui sont :

- Rapport de puissance crête / puissance moyenne élevé : un signal OFDM a un bruit comme une variation d'amplitude et a une plage dynamique relativement élevée ou un rapport de puissance crête / puissance moyenne. Cela a un impact sur l'efficacité de l'amplificateur RF car les amplificateurs doivent être linéaires et s'adapter aux grandes variations d'amplitude et ces facteurs signifient que l'amplificateur ne peut pas fonctionner avec un niveau d'efficacité élevé ;
- Sensible au décalage et à la dérive de la porteuse : un autre inconvénient de l'OFDM est qu'il est sensible au décalage et à la dérive de la fréquence de la porteuse. Les systèmes à un seul transporteur sont moins sensibles[12].

3.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude théorique de la technique OFDM. Par la suite, nous avons présenté son schéma de modulation et démodulation, et avons décrit

ses caractéristiques et comment l'intervalle de garde permet au système OFDM d'éviter les interférences entre les symboles. Finalement, l'association MIMO-OFDM a été abordée.

CHAPITRE 4

SIMULATIONS ET RÉSULTATS

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de simulations obtenus par le logiciel MATLAB. Ces simulations sont basées sur l'étude théorique des trois chapitres précédents. Les paramètres clés sur lesquels nous nous sommes basés, seront donnés dans ce qui suit.

4.2 Bit Error Rate (BER)

Dans tous nos calculs dans la partie simulation, le BER sera considéré comme étant le nombre de bits reçus d'un flux de données sur un canal de communication qui ont été altérées à cause du bruit, des interférences, de la distorsion ou des erreurs de synchronisation des bits divisés par le flux de bits envoyé.

4.3 Signal-to-Noise Ratio (SNR)

C'est à partir de cette mesure que l'opérateur de téléphonie utilise pour comparer le niveau d'un signal souhaité au niveau du bruit de fond. Le SNR est défini comme le rapport de la puissance du signal à la puissance du bruit, souvent exprimé en décibels.

4.4 La technologie 5G

Lors de notre conception nous avons installé une station de base et plusieurs sites de réception dans un environnement suburbain, en plaçant les antennes pour obtenir une visibilité en ligne droite sur un terrain intermédiaire. Un système multi-utilisateurs à entrées et sorties multiples (MU-MIMO) avec des antennes à haut gain. L'intensité du signal sur les sites de réception est évaluée pour deux fréquences (28 GHz et 3.5 GHz) en présence de l'affaiblissement du trajet (feuillage, pluie).

4.4.1 Création d'une BS sur une fréquence de 28 GHz

Nous avons créé une station de base émettrice à Béjaia plus exactement à Bir Es-Salam et quatre autres sites récepteurs, nommés places 1, 2, 3 et 4. La station de base émet à 28 GHz, une puissance de 1 Watt. La **figure 4.1** montre le plan dans le Site Viewer. Cette station est colorée en rouge et il est possible aussi de distinguer les antennes réceptrices en bleu sur la même figure. Et le **tableau 4.1** représente les coordonnées de la BS et de chaque site récepteur pour effectuer leurs installations.

	Longitude	Latitude
Biresselam	5.055290	36.723114
Place 1	5.056698	36.723990
Place 2	5.058629	36.726742
Place 3	5.062622	36.736801
Place 4	5.062590	36.722102

TABLE 4.1 – les coordonnées GPS de la BS et les sites récepteurs

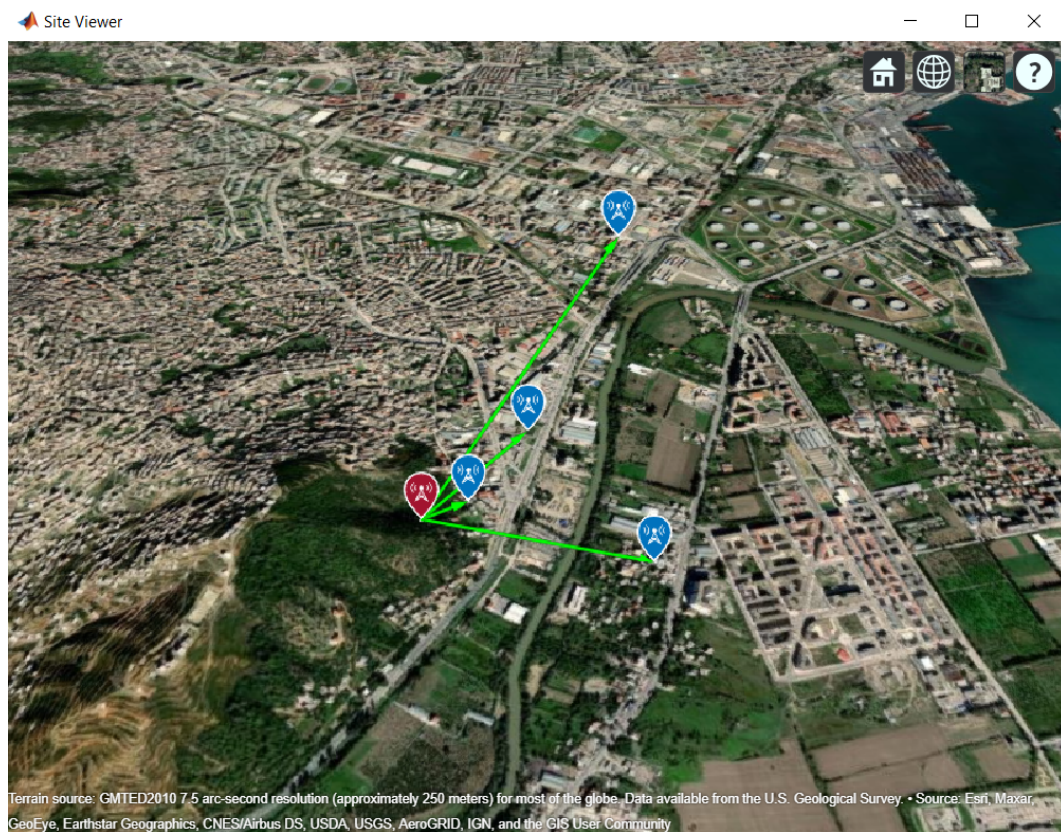


FIGURE 4.1 – Implémentation du réseau d’antennes.

4.4.2 Création d’un réseau d’antennes de station de base 8 par 12

Nous avons implémenté un réseau d’antennes 8 par 12, composé d’éléments d’antennes dipôles croisés, pour générer un faisceau hautement directif. Ce système met en œuvre un concept 5G utilisant MU-MIMO. Les coordonnées du site sont données en légende de la **figure 4.2**.

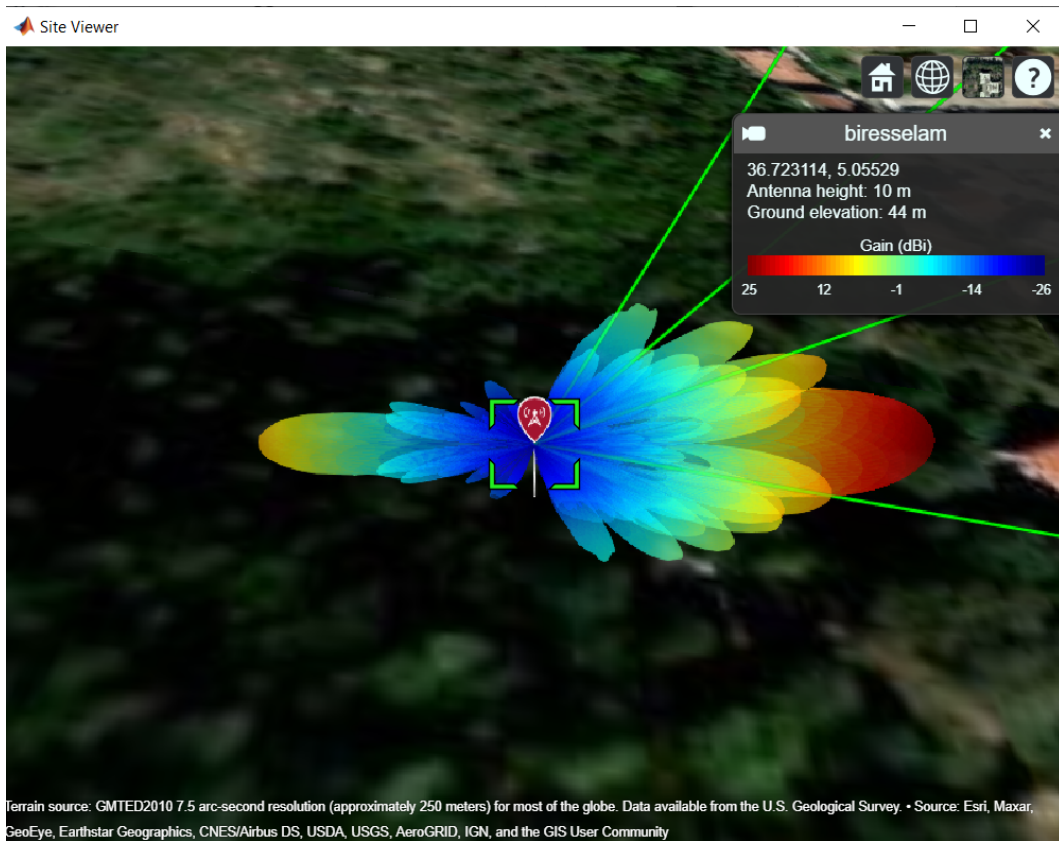


FIGURE 4.2 – Réseau d’antennes de station de base 8 par 12.

4.4.3 Création d’un réseau d’antennes 3 par 3 sur le site du récepteur

Nous avons conçu un réseau d’antennes rectangulaire 3 par 3 à partir d’un élément d’antenne dipôle vertical à réflecteur. Il est à noter qu’à chaque site de réception, nous avons pointé le réseau vers la station de base.



FIGURE 4.3 – Réseau d’antennes 3 par 3 sur le site du récepteur

4.4.4 Prédiction de la force du signal dans l’espace libre avec le beamforming

Nous avons calculé la puissance du signal reçu pour chaque site de réception en utilisant le modèle de propagation en espace libre. Pour chaque site, le faisceau de la station de base est orienté afin d’optimiser la directivité de la liaison.

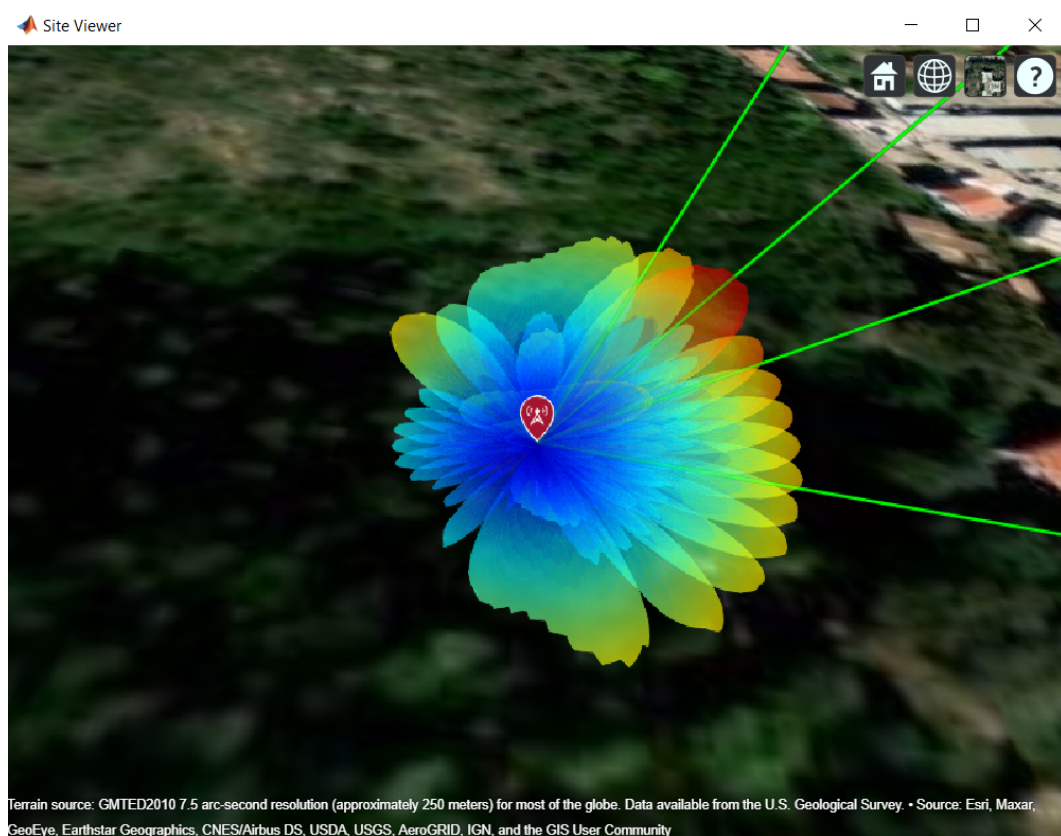


FIGURE 4.4 – Transmission à tour de rôle.

Les conditions de propagation supposées favorables en espace libre, produisent des signaux forts aux sites de réception, en supposant une sensibilité de réception de -84dBm [29]. Après la simulation, nous avons obtenu les puissances du signal reçu pour chaque site de réception. D’après le **tableau 4.2**, nous remarquons que la puissance du signal correspond à la sensibilité du récepteur.

4.4.5 Transmission simultanée

Au lieu de diriger le faisceau de l’antenne de la station de base vers chaque site de réception à tour de rôle, nous avons généré un seul faisceau qui peut être transmis simultanément vers tous les sites de réception. Nous remarquons que le faisceau unique génère des lobes de rayonnement vers les trois sites de réception tel que montré par la **figure 4.5**. Sur le **tableau 4.2** on peut voir que l’intensité du signal diminue à chaque site de réception en cas de transmission simultanée, mais elle correspond toujours à la sensibilité du récepteur.

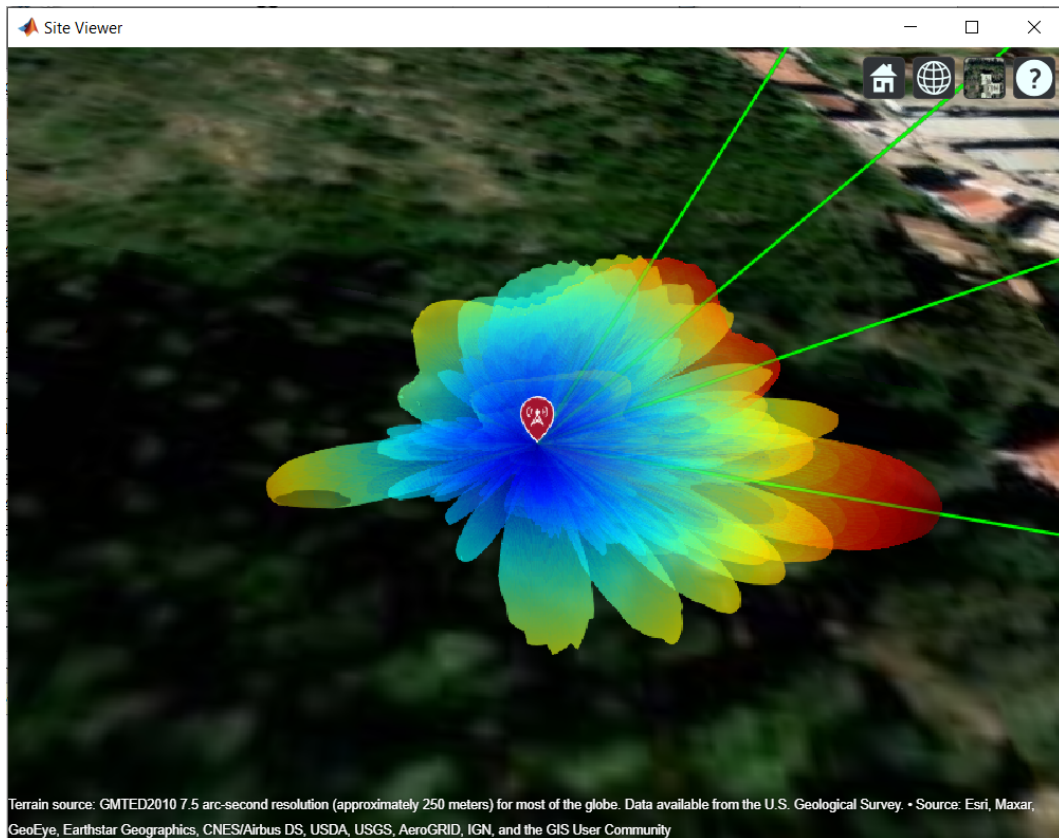


FIGURE 4.5 – Transmission simultanée

4.4.6 Ajout de l'affaiblissement des trajets (Add Path Loss Impairments)

Le feuillage et les conditions météorologiques entraînent une atténuation supplémentaire du signal. Nous avons utilisé le modèle de Weissberger pour estimer la perte de trajet due au feuillage, et du modèle de propagation de la pluie pour estimer la force du signal due au temps. Le calcul de la perte par trajet due au feuillage a donné une valeur égale à 22,7422 dB. Après avoir traversé le feuillage et en présence de l'affaiblissement du trajet lors de sa propagation, nous remarquons que la puissance du signal estimée diminue et devient faible (voir le **tableau 4.2**). Afin de rendre la simulation réaliste, c'est-à-dire en plus du feuillage, nous avons ajouté un autre facteur de déficience qui est la pluie. Ce dernier paramètre nous a permis de remplir l'avant dernière colonne du **tableau 4.2**. D'après ce résultat nous avons remarqué que les puissances estimées ont trop diminué et que la puissance reçue sur le site était en dessous de la sensibilité du récepteur (place 3).

4.4.7 Performances dans la bande de 3,5 GHz

La bande des 3,5 GHz est une bande importante à l'étude pour la radio 5G. Le système MU-MIMO a été repensé pour cette fréquence inférieure afin d'obtenir une perte de trajet plus favorable et d'obtenir la puissance de signal requise. Nous avons calculé la puissance du signal reçu à chaque site de réception, et avons généré une carte de couverture en utilisant le modèle de propagation de Longley-Rice avec les dégradations météorologiques. Le modèle de Longley-Rice, également connu sous le nom de modèle de terrain irrégulier (ITM) qui estime la perte de trajectoire en fonction de la diffraction et d'autres pertes dérivées du terrain. Le modèle Longley-Rice est valable de 20 MHz à 20 GHz et est donc représentatif pour 3,5 GHz mais pas pour 28 GHz. Après avoir appliqué le modèle précédemment décrit nous avons obtenu 12.5996 dB de pertes sur le trajet dues aux feuillages. En observant le **tableau 4.2**, nous remarquons que la puissance au niveau de chaque site de récepteur a augmenté. Sur la base de la conception décrite, nous avons montré comment planifier une liaison d'accès sans fil sur un terrain utilisant les technologies 5G dans un scénario suburbain multi-utilisateurs. Les pertes de trajet rendent la fréquence porteuse de 28 GHz inadaptée aux liaisons malgré l'utilisation d'antennes à haut gain et le beamforming. L'ajout de la seule perte de feuillage fait baisser la puissance du signal en dessous de la sensibilité du récepteur de -84 dBm, et l'ajout de la perte de temps l'a fait encore baisser de manière significative. La fréquence inférieure de 3,5 GHz est nécessaire pour obtenir des liaisons efficaces dans les plages de plusieurs kilomètres considérées ici. Par conséquent, ce calcul illustre la sensibilité des fréquences porteuses 5G élevées aux affaiblissements du trajet multiple.

4.4.8 Les puissances à chaque site récepteur

La mesure des valeurs de la puissance reçue à chaque site récepteur pour les différentes étapes de simulation est représentée sur le **tableau 4.2**.

	La transmission à tour de rôle avec le beamforming	La transmission simultanée avec le beamforming	L'ajout de feuillage	L'ajout de la pluie	La bande 3.5 GHz
Place 1	-38.8108 dBm	-45.8271 dBm	-68.5693 dBm	-69.0531 dBm	-40.1617 dBm
Place 2	-48.8116 dBm	-54.9854 dBm	-77.7276 dBm	-79.2104 dBm	-49.4934 dBm
Place 3	-60.6808 dBm	-65.8783 dBm	-88.6205 dBm	-93.3059 dBm	-60.4344 dBm
Place 4	-48.3048 dBm	-52.0938 dBm	-74.836 dBm	-76.7802 dBm	-46.5945 dBm

TABLE 4.2 – Les puissances reçues à chaque site récepteur

4.5 Introduction du beamforming lors de la transmission

Dans cette section nous présentons la comparaison de l'évolution du taux d'erreur binaire BER en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) pour une transmission sans fil avec et sans beamforming. La **figure 4.6** représente le résultat obtenu après simulation et le **tableau 4.3** les paramètres utilisés dans cette dernière :

Paramètres	Types ou valeur
Modulation	QPSK
Canal	Rayleigh fading
Nombre de bit transmis	10^6
Normalisation d'énergie à	1
Nombre de tapes	4

TABLE 4.3 – paramètres utilisés dans la transmission sans et avec beamforming.

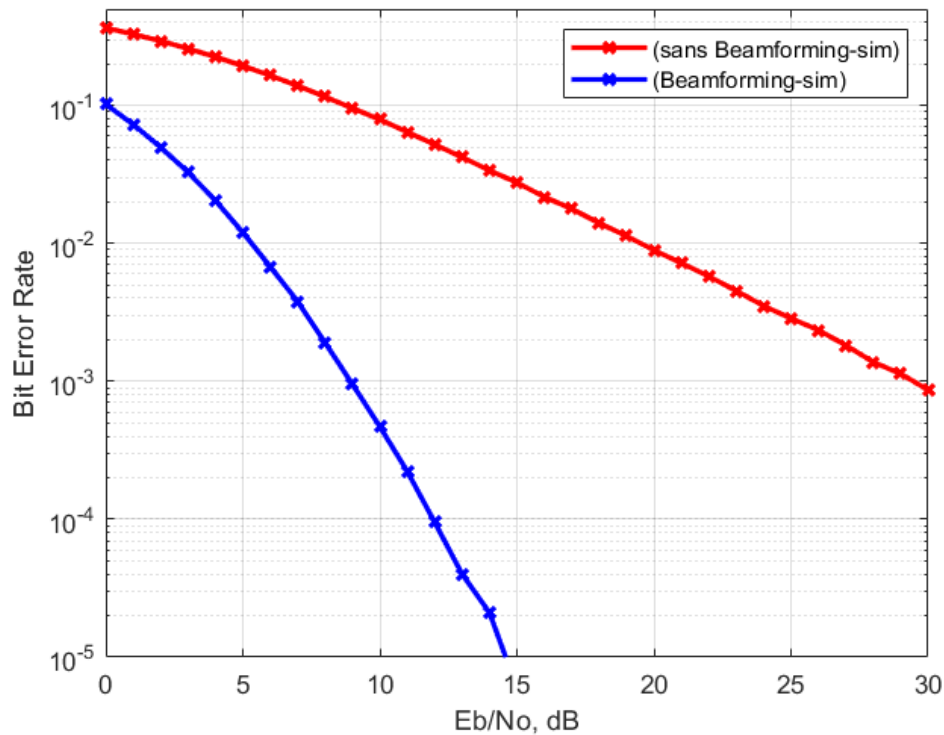


FIGURE 4.6 – BER en fonction du SNR pour transmission sans fil avec et sans le beamforming.

La **figure 4.6** montre clairement que la transmission avec le beamforming atteint la valeur BER de 10^{-5} pour un SNR ≈ 14.5 dB tandis que la transmission sans le beamforming atteint la valeur BER de 10^{-3} pour un $SNR = 30$ dB. Nous constatons que le BER est plus faible dans une transmission avec beamforming.

4.6 Précodage

Dans cette section nous avons fait la comparaison entre les techniques d'égalisation en liaison montante (UL) et en liaison descendante (DL) dans un système massive MIMO. Le **tableau 4.4** représente les paramètres utilisés dans cette simulation dans la liaison montante et descendante :

Paramètres	valeur
Nombre de BSs	$L = 16$
Nombre d'utilisateurs par BS	$K = 10$
Nombre d'antennes par BS	$M = 100$
Bande passante de communication	$B = 20^6$
Puissance d'émission totale de liaison montante par UE (mW)	$P = 100$
Nombre d'échantillons par bloc de cohérence	$T_c = 200$

TABLE 4.4 – Paramètres utilisés dans la liaison montante et descendante.

4.6.1 En liaison montante

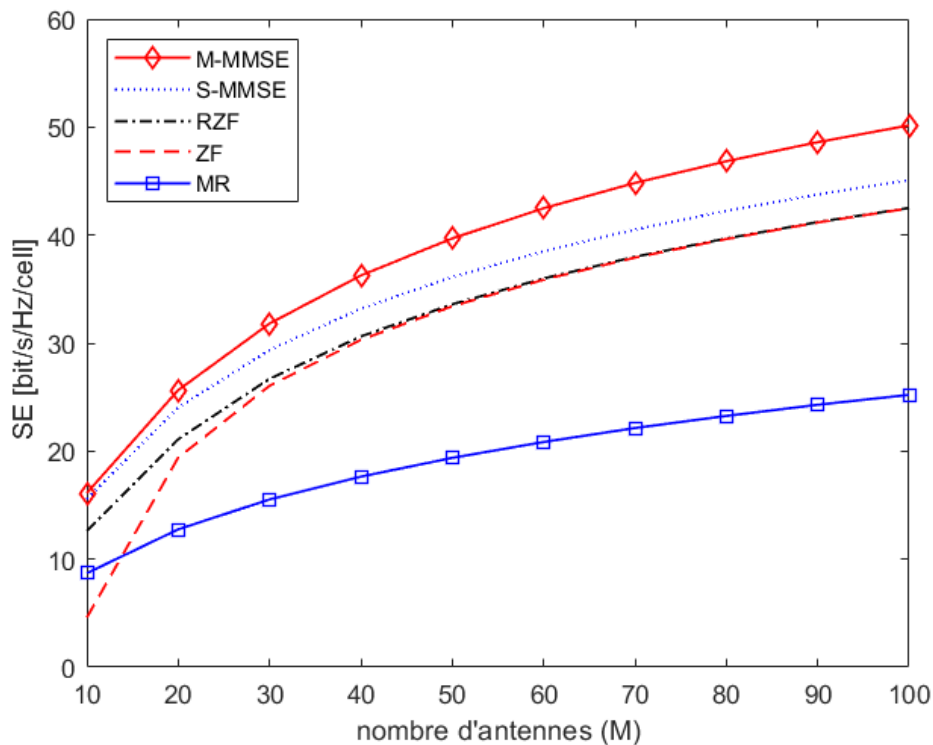


FIGURE 4.7 – Efficacité spectrale de liaison montante en fonction de nombre d'antennes M de BS pour des différents précodages [7].

La **figure 4.7** montre la somme moyenne de la SE de la liaison montante en fonction du nombre d'antennes de la BS. Nous remarquons dans cette figure que le MMSE donne la plus grande valeur de SE. Cette dernière se réduit un peu à chaque approximation qui est faite pour obtenir un schéma de moindre complexité par rapport au M-MMSE. Le schéma S-MMSE fournit une SE inférieure à M-MMSE, mais 5% à 10% de SE plus élevé que RZF et ZF. Notons que RZF et ZF donnent essentiellement le même SE dans la gamme $M \geq 30$ qui est le principal intérêt dans Massive MIMO, mais la SE avec ZF se détériore rapidement pour $M < 20$ car la BS n'a pas assez de degrés de liberté pour annuler l'interférence sans annuler également une grande partie du signal souhaité. Par conséquent, ZF doit être évité pour obtenir une implémentation robuste.

4.6.2 En liaison descendante

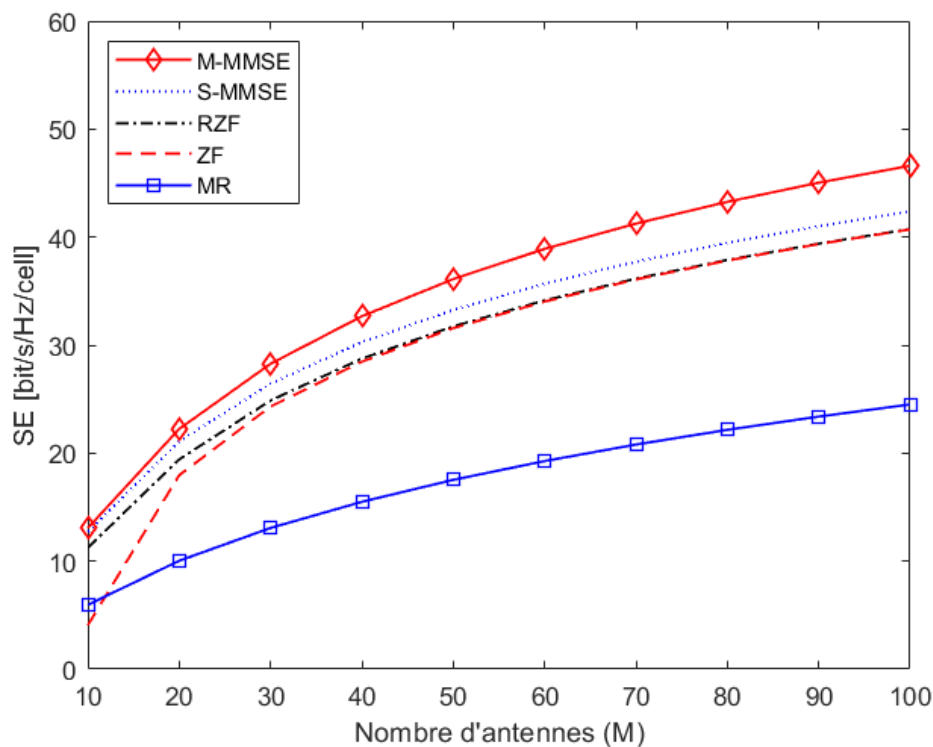


FIGURE 4.8 – Efficacité spectrale de liaison descendante en fonction du nombre d'antennes M de BS pour des différents pré-codages[7].

Les précodages M-MMSE, S-MMSE, RZF, ZF et MR illustrés sur la figure 4.8, se comportent de la même manière que leurs homologues de la liaison montante. M-MMSE fournit la SE le plus élevé pour un nombre quelconque d’antennes. S-MMSE, RZF, et ZF fournissent presque la même SE, sauf que ZF a la robustesse pour $M < 20$ antennes. Enfin, MR fournit la SE la plus faible parmi tous les régimes et c’est aussi le seul régime qui préfère le durcissement lié au-delà de la limite d’estimation. La technique MR n’atteint que 40 à 50% de la SE retrouvée à partir du M-MMSE et 50 – 60% du SE fournie par RZF.

4.7 Comparaison entre MIMO-OFDM et le massive MIMO

Maintenant nous faisons une comparaison entre les deux techniques MIMO-OFDM et Massive MIMO comme illustré sur la **figure 4.9**. Les **tableaux 4.5, 4.6** représentent les paramètres de la simulation :

Paramètres	Types ou valeurs
Modulation	QPSK
Canal	AWGN
Taille du FFT/IFFT	1024
Taille du CP	9
Variance d’évanouissement	0.5
Nombre de frames	10^3

TABLE 4.5 – paramètres du système MIMO-OFDM.

Paramètres	Types ou valeurs
Modulation	QPSK
Canal	AWGN
Nombre d'antennes utilisateurs	16
Nombre d'antennes de BS	128
Variance d'évanouissement	0.5
Nombre de frames	10^3

TABLE 4.6 – paramètres utilisés dans le système massive MIMO

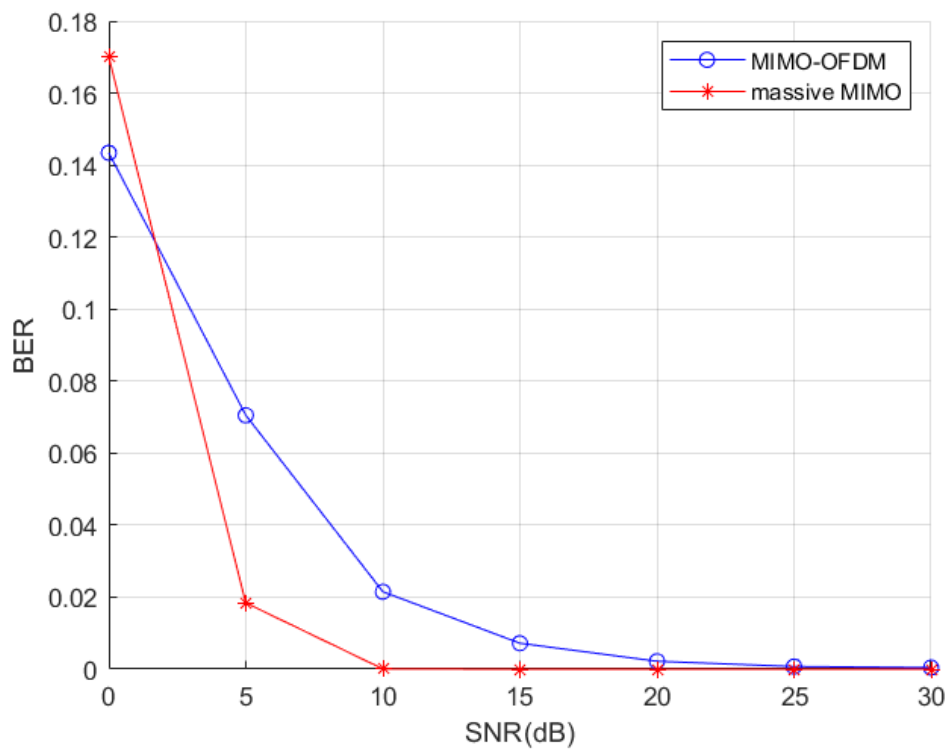


FIGURE 4.9 – BER en fonction du SNR pour le massive MIMO et le MIMO-OFDM..

Les résultats de simulation obtenus sur la **Figure 4.9** montrent nettement que le massive MIMO enregistre un BER plus faible que le MIMO-OFDM. Pour un SNR = 5 dB le MIMO-OFDM enregistre un BER ≈ 0.07 tandis que le massive MIMO enregistre un $BER \approx 0.02$. En prenant le SNR = 10 dB le BER du MIMO-OFDM est égale à 0.02 dB par contre celui du massive est égale à 0 db. Nous constatons que le massive MIMO est plus performant que

le MIMO-OFDM.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre on peut conclure que : Dans la première partie, lorsque nous avons étudié la planification des antennes, nous avons constaté que les pertes de trajet rendent la fréquence porteuse de 28 GHz inadaptée aux liaisons malgré l'utilisation d'antennes à haut gain et la formation de faisceaux. Et nous avons constaté que la fréquence inférieure de 3,5 GHz est nécessaire pour obtenir des liaisons efficaces dans les plages de plusieurs kilomètres considérées dans cet exemple. Dans la deuxième partie nous avons constaté que la transmission avec le beamforming est plus performante que celle sans le beamforming. Dans la troisième partie nous avons constaté que le pré-codage linéaire comme le RZF, améliore le SE. Finalement nous avons fait une comparaison entre le massive MIMO et le MIMO-OFDM et nous avons conclu que le massive MIMO est plus performant que le MIMO-OFDM.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les systèmes de communication cellulaire de nouvelle génération notamment la 5G, sont assistés par des technologies qui produisent des améliorations significatives du débit cellulaire. Dans ce mémoire, nous avons projeté la lumière sur la technologie massive MIMO qui utilise un grand nombre d'antennes fonctionnant de manière cohérente en phase dans les stations de base sans fil pour desservir une multitude d'utilisateurs par multiplexage spatial. La technique faisant appel au massive MIMO sont considérés comme étant des systèmes MIMO dans lesquels des précodeurs et/ou des détecteurs contenant de nombreuses antennes ont été intégrés. Un nombre important d'antennes permet d'obtenir une efficacité spectrale et une efficacité énergétique très élevées.

Durant la réalisation de notre projet de fin d'étude, en premier lieu nous avons exposé le fondement théorique des réseaux mobiles et plus précisément le concept et les techniques de la nouvelle génération attendue dans le domaine des télécommunications 5G.

En second lieu, nous avons réalisé une étude théorique du système de la technique massive MIMO et nous avons vu qu'elle procure un grand nombre d'avantages en termes de latence, de débit et de fiabilité.

Par la suite nous avons, dans le chapitre 3, présenté brièvement le procédé de la modulation OFDM, MIMO-OFDM ainsi que leurs caractéristiques.

Finalement, nous avons présenté et discuté les résultats obtenus lors de nos simulations sous Matlab dans le dernier chapitre. Au début, une planification des antennes 5G a été faite sur une zone suburbaine pour constater les effets de la distance et les interférences sur la puissance des signaux envoyés. Ensuite, une comparaison a été effectuée entre les différents résultats obtenus sur une transmission avec et sans beamforming, aussi entre les différents précodeurs du massive MIMO et a la fin entre le massive MIMO et MIMO-OFDM.

ANNEXE A

A.1 New Generation Radio Acces Network (NG-RAN)

Tel que représenté sur la **figure A.1**, il s'agit pour le NG-RAN d'un ensemble de stations de bases 5G, appelées gNBs, connectées au 5GC à travers un ensemble d'interfaces logiques. Les gNBs peuvent être interconnectées à travers l'interface Xn pour améliorer les fonctions de mobilité (handover) et de gestion (coordination d'interférences intercellulaires) [17].

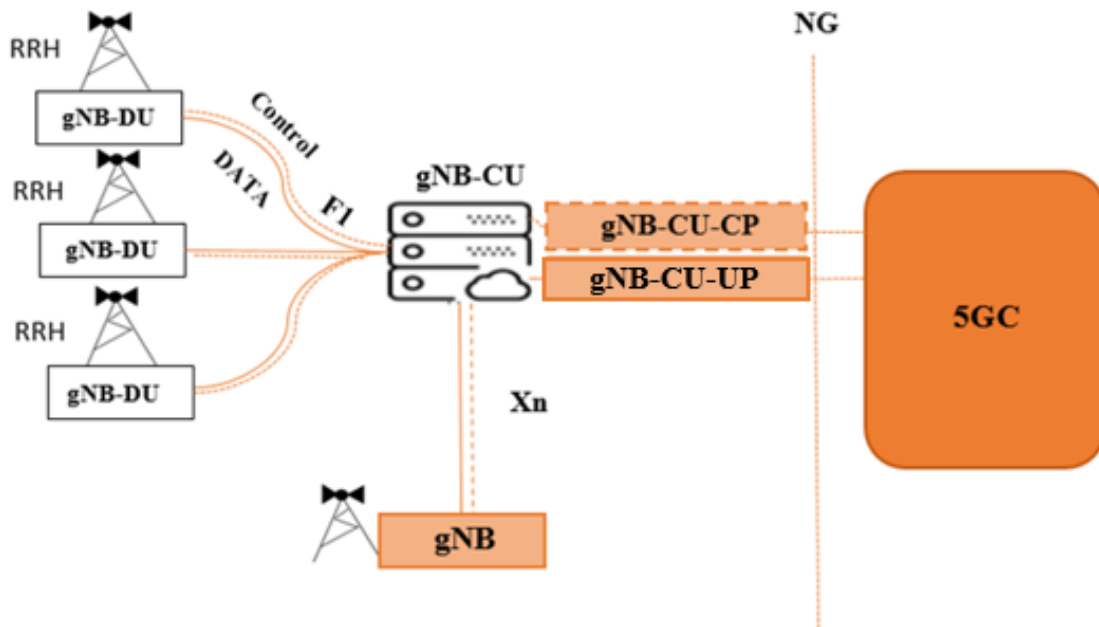


FIGURE A.1 – Architecture de NG-RAN [17].

Le fonctionnement de la gNB est parfois réparti. Dans ce cas, l'architecture résultante est formée par une unité centrale (gNB-CU) qui nécessite une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) et connecté à une carte radio distante (RRH Remote Radio Head). L'unité centrale est encore divisée en deux parties, une pour les fonctions de plan de contrôle (gNB-CU-CP) et l'autre pour les fonctions de plan d'utilisateur (gNB-CU-UP) [19].

A.1.1 Le réseau cœur de la 5G (Core Network 5GC)

La décomposition des fonctions exécutées par les nœuds de réseau des générations précédentes a conduit à une architecture 5G complètement définies en termes de fonctions de réseau exposées sous formes de services. Comme se produit dans le NG-RAN, il y a une séparation entre les plans contrôle et utilisateur. Dans le plan utilisateur il se trouve une ou plusieurs fonctions UP (UPFs), qui effectuent principalement le transfert de paquets entre les différents tunnels de NG-U qui forment la session PDU. Toutes les autres fonctions du réseau appartiennent au plan contrôle. Un autre changement radical par rapport aux générations précédentes est la modélisation d'interface, qui a été passé de " l'orientation-bit point-à-point " (bit-oriented point-to-point) vers " l'orientation-web basée-service " (web-oriented service-based). En effet, 5GC a une architecture basée sur le service applicable partout, les procédures sont définies comme des services de sorte qu'il est possible de les réutiliser. Il existe une interface point-à-point normalisée, soit réelle où logique, entre toute paire d'entités de réseau 2G, 3G et 4G en interaction. Cette interface utilise un protocole spécial orienté-bit. Dans le réseau cœur 5G, les interactions entre les entités du plan contrôle, utilisent des interfaces basées sur les services prises en charge par des outils web tels que HTTP/2, REST et JSON [17].

A.2 La nouvelle interface radio5G (New Radio)

Répondre aux exigences mentionnées nécessite des changements radicaux dans le modèle du réseau en plus d'innovations perturbatrices et indispensables. Dans ce contexte, les réseaux 5G doivent faire appel à un large éventail de nouvelles technologies. Cela permet un saut dans les performances qui éclipsent ses prédécesseurs. Ces innovations toucheront la transmission et

la conception de la couche physique en plus d'introduire des bouleversements dans les couches supérieures du réseau. En fait, 5G New Radio (NR) utilisera de nombreuses technologies clés afin d'atteindre de nouveaux niveaux de performance et d'efficacité. Les combinaisons de ces dernières étendront l'importance des communications mobiles et leurs permettront de jouer un rôle central dans un monde de cas d'utilisation changeants. Parmi les innovations potentielles dans la couche physique 5G [1].

A.3 Types de modulation utilisés

La transmission des données est assurée en modulant le signal entre la BS et terminal, c'est-à-dire en codant l'information avant de l'envoyer sur le canal de transmission. Le multiplexage permet de faire passer plusieurs données sur un même canal de transmission. Depuis le début de la téléphonie mobile, différents types de modulation multiplexées ont été utilisés. 1G utilise la modulation FDMA (Frequency Division Multiple Access), 2G utilise la TDMA (Time Division Multiple Access), CDMA (Code Division Multiple Access) pour la 3G et l'OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) pour la 4G. Cependant La 5G utilisera comme la 4G de l'OFDMA (orthogonal frequency-division multiple access) mais avec beaucoup plus de flexibilité et de souplesse dans le découpage en temps et en fréquence pour permettre de servir des utilisateurs aux contraintes très variées[1]. Cette modulation consiste à transmettre simultanément des signaux sur plusieurs porteuses différentes ce qui résulte en de fortes variabilités des niveaux instantanés du fait d'interférences constructives et destructives. Ces additions constructives se mesurent par le PAPR (Peak to Average Power Ratio) qui est le rapport entre la valeur crête et la valeur moyenne d'un signal [16].

ANNEXE B

B.1 Types de Massive MIMO

B.1.1 Single-User Massive MIMO

En raison de la difficulté physique des terminaux, le nombre d'antennes au terminal est généralement bien inférieur à M . Par conséquent, les structures SU-MIMO entrent dans le premier cas lorsqu'une quantité massive d'antennes est installée dans la station de base, et profitent donc des avantages de l'orthogonalité des canaux si les conditions de propagation des canaux sont favorables. Cependant, les canaux SU-MIMO peuvent être extraordinairement corrélés en raison de la courte distance des antennes du côté terminal et d'un environnement en visibilité directe viable. Du point de vue de l'efficacité énergétique, l'utilisation d'un réseau à grand nombre d'antennes pour desservir une seule ou une petite quantité d'UE peut en outre ne pas être judicieuse. Par conséquent, dans ce cas, la réalisation de massive MIMO pour SU-MIMO peut également être limitée[2].

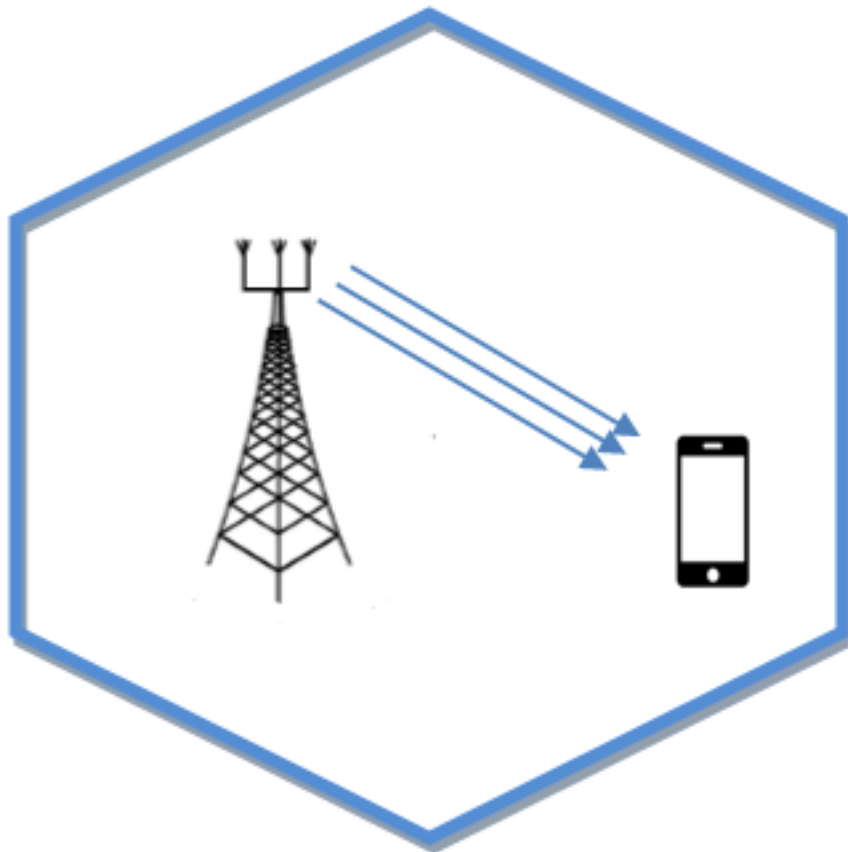


FIGURE B.1 – SU Massive MIMO [2]

Le signal reçu à la BS d'un système SU-MIMO sera :

$$y = \sqrt{pu}hs + w \quad (\text{B.1})$$

Notons que pu est le SNR de liaison montante, h le vecteur de réponse de canal, s le vecteur symbole et w le vecteur de bruit AWGN[2].

B.1.2 Multi-User Massive MIMO

Lorsque plusieurs terminaux sont autorisés à accéder à une ressource temps-fréquence identique, MU-MIMO offre une plus grande efficacité du système par rapport à SU-MIMO. Dans cette section, nous avons considéré un système MU-MIMO monocellulaire dans lequel la station de base dessert K utilisateur et chaque terminal est équipé d'une antenne[2]. Le

signal reçu à la BS d'un système MU-MIMO de liaison montante est[2] :

$$\begin{aligned} y &= \sum_{k=1}^K \sqrt{P_u} h_k s_k + w \\ y &= \sqrt{P_u} H S + w \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

- y est le vecteur du signal reçu $M \times 1$ $h_k \in H$. Où $H = [h_1 \dots h_k \dots h_K]$ représente le vecteur de canal entre les antennes BS et l'utilisateur K - $s_k \in S$. Par exemple $S^T = [s_1 \dots s_k \dots s_K]$ représente le symbole transmis par le K^{ime} UT.

- w représente le bruit blanc additif gaussien (AWGN).

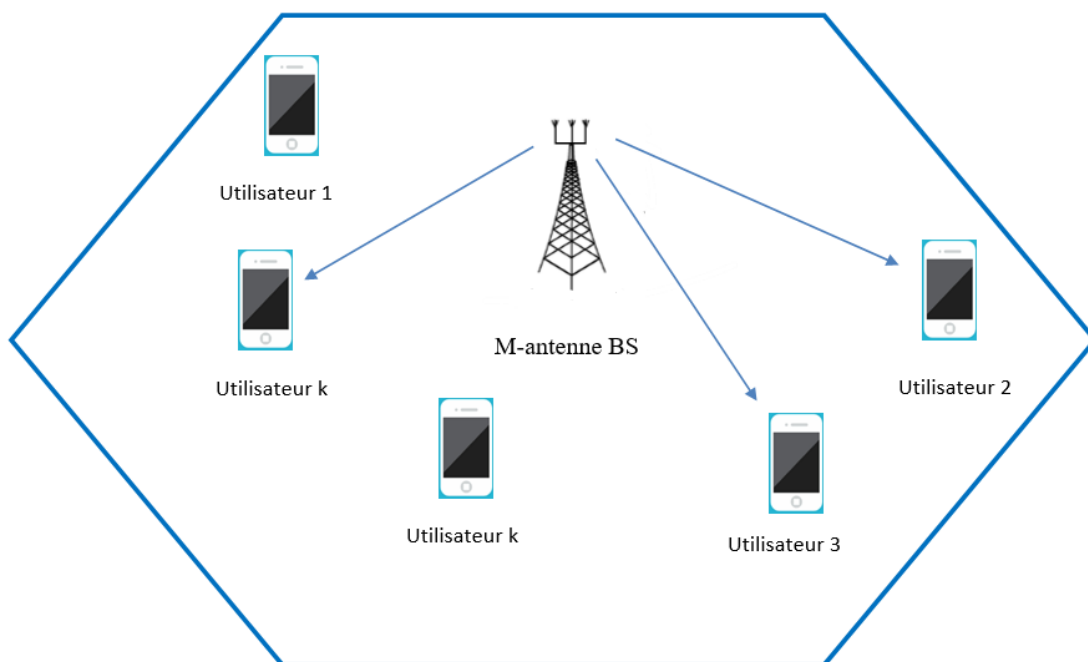


FIGURE B.2 – Système MU Massive MIMO. M-antennes de la BS desservent K UT[2].

Lorsque $K \geq 2$, le signal obtenu de chaque UE interfère avec ceux des autres terminaux, et donc nous devrions anticiper que l'information mutuelle de chaque terminal pour MU-MIMO est plus petite que celle pour SU-MIMO étant donné la même puissance émise à chaque terminal. Toutefois, lorsque $M \gg K$, l'orthogonalisation du canal se met en place, de sorte que le signal obtenu de chaque terminal est presque orthogonal, c'est-à-dire sans interférence dans le secteur de signalisation favorisé sous des conditions de propagation du canal favorable[2]. En outre, étant donné que les terminaux sont autonomes, la condition de propagation du canal favorable est généralement satisfaite car les antennes des terminaux sont presque non corrélées et non couplées. Cela suggère que le massif MIMO utilise la

configuration MU-MIMO [2].

B.1.3 Multi-User Massive MIMO avec scenario Multi-Cell

Dans cette section, nous envisageons la restriction des systemes MIMO cellulaires multi-utilisateurs non coopératifs, car M est élevé, pour une cellule unique ou bien pour les MIMO multicellulaires. Théoriquement, pour que le bruit thermique et l'évanouissement de Rayleigh à petite échelle disparaissent il faut augmenter M indéfiniment. Cependant, avec plus d'une cellule, l'interférence de cellules distinctes due à l'interférence du pilote persistera l'idée de contamination pilote est nouvelle dans le contexte cellulaire MU-MIMO. Cependant, elle posait auparavant un problème dans le contexte du CDMA, généralement sous la nomination "contamination pilote". L'estimation du canal calculée à l'aide de la station de base dans la cellule 1 étant contaminée par la transmission du pilote de la cellule j . La BS dans la cellule 1 va former son signal partiellement le long du canal vers les terminaux de la cellule adjacente. En raison du beamforming, l'interférence sur la cellule j ne disparaît pas de manière asymptotique comme $M \rightarrow \infty$. Toutes les cellules desservent K terminaux indépendants et ont M antennes à la BS. Les BS sont supposées non coopératives. La matrice du canal composite $M \times K$ entre les K utilisateurs de la cellule 1 et la BS de la cellule j est désignée par H_{jl} . S'appuyant sur la réciprocité, la matrice de canal de liaison descendante entre la station de base de la cellule j et les terminaux de la cellule 1 est présentée par H_{jl}^T . Le signal reçu à la $j^{i\text{me}}$ station de base sera le suivant [2] :

$$\begin{aligned} y_j &= \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{p_u} h_{jl} s_{lk} + w \\ y_j &= \sum_{l=1}^L \sqrt{p_u} H_{jl} s_l + w \end{aligned} \tag{B.3}$$

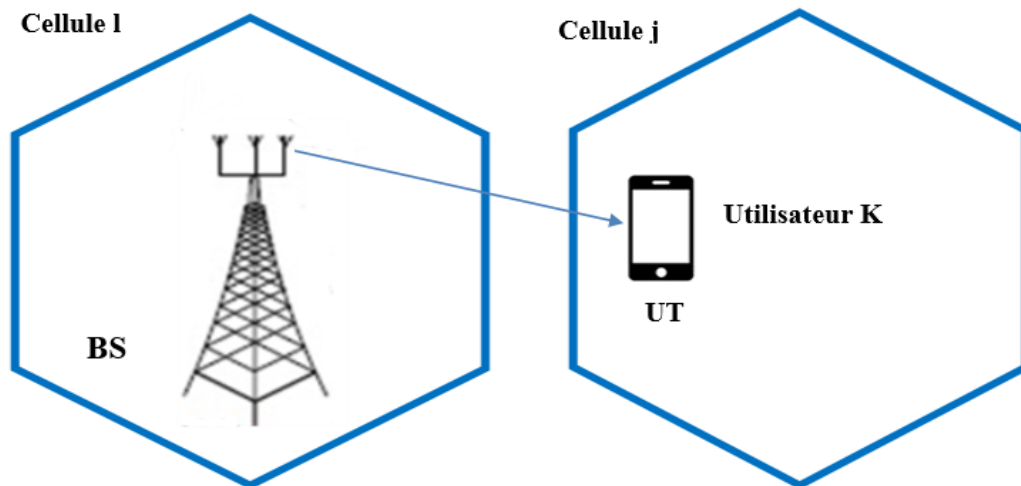


FIGURE B.3 – La station de base dans la 1^{me} cellule et le k^{me} utilisateur dans la j^{im} cellule[2].

B.1.4 Massive MIMO distribuée

Le massive MIMO distribué peut être traité comme un cas distinct de la MU-MIMO pour fournir une plus grande capacité du système en utilisant des antennes dispersées déployées pour transmettre et recevoir des signaux. L'un des plans de massive MIMO distribué est de permettre la coopération entre les stations de base dans des cellules distinctes, ce qui réduit les interférences intercellulaires. Cependant, la synchronisation devient un problème essentiel, même pour les antennes déployées dans la même station de base. Dans certains cas, la quantité massive d'antennes de la station de base peut en outre être positionnée à des endroits uniques (par exemple, sur le toit d'un bâtiment). Dans ce cas, la synchronisation est un problème, et le frontal RF peu coûteux pourrait également introduire des problèmes plus importants[2].

ANNEXE C

C.1 Définition du PAPR

Le PAPR est un paramètre clé dans un système de télécommunication longue distance. En effet, il nous donne une idée sur le comportement du signal, plus précisément sur les pics d'amplitude et donc de puissance. Cette dernière a une influence directe sur l'amplificateur de puissance (AP). Si nous considérons une fenêtre d'observation T du signal $s(t)$, le PAPR représente le rapport entre la puissance maximale et la puissance moyenne du signal $s(t)$ sur l'intervalle T . Le PAPR est défini comme suit [3] :
$$\text{PAPR} = p_{max}/p_{min} = \frac{\max(|s(t)|^2)_{(0 \leq t \leq T)}}{(1/T) \int_0^T |s(t)|^2 dt}$$

À chaque fois qu'on aura un pic du signal, l'AP doit consommer plus d'énergie pour le transmettre. Or il est nécessaire d'optimiser la consommation d'énergie surtout dans les transmissions sans fil.

C.2 Méthodes de réduction du PAPR

La réduction du PAPR a pour objectif d'atténuer les fluctuations de l'enveloppe du signal, afin de pouvoir amplifier le signal le plus près possible de la zone de saturation, permettant ainsi un meilleur rendement énergétique. Cependant, ce n'est qu'avec l'utilisation de la modulation OFDM dans certains standards de télécommunications (DVB-T, DAB), que l'intérêt pour la réduction du PAPR s'est développé. C'est ainsi que plusieurs méthodes de

réduction du PAPR ont été proposées. On trouve principalement trois catégories de méthodes de réduction du PAPR, à savoir les techniques d'ajout de signal, les techniques probabilistes et les techniques de codage. Les méthodes de réduction du PAPR sont présentées dans les 2 thèmes de nos collègues « Réduction du PAPR avec écrêtage et filtrage lors d'une transmission OFDM » et « Réduction du PAPR par PTS lors d'une transmissions OFDM »

C.3 Principe des modulations multi-porteuses

Le principe de la modulation multi-porteuse de type OFDM consiste à transmettre les données simultanément sur N porteuses modulées à un débit de $R_s N$. Le débit global reste le même mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation[4].

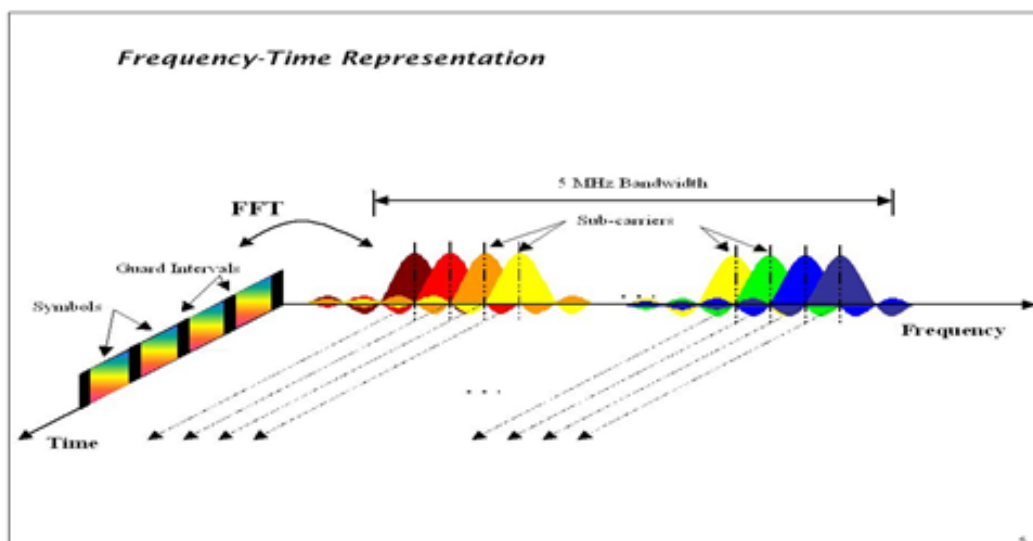


FIGURE C.1 – Modulation OFDM.

Le schéma de principe d'un modulateur OFDM illustré dans la figure en bande de base montre qu'après un codage Bit/Symboles des bits à transmettre et afin de former le signal de sortie les symboles complexe $\{X_l\} l = 1, 2, \dots, N$ sont successivement regroupés par bloc de N (conversion série/parallèle), mis en forme sur une durée T (forme d'onde $g(t)$), puis envoyés sur N porteuses $\{f_n\} n = -\frac{N}{2} \dots \frac{N}{2} - 1$.

Durant l' intervalle du temps $[iT, (i + 1)T[$ le signal OFDM généré s'écrit comme suit[4] :

$$S_i(t) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g \left(t - iT - \frac{T}{2} \right) e^{j2\pi f_0 t}$$

Il représente le i ième symbole OFDM, pendant que les $\{x_{i,n}\} n = -\frac{N}{2} \dots \frac{N}{2}$ représentent les N symboles complexes X_2 qu'il transporte. Le signal reçu s'écrit de cette manière[4] :

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g \left(t - iT - \frac{T}{2} \right) e^{j2\pi f_n t} + n_n(t)$$

Où $n_n(t)$ est le bruit blanc additif gaussien introduit par le canal sur la $n^{ième}$ porteuse. Les symboles transmis peuvent être retrouvés en réception à l'aide d'un filtre adapté suivi d'un échantillonneur[4].

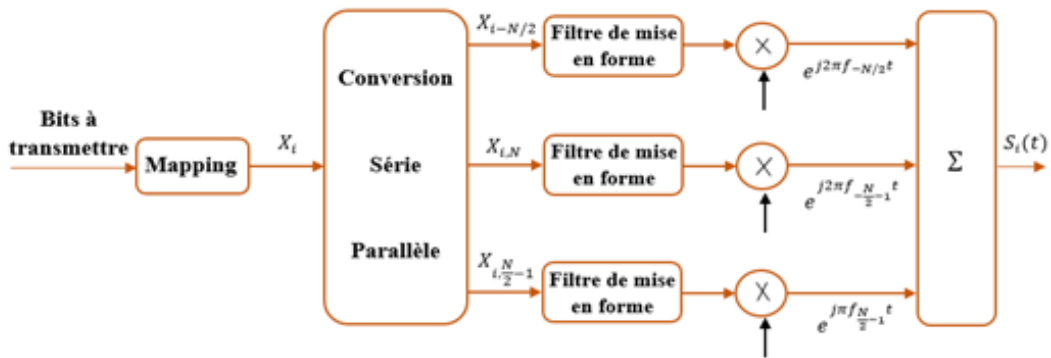


FIGURE C.2 – Schéma de principe d'un modulateur OFDM[4].

C.4 Porteuse orthogonale

l'efficacité spectrale a été définie comme étant le débit binaire transmis par unité de fréquence. Dans une transmission de type OFDM, le choix de l'écart entre les porteuses va influencer sur cette efficacité spectrale. Plus l'espacement entre porteuses est grand, plus nous avons besoin d'une bande passante plus importante pour transmettre un même débit et plus l'efficacité spectrale diminue. Pour que le signal modulé ait une grande efficacité spectrale, il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en garantissant que le récepteur soit capable de les séparer et retrouver le symbole numérique émis sur chacune d'entre elles [4]. Si la condition est vérifiée :

- Dans le domaine temporel si les fonctions

$$\psi_{i,n}(t) = g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} \quad (\text{C.1})$$

sont orthogonales.

- Dans le domaine fréquentiel si le spectre de chaque porteuse est nul aux fréquences des autres porteuses. Ce spectre dépend de

$$G(f) = TF[g(t)] \quad (\text{C.2})$$

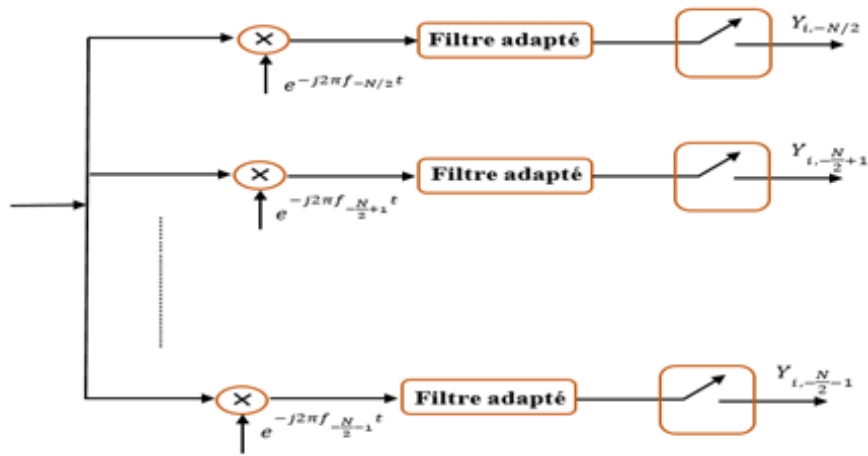


FIGURE C.3 – Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.

On parle de condition d'orthogonalité des porteuses. L'orthogonalité temporelle des fonctions $\psi_{i,n}(t)$ est indispensable dans la mise en oeuvre d'un signal OFDM. En 1966, les travaux de R. W. Chang ont permis de démontrer que l'orthogonalité des fonctions $\psi_{i,n}(t)$ se traduit par des conditions sur le module et la phase de $g(t)$. Parmi les fonctions disponibles, celle qui est la plus utilisée est la fonction porte [4] :

$$g(t) = \text{Rect}_{[0,T[} \quad (\text{C.3})$$

Supposons que les symboles émis sont une variable aléatoire de moyenne nulle et de variance σ^2 , le spectre du signal modulé sur la porteuse n s'écrit de la façon suivante :

$$S_n(f) = \frac{\sigma^2}{2} \text{sinc}^2[\pi(f - f_n)T] \quad (\text{C.4})$$

Ce spectre s'annule aux fréquences $\{f = f_n + k/T\}$ pour tout entier k , donc $\frac{1}{T}$ est un espacement possible des fréquences des différentes porteuses qui permet de garantir à la fois l'

orthogonalité entre les porteuses et une efficacité spectrale optimale. Les spectres des différentes porteuses sont présentés sur la figure, Le spectre d'un signal OFDM est la somme de tous ces spectres[4].

Notons que lorsque la mise en forme est une fonction rectangulaire de longueur T , les filtres adaptés en réception sont des intégrateurs sur la durée T .

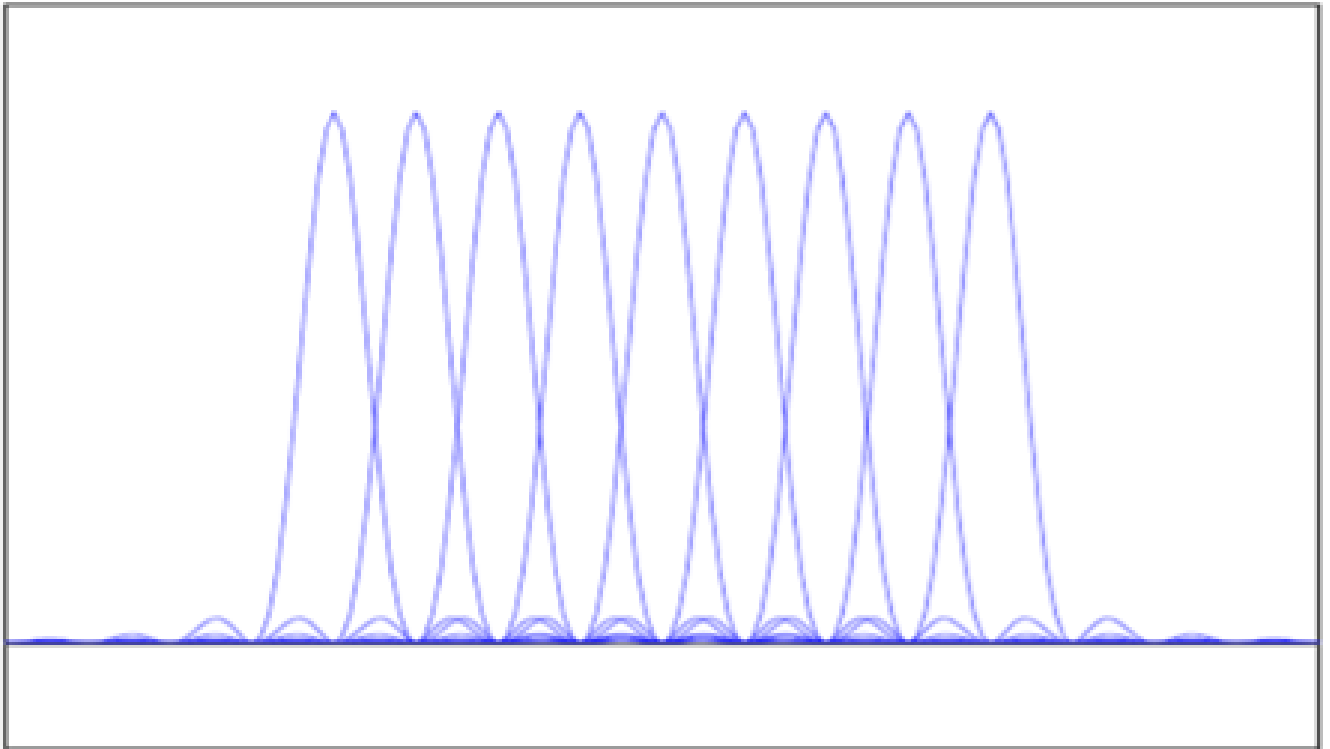


FIGURE C.4 – Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse

C.5 Interférences entre porteuses et symboles :

La figure ci-contre illustre les interférences liées aux trajets multiples provoquant des échos à la réception. Pour l'exemple, deux trajets sont considérés, un principal et un retardé. La réception de la trame i pendant le temps d'intégration T est la somme des différents signaux issus des différents trajets[5].

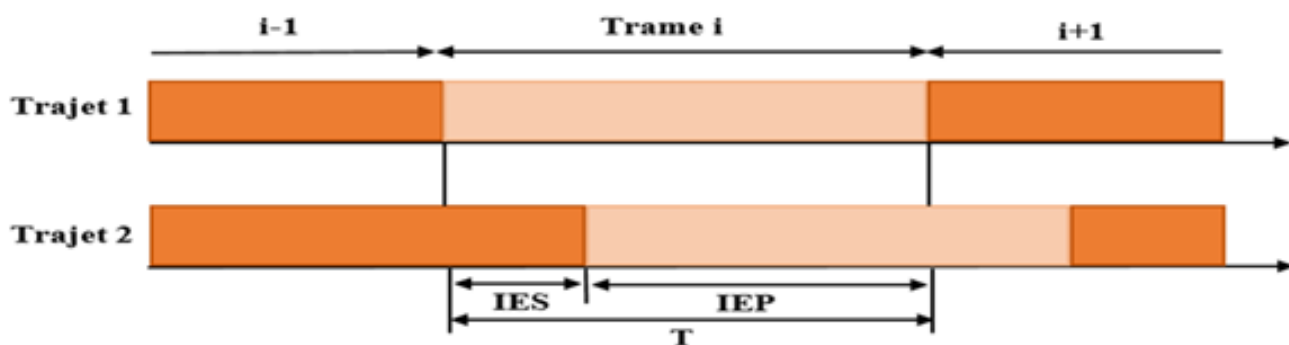


FIGURE C.5 – Propagation des trames OFDM sans intervalle de garde : retards, trajets multiples et interférences [5].

Deux observations peuvent être faites ici[5] :

- Le débordement de la trame retardée $i-1$ sur la période d'intégration du signal issu du trajet principal est une interférence entre symboles qui provoque des distorsions sur les premiers échantillons du signal utile et dont l'effet est la perte d'orthogonalité des sous-porteuses. La conséquence directe est une réduction importante de la performance de la transmission[5].
- Aussi, l'influence de l'écho de la trame i sur elle-même induit une interférence entre porteuses. Selon la phase des échantillons, il en résulte des ajouts constructifs ou destructifs sur le signal véhiculé par le trajet principal. Les IES (intérférence entre symbole) et IEP(intérférence entre porteuse) entretiennent une relation étroite. Du fait de la dispersion en temps des canaux de communication, il est évident que la condition d'orthogonalité est largement menacée. Afin de s'assurer de sa préservation, il convient d'utiliser un intervalle de garde en temps afin d'assurer que les avances ou retards de trames adjacentes n'influent pas en réception[5].

C.6 Intervalle de garde

Pour préserver l'orthogonalité entre les porteuses lorsque le canal introduit des multi-trajets au signal et pour éviter les interférences entre les symboles OFDM transmis succes-

sivement on ajoute un espace entre les symboles qui s'appelle intervalle de garde. Plusieurs techniques existent pour l'introduction des intervalles de gardes pour l'OFDM. Il s'agit soit de remplir l'espace de garde entre deux symboles consécutifs par des zéros (technique utilisée pour certaines transmissions Ultra Wide Band UWB), soit d'introduire une extension cyclique du symbole OFDM. Cependant cette dernière peut être introduite de deux façons différentes : l'une est nommée préfixe cyclique et l'autre suffixe cyclique [5].

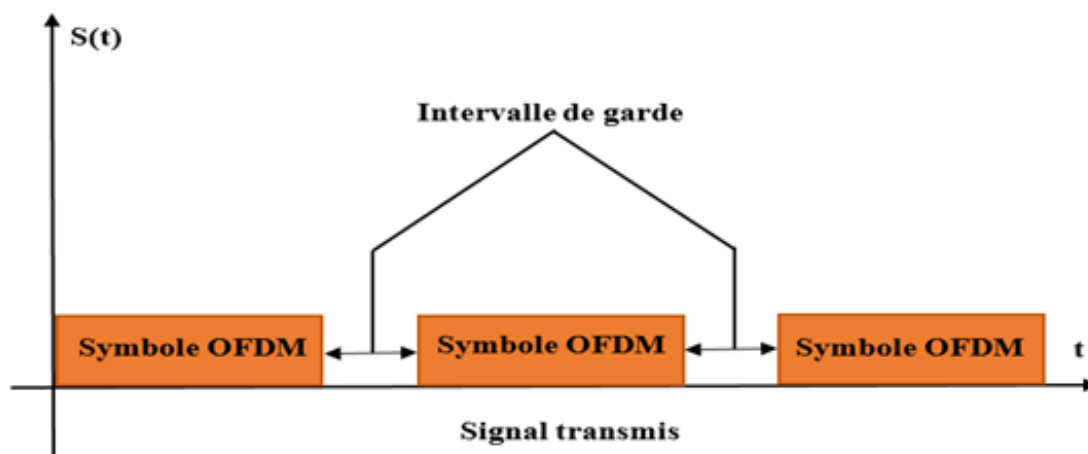


FIGURE C.6 – Intervalle de garde [5].

C.6.1 Remplissage par des zéros

Le remplissage par des zéros c'est une méthode qui consiste à insérer dans l'intervalle de garde des zéros au lieu du préfixe ou suffixe cyclique. La longueur du symbole OFDM est plus courte que dans les cas d'attribution de préfixe cyclique et suffixe cyclique lorsque l'intervalle de garde est rempli par des zéros. Aussi la longueur de la fenêtre rectangulaire de transmission est plus courte que pour le cas contenant les préfixes et suffixes cycliques T_{total} , on aboutit à un spectre correspondant plus large. Le débit est de [5] :

$$\frac{T_{eff}}{T_{total}} = \frac{T_{off}}{T_{total} + T_{Cp}} \quad (C.5)$$

à cause de l'intervalle de garde, est la durée du symbole OFDM ajouté de l'intervalle de garde [5].

C.6.2 Préfixe cyclique

C'est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de ce bloc. Plus clairement, il s'agit de récupérer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début du bloc, on appelle ce mécanisme Préfixe Cyclique (CP-OFDM) [5].

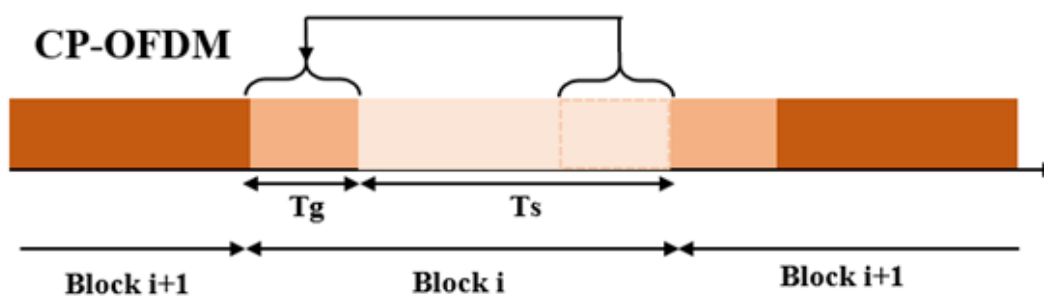


FIGURE C.7 – Préfixe cyclique.

C.6.3 Suffixe cyclique

Le suffixe cyclique est aussi une extension cyclique du symbole OFDM. C'est le même principe de rajout que précédemment sauf que dans ce cas, le suffixe est intégré à la fin du symbole OFDM. Il est utilisé pour éviter l'interférence entre le flot montant et celui descendant dans une communication [5].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Hajri, S-E. (2018, 9 avril). L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptifs des utilisateurs [Thèse de doctorat, Université de Paris Saclay].
- [2] ABOUD, A. (2017, 22 septembre). Université de Limoges. École Doctorale Sciences et Ingénierie pour l'Information, Mathématiques (ED 521) - PDF Free Download. Thèse de Doctorat.
- [3] Sofi, N. (2019, 06 juillet). Etude et optimisation d'un système de communications sans fil MIMO-OFDM pour des applications WIFI et WIMAX [Thèse de doctorat, Université de Tlemcen].
- [4] Anh Tai, H. (2009, 30 mars). Application des techniques multiporteuses de type OFDM pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite [Thèse de doctorat, Université de Toulouse].
- [5] Bentaleb, N., Benatia, D. (2019). Etude des performances de la technique OFDM pour les communications sans fil [Mémoire de Master, Université de Msila].
- [6] Désiré GUEL, "Etude de nouvelles techniques de réduction du « facteur de crête » à compatibilité descendante pour les systèmes multi porteuses", Thèse de Doctorat, Institut d'Electronique et Télécommunications de Rennes, 2009
- [7] Björnson, Emil, Jakob Hoydis, and Luca Sanguinetti (2017). "Massive MIMO networks : Spectral, energy, and hardware efficiency." Foundations and Trends® in Signal Processing 11.3-4 : 154-655.

- [8] Challita, F. (2019, 26 septembre). Caractérisation des Canaux Massive MIMO et Stratégies de Sélection d'Antenne : Application pour la 5G et l'Industrie 4.0 [Thèse de doctorat, Université de Lille].
- [9] Bazin, A. (2019, 26 février). Massive MIMO for 5G Scenarios with OFDM and FBMC/O-QAM Waveforms[PDF File]. HAL.
- [10] Fu, H. (2016, 18 février). Spectral resource optimization for MU-MIMO systems with partial frequency bandwidth overlay [PDF File]. HAL.
- [11] Sun, D. (2017, 28 octobre). Spectral Efficiency and Energy Efficiency in Massive MIMO Systems [Mémoire de master, Université de UNSW Australia].
- [12] Ezzyani, M. (2019). MIMO-OFDM for wireless systems : AN overview .Aarab, M. N and Chakkor , O, Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD'2019) (pp.185-196).Springer.
- [13] Faure, L. (2018, 20 novembre). L'évolution des réseaux mobiles : de la 2G à la 5G. IT SOCIAL .[https ://itsocial.fr/actualites/levolution-reseaux-mobiles-de-2g-a-5g/](https://itsocial.fr/actualites/levolution-reseaux-mobiles-de-2g-a-5g/)
- [14] Chataut, R. (s. d.). Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks- Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction. MDPI. [https ://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2753](https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2753)
- [15] Bundesamt für Kommunikation BAKOM. (s. d.). Notice d'information 5G [PDF File]. [https ://www.bakom.admin.ch/dam/bakom/fr/dokumente/faktenblatt_5g.pdf.download.pdf/notice-d-information_5G.pdf](https://www.bakom.admin.ch/dam/bakom/fr/dokumente/faktenblatt_5g.pdf.download.pdf/notice-d-information_5G.pdf).
- [16] Agence Nationale des Fréquences. (juillet 2019). Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G (PDF File). [https ://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/CND/Rapport-ANFR-presentation-generale-5G.pdf](https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/CND/Rapport-ANFR-presentation-generale-5G.pdf).
- [17] Detti, A. (s. d.). Functional Architecture [PDF File]. [https ://www.5gitaly.eu/2018/wp-content/uploads/2019/01/5G-Italy-White-eBook-Functional-architecture.pdf](https://www.5gitaly.eu/2018/wp-content/uploads/2019/01/5G-Italy-White-eBook-Functional-architecture.pdf).
- [18] 5G Vs. 4G | What Is The Difference Between 5G 4G Networks? (s. d.). iSelect. [https ://www.iselect.com.au/internet/5g-australia/5g-vs-4g/](https://www.iselect.com.au/internet/5g-australia/5g-vs-4g/)

- [19] Purcher, J. (2018, 23 juillet). Qualcomm Claims 5G-Antenna Breakthroughbased on MillimeterWaveTechnologycould hit the Marketin 2019. Patently Apple. <https://www.patentlyapple.com/patently-apple/2018/07/qualcomm-claims-5g-antenna-breakthrough-based-on-millimeter-wave-technology-could-hit-the-market-in-2019.html>
- [20] Gaube, E. (2018, 26 octobre). INFOGRAPHIE – Comment fonctionnera le réseau mobile 5G ? BFMTV. https://www.bfmtv.com/tech/vie-numerique/infographie-comment-fonctionnera-le-reseau-mobile-5g_AN-201810260081.html
- [21] Ericsson Networks. (2019, 26 février). What are Ericsson Radio Stripes? Twitter. <https://twitter.com/EricssonNetwork/status/1100398048419696641/photo/1>
- [22] Mursia, P. (2018, 31 août). Massive MIMO. ITN Spotlight. <https://itnspotlight.com/massive-mimo/>
- [23] Lausson, J. (2020, 25 juillet). 5G : tout comprendre au réseau mobile du futur en 10 questions. Numerama. <https://www.numerama.com/tech/147723-5g-tout-savoir-sur-le-reseau-mobile-du-futur.html>
- [24] Muteau, S. (2017, 30 août). Les dessous de la 5G. Économie numérique. <http://blog.economie-numerique.net/2017/09/16/les-dessous-de-la-5g/>
- [25] Nordrum, A., IEE Spectrum Staff and Clark, K. (2017, 27 janvier). Everything You Need to Know About 5G. IEEE Spectrum : Technology, Engineering, and Science News. <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/everything-you-need-to-know-about-5g>
- [26] RCR Wireless News. (2018, 9 octobre). 5G NR : Massive MIMO and Beamforming – What does it mean and how can I measureit in the field? <https://www.rcrwireless.com/20180912/5g/5g-nr-massive-mimo-and-beamforming-what-does-it-mean-and-how-can-i-measure-it-in-the-field>
- [27] Wang, M. (2018, 23 octobre). The Role of Massive MIMO in 5G - Michael Wang. Medium. <https://medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61>
- [28] Sadiq, M. (2017a, juin 19). C'est quoi la Massive MIMO et quel est son rôle dans les réseaux 5G ? ICT Academy. <https://mustafasadiq0.com/2017/06/12/>

- [29] Roessler, A. (2017, décembre). Pre-5G and 5G : Will The mmWave Link Work? Microwave. <https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/downloads/download/commonlibrary/downloadthepress/RSArticlePre-5G5GwillthemWaveLinkWorkDec2017.pdf> *Journal.LARAQUI, K., TOMBAZ, S., FURUSK??R* 017128423 – 3294, pp.213.[http : //www.diva – portal.org/smash/record.jsf?pid = diva2%3A1150804dswid = -5612](http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1150804dswid=-5612)