REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Etude et implémentation de Beamforming hybride pour les réseaux mobile 5G

Présentés par :

BENKIAR Chamia

BENAIDJA Asmaa

Proposés et Dirigés par :

Dr. KROBBA Ahmed

Promotion 2022

إهـــــداء

الحمد لله و كفى و الصلاة و السلام على النبي المصطفى....أولا أحمد الله عز و جل الذي منَّ علي بأن أكون في مكاني هذا أكتب هاته الكلمات و وفقني لبلوغ هذه المرحلة من حياتي ، فالحمد لله حمدًا كثيرًا طيباً مباركاً فيه. أما بعد:

إلى سندي و حبيبي، إلى من جاهد في سبيل وصولي إلى ما أنا عليه، إلى **أبي** الغالي، اللهم يا رب عن كل قطرة عرق نزلت من جبينه سعيا لرزقنا إرفع بها درجته في الجنة.

إلى مصدر إيماني بذاتي و مرآتي لمستقبل زاهر ، إلى من سهرت لأجلي الليالي، إلى التي لا تمل العطاء، إلى قدوتي في الحياة ، إلى أغلى ما أملك في هذه الدنيا ، إلى **أمي** التي لولاها لما وصلت لهذا اليوم ، كل الكلمات لن تفيك حقك ، حفظك الله لنا و أطال الله عمرك و ألبسك ثوب الصحة و العافية يا جنة دنياي.

إلى رفيقة دربي و روحي، نصفي الثاني، يدي اليمنى، إلى أختي حبيبتي **نادية**.

.إلى من بهم أحتمي ، و عليهم أستند إخوتي **كريم** و **بلال**.

إلى زوجة أخي **خديجة**.

إلى أجمل من شاركني في هذا العمل العزيزة على قلبي، صديقتي الغالية **أسماء**.

إلى صديقات العمر **مريم** ، **صفية**، **سكينة** ، **سارة**، **أحلام**، **سلمى** و **عبير**.

إلى **أساتذتي** ، و كل من أنار طريقي بعلمه.

إلى كل من أحبني بصدق و تمنى لي الخير.

-أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع-

شـــامية

2022-06-16

إهـــــداء

الحمد لله و كفى و الصلاة و السلام على النبي المصطفى...أولا أحمد الله عز و جل الذي منَّ علي بأن أكون في مكاني هذا أكتب هاته الكلمات و وفقني لبلوغ هذه المرحلة من حياتي ، فالحمد لله حمدًا كثيرًا طيباً مباركاً فيه. أما بعد:

إلى من لا يضاهيهما أحد في الكون، إلى من أمرنا الله ببرّهما، إلى من بذلا الكثير، وقدّما ما لا يمكن أن يردّ،إلى حبيبي قلبي إلى كل شيء أملكه في هذه الدنيا، إليكما يا معنى وجودي وسعادتي في هذه الحياة، إليكما تلك الكلمات **أمي** و **أبي** الغاليين ، ما كنتما سبب طاقتي فحسب بل كنتما خير داعم لي طوال مسيرتي الدراسية، أدام الله لكما الصحة و العافية و أمدكما بطول العمر، أحبكما.

إلى **جدتي** حبيبة قلبي رحمها الله.

إلى نجمات قلبي وحبيبات روحي، إلى أخواتي **أمينة** ، **هاجر** و **خولة**.

إلى إخوتي وسندي في الحياة **عبد المجيد** و **معاذ**.

إلى زوجة أخي **نسيمة**.

إلى فارسي الاثنين **هيثم** و **أنس**، إلى أميراتي الأربع **إيناس**، **سيرين**، **رفقة** و **تالين**.

إلى أجمل من شاركني في هذا العمل العزيزة على قلبي، صديقتي الغالية **شامية**.

إلى صديقاتي **صفية**، **سكينة**، **أحلام**، **عبير**، **شيماء**، **فدوى** و **إيمان**.

إلى كل من أحبني بصدق و تمنى لي الخير.

-أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع-

أســماء

2022-06-16

Remerciement

Tout d'abord nous tiendrons à remercier ALLAH le tout puissant, pour nous avoir donné la force, la patience, la santé et la volonté pour achever ce travail.

Nous adressons vivement nos remerciements à notre encadreur **Dr. KROBBA AHMED** D'avoir accepté de nous encadré, pour Ses conseils, ses recommandations, qui nous ont extrêmement aidés, guidé et encouragé tout au long de la réalisation de ce travail, nous lui adressons nos remerciements les plus sincères.

Nous remercions tous les enseignants de l'université Dr. Yahia Farés de Médéa qui nous ont guidés tout au long de notre vie universitaire

Nous remercions aussi tous nos collègues et amies qui nous ont soutenu et encouragé pour terminer ce travail.

Nous remercions enfin toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

ملخص

أصبحت أنظمة الاتصالات اللاسلكية موضوعًا بحثيًا شائعًا بسبب دورها المهم في جميع المجالات تقريبًا؛ من الاتصال إلى التجارة والصناعة وصولا إلى السلامة والصحة مع الجيل الجديد من شبكة 5G .وبالنظر إلى أن أنظمة الاتصال التي تستخدم نطاقات التردد للموجات المليمترية (mmWave) يجب أن تستخدم شبكات هوائي (MIMO) الكبيرة للتغلب على فقدان انتشار كبير لإشارات (mmWave) ، فقد تم اعتبار تشكيل الحزم الهجينة جـــزءا لا يتجزأ من اتصالات (mmWave). والهدف الرئيسي لهذا المشروع هو دراسة ومحاكاة بنية تشكيل الحزم الهجينة باستخدام برنامج (MATLAB).

الكلمات المفتاحية

الاتصالات اللاسلكية، الجيل الخامس،MIMO massif، الموجات الميليمترية، تشكيل الحزم الهجينة

Résumé

Les systèmes de communication sans fil sont devenus un sujet de recherche commun en raison de leur rôle important dans presque tous les domaines, de la connectivité au commerce, à l'industrie, à la sécurité et la santé avec la nouvelle génération de réseau 5G.Étant donné que les systèmes de communication qui utilisent les bandes de fréquences des ondes millimétriques (mmWave) doivent utiliser des grands réseaux d'antennes pour surmonter la perte de propagation importante des signaux mmWave. Le beamforming hybride a été considérée comme un composant intégral des communications mmWave. L'objectif principal de ce travail est l'étude et la simulation d'une architecture beamforming hybride en utilisant le logiciel MATLAB.

Mots clés

Communication sans fil, 5G, MIMO massif, Formation de faisceaux, ondes millimétriques, Hybride

Abstract

Wireless communication systems have become a common research topic due to their important role in almost every field, from connectivity to commerce, industry, security and health with the new generation of 5G network.As communication systems that employ millimeter wave (mmWave) frequency bands must use large antenna arrays MIMO to overcome the severe propagation loss of mmWave signals, hybrid beamforming has been considered as an integral component of mmWave communications. The main objective of this work is the study and simulation of a hybrid beamforming architecture using MATLAB software.

Keywords

Wireless communication, 5G, Massive MIMO, Beamforming, Millimeter waves, Hybrid

Table des matières

Table des matières i
Liste des figure iv
Liste des tableaux v
Liste des acronymes et abréviation vi
Introduction Générale 1

Chapitre 1 : Généralités sur le réseau 5G

1.1 Introduction 3
1.2 La quatrième génération des réseaux mobiles (4G) 3
1.2.1 Description de la quatrième génération (4G) 3
1.2.2 Architecture de réseau mobile 4G (LTE) 3
1.2.3 Caractéristiques des réseaux 4G (LTE) 4
1.3 La cinquième génération des réseaux mobile 5G 5
1.3.1 Définition de la 5G 5
1.3.2 Objectifs de la 5G 5
1.3.3 Les caractéristiques techniques 6
1.3.4 Les principales technologies de la 5G 7
1.3.4.1 Les ondes millimétriques 7
1.3.4.2 Les micros-celles 7
1.3.4.3 MIMO massif 8
1.3.4.4 Beamforming 9
1.3.4.5 Full-Duplex 9
1.3.5 Architecture de réseau 5G 10
1.3.5.1 Les services innovants 11
1.3.5.2 La plate-forme de validation : (Architecture de réseau) 11
1.3.5.3 La radio Hyper-Connecté 12
1.3.6 Nouvelles bandes de fréquences 12
1.3.7 La différance entre la 4G et la 5G 13
1.4 Conclusion 14

Table des matières

Chapitre 2 : La technologie MIMO et Beamforming hybride

2.1 Introduction 15
2.2 Chaine de transmission 15
2.3 Les ondes millimétriques 16
2.3.1 Définition des ondes millimétriques 16
2.3.2 Caractéristiques de communication avec ondes millimétriques 17
2.3.2.1 Les caractéristiques de propagation 17
2.3.2.2 Pertes en espace libre 17
2.3.2.3 Mécanisme de propagation 17
2.3.3 Standardisation de la bande millimétrique de 60GHz 19
2.3.4 La bande passante des ondes millimétriques 20
2.3.5 Technologies clés pour communication mmWave 20
2.3.6 Problème de l'estimation des canaux d'onde millimétrique 20
2.4 Antenne et propagation 21
2.4.1 Réseaux d'antenne 21
2.4.2 Antennes intelligentes 21
2.4.3 Antenne adaptatives 22
2.5 La technologie MIMO 22
2.5.1 MIMO traditionnel 22
2.5.2 Principe de MIMO 22
2.5.3 Système MIMO 23
2.5.3.1 MIMO 23
2.6 Efficacité spectrale 25
2.6.1 Importance de l'efficacité spectrale 25
2.7 MIMO massif 26
2.7.1 Principe de fonctionnement 26
2.7.2 Antenne MIMO massif 26
2.7.3 Beamforming 26
2.7.4 MU-MIMO 27
2.7.5 Les avantages des systèmes Massive MIMO 27
2.8 Massif MIMO pour les ondes millimétrique 27
2.9 Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif 28
2.10 Beamforming 28
2.10.1 Principe de fonctionnement 28

Table des matières

2.10.2 Différents types de Beamforming 28
2.10.3 Précodage 29
2.10.3.1 Précodage et Beamforming 29
2.10.4 Beamforming analogique et numérique 31
2.10.4.1 Hybride Beamforming 33
2.11 Conclusion 33

Chapitre 3 : Simulation et Résultats

3.1 Introduction 35
3.2 Langage utilisé 35
3.2.1 RF PCB Toolbox 35
3.2.2 Signal IntegrityToolbox 36
3.3 Architecture de la plateforme 36
3.3.1 Plateforme de simulation 37
3.4 Résultats de simulation 43
3.4.1 La variation de spectre du signal au niveau d'émetteur et récepteur 43
3.4.2 Les diagrammes de constellation de l'émetteur et réception 46
3.4.3 Impact de la variation du SNR dans la capacité du canal de transmission 47
3.4.4 La probabilité de la capacité du canal de transmission 48
3.5 Conclusion 49
Conclusion Générale 50
Bibliographie 51

Liste des figure

Figure 1.1 : Architecture du système LTE 4
Figure 1.2 : Techniques utilisées dans la technologie 5G 7
Figure 1.3 : Spectre des ondes millimétrique 7
Figure 1.4 : Small Cell 8
Figure 1.5 : Massive MIMO 9
Figure 1.6 : Beamforming 9
Figure 1.7 : Full Duplex 10
Figure 1.8 : Architecture de la 5G 11
Figure 1.9 : Trois groupes de fréquences utilisés par la 5G 13
Figure 2.1 : Chaine de transmission sans fil 16
Figure 2.2 : Illustration des différents mécanismes de propagation, à savoir réflexion spéculaire, diffusion et diffraction 18
Figure 2.3 : Différentes géométries de réseaux d'antennes 21
Figure 2.4 : Système MIMO 24
Figure 2.5 : Une illustration de MIMO massive 26
Figure 2.6 : Précodeur Zero Forçage 31
Figure 2.7 : Beamforming analogique 32
Figure 2.8 : Beamforming numérique 32
Figure 2.9: Beamforming Hybride 33
Figure 3.1 : Architecture de Beamforming Hybrid 37
Figure 3.2 : Bloc émetteur QPSK 38
Figure 3.3 : Bloc d'émetteur RF 38
Figure 3.4 : Paramètre du choix de la fenêtre (Hamming) 39
Figure 3.5 : Paramètre du choix de la fenêtre (Hamming) 39
Figure 3.6 :Beamforming de réseau de transmission 40
Figure 3.7 : Bloc des sous-réseaux de transmission 41
Figure 3.8 : Bloc du réseau de récepteur 42
Figure 3.9 : Bloc de récepteur de QPSK 43
Figure 3.10 : Spectre du signal à l'émission de type Hamming 44
Figure 3.11 : Spectre du signal à la réception de type Hamming 44
Figure 3.12 : Spectre du signal à l'émission de type Kaiser 45
Figure 3.13 : Spectre du signal à la réception de type Kaiser 45
Figure 3.14 : Diagramme de constellation Tx 46
Figure 3.15 : Diagramme de constellation Rx 46
Figure 3.16 : Capacité en fonction de SNR pour différents nombre Tx-Rx 47
Figure 3.17 : Probabilité de la capacité en fonction capacité du canal de transmission pour différents nombre Tx-Rx (SNR=5dB) 48

Liste des tableaux

Tableau chapitre 1 :

Tableau 1.1 : Comparaisons entre les performances de 4G et de la 5G 13

Tableau chapitre 2 :

Tableau 2.1 : standardisation de la bande de 60 GHz 19
Tableau 2.2 : Les différents précodeurs linéaires. 30

Liste des acronymes et abréviation

1G	Première Génération
2G	Deuxième Génération
3D	Trois Dimension
3G	Troisième Génération
4G	Quatrième Génération
5G	Cinquième Génération
ADC/DACs	Analog to Digital Converter (Digital to Analog Converter)
AGC	Automatic Gain Control
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
CB	Conjugate Beamforming
CL-MIMO	Close Loop-MIMO
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
D/A	Digital to Analog Converter
DBF	Digital Beam-Forming
DC	Data Center
DOA	Delay Of Arrival (direction d'arrive)
DSS	Dynamic Spectrum Switching
ECMA	Europen Computer Manifacturers Association (Geneve)
EGT	Equal Gain Transmission
eNB	evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency division duplex
FFT	Fast Fourier Transform
GW	GateWay
HSS	Home Subscriber Server
I/Q	In-phase/Quadrature-phase

Liste des acronymes et abréviation

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMS/PDN	IP Multimedia Subsystem (Packet Data Network)
IoT	Internet Of Things (internet des objets)
IP	Internet Protocol
Lob	Line of bearing
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-UE	LTE- User Equipmen
MATLAB	MATrice LABoratory
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multi Input Single Output
MME	Mobile Management Entity
MMSE	Minimum Mean Square Error
mmWave	Millimeter wave
MU-MIMO	Multi User –MIMO
MuPAD	Multi Processing Algebra Data
MVDR	Minimum Variance Distortioneless Response
NFV	Network Functions Virtualization
NLoS	Non-Line-of-Sight
Nt - Nr	Nombre d'antenne émettrice - Nombre d'antenne réceptrice
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OL-MIMO	Open Loop-MIMO
OMM	Output Messagd Manual
PA	Power Amplifier
PCB	Printed Circuit Board
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PGW	PDN Gateway
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access Network
RF	Radio Fréquence
Tx-Rx	Transmitter-Receiver

Liste des acronymes et abréviation

SAE	System Architecture Evolution
SAE-GW	SAE- Gateway
SDN	Software Defined Networks (Réseaux définis par logiciel)
SE	Spectral Efficiency
SGW	Serving Gateway
SINR	Signal to Interference & Noise Ratio
SIMO	Single Input Multi Output
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SQPSK	Staggered Quadrature-Phase Shift Keying
TDD	Time-Division Duplex
UDN	Ultra Denses Network
UE	User Equipmen
UHF	Ultra High Frequency
VoIP	Voice over IP
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
ZF	Zero Forcing

Introduction générale

Introduction Générale

Ces dernières années, le monde devient de plus en plus digitalisé où tout est connecté entre eux, sur internet et avec des milliards de personnes. Cette augmentation nécessite de nombreux progrès sur les systèmes de télécommunications mobiles, bien que, le réseau 4G reposant sur la norme LTE (Long Term Evolution) a apporté de nombreuses solutions comme l'augmentation du débit et de la bande passante comparé aux anciennes générations de réseaux mobiles. En utilisant la technologie IP, la 4G permet une navigation internet confortable avec les Smart-Phones, les tablettes ou les ordinateurs portables. Cependant, ce réseau dont le spectre de fréquence est assez surchargé ne pourra plus bien assurer les diverses exigences dues à l'essor des objets connectés avec leurs différentes catégories d'usages.

Face à ces problèmes, une nouvelle révolution s'annonce avec un nouveau standard des systèmes de télécommunications mobiles, dénommé 5G. La 5G se présente comme la génération de la disruption, qui ne concerne plus uniquement le monde des opérateurs mobiles et de la communication grand public, mais qui offre de nouvelles perspectives et permet la coexistence d'applications et d'usages très diversifiés et unifiés dans une seule technologie. La 5G apparaît comme une nouvelle menace pour la numérisation de la société et de l'économie. Le but de la 5G ce n'est pas seulement de répondre aux déficits liés à la bande passante ou à l'augmentation de débit, mais d'obtenir un temps de latence ultra-court, de réduire la consommation énergétique avec un service de qualité omniprésent. Elle a une vitesse maximale théorique de 20 Gbps, tandis que la vitesse maximale pour la technologie 4G n'est que de 1 Gbps. Cela peut améliorer les performances des applications d'entreprise et d'autres expériences numériques (telles que les jeux en ligne, la vidéo conférence et les voitures autonomes).

L'objectif de notre travail est l'étude, analyser et modéliser une architecture émetteur-récepteur RF pour la 5G, notamment, l'architecture hybride Beamforming.

Le premier chapitre explique généralement la 4G et présente la 5G en commençant par une définition, son objectifs et les caractéristiques techniques, ensuite une explication de son principales technologies et son architecture réseau, finalement il compare entre la 4G et la 5G.

La deuxième chapitre définit des ondes millimétriques et fournit quelques avantages d'utilisation des mmWaves et aborde le problème de l'estimation des canaux d'ondes millimétriques. Ensuite présente les technique MIMO et MIMO massif, enfin définit Beamforming lui principe de fonctionnement, beamforming analogiques et numériques et la beamforming hybride.

Le dernier chapitre est consacré aux simulations et résultats. Il commence par une présentation de la plateforme choisie pour les différentes simulations. Ensuite, plusieurs simulations et analyses de performances des combinaisons hybrides sont faites. Après ça, Cette étude des performances est réalisée en analysant la capacité en fonction de le rapport signal sur bruit SNR et la probabilité en fonction de la capacité.

A la fin, on conclut notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Généralités sur le réseau 5G

1.1 Introduction

Le monde a connu un développement fleurissant dans le domaine de la téléphonie mobile en passant de la 1G à la 4G mais l'humanité ne cesse de progresser dans ce domaine en inventant une autre technologie qui est la 5G. La 5G est la cinquième génération. Elle possède suffisamment de fonctionnalités avancées pour résoudre de nombreux problèmes de notre vie moderne, Facilitée le monde avec un accès illimité à l'information et une connexion à des discussions virtuelles de toutes sortes d'applications. Et ce n'est pas seulement une question de connexion entre les gens, mais c'est aussi une connexion à tous les appareils et une connexion disponible n'importe où, n'importe quand. De nombreuses idées révolutionnaires ont été proposées dans le monde entier pour contribuer à cette avancée technologique, parmi lesquelles l'utilisation du spectre d'ondes millimétriques, la virtualisation des fonctions réseau, l'utilisation du MIMO massif, le cloud computing et la communication appareil-machine à haute mobilité. Elle permet aux réseaux mobiles de faire d'énormes progrès en termes de productivité. La 5G cible des secteurs variés, qui n'auront pas forcément d'autre élément commun que cette technologie, mais qui représentent des piliers importants de la société : énergie, santé, médias, industrie ou encore transport.

Ce chapitre va expliquer généralement la 4G et présenter une introduction de la 5G en commençant par une définition, son objectifs, les caractéristiques techniques, une explication de son principales technologies et son architecture réseau..

1.2 La quatrième génération des réseaux mobiles (4G)

1.2.1 Description de la quatrième génération (4G)

La technologie LTE (Long Term Evolution) ou la 4G s'appuie sur un réseau de transport à commutation par paquet IP. Elle n'a pas prévu de mode d'acheminement pour la voix, autre que la VoIP, Les systèmes mobiles de la quatrième génération (4G) tendent à offrir des débits plus élevés. La 4G offre un débit de **150 Mb/s**. Ce réseau est déployé par les trois grands opérateurs sur la bande de fréquences 1800 Mhz (en Algérie), et vous assure ainsi un débit en réception beaucoup plus important. La 4G était la technologie de transmission sans fil mobile la plus performante avant l'arrivée de la 5G.

1.2.2 Architecture de réseau mobile 4G (LTE)

La technologie LTE a permis une connexion internet mobile rapide. En réalité le LTE est un chemin emprunté pour atteindre les services haut début mobiles pour le transfert de données et les appels vocaux. Les opérateurs sans fil développent rapidement leurs réseaux LTE pour tirer parti d'une efficacité accrue, d'une latence réduite et de la capacité de gérer un trafic de

données en augmentation constante. Les technologies de base sont passées de la commutation de circuits au cœur de paquets évolué all IP. L'architecture de réseau LTE composée de deux entités principales **[1]**:

- Le réseau d'accès radio terrestre universel évolué (E-UTRAN) qui est le réseau d'accès radio pour l'EU.
- Le cœur de paquets évolué (EPC) qui est le cœur du réseau. L'architecture du réseau cœur est aussi désigner par, évolution d'architecture de service (SAE), et la combinaison de l'EUTRAN et de l'EPC est aussi appelée système paquet évolué (EPS).

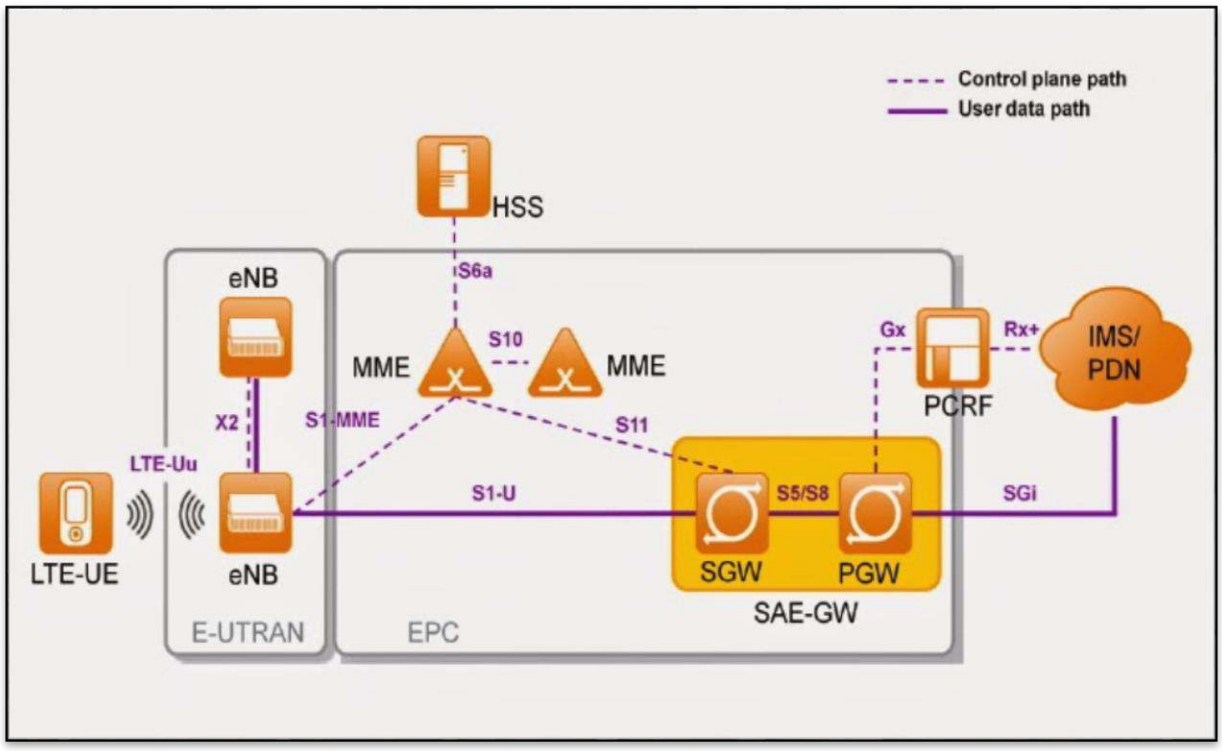


Figure 1.1 : *Architecture du système LTE* **[1]**

1.2.3 Caractéristiques des réseaux 4G (LTE)

Parmi les principales caractéristiques de LTE on trouve :

- **Une Flexibilité :** dans le choix des bandes de fréquences. En effet, LTE offre six possibilités de largeurs de bande, à savoir 1.25, 2.5, 5, 10, 15 ou 20 MHz. L'intention est de permettre un déploiement flexible en fonction des besoins des opérateurs et des services qu'ils souhaitent proposer.
- **Un Débit sur l'interface radio** : un débit maximum descendante de 100 Mbit/s, et 50Mbit/s dans montante (obtenus à travers une bande de fréquence 20MHz).

- **Efficacité du spectre :** Le LTE utilise une efficacité du spectrale de 5 bit/s/Hz pour le sens descendant, et 2.5 bit/s/Hz pour le sens montant.
- **Faible latence.**
- **Connexion permanente** : principe des accès haut débit où la connectivité est permanente pour l'accès à Internet
- **Un Faible délai pour la transmission de données :** Moins de 5 ms entre l'UE et le réseau d'accès dans une situation de non-charge où un seul terminal est ACTIF sur l'interface radio. La valeur moyenne du délai devrait avoisiner les 25 ms en situation de charge moyenne de l'interface radio. Ceci permet de supporter les services temps réel IP nativement, comme la voix sur IP et le streaming sur IP **[2]**.
- **Une Mobilité :** assurée à des vitesses comprises entre 120 et 350 km/h. Le Hand-over pourra s'effectuer dans des conditions où l'usager se déplace à grande vitesse.
- **Interfonctionnement avec la 3G.**

1.3 La cinquième génération des réseaux mobile 5G

1.3.1 Définition de la 5G

La 5G est le réseau mobile de 5émé génération. Il s'agit d'une nouvelle norme mondiale sans fil après les réseaux 1G ,2G, 3G et 4G. La 5G permet un nouveau type de réseau conçu pour connecter virtuellement tout et tout ensemble, y compris les machines ; les objets et les appareils. La technologie sans fil 5G est destiné à offrir des débits de pointes plusieurs Gbps. Une latence ultra-faible, une plus grande fiabilité, une capacité de réseau massive, une disponibilité accrue et une expérience plus uniforme à un plus grand nombre d'utilisateurs. Des performances plus élevées et une efficacité améliorée permettent de nouvelles expériences d'utilisation et connectent de nouvelles industries **[3]**.

1.3.2 Objectifs de la 5G

La 5G a cinq objectifs principaux, parmi lesquels l'augmentation de la vitesse et de la capacité des réseaux, mais aussi la préparation de l'événement majeur qu'est l'internet des objets, qui vas nous permettre de construire un monde complètement connecté **[4]**.

- Des forfaits data plus volumineux : le volume de donnes échangeables sur ce réseau de future devra être supérieur a ce que la norme 4G(LTE) ne peut pas supporter.
- Connectivité de masse : le nombre d'appareils pouvant être connecté par antenne devra être 100 fois plus élevé. Le nombre d'antenne dépend principalement des fréquences utilisés, en fonction des déférents phénomènes

comme l'absorbation des ondes, bâtiments, tour,… sachant que la technique 5G vise avant tout a connecter plus d'appareils (Connectivité de masse).

- Un débit de 1Gbps : les meilleurs débits qui peuvent être offerts actuellement par la 4G sont des fois inferieur il peut être équivalent ou même supérieur a celui propose dans certaine offres internet résidentielles basées sur la fibre optique.
- Faible latence : le temps de latence est le temps entre le moment ou nous cliquons sur un lien, envoyons des informations via le réseau, et la réponse de serveur, un temps de latence très court donne l'impression que le réseau est très réactif, temps de latence très courtes est très important dans les applications en temps réel (vidéo conférence, jeux vidéo,...)
- Plus d'autonomie des batteries et moins de consommation : pour connecter des appareils à internet, les terminaux ont besoins d'avoir une autonomie et une durée de vie considérablement améliorée. Pour arriver à ça, les constructeurs font des améliorations pour les batteries, mais ce n'est pas suffisant aussi, donc ils ont pensée a réduire la consommation avec des nouvelles technique, pour doubler la durée de vie des terminaux de 10 fois pour une même charge.

1.3.3 Les caractéristiques techniques

Les premiers déploiements de la 5G s'effectuent principalement dans la bande de fréquence 3,5 GHz qui est une bande très proche des réseaux mobiles actuels (3G/4G et Wi-Fi) en terme de couverture. Cela signifie que beaucoup de sites d'antennes existants pourront être réutilisés pour la 5G, sans ajout de nouveaux sites.

La principale différence avec les réseaux existants sera réside dans l'utilisation d'antennes intelligentes MIMO (en français : Entrées Multiples Sorties Multiples), constituées chacune d'un grand nombre d'antennes miniaturisées et qui permettent d'atteindre des débits et une capacité de transmission inaccessibles aujourd'hui en 4G. Ces antennes intelligentes émettent des ondes radio là où le besoin de connexion le réclame. Etant directionnelles, elles émettent uniquement à la demande, c'est-à-dire seulement aux moments où les terminaux ont besoin de se connecter au réseau. Et à l'inverse des antennes classiques qui émettent sans discontinuité sur la totalité d'une zone géographique (les cellules), elles desservent à la demande le terminal qui se déclare sur le réseau. Cette caractéristique permet aux antennes de se mettre en veille lorsqu'elles ne sont pas activées, d'où une meilleure gestion de la consommation d'énergie **[5]**.

1.3.4 Les principales technologies de la 5G

La 5G utilise des fréquences de diffusion ultra-hautes (UHF entre 6-300 GHz) c-à-d les ondes millimétriques pour transférer rapidement d'énormes quantités de données, en savant que la plage de diffusion est limitée, en survenant ce problème là en utilisant la technologie de Beamforming à travers MU-MIMO (multi utilisateur MIMO) qui permet la diffusion continue des données sur plusieurs appareils et le processus multi-cell hand-over pour assurer des connexions de l'ordre de gigabit même en marche **[6]**.

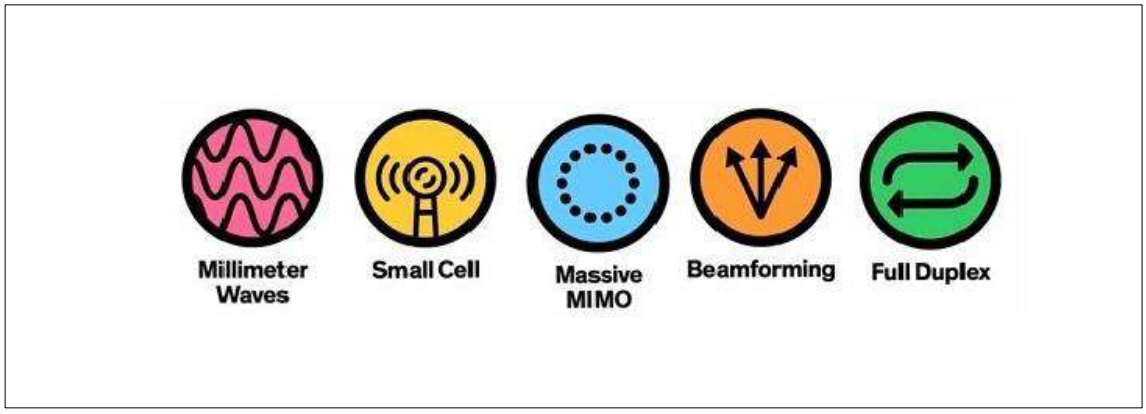


Figure 1.2 : *Techniques utilisées dans la technologie 5G*

1.3.4.1 Les ondes millimétriques

L'utilisation de plus hautes fréquences c'est un des éléments les plus caractéristiques de la 5G; les UHF (extremely high frequencies). ce terme sera défini et discuté dans la deuxième chapitre.

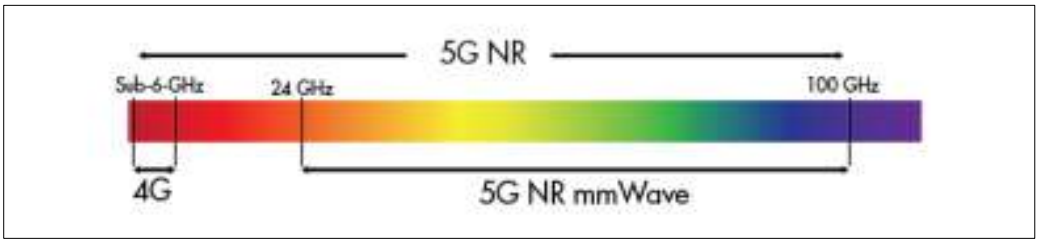


Figure 1.3 : *Spectre des ondes millimétrique*

1.3.4.2 Les micros-celles

Les petites cellules utilisent des systèmes de transmission sans fil (ou «stations de base») à faible puissance et à courte portée qui couvrent de petites zones géographiques ou de petits espaces intérieurs et extérieurs de proximité. Les petites cellules ont toutes les mêmes caractéristiques que les stations de base classiques utilisées par les entreprises de télécommunications depuis des années.

Cependant, ils sont uniquement capables de gérer des débits de données élevés pour le haut débit mobile et les consommateurs et pour l'IoT, des densités élevées d'appareils à faible débit et à faible consommation. Cette fonctionnalité les rend parfaits pour le déploiement de la 5G qui promet des vitesses ultra- élevées, un million d'appareils par mile carré et des latences de l'ordre de la milliseconde.

Ces petites stations de base («émetteurs-récepteurs») peuvent être montées au mur pour des applications intérieures, et bon nombre des petites tours ou des lampadaires sont à l'extérieur. Les connexions backhaul sont réalisées avec des connexions fibre, filaire et micro-ondes, ce qui rend la configuration moins compliquée que les formes précédentes **[7]**. .

Il existe aujourd'hui trois (03) types de petites cellules dans l'industrie: les femto cellules, les pico cellules et les microcellules - chacune avec sa distinction basée sur sa capacité de couverture et le nombre d'utilisateurs individuels qu'elle peut prendre en charge **[7]**.

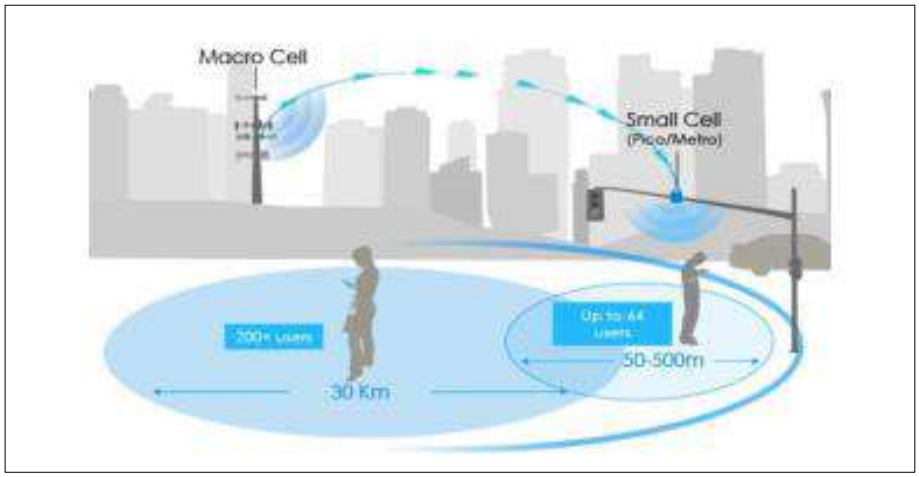


Figure 1.4 : *Small Cell*

1.3.4.3 MIMO massif

Ce concept il fait référencer au grand nombre d'antennes utilisées dans un réseau MIMO. On en reparlera au prochain chapitre.

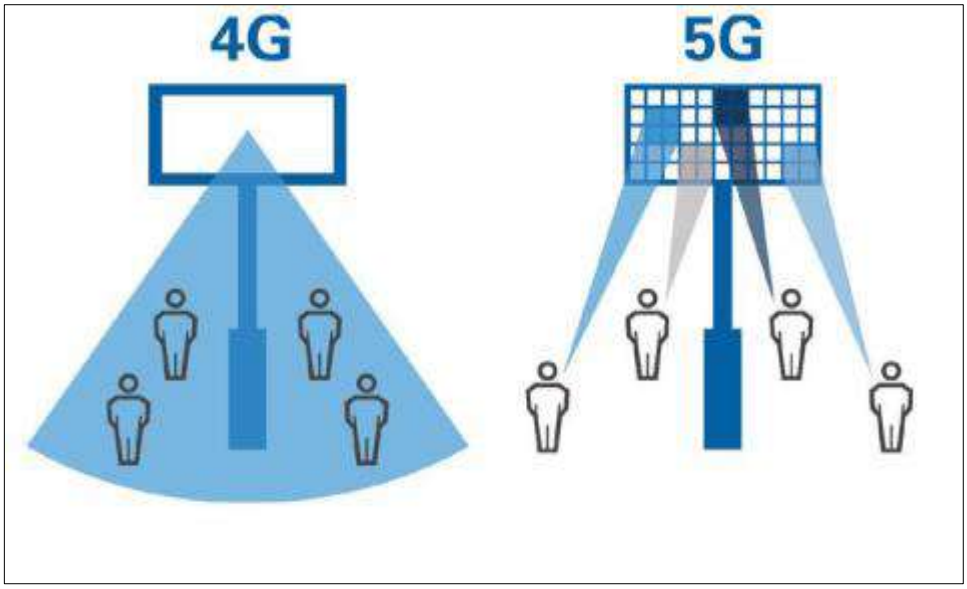


Figure 1.5 : *Massive MIMO*

1.3.4.4 Beamforming

Le Beamforming est la possibilité d'adapter le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes selon un certain modèle. Cette technologie consiste à focaliser les ondes en direction de chaque objet spécifique. Cette précision réduit les interférences et augmente l'efficacité du signal et donc consomme moins d'énergie, en même temps économise de la bande passante et de l'énergie. La fréquence de chaque faisceau s'adaptera aux besoins des applications **[8]**.

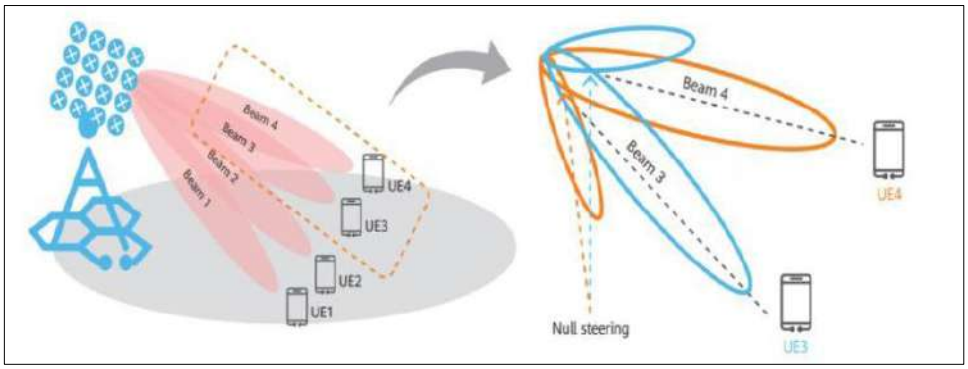


Figure 1.6 : *Beamforming*

1.3.4.5 Full-Duplex

Pour comprendre pourquoi la technologie duplex intégral est si convaincante, il est important de comprendre d'abord comment les réseaux 3G et 4G gèrent les signaux de liaison montante par rapport aux signaux de liaison descendante. Il existe deux configurations de base:

- Duplexage par répartition en fréquence (FDD): Avec FDD, les signaux d'émission et de réception sont dans différentes bandes de spectre. En d'autres

termes, le signal de liaison montante est envoyé dans un bloc de spectre et la liaison descendante est transmise dans un autre bloc de spectre.

- Duplex par répartition dans le temps (TDD): Avec TDD, la liaison montante est séparée de la liaison descendante en utilisant différentes tranches de temps dans la même bande de fréquences. Cela signifie que les signaux de liaison montante se connecteront pendant quelques secondes, puis les signaux de liaison descendante se connecteront pendant quelques secondes.

Le duplex intégral est différent. La technologie promet de donner aux réseaux sans fil la possibilité de transmettre et de recevoir simultanément des signaux sans fil sur un seul canal de spectre en même temps **[9]**.

Un inconvénient du duplex intégral est qu'il crée également plus d'interférences de signal, à travers un écho embêtant. Lorsqu'un émetteur émet un signal, ce signal est beaucoup plus proche de l'antenne de l'appareil et donc plus puissant que tout signal qu'il reçoit. Attendre qu'une antenne parle et écoute en même temps n'est possible qu'avec une technologie spéciale d'annulation d'écho **[10]**.

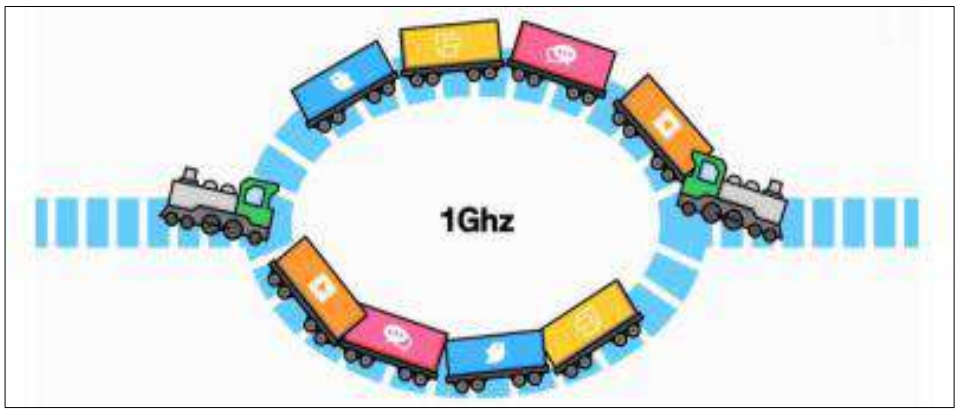


Figure 1.7 : *Full Duplex*

1.3.5 Architecture de réseau 5G

L'architecture 5G est principalement composée de trois couches horizontales, à savoir « l'activation de service innovante », «la plate-forme d'activation » et «la radio hyper-connectée », que nous décrivons dans cette section en détail.

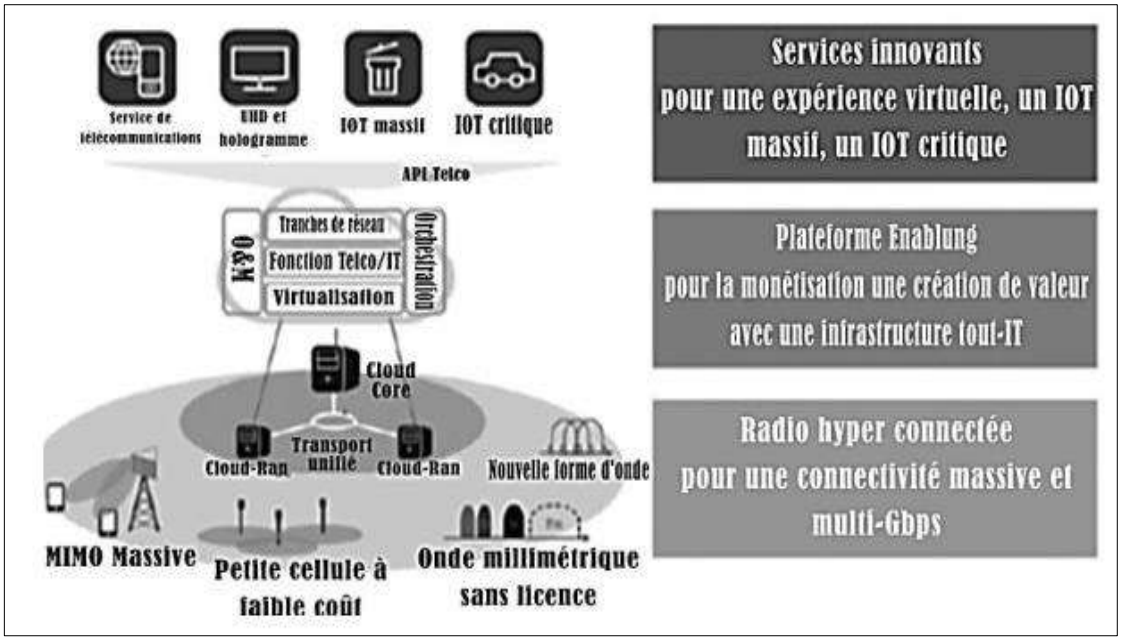


Figure 1.8 : *Architecture de la 5G*

1.3.5.1 Les services innovants

C'est la couche supérieure qui inclut des services 5G innovants. Basé sur des ls différents capacités d'infrastructure 5G différenciées, les services 5G seront en mesure d'offrir une expérience utilisateur hautement fiable et immersive. En particulier, le streaming vidéo en ultrahaute définition finira par devenir des services dominants offrant des expériences utilisateur virtuelles telles que le streaming vidéo multi-view et même les hologrammes. De plus, la bande passante suffisante et la grande fiabilité offerte par la 5G faciliteront le lancement des services de contrôle des robots à distance et aussi les services d'Internet des objets (IoT).

1.3.5.2 La plate-forme de validation : (Architecture de réseau)

C'est la couche intermédiaire qui crée des valeurs significatives et centrées sur le service pour prendre en charge la couche supérieure de « service innovant » en transformant correctement les éléments mécaniques et disjoints.

Réseaux sous-jacents à une infrastructure orientée services. Il utilise deux activateurs clés pour effectuer cette tâche. L'un est la virtualisation des fonctions réseau (NFV) et le réseau SDN (Software Defined Networking), qui virtualisent l'infrastructure et les services pour offrir toujours plus de souplesse, d'intelligence et d'ouverture, sont l'avenir des télécommunications.

- **Le SDN :** son but principale consiste a séparer la partie contrôle du réseau de la partie opérationnelle, Les deux parties étant traditionnellement liées et

distribuées. Le contrôle du réseau est concentre sous forme des logiciels sur des serveurs plus puissants et libre des spécifications des équipementiers. Cela permet de lancer des services à forte valeur dans des environnements hétérogènes comme équilibrage de charge, routage intelligent, configuration dynamique …

- **Le NFV :** complémentaire du SDN, son but est le virtualisation, remplacer le logiciel sur un serveur, le NFV vise à l'accélérer les déploiements et a permettre des évolutions rapides.
- **Cloud-RAN :** est une fonctionnalité appelée RAN centralisée. Il implique une architecture réseau très différente de ce qui se fait actuellement. C'est une évolution du SDN. Les unités de traitement du signal des stations de base, actuellement placées au niveau de la station elle-même, sont déportées dans le Cloud centralisé, elles communiquent avec les têtes de réseau, situées au plus proche de l'antenne, via un réseau fibre optique. Cette centralisation permet une vision d'ensemble de toutes les stations déployées et de coordonner le traitement de signal et gestion des interférences entre cellules et terminaux.

  L'autre est un ensemble bien défini d'interfaces de programmation d'application API (Application Programming Interface), qui offre la possibilité d'automatiser le réseau en interne pour un réseau automatisé.

1.3.5.3 La radio Hyper-Connecté

C'est la couche inférieure qui fournit une quantité importante de données à la couche intermédiaire " Plate-forme d'activation" d'une manière très efficace et transparente. En raison de l'énorme quantité de données de transmission e t des exigences de latence strictes, cette couche inclut de nouvelles technologies de réseau qui sont en cours d'étude par les organismes de recherche.

1.3.6 Nouvelles bandes de fréquences

Des nouvelles bandes de fréquences sont utilisées et elles sont divisées en deux groupes, le premier regroupe les bandes de fréquences 5G Sub-6 et le second, le groupe des ondes millimétriques qui permet d'augmenter sensiblement le débit au détriment de la portée **[11]**.

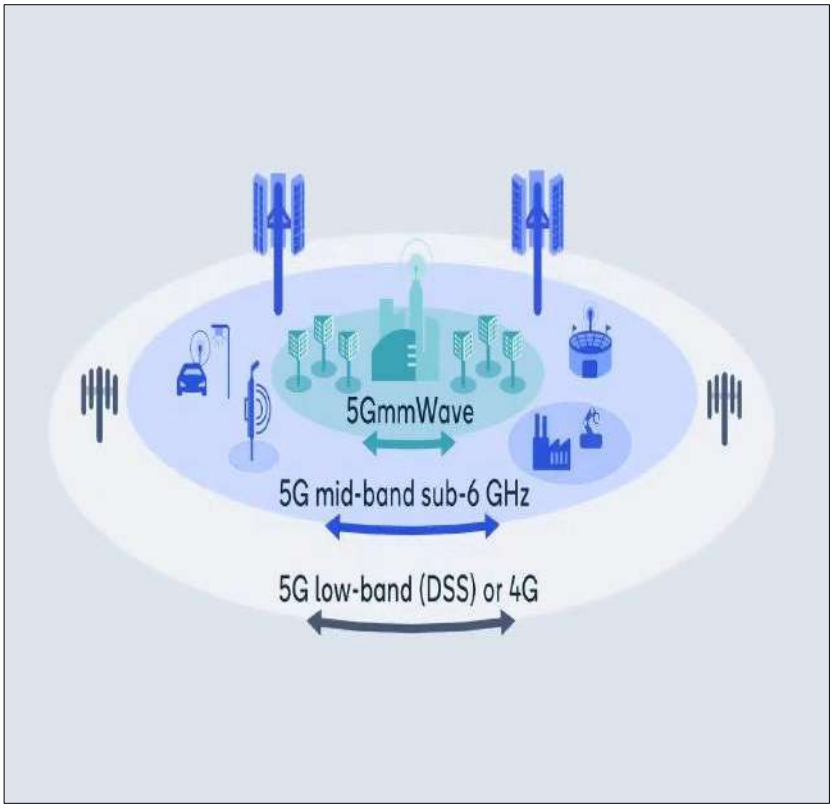


Figure 1.9 : *Trois groupes de fréquences utilisés par la 5G* **[10]**

1.3.7 La différance entre la 4G et la 5G

Le tableau ci-dessous résume les performances de la 4G et la 5G :

Tableau 1.1 : Comparaisons entre les performances de 4G et de la 5G

Paramètres	**4G**	**5G**
Débit maximal (Gbit/s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1×	3×
Vitesse (Km/h)	350	500
Latence (ms)	10	1
Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km²)	10pui5	10pui6
Efficacité énergétique du réseau	1×	100×
Débit sur une zone (Mbit/s/m²)	0.1	10
La bande de fréquence (GHz)	2 à 8	3 à 300

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu de la génération actuelle de réseaux mobiles (4G) qui ne pourront pas répondre à l'énorme demande en termes de capacité. L'arrivée de la 5G est donc plus que jamais nécessaire pour répondre aux exigences du futur. Après avoir défini la définition, les objectifs et les caractéristiques de la 5G, nous avons vu les principales technologies de la 5G représentées par les ondes millimétriques, les petites cellules, le MIMO massif, le beamforming et le full duplex. Ensuite, nous avons mentionné l'architecture du réseau 5G et ses principaux composants, et nous avons également vu de nouvelles bandes de fréquences 5G, à la fin nous avons comparé les performances de la 4G et de la 5G. Dans la deuxième chapitre, nous étudierons les ondes millimétriques et la technologie MIMO en détails.

Chapitre 2 : La technologie MIMO et Beamforming hybride

2.1 Introduction

La communication à onde millimétrique (mmWave) est une technologie clé pour le réseau 5G, elle permettant de répondre à l'exigence de la nouvelle génération grâce à son potentiel technique qui peut être complémentaire à d'autres technologies, telle que les réseaux ultra-denses (UDN) et de nombreux grands intrants et sorties (MIMO). Cependant, il y a des défis techniques liés principalement aux caractéristiques spécifiques de la diffusion de l'onde mm qui doivent être relevée,

La technologie MIMO se présente comme l'une des méthodes les plus prometteuses de systèmes révolutionnaires pour les réseaux mobiles 5G et IoT **[12]**. Les progrès technologiques nécessiteront des systèmes de communication robustes et fiables, ce qui exigera beaucoup de progrès dans les systèmes actuels. Beamforming (en français formation faisceaux) est une technique prometteuse pour la transmission de signaux d'une direction spécifique et l'atténuation de signaux provenant d'autres directions (chevauchements), ce qui augmente la capacité et améliore la qualité de transmission.

Ces points seront discutés dans ce chapitre après une définition des ondes millimétriques nous fournirons quelques avantages d'utilisation des mmWaves et aborder le problème de l'estimation des canaux d'ondes millimétriques. Ensuite nous allons présenter les technique MIMO et MIMO massif, enfin nous allons définir Beamforming lui principe de fonctionnement, beamforming analogiques et numériques et la beamforming hybride.

2.2 Chaine de transmission

Un système de communication à distance filaire ou sans fil a pour but de transmettre l'information d'un point à un ou plusieurs points, il se compose de trois grandes parties :

- **Un émetteur :** son objectif est d'adapter l'information de la source avant d'entamer une transmission à travers le canal de propagation.
- **Un récepteur :** il reçoit le signal avec l'objectif de récupérer l'information de la source.
- **Canal de propagation :** c'est le milieu de propagation. L'émetteur et le récepteur effectuent plusieurs opérations pour permettre le bon acheminement de l'information depuis la source jusqu'à la destination, parmi ces opérations il y a le codage et décodage de source, le codage et le décodage de canal, la modulation et la démodulation. Le bruit est une perturbation aléatoire qui vient de l'intérieur et de l'extérieur du récepteur.

Nous allons décrire brièvement dans ce qui suit ces différents schémas de transmissions, notons que chaque architecture traite les signaux de façon différente qui dépendent de la conception appliquée.

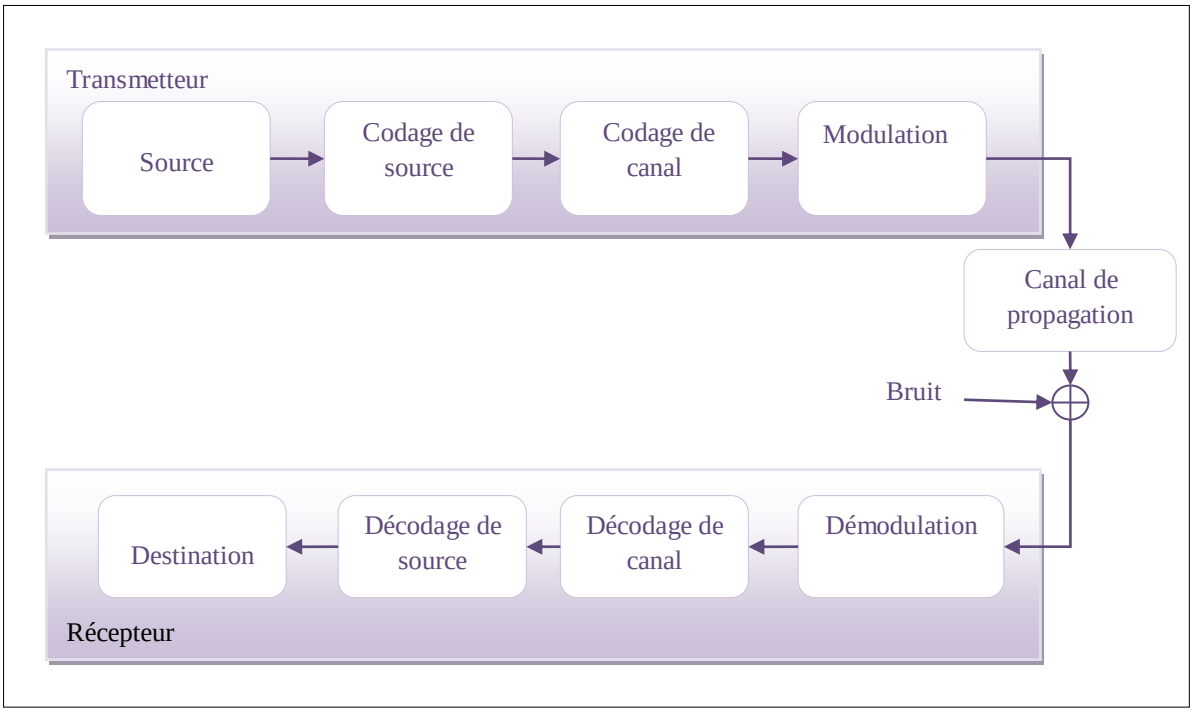


Figure 2.1 : *Chaine de transmission sans fil*

2.3 Les ondes millimétriques

2.3.1 Définition des ondes millimétriques

La bande millimétrique est une bande du spectre électromagnétique correspondant à des longueurs d'onde entre [1 mm-10mm] à une propagation sur la plage de fréquence de [30 GHz-300GHz]. En effet, la communication par les ondes millimétriques est une solution d'un avenir proche pour la transmission des réseaux cellulaires mobiles sans fil, les réseaux locaux sans fil, les réseaux personnels **[13]**.

Les avantages

- L'utilisation d'une large bande passante de (30 GHz-300 GHz) par rapport aux autres ondes radio des réseaux sans fil.
- Faisceaux étroits avec la même taille d'antenne, il est possible d'emballer plus d'éléments d'antenne aux fréquences mmWave.
- Elle offre au moins une bande passante continue de 5 GHz au monde dans le cas de certaines bandes, comme la bande autour de 60 GHz.

Les inconvénients

- Une courte portée.
- Une grande atténuation.
- Les ondes millimétriques sont absorbées facilement par le feuillage et les bâtiments, les pertes de puissances sont provoquées par les matériaux comme la brique, les vitres teintées, les murs intérieurs et les cabines.

2.3.2 Caractéristiques de communication avec ondes millimétriques

2.3.2.1 Les caractéristiques de propagation

Avant d'exploiter l'architecture d'un réseau, il faut tout d'abord prendre en compte les caractéristiques de propagation des ondes millimétriques. Les ondes millimétriques souffrent d'une perte de propagation par rapport aux autres ondes radio à basse fréquence, on note l'atténuation atmosphérique, les pertes en espace libre, les mécanismes de propagation qui limitent la propagation de ces ondes, sont définies comme suit **[13]** :

2.3.2.2 Pertes en espace libre

On parle d'un milieu de propagation comme un espace libre lorsque l'espace entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice doit être libre, c'est à dire; nous ne trouvons aucune source ou objet perturbant pendant la transmission du signal entre les deux antennes. Dans une zone d'ouverture fixe, une augmentation de fréquence provoque un affaiblissement en propagation des ondes millimétriques. Les signaux transmis en espace libre subissent une décroissance de puissance. La relation de perte en espace libre avec la fréquence de porteuse et la distance est proportionnelle **[13]**.

2.3.2.3 Mécanisme de propagation

En raison de courte longueur d'onde [1 mm-10mm], les signaux en mmWave subissent divers mécanismes de propagation qui sont illustrés sur **(la Figure 1.2)**, tels que la réflexion spéculaire du rayon, la diffusion, et la diffraction. Ces mécanismes sont radicalement différents de ceux des basses fréquences, donc ils doivent être soigneusement étudiés et modélisés **[13]**.

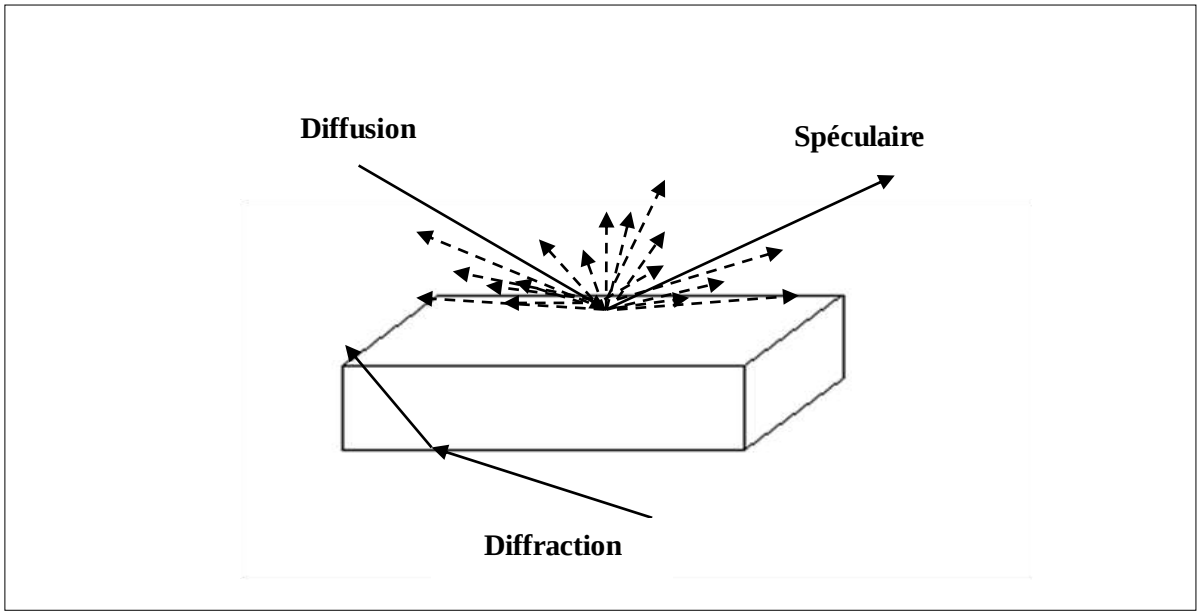


Figure 2.2 : *Illustration des différents mécanismes de propagation, à savoir réflexion spéculaire, diffusion et diffraction* **[13]**

- **Diffraction :** La diffraction est le mécanisme de propagation des signaux radio, elle se produit lorsqu'un lien est bloqué par un obstacle possédant des arrêts, le signal dans ce cas est se propage presque dans toutes les directions de l'espace. On constate que la transmission par ce phénomène peut avoir lieu, en absence de visibilité directe (NLoS).
- **Réflexion et pénétration :** Le canal de propagation à ondes millimétriques des environnements intérieurs et extérieurs est riche par la réflexion de nombreux matériaux malgré l'existence de diffraction et son effet négatif sur la puissance reçue au récepteur.

  Dans le cadre de réalisation sur les fréquences 28, 38, 60 et 73 GHz, en observant plusieurs obstacles qui provoquent des pertes de trajets multiples sur les objets naturels et synthétiques. Nous citons parmi eux le corps humain, les murs des bâtiments, les lampadaires et les arbres.

  Il existe d'autres obstacles qui causent des propagations des signaux à trajets multiples tels que le feuillage, les murs métalliques, les cages d'ascenseur, les bâtiments externes et les fenêtres externes modernes.

  Alors pour créer des relations variables entre les divers environnements d'exploitation une clé́ des futurs systèmes à onde millimétrique est définie pour bien déterminer et traiter les composants multi trajets directs, réfléchis et dispersés les plus solides.

- **Diffusion :** La diffusion est un phénomène de propagation qui apparait à cause des petites caractéristiques structurelles de taille comparable aux longueurs d'onde millimétriques, où chaque rayon réfléchi à une direction de réflexion différente conduisant à une réception de puissance dispersée, et à une plus faible réflexion spéculaire de surface.
- **Absorption :** Les ondes millimétriques comparées aux radiofréquences utilisées en téléphonie mobile sont absorbées par les tissus sur une très faible profondeur, donc essentiellement au niveau de la peau. Ceci se traduit par une forte absorption d'énergie, même pour des valeurs de puissance incidente inférieures aux normes limites. Ainsi, plus de 95% de l'énergie est absorbée par la peau, ce qui fait de cet organe la principale cible des OMM et sûrement le point de départ des effets biologiques potentiels. Or, la peau n'est pas une barrière isolée du reste de l'organisme ; elle contient des vaisseaux sanguins et des terminaisons nerveuses qui communiquent avec l'ensemble du corps.

2.3.3 Standardisation de la bande millimétrique de 60GHz

En raison du grand potentiel des communications mmWave, des normes de l'industrie qui ont le rôle de développer la technologie de communication sans fil à 60 GHz, tels que IEEE 802.11ad, IEEE 802.15.3c, et ECMA-387. **Le tableau (2.1)** représente les trois principales normes et ses paramètres **[13]** :

Tableau 2.1 : standardisation de la bande de 60 GHz

Paramètre	IEEE 802.15.3C	ECMA-387	IEEE 802.11ad (OFDM)
Longueur de bande occupée (GHz)	2.16	1.904	2.16
Nombre de sous porteuse	512	512	512
Durée de FFT/IFFT (ns)	193.9	197.53	193.9
Durée de préfixe cyclique (ns)	24.24	24.70	48.5
Nombre de sous porteuse données	336	360	336
Nombre de sous porteuse DC pilote (Estimation de canal)	16	16	16
Nombre de sous porteuse nulles	3	3	3
Types de modulation	QPSK , 16-QAM, 64-QAM	QPSK , 16-QAM	BPSK,SQPSK , QPSK, 16-QAM, 64-QAM

2.3.4 La bande passante des ondes millimétriques

Malgré les caractéristiques difficiles du canal mmWave, les communications mmWave seront une partie importante du système cellulaire 5G et au-delà. Cela est dû au potentiel des communications mmWave en matière de disponibilité de large bande passante et de courte longueur d'onde **[14]**.

Ce potentiel d'intérêt récent a conduit ces dernières décennies à des travaux considérables sur les systèmes cellulaires à ondes mmWave. Autant dans l'industrie, les compagnes de mesures ont été lancées afin d'obtenir les caractéristiques spatiales et temporelles des bandes de fréquences mmWave et développer des nouvelles techniques et procédures en bandes 60 GHz. En outre, les spectres des fréquences millimétriques envisagent un grand nombre d'applications telles que : radioastronomie, radar, militaire, communication par satellite, pour les réseaux sans fil commerciaux, dans les environnements industriels à courte portée, communication point à point (ptp), et utilisée dans de la 5G.

2.3.5 Technologies clés pour communication mmWave

Il existe Plusieurs technologies une fois associées aux mmWaves, elles permettent aux communications à base d'ondes millimétriques de surmonter certains défis techniques parmi ces technologies **[14]** :

- Le Beamforming qui permet de cibler les utilisateurs de manière précise.
- La technique du multi-in multi-out (MIMO) qui combine plusieurs antennes à la fois émettrice et/ou réceptrice afin de renforcer le signal.

2.3.6 Problème de l'estimation des canaux d'onde millimétrique

Le défi le plus immédiat auquel est confrontée l'estimation du canal mmWave provient des pertes de propagation du signal inhérentes à la gamme de fréquences. En raison de cette perte, la transmission omnidirectionnelle de tout signal pilote se traduit par un rapport signale sur bruit (SNR) reçu très faible, ce qui conduit finalement à une estimation de canal moins précise. En tant que tels, les signaux pilotes utilisés dans l'estimation du canal mmWave nécessiteront également « une formation de faisceau », afin d'être reçus avec un SNR suffisamment élevé. Cela signifie que des faisceaux plus étroits doivent être utilisés pour balayer le canal mmWave à la recherche de chemins de propagation appropriés, ce qui, pour des faisceaux très étroits, nécessite une durée d'apprentissage importante **[15]**.

2.4 Antenne et propagation

Les antennes classiques omnidirectionnelles et sectorielles des systèmes de radiocommunication existante ont un diagramme de rayonnement fixe qui cherche à optimiser la couverture, par conséquent, ils ne peuvent pas s'adapter aux phénomènes rencontrer lors de la propagation. L'apparition des antennes intelligentes basées sur les réseaux d'antennes qui offrent la combinaison dynamique des signaux permet de régler ce problème d'adaptation.

2.4.1 Réseaux d'antenne

Un réseau d'antennes est formé d'une combinaison des éléments rayonnants dans différentes structures géométriques les plus populaires sont linéaires, circulaires et planaires**.**

(La figure 2.3) représente les différentes structures géométriques d'un réseau d'antennes. D'où :

(1) Réseau linéaire uniforme.

(2) Réseau circulaire.

(3) Réseau planaires

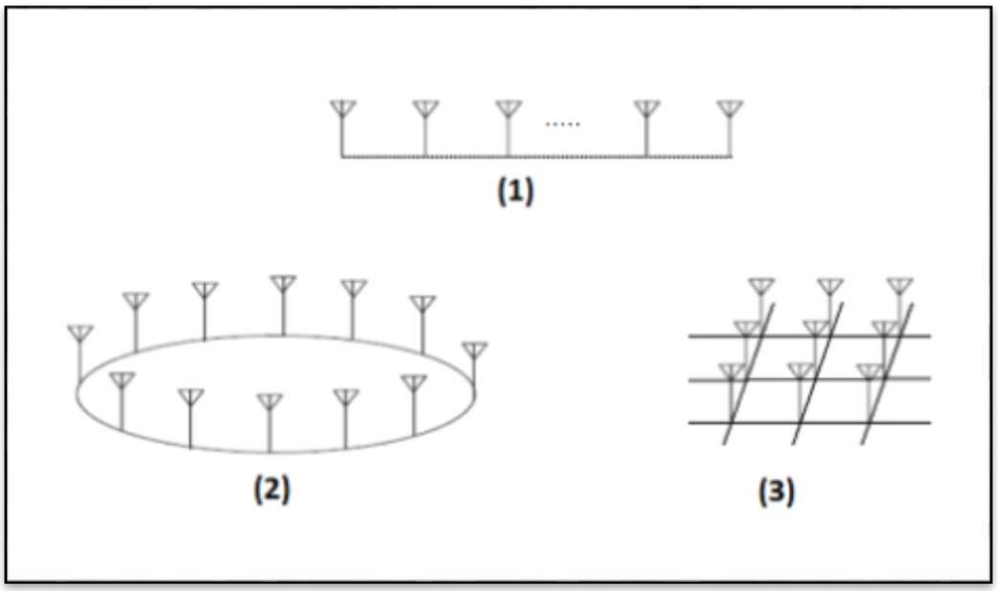


Figure 2.3 : *Différentes géométries de réseaux d'antennes*

2.4.2 Antennes intelligentes

Les antennaires intelligents (smart antennas) ont comme objectif l'automatisation et l'adaptation de leurs capacités, leur réaction change en temps réel selon les modifications intervenues sur le canal de propagation. Le rôle principal de ces systèmes est de focaliser l'énergie du lob principal vers la direction utile et réduire les pertes d'énergie présentée par

les lobes secondaires. Un réseau d'antennes adaptatives est défini comme un système qui a la capacité de modifier pendant de son fonctionnement sa réponse fréquentielle, son diagramme de rayonnement et d'autres paramètres grâce à une boucle à retour de décision interne. Les antennes intelligentes sont capables de définir la position de la cible avant d'envoyer le signal, par contre, les systèmes antennaires traditionnels ne peuvent pas définir la localisation du mobile et donc l'envoient du signal se fait d'une manière très large.

2.4.3 Antenne adaptatives

Dans un réseau d'antennes adaptatives chaque élément d'antenne à son propre coefficient de pondération qui se mis à jour dune manière adaptative pour maximiser son gain dans une direction précise. Plusieurs utilisateurs peuvent partager le même canal pour optimiser l'utilisation des ressources grâce à la capacité des antennes adaptative à focaliser l'énergie et de poursuivre l'utilisateur.

2.5 La technologie MIMO

2.5.1 MIMO traditionnel

La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) est une technologie sans fil qui utilise plusieurs émetteurs et récepteurs pour transférer plus de données en même temps. La technologie MIMO tire parti d'un phénomène d'ondes radioélectriques appelé trajets multiples, où les informations transmises rebondissent sur les murs, les plafonds et d'autres objets, atteignant l'antenne de réception plusieurs fois sous différents angles et à des moments légèrement différents. Elle exploite le comportement par trajets multiples en utilisant plusieurs émetteurs et récepteurs « intelligents » avec une dimension « spatiale » supplémentaire pour augmenter considérablement les performances et la portée. MIMO permet à plusieurs antennes d'envoyer et de recevoir plusieurs flux spatiaux en même temps Grâce à MIMO, les antennes fonctionnent plus intelligemment en leur permettant de combiner des flux de données provenant de différents chemins et à différents moments pour augmenter efficacement la puissance de capture du signal du récepteur. Les antennes intelligentes utilisent la technologie de la diversité spatiale, qui permet de tirer le meilleur parti des antennes excédentaires. S'il y a plus d'antennes que de flux spatiaux, les antennes supplémentaires peuvent ajouter de la diversité aux récepteurs et augmenter la portée **[12]**.

2.5.2 Principe de MIMO

Comme cela a été expliqué précédemment, la principale source des perturbations, que subit un signal lors de sa propagation, est le canal. En effet, à cause des phénomènes de propagation multi-trajets, le signal subit des évanouissements, des décalages fréquentiels ou même

temporels. Contrairement aux systèmes classiques, les systèmes à diversité prennent avantage de ces types de propagation pour améliorer les performances du système. Pour mettre en place ces améliorations, les systèmes MIMO exploitent les techniques de **[12]** :

- Diversité d'espace : Aussi connue sous le nom de diversité d'antenne.
- Diversité fréquentielle : Cette technique demande l'envoi du même signal sur des fréquences différentes. Il faut toutefois faire attention à la largeur de bande cohérente et à l'étendue fréquentielle due aux multi-trajets et aux distances à franchir par la transmission.
- Diversité temporelle : Lorsque l'on sépare l'envoi du même signal par le temps cohérence du canal, il est possible de profiter de la diversité temporelle. Tout dépend également de la vitesse de déplacement du mobile et de la fréquence porteuse.

2.5.3 Système MIMO

Selon le nombre d'antenne existant dans les différents disponible d'antenne, nous pouvons distinguer plusieurs configurations (SISO, MISO, SIMO, et MIMO). Cependant, ces architecture utilisent des différent fonctions pour traiter le signal telles que la technique de combinaison, le codage spatio-temporel, le multiplexage spatial etc.…, dont le but est d'achever la meilleure performance possible du dispositif antenne. Pour un système utilisant Nt antennes à transmission et Nr antenne en réception.

- SISO (Single Input Single Output)
- SIMO (Single Input Multiple Output)
- MISO (Multiples Input Single Output)
- MIMO (Multiple Input Multiple Output)

2.5.3.1 MIMO

La technologie MIMO (Multiple input Multiple output) utilise Nt antennes de transmission et Nr antennes de réception. Ce système améliore le débit ainsi que la capacité des canaux. Le canal MIMO est traduit par une matrice H de taille NxM dite matrice de canal H **[16]**.

$$\mathbf{H}=\begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \cdots & h_{N_RN_T} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(2.1)}$$

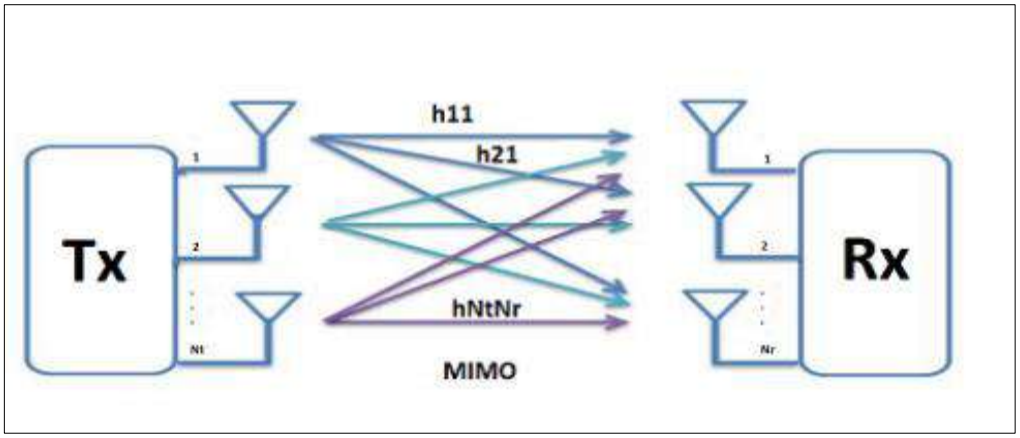


Figure 2.4 : *Système MIMO* **[16]**

Un signal MIMO est définit par :

$$\mathbf{Y = HX + n} \qquad \textbf{(2.2)}$$

Où :

X : la séquence émit. Y : la séquence reçue. n : représente le bruit. La capacité du canal MIMO est donnée par :

$$\mathbf{C_{MIMO} = N_r N_T W \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)} \quad \textbf{[bit/s]} \qquad \textbf{(2.3)}$$

N_r : Le nombre d'antenne réceptrice.

N_T: Le nombre d'antenne émettrice.

Avec S/N est le rapport signal sur bruit. Les deux principaux formats de MIMO sont :

a. Diversité spatiale

La diversité spatiale est souvent utilisée dans ce sens étroit se réfère à transmettre et recevoir la diversité. Ces deux méthodologies sont utilisées pour apporter des améliorations au rapport signal sur bruit et sont caractérisé par l'amélioration de la fiabilité du système vis-à-vis des différentes formes d'évanouissement.

b. Multiplexage spatial

Le principe du multiplexage spatial est utilisé par les systèmes MIMO, il permet d'exploiter la diversité spatiale pour transmettre des flux parallèles d'information dans la même bande spectrale attribuée, ces flux parallèles sont appelés couches. Il existe deux classes de multiplexage spatial selon la disponibilité des informations sur le canal à l'émission **[17]** :

- **OL-MIMO :** Dans le multiplexage spatial à boucle-ouverte (Open-Loop MIMO), l'émetteur ne dispose d'aucune information sur le canal. Chaque antenne transmet un flux de données indépendant avec une puissance totale équitablement répartie sur les différentes antennes.
- **CL-MIMO :** Dans le multiplexage spatial boucle-fermée (Close-Loop MIMO), l'émetteur dispose de toutes les informations nécessaires sur le canal. Les différentes antennes transmettent avec des puissances d'émissions allouées en fonction des valeurs propres de la matrice du canal H.

2.6 Efficacité spectrale

Par définition l'efficacité spectrale (η) est le rapport entre le débit binaire (en bit/s) et la bande passante (en Hz). Autrement dit c'est le nombre de données binaires envoyées sur le canal de communication par ressource temps-fréquence **[17]**.

L'efficacité spectrale est donnée par :

$$\boldsymbol{\eta = \frac{D}{B}} \quad \textbf{[bit/s/Hz]} \qquad \textbf{(2.4)}$$

Avec :

D : le débit binaire [bit/s]

B : est la largeur de la bande occupée par le signal modulé [Hz]

Pour un signal utilisant des symboles M-aires, on aura :

$$\boldsymbol{\eta = \left({}^{1}/_{T.B}\right) * \log_2(M)} \qquad \textbf{(2.5)}$$

M : la valence.

$$\boldsymbol{n = \log_2(M)} \ \textbf{[bit/symbole]} \qquad \textbf{(2.6)}$$

n : le nombre de bit/ symbole à transmettre.

2.6.1 Importance de l'efficacité spectrale

L'amélioration de l'efficacité spectrale augmenter les débits binaires, un but principal pour les réseaux de nouvelle génération 5G. Cette amélioration peut se faire avec plusieurs technologies dont la plus fameuse est la transmission sur plusieurs antennes ou MIMO **[17]**.

2.7 MIMO massif

2.7.1 Principe de fonctionnement

Le MIMO massif s'appuie sur l'utilisation d'un grand nombre d'antennes aux niveaux émetteurs et des récepteurs, le mot massif est employé car ce système utilise une centaine d'antennes pour envoyer les signaux. Cette technologie est essentielle pour augmenter la capacité des réseaux cellulaires.

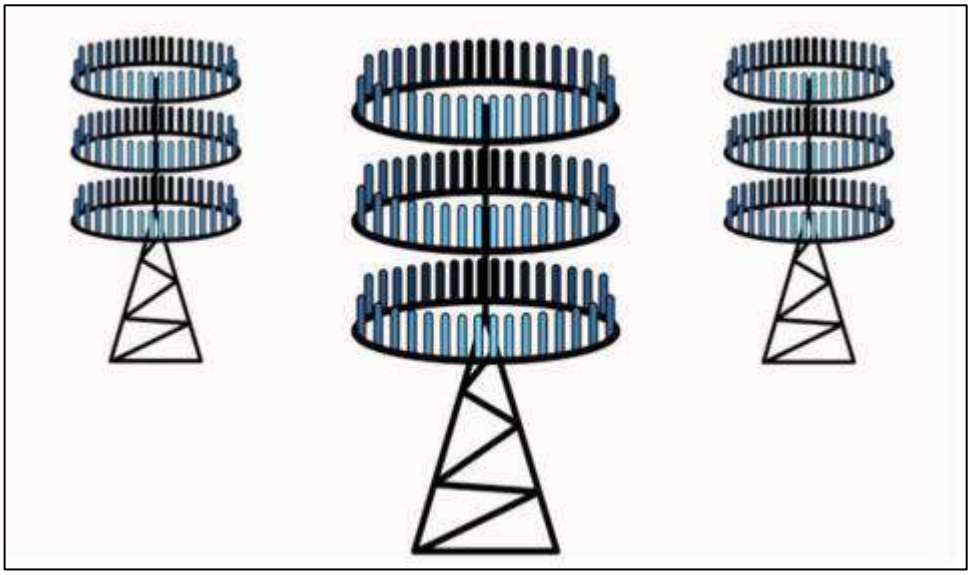


Figure 2.5 : *Une illustration de MIMO massive* **[18]**

2.7.2 Antenne MIMO massif

Les antennes MIMO massif se constituent un grand nombre de dipôles élémentaires appelé aussi élément rayonnant de petite taille, cela est possible grâce à l'utilisation de bandes de fréquences plus hautes. L'utilisation d'un grand nombre de dipôles élémentaires permettant de bénéficier de plusieurs émetteurs/récepteurs, dans ce cas, un émetteur/récepteur peut utiliser soit une seule antenne élémentaire soit un regroupement d'antennes élémentaires.

Massive MIMO propose deux innovations majeures :

2.7.3 Beamforming

Est un système de signalisation du trafic pour stations de base cellulaires qui identifie la voie de transmission de données la plus efficace pour un utilisateur particulier et réduit les interférences pour les utilisateurs à proximité. Aux stations de base MIMO massives, des algorithmes de traitement du 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. En résumé, pensez à la technologie

MIMO massive en tant que structure 3D massive augmentant les capacités de couverture horizontale et verticale **[18].**

2.7.4 MU-MIMO

Augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant ainsi un côté périphérique pratiquement unifié. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grande échelle. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter la vitesse de transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de la station de base sans consommer plus de bande passante ni augmenter les valeurs de modulation **[18]**.

2.7.5 Les avantages des systèmes Massive MIMO

Les principaux avantages des systèmes Massive MIMO peuvent être résumés comme suit **[19] :**

- Gain d'efficacité spectrale élevé.
- Gain d'efficacité énergétique élevé.
- Traitement simple.
- Augmentation du débit de données.
- Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.
- Renforcement des canaux.
- En intégrant le Beamforming il permet de réduire la pollution électromagnétique environnante en ciblant le récepteur.

2.8 Massif MIMO pour les ondes millimétrique

Les systèmes à ondes millimétriques offres des bandes de fréquences plus élevées permettant de concevoir des antennes de petite taille, cela permet d'intégrer un grand nombre d'antennes dans les réseaux d'antennes. Heureusement, il est maintenant possible d'emballer un tel nombre d'antennes dans de petits boîtiers, mais cela ne sera pas possible sans les progrès récents des circuits à semi-conducteur à oxyde métallique complémentaire (CMOS-complementary metal oxide semiconductor) qui augmente la capacité d'intégration de circuits. Le nombre maximal d'antennes pouvant être intégré dans les systèmes mmWave est influencé par des aspects tels que la consommation d'énergie et le coût, cependant, le MIMO massif reste très crucial pour de tels systèmes où une directivité élevée est obligatoire **[20].**

2.9 Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif

Comparés au MIMO traditionnel, les avantages du MIMO massif incluent :

- Amélioration de SE.
- Quantité massive de degrés de liberté dans le domaine spatial.
- Bonnes performances système avec uniquement un schéma de pré-codage linéaire (simple), par ex Forçage nul, transmission du rapport maximal, erreur quadratique moyenne minimale.
- Faciliter l'allocation des ressources**.**

2.10 Beamforming

En français appeler formation de faisceau, le Beamforming permet de filtrer le signal pour créer une connexion directe entre l'appareil (l'utilisateur) et l'antenne émettrice c'est- à-dire avoir un signal dirigé, cette technologie réseau a été également utilisée par le passé par les générations précédentes comme le wifi et parfois par la 4G LTE **[21]**.

2.10.1 Principe de fonctionnement

C'est l'une des techniques les plus puissantes de traitement de signal utilisées dans les communications par mmWaves, elle se base sur un réseau d'antennes pour l'émission ou la réception directionnelle de signaux. En agissant sur le décalage de phase et l'amplitude des signaux émis ou reçus par un réseau d'antenne, il est possible de manipuler le rayonnement électroniquement de certaines façons qu'il interfère de manière constructive dans des directions particulières et destructive ailleurs, et donc de concentrer la puissance des signaux de sortes qui soient plus puissants dans les directions souhaitées. Si l'espacement entre les éléments d'antenne est égal à la moitié de la longueur d'onde de la porteuse il en résulte un faisceau très étroit pouvant être dirigé dans n'importe quelle direction.

Le Beamforming permet d'améliorer considérablement la puissance et la sensibilité du signal émis cela est très efficace dans les endroits saturés et les lieux publics **[21]**.

2.10.2 Différents types de Beamforming

Il existe plusieurs types de Beamforming qui sont classées selon les techniques utilisées :

- Scanning Beamforming: il est utilisé généralement dans les radars.
- Phased array Beamforming : il agit seulement sur la phase pour diriger les faisceaux
- Switched Beamforming : il utilise un nombre fixe de faisceau avec une très grande sensibilité dans certaines directions, un des faisceaux prédéfinis est sélectionné pour la liaison.

- Adaptive Beamforming : ce type est capable automatiquement d'adapter la puissance du signal rayonné d'une antenne à différentes situations et scénarios de communications **[21]**.

2.10.3 Précodage

L'idée de base du précodage est d'utilisation une forme de connaissance du canal à l'émetteur afin de personnaliser les signaux transmis à la structure propre de la matrice canal. Il permet d'améliorer le taux de transmission, la probabilité d'erreur et par conséquent la capacité du système par un partage plus efficace du canal avec les différents usagers. Le précodage permet également la suppression des interférences et en l'occurrence réduit la complexité du récepteur.

2.10.3.1 Précodage et Beamforming

La notion de précodage apparaît dès lors que l'on effectue un traitement numérique à l'émission codant puis répartissant les données sur chacune des antennes, à l'aide d'une connaissance plus ou moins parfaite du canal de transmission. où d'un grand nombre d'antennes implique de faire un choix afin d'obtenir le compromis coût / complexité / qualité et rapidité de quantification le plus adapté au cas d'usage. le précodage va permettre de focaliser l'énergie dans une direction ou une zone particulière (respectivement pour une communication en LOS ou en NLOS) Un prétraitement numérique suivi d'un convertisseur numérique/analogique en entrée de chaque antenne .La synthèse des précodeurs est liée aux critères d'optimisation désirés (e.g. SIR, SNR, SINR, etc...). Chaque précodeur correspond à un compromis différent entre complexité, interférences inter-utilisateurs et consommation énergétique **[22].**

a. Précodeurs linéaires

Les systèmes MIMO souffrent d'interférences MU transmission de liaison descendante, qui est atténuée au moyen de méthodes de précodage de sensible au canal mises en œuvre au BS. Évalué catégoriser ces Précodeurs en deux catégories principales : précodeur linéaire et non linéaire. Les détecteurs de signaux linéaires à faible complexité considèrent tous les signaux, qui sont transmis en excluant le flux souhaité de l'antenne de transmission spécifiée comme interférence, qui sont transmis par d'autres antennes, sont réduites ou annulées dans le processus de détecter les signaux souhaités à partir de la transmission spécifiée **[22]**.

Tableau 2.2 : Les différents précodeurs linéaires **[22]**.

Précodeur	Expression	Maximisation
CB	H^H	SNR
EGT	Arg (H*)	SNR
ZF	$H^H(HH^H)^{-1}$	SIR
MMSE	$H^H(HH^H\sigma^2I_k)^{-1}$	SINR

- **Conjugate Beamforming (CB)**

  Formation de faisceaux conjuguée il est également appelé l'inversion du temps lorsqu'il est appliqué dans le fuseau horaire, il vise à maximiser le SNR .Cet appareil fournira un revenu maximal pour la formation de paquets pour chaque utilisateur, mais générera une certaine quantité de chevauchement sur d'autres utilisateurs. on utilise seulement la matrice des évanouissements rapides H. et matrice de précodage du Formation de faisceaux conjuguée (CB). (CB) est donnée par :

$$\boldsymbol{W^{(CB)} = H^H} \qquad \textbf{(2.7)}$$

- **Transmission Gain Egal (EGT)**

  L'EGT, ou transmission à gain constant, ne va compenser que le déphasage engendré par le canal sur chaque sous porteuse :

$$\boldsymbol{W_{k,m}^{(EGT)} = e^{-i\emptyset_{k,m}}} \qquad \textbf{(2.8)}$$

  $\emptyset_{k,m}$ est le déphasage introduit par le canal entre l'utilisateur k et l'antenne m La matrice de précodage a l'expression suivante :

$$\boldsymbol{W^{(EGT)} = \angle H^H} \qquad \textbf{(2.9)}$$

- **Zero Forçage (ZF)**

  Le ZF est un prédateur annulant les interférences inter-utilisateurs (interférences produites par une transmission MU-MIMO) et donc qui maximise le SIR, comme le montre **(la figure 3.1)**

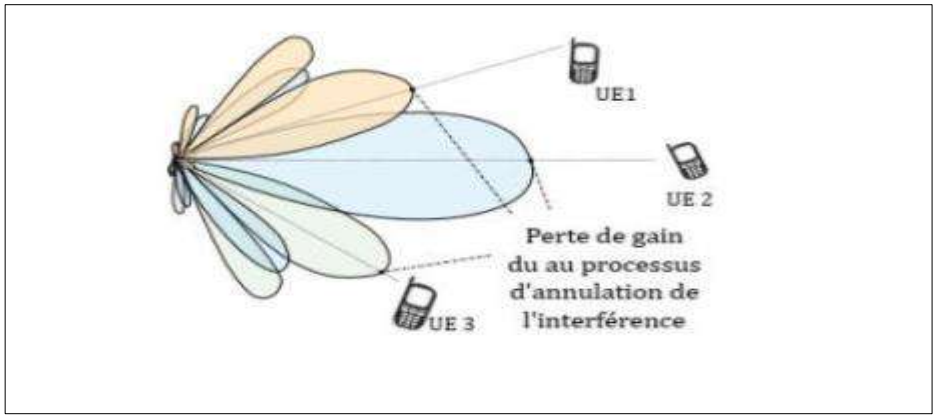


Figure 2.6 : *Précodeur Zero Forçage* **[22]**

La forme linéaire devenant très complexe, l'écriture matricielle est préférable pour plus de lisibilité

$$\boldsymbol{W^{(ZF)} = H^H(HH^H)^{-1}} \qquad \textbf{(2.10)}$$

- **Détecteur minimale moyenne quadratique Erreur (MMSE)**

Le précodeur MMSE est un compromis entre annulation d'interférences et puissance de bruit ce qui en fait un précodeur plus adapté que le ZF à bas SNR. Il vise donc à maximiser le SINR

$$\boldsymbol{W^{(MMSE)} = H^H(HH^H\sigma^2 I_k)^{-1}} \qquad \textbf{(2.11)}$$

Comme le ZF, il est d'une grande complexité à cause de l'inversion matricielle nécessaire au calcul de la matrice de précodage. Il permet de limiter l'impact du bruit à faible SNR que subit le ZF.

2.10.4 Beamforming analogique et numérique

Et il y a une classification dans les classifications de beamforming et elle est divisée en deux types : Analogique, numérique.

Les antennes analogiques de beamforming sont composées de matrices hybrides et de quarts de phase fixes. Le concept principal derrière l'analogique beamforming contrôle la phase de chaque signal transmis à l'aide de quarts de phase à faible coût. Un interruptrice radiofréquence sélective (RF) est utilisée pour faciliter la fonction de direction du faisceau (angle de direction) **[23]**.

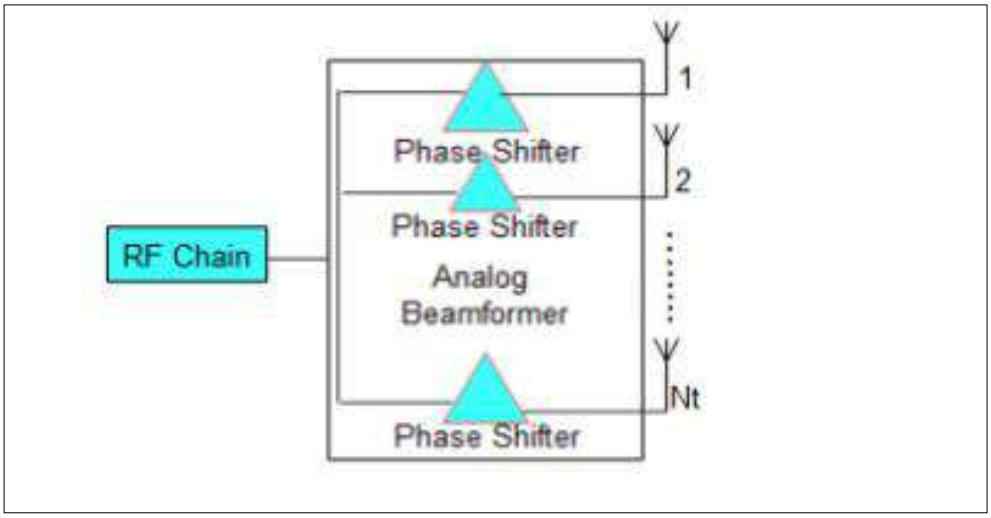


Figure 2.7 : *Beamforming analogique* **[23]**

Digital Beam Forming (DBF) est un mariage entre la technologie des antennes et la technologie numérique. Un processeur de signal numérique offre plus de liberté avec une plus grande flexibilité pour exécuter un algorithme efficace de beamforming **[23]**.et la mise en œuvre de beamforming numérique est ne convient pas aux systèmes MIMO massifs parce que le faisceau traditionnel est mis en œuvre à la bande de base, ce qui aide à contrôler la phase et l'amplitude du signal ; par conséquent, il exige que la fréquence du transporteur du signal traité soit convertie en hausse après une chaîne RF multi-segment, qui comprend des convertisseurs numériques-analogue (D/A). La partie numérique de beamforming crée des signaux de bande de base, tandis que la partie analogique de faisceau forme répond aux effets de chaîne de RF en réduisant le nombre d'ADC/DACs, ce qui améliore les extrants d'amplificateurs de puissance ou change l'architecture des mélangeurs et permet ainsi des économies de coûts **[23]**.

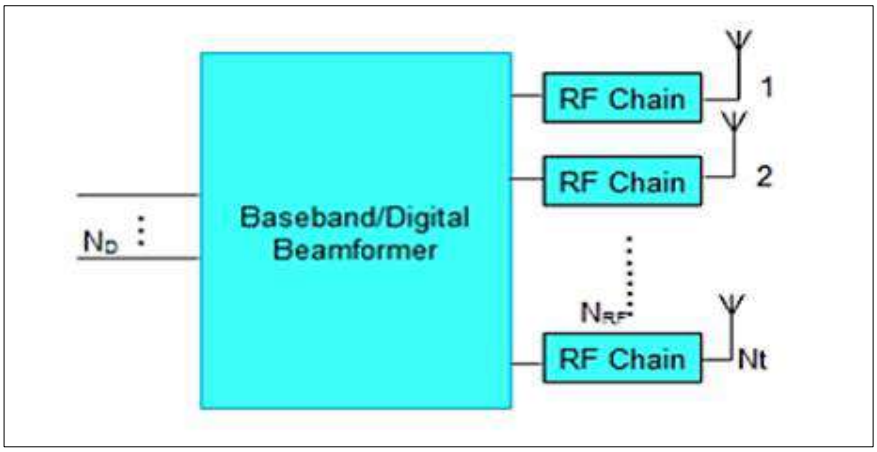


Figure 2.8 : *Beamforming numérique* **[23]**

2.10.4.1 Hybride Beamforming

Le beamforming analogique et le beamforming numérique formant méthodes ayant leurs propres avantages et inconvénients pour cette raison, une autre méthode est nécessaire pour surmonter les inconvénients, c'est-à-dire la méthode hybride de beamforming. L'architecture de cette méthode est réduite en raison de gros millimètres d'antennes d'ondes. Il existe deux types d'hybrides architectures de beamforming, la première est, les antennes sont attaché à chaque système présent de chaîne RF, le second contient un groupe d'antennes présentes dans le système qui sont connecté à la chaîne RF unique. L'avantage de l'utilisation La méthode hybride de beamforming est meublée presque optimale performance ainsi que la diminution du matériel et du signal complexité traitement **[23]**.

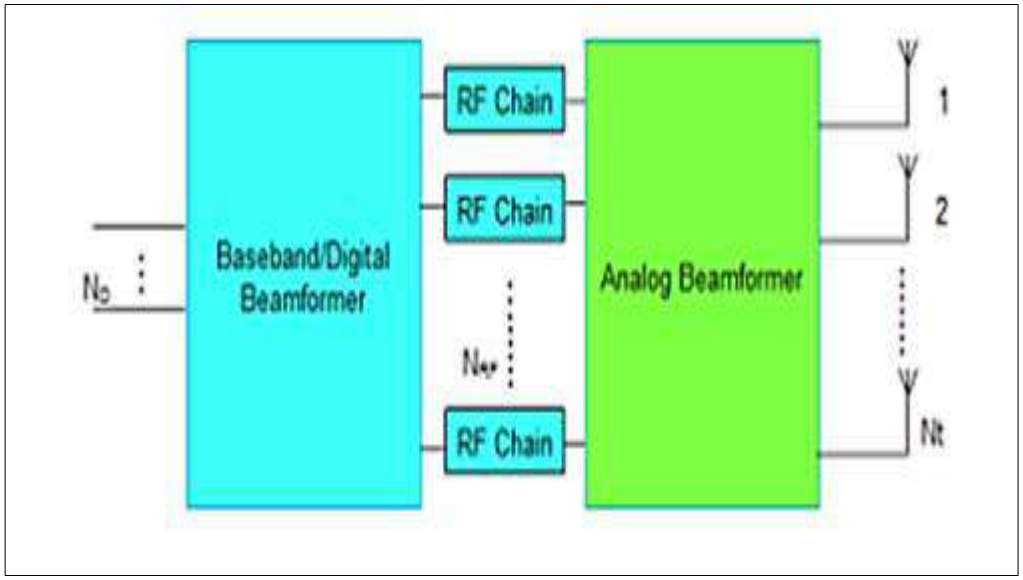


Figure 2.9 : *Beamforming Hybride* **[23]**

2.11 Conclusion

mmWave bandes sont devenues une solution prometteuse pour les réseaux mobiles 5G pour augmenter la capacité de canal, ils représentent la technologie du siècle pour les nouvelles générations mobiles avec leurs avantages riches tels que les hautes fréquences et une productivité élevée, grâce à leur petite longueur d'onde. Ces fréquences peuvent utiliser de nouvelles technologies telles que le MIMO massif et le beamforming. Cette dernière (technologie MIMO) est essentielle pour les systèmes de communication WLAN, LTE et 5G. Il a la capacité d'augmenter la productivité des canaux, l'efficacité spectrale et la durabilité contre la décoloration du signal et l'interférence. MIMO offre également une variété de graphiques pour améliorer les performances des liens, y compris la gestion de la diversité, le multiplexage spatial et le beamforming.

Dans ce chapitre, nous avons parlé de l'aspect général et du comportement des ondes millimétriques, Ensuite, nous avons introduit les différents aspects de la technologie MIMO dans la nouvelle ère des systèmes MIMO massifs, enfin nous avons présenté beamforming, lui principe de fonctionnement, beamforming analogiques et numériques et la beamforming hybride.

Chapitre 3 : Simulation et Résultats

3.1 Introduction

La conception du système de communication mobile basé sur l'évaluation et la performance du ce système. Dans ce chapitre, nous allons étudier et analyser la technique beamforming hybride dans le système mobile 5G.

Nous allons commencer par un modèle Simulink, un outil de simulation, qui peut effectuer une analyse architecturale de Beamforming hybrid. Ensuite, nous allons simuler les performances d'un émetteur-récepteur hybride avec plusieurs combinaisons. L'étude des performances est réalisée en analysant la capacité en fonction de le rapport signal sur bruit SNR et la probabilité en fonction de la capacité.

3.2 Langage utilisé

MATLAB (une abréviation de «MATrice de LABoratoire») est un langage de programmation multi-paradigme propriétaire et un environnement de calcule numérique développé MathWorks . MATLAB permet des manipulations matricielles, le traçage de fonctions et de données, la mise en œuvre d'algorithmes, la création d'interfaces utilisateur et l'interfaçage avec des programmes écrits dans d'autres langages. Bien que MATLAB soit principalement destiné au calcul numérique, une boîte à outils optionnelle utilise le moteur symbolique MuPAD permettant d'accéder aux capacités de calcul symbolique. Un package supplémentaire, Simulink, ajoute une simulation graphique multi domaine et une conception basée sur un modèle pour les systèmes dynamiques et embarqués **[24].**

MathWorks a présenté aujourd'hui la version 2021b des familles de produits MATLAB et Simulink. La version 2021b (R2021b) offre des centaines de fonctionnalités et de fonctions nouvelles et mises à jour dans MATLAB et Simulink, ainsi que deux nouveaux produits et cinq mises à jour majeures. Les nouvelles fonctionnalités de MATLAB incluent de code et l'édition de blocs, ainsi que la possibilité d'exécuter des commandes et des scripts Python à partir de MATLAB. Les mises à jour de Simulink permettent aux utilisateurs d'exécuter plusieurs simulations pour différents scénarios à partir de l'éditeur Simulink et de créer des onglets personnalisés dans la barre d'outils Simulink. La R2021b introduit également de nouveaux produits prenant en charge les communications sans fil **[25] :**

3.2.1 RF PCB Toolbox

RF PCB Toolbox permet la conception, l'analyse et la visualisation de cartes de circuits imprimés (PCB) multicouches haute vitesse et RF. Les ingénieurs RF peuvent concevoir des composants à géométrie paramétrée ou arbitraire, y compris des structures passives

Distribuées telles que des traces, des coudes et des vias. En utilisant la méthode des moments dans le domaine de la fréquence et d'autres techniques EM, les effets de couplage, de dispersion et parasitaires peuvent être modélisés.

3.2.2 Signal IntegrityToolbox

Signal Integrity Toolbox fournit des fonctions et des applications pour la conception de liaisons série et parallèles à grande vitesse. Les utilisateurs peuvent générer des expériences couvrant plusieurs paramètres, extraire des mesures de conception et visualiser les formes d'onde et les résultats.

La version R2021b est disponible immédiatement dans le monde entier. Pour plus d'informations sur tous les nouveaux produits, les améliorations et les corrections de bogues des familles de produits MATLAB et Simulink, consultez la page des faits marquants de la R2021b.

3.3 Architecture de la plateforme

Nous avons choisi le model de plateforme simulink développer MathWorks . Ce modèle permet d'explorer plusieurs configurations avec une durée de simulation minimale. Notre architecture du système est présentée dans **(la Figure 3.1).**On modélise un système complet de communication qui comporte un réseau d'antenne émetteur et récepteur et chaque réseau vertical de 8 antennes effectue une beamforming. Les quatre des sous-réseaux font de le beamforming en azimut. On assume que chaque antenne est isotopique. Le récepteur envoie la direction d'arrivée prévue à l'émetteur afin qu'il puisse se concentrer et se recentrer lorsque le récepteur se déplace, à noter que le transmetteur effectue un beamforming hybrid .Nous avons modélisé le système avec Simulink afin de mieux intégrer l'interface RF à la logique de contrôle. Notre système est constitué d'un émetteur qui produit un signal QPSK, un modèle de canal qui atténue le signal et ajoute du bruit et un récepteur de beamforming.

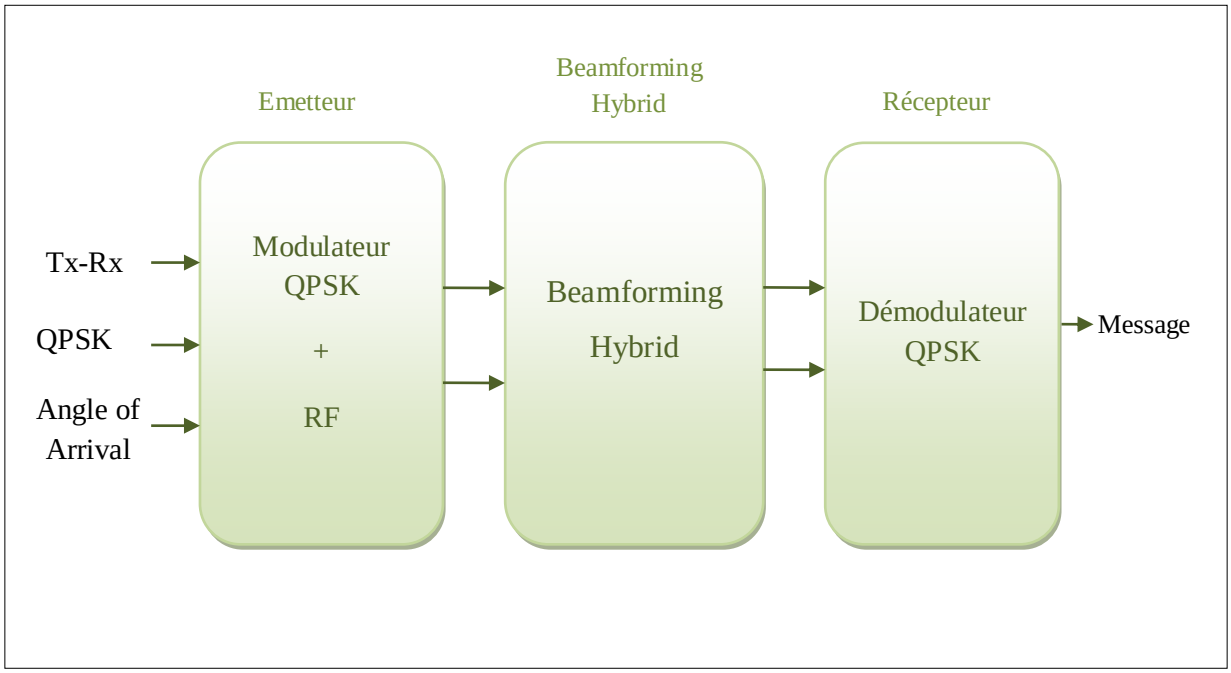


Figure 3.1 : *Architecture de Beamforming Hybrid*

3.3.1 Plateforme de simulation

Plateforme de simulation constituée du 5 blocs principaux :

- Transmetteur QPSK
- Emetteur RF
- Beamforming réseau de transmission
- Réseau de réception
- Récepteur QPSK

a) Transmetteur QPSK

L'émetteur QPSK comprend un sous-système de génération de bits, un bloc modulateur QPSK, un bloc de filtre de transmission en cosinus surélevé pour la mise en forme des impulsions et un bloc de gain (voir la **Figure 3.2**). Le sous-système de génération de bits génère des trames. Chaque trame comporte 26 bits d'en-tête suivis d'une charge utile de 174 bits, 105 bits pour le message '**Hello World**' et 69 bits aléatoires. La charge utile est bloquée pour assurer une répartition équilibrée des zéros et des zéros pour l'opération de récupération temporelle dans le modèle récepteur.

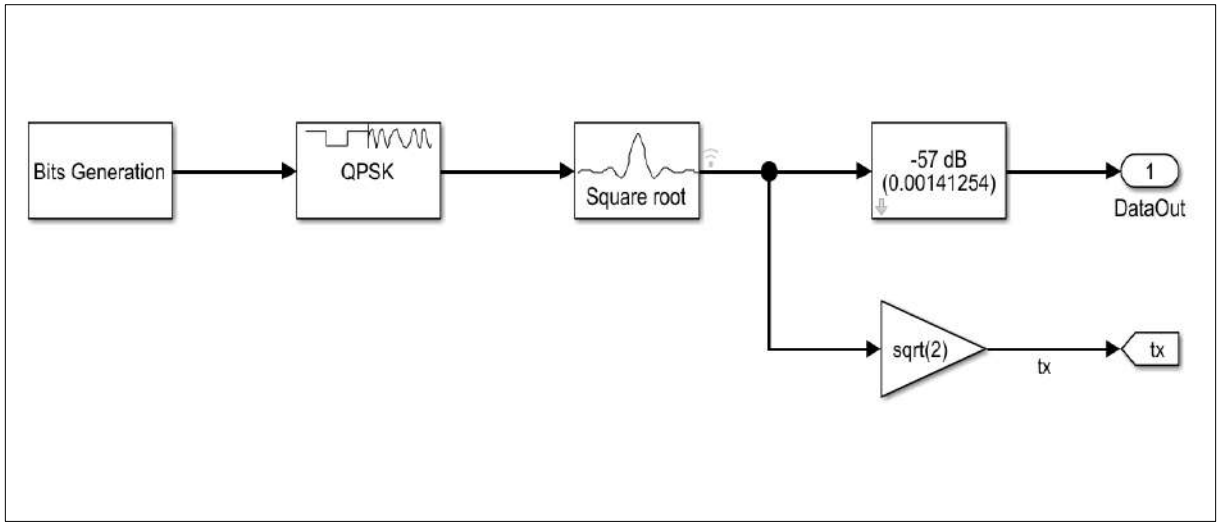


Figure 3.2 : *Bloc émetteur QPSK*

b) Emetteur RF

L'émetteur RF est constitué de trois partie : des faisceaux réseau, une antenne beamforming hybride et un bloc réseau de transmission à bande étroite. L'antenne hybride 32 éléments formant un faisceau est divisée en quatre sous-réseaux. Chaque sous-réseau est constitué de 8 émetteurs RF fonctionnant dans la bande de 66 GHz.

Le gain de l'antenne réseau à distance est calculé en utilisant le bloc d'antenne de transmission à bande étroite Phasarray System Toolbox. Le diagramme de rayonnement calculé correspond à la superposition de champs générés par des patchs de microsémies isolés. La **Figure.3.4** donne un bloc d'émetteur RF.

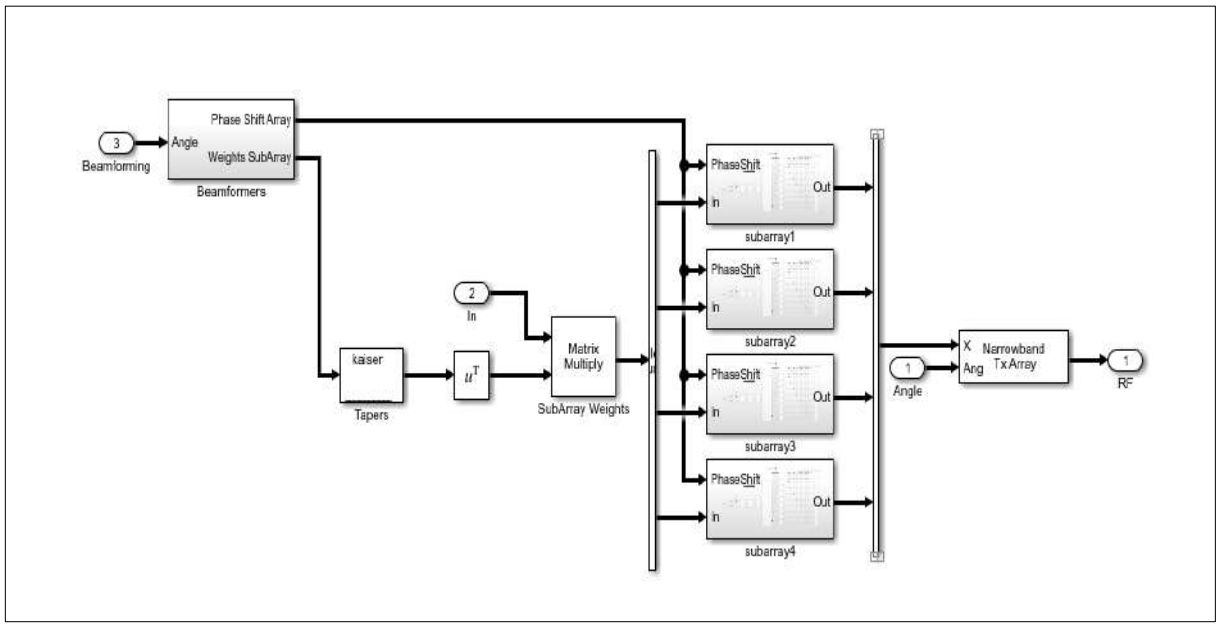


Figure 3.3 : *Bloc d'émetteur RF*

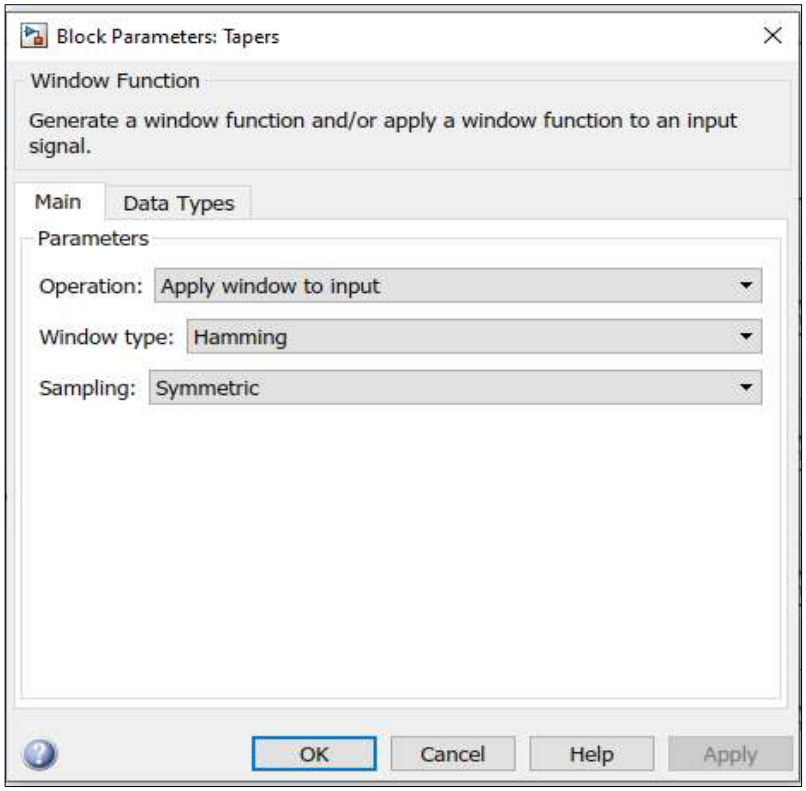


Figure 3.4 : *Paramètre du choix de la fenêtre* ***(****Hamming****)***

Nous avons changé le type de fenêtre, la fenêtre de kaiser avec beta égale à 20, comme montre dans **(la Figure. 3.5) :**

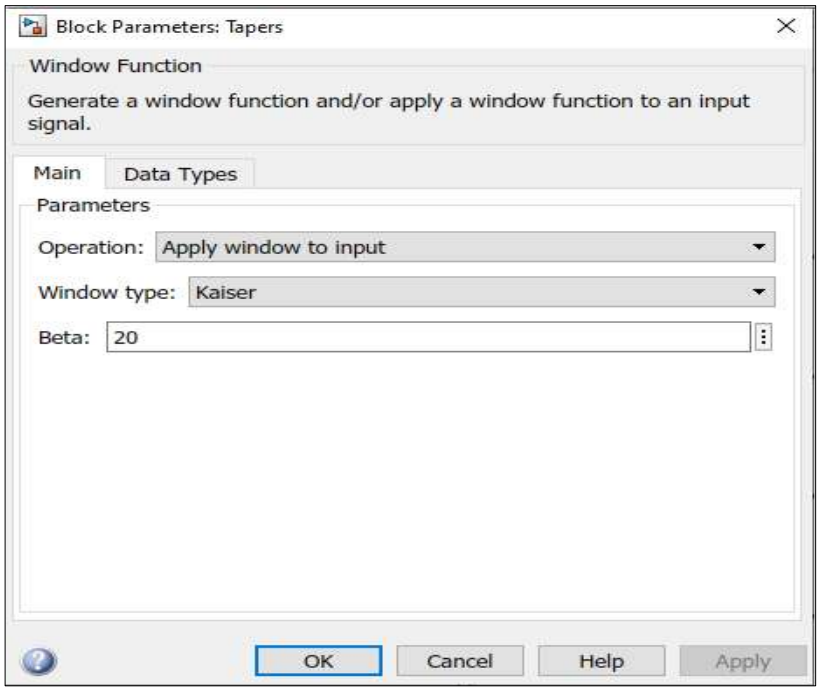


Figure 3.5 : *Paramètre du choix de la fenêtre* ***(****Hamming****)***

c) Beamforming et réseau de transmission

Le réseau d'émission est orienté vers la direction estimée par le récepteur. Deux algorithmes de beamforming différents sont employés afin de calculer les poids appliqués aux quatre sous-ensembles et aux éléments de chaque sous-ensemble. Les poids des sous-échelles sont calculés en utilisant un formateur de faisceaux MVDR.

Une multiplication complexe dans le beamforming MVDR combine les poids du signal transmis et les échelles secondaires, dirigeant le signal transmis dans la sens de l'azimut. Le retrait est employé pour réduire les effets des lobes de réseau.

Les décalages de phase appliqués aux 8 sous-éléments sont calculés à l'aide d'un algorithme pour la beamforming déphasés. Les quatre sous-échelles appliquent les mêmes décalages de phase qui guident l'émetteur le long de le sens d'élévation. **La Figure.3.6** illustre les différents étages de Beamforming de réseau de transmission.

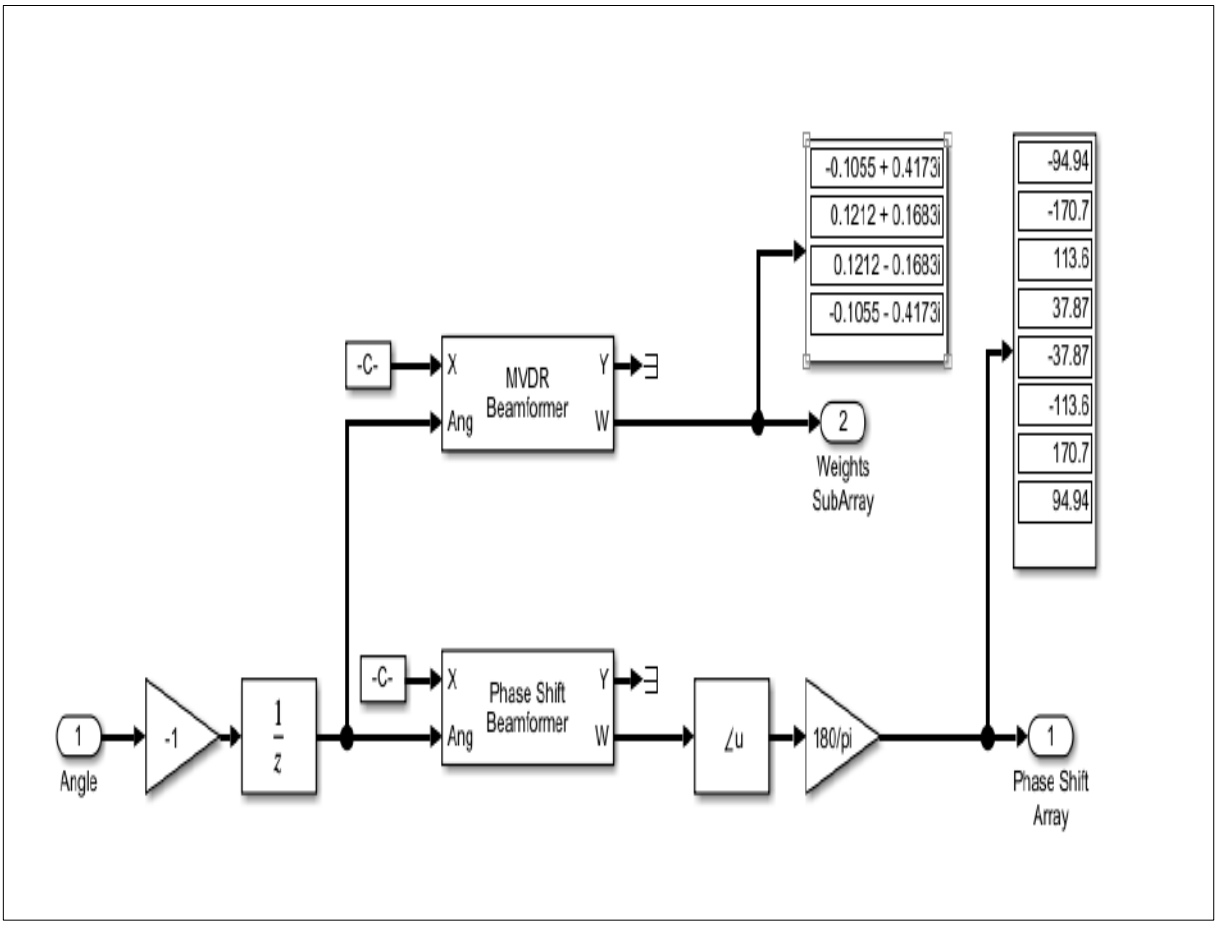


Figure 3.6 : *Beamforming de réseau de transmission*

d) Les différents des sous-réseaux de transmission

Les quatre sous-réseaux d'émission sont identiques. Chaque sous-réseau effectue une conversion ascendante à 66 GHz à l'aide d'un modulateur en quadrature et d'un oscillateur local à 5 GHz suivi d'un modulateur avec un oscillateur local à 61 GHz, d'un filtre d'image et d'un filtre de sélection du canal. Les altérations comme le bruit, le déséquilibre I/Q et les non-linéarités sont comprises dans les composants souterrains appropriés. Un amplificateur de puissance non linéaire augmente le gain de l'émetteur et un diviseur de puissance de type Wilkinson 1 à 8 suivis de déphaseurs variables connecte le PA à 8 antennes. Les huit déphasages variables servent à diriger le faisceau. La charge du sous-ensemble d'antenne et le couplage entre les éléments d'antenne sont modélisés selon ses paramètres S.

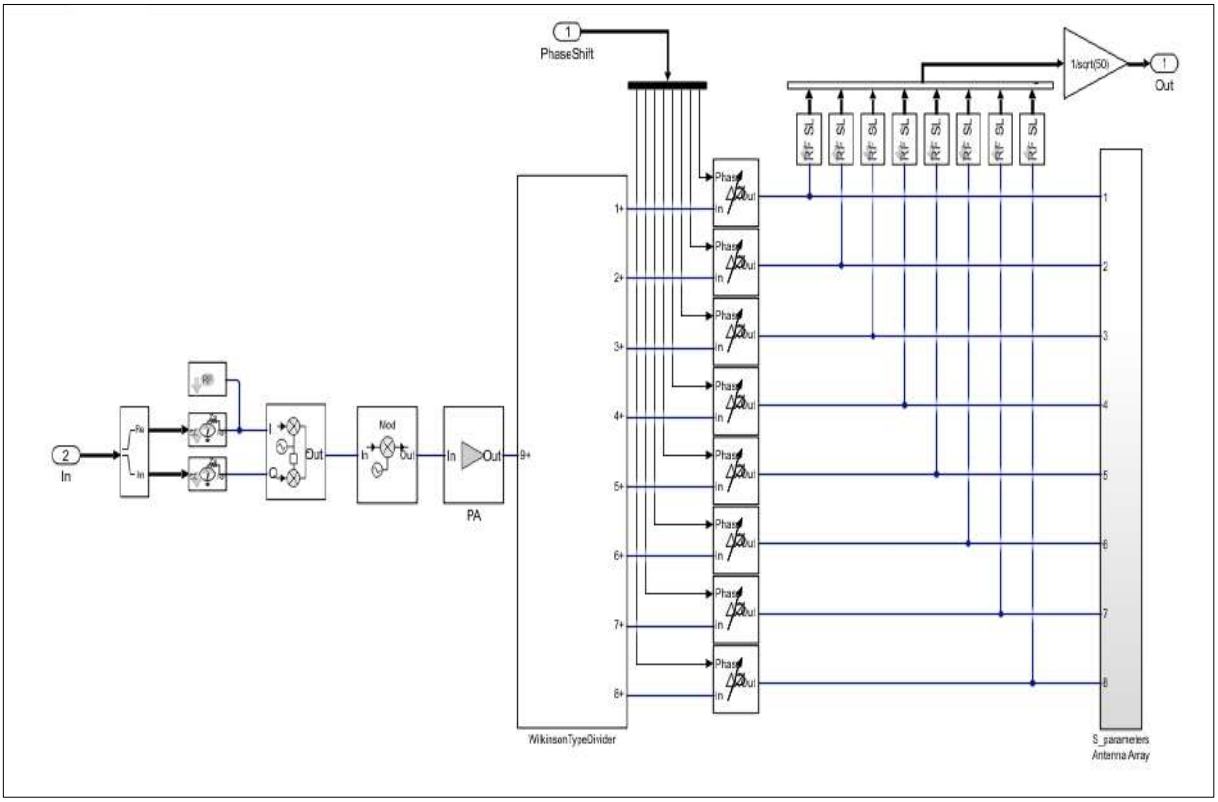


Figure 3.7 : *Bloc des sous-réseaux de transmission*

e) Réseau de récepteur

Le récepteur est modélisé à un degré d'abstraction supérieur à celui de l'émetteur. Le récepteur emploie deux réseaux linéaires orthogonaux, chacun comportant quatre éléments d'antenne isotropes. Les réseaux permettent d'établir la diversité spatiale pour l'identification de l'angle d'arrivée. Le récepteur n'applique pas d'algorithme de beamforming.

Le gain fini et le SNR du récepteur sont modélisés pour chacun des signaux reçus suivis d'un ADC 12 bits avec une plage dynamique finie incluant les effets de saturation et de

quantification. L'algorithme Root MUSIC DOA est utilisé pour estimer la position du transmetteur en termes d'angles d'azimut et d'altitude (voir **Figure.3.8**).

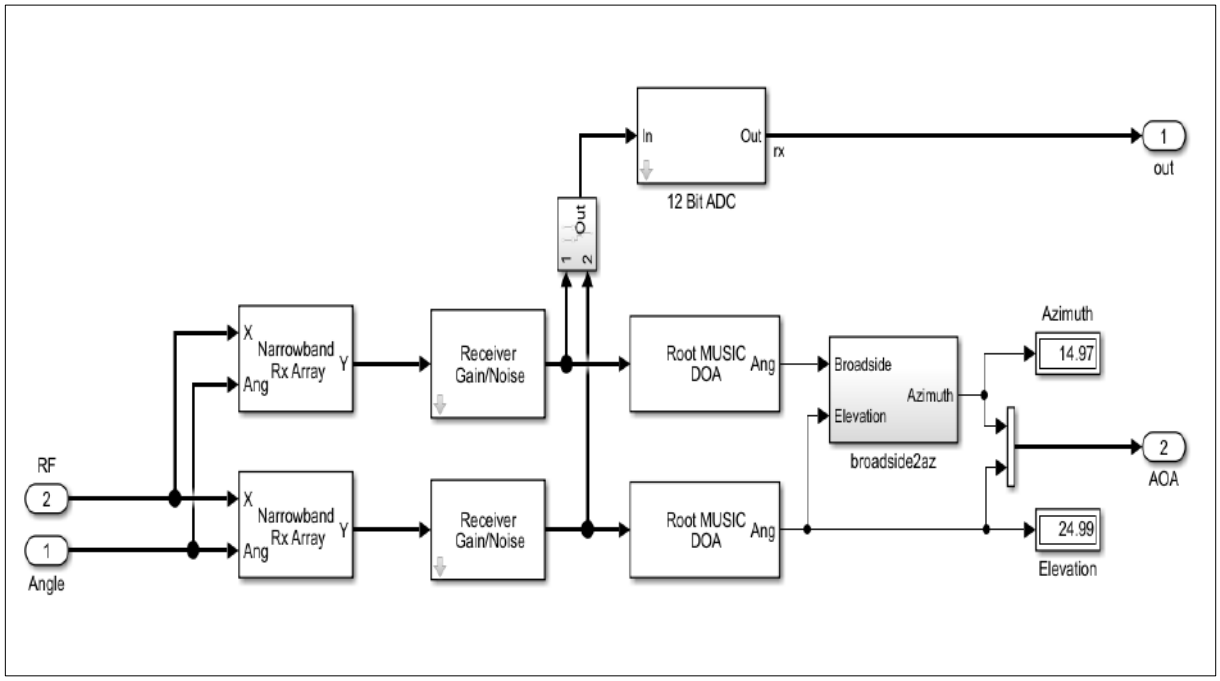


Figure 3.8 : *Bloc du réseau de récepteur*

f) Récepteur QPSK

Le bloc de récepteur QPSK est composé comme suit (voir la **Figure .3.9)**:

- L'AGC contrôle et stabilise l'amplitude du signal reçu, ce qui affecte l'exactitude du synchronisation du symbole porteur.
- Le filtre récepteur cosinus élevé assure un filtrage correspondant à la forme d'onde transmise.
- L'étage de synchronisation du transporteur assure une compensation de fréquence précise.
- L'étage de détecteur de préambule utilise l'en-tête de cadre connu (code Barker modulé QPSK) pour corréler avec les symboles QPSK reçus pour localiser l'emplacement de l'en-tête de cadre.
- L'étage de synchronisation d'image utilise les informations de localisation d'image du détecteur de préambule afin d'aligner les limites d'image. La deuxième sortie du bloc est un scalaire booléen indiquant si la première sortie est une image valide avec l'en-tête souhaité et si oui, permet au sous-système de décodage de données de fonctionner.

- Le sous-système de décodage de données activé permet de résoudre les ambiguïtés de phase, de démoduler et de décoder les messages texte.

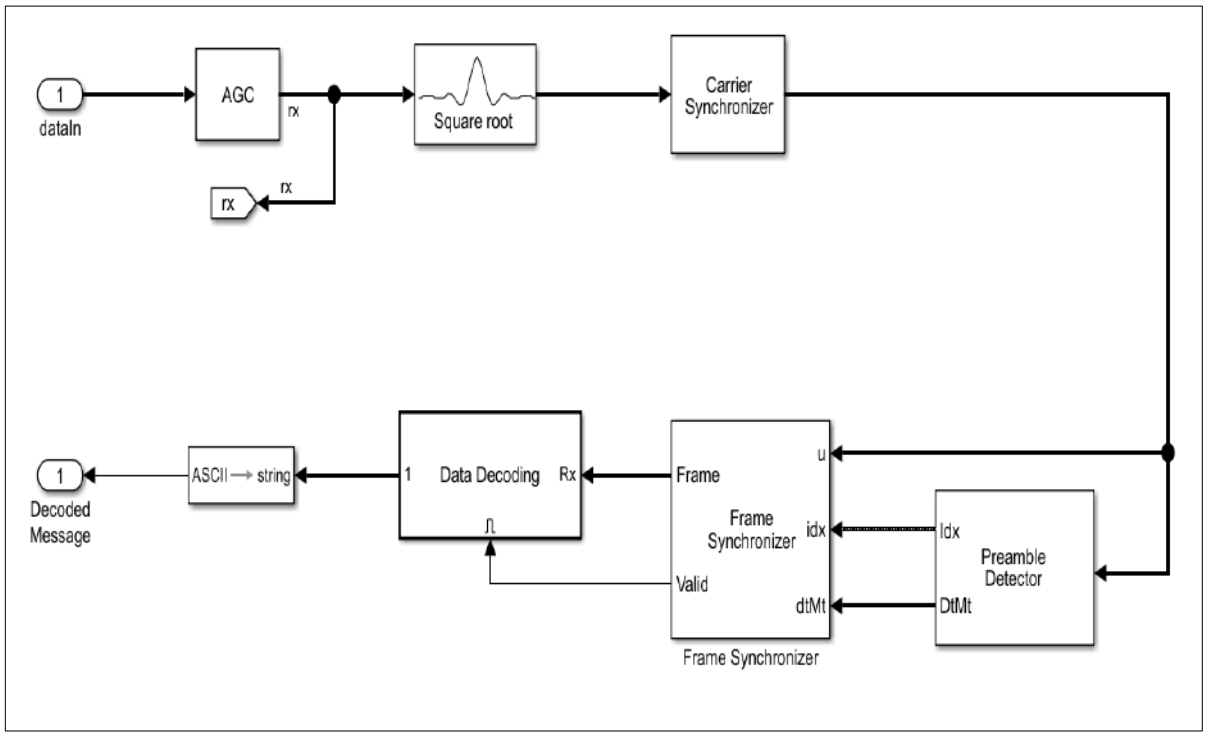


Figure 3.9 : *Bloc de récepteur de QPSK*

3.4 Résultats de simulation

3.4.1 La variation de spectre du signal au niveau d'émetteur et récepteur

Les résultats de simulations sont présents dans les **(Figure 3.10), (Figure. 3.11), (Figure. 3.12)** et **(Figure. 3.13)**.**(La Figure 3.10)** et **(Figure 3.11)** représentes le spectre du signal au niveau d'émetteur et récepteur pour le type de fenêtre Hamming. **(La Figure 3.12)** et **(Figure 3.13)** représentes le spectre du signal au niveau d'émetteur et récepteur pour le type de fenêtre Kaiser.

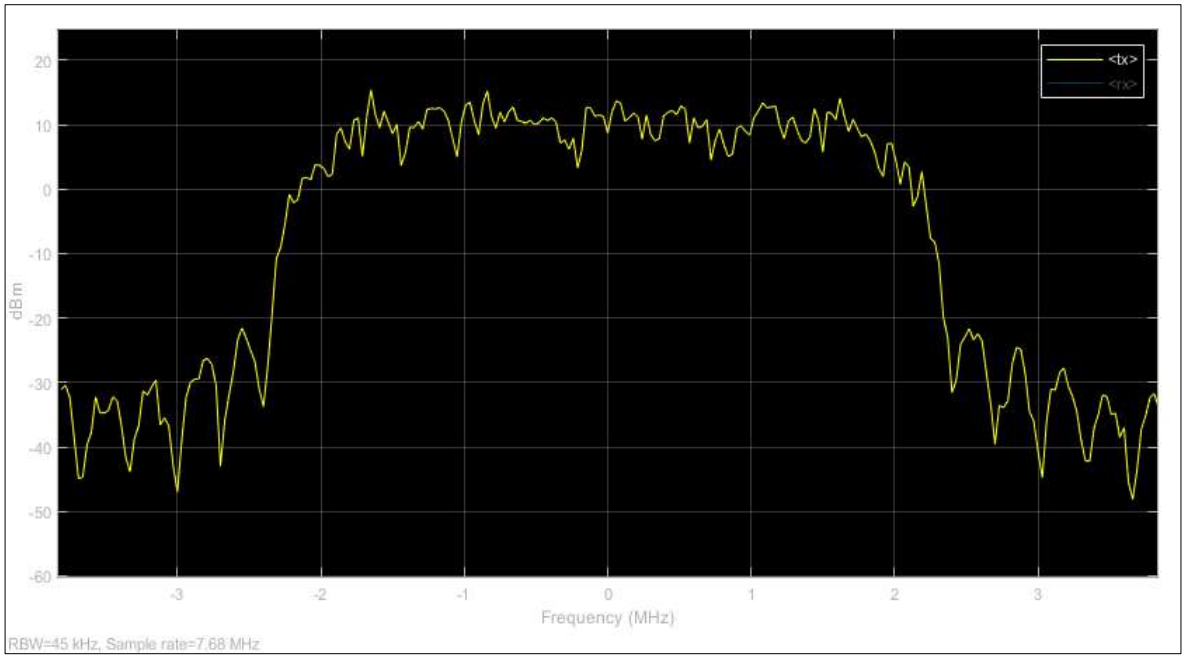


Figure 3.10 : *Spectre du signal à l'émission de type Hamming*

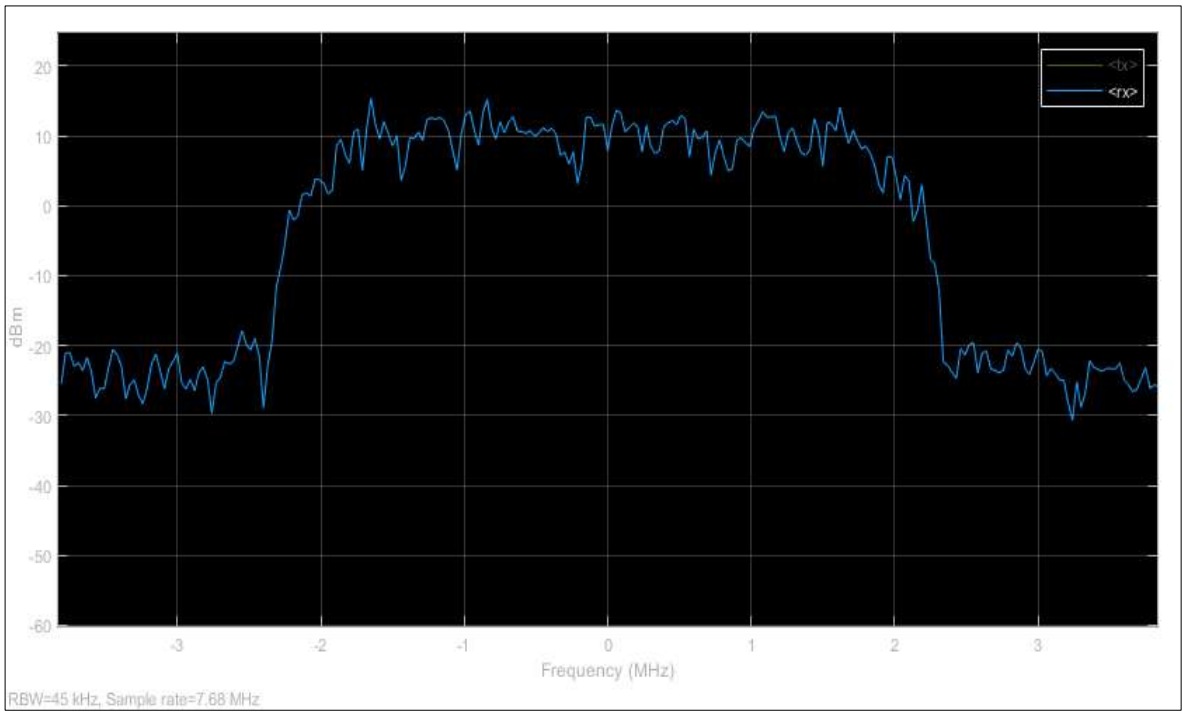


Figure 3.11 : *Spectre du signal à la réception de type Hamming*

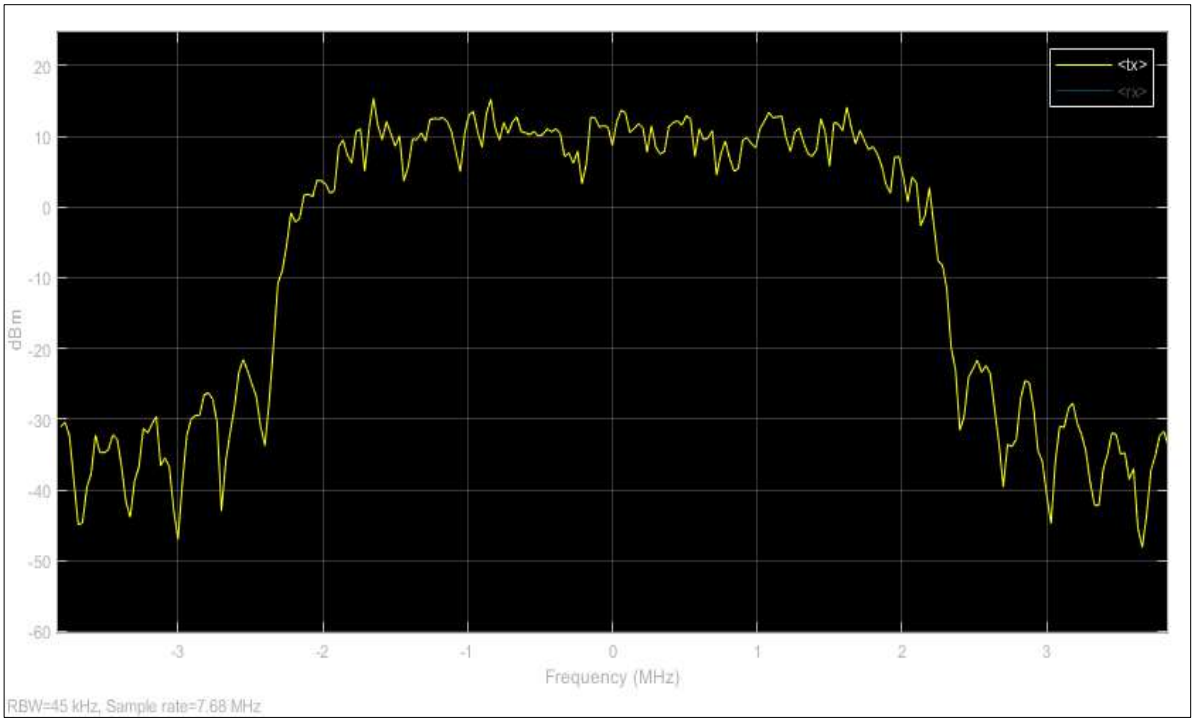


Figure 3.12 : *Spectre du signal à l'émission de type Kaiser*

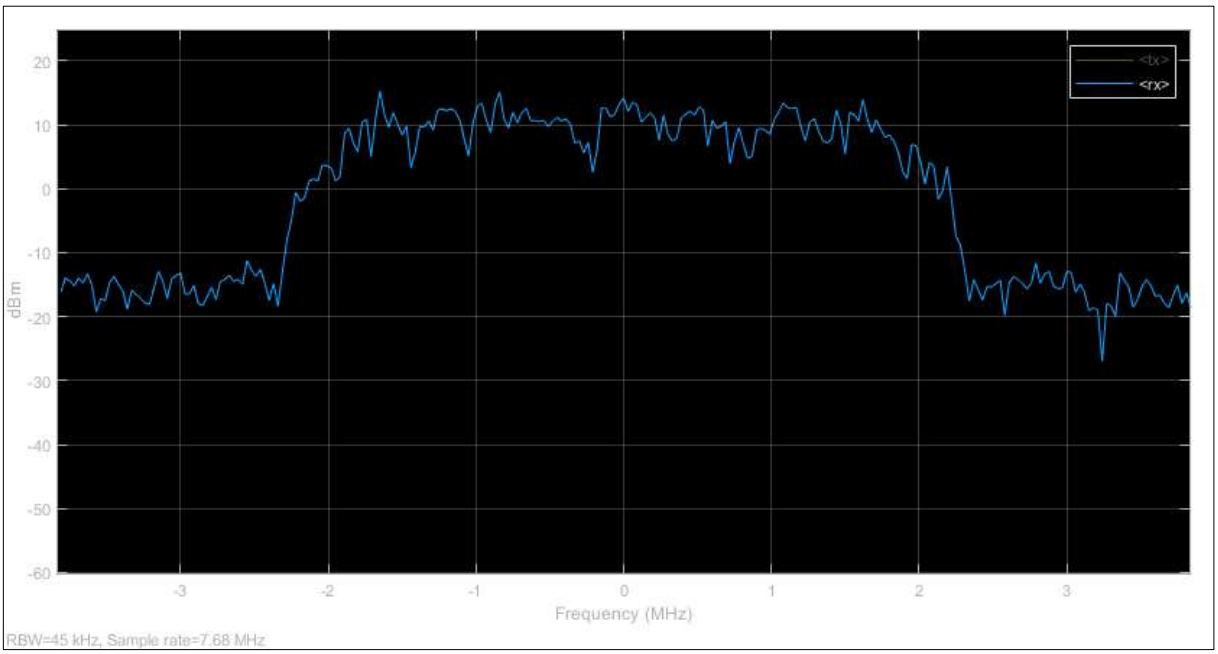


Figure 3.13 : *Spectre du signal à la réception de type Kaiser*

Après l'analyseur des Figures précédentes, on remarque que le spectre du signal au niveau d'émetteur ne porte pas un changement par rapport le spectre au niveau de récepteur. Nous observons également que les résultats des paramètres de la fenêtre Kaiser sont légèrement meilleurs que ceux du Hamming.

3.4.2 Les diagrammes de constellation de l'émetteur et réception

Les diagrammes de constellation de l'émetteur et réception de type Kaiser sont donnés par les **(Figure 3.14)** et **(Figure 3.15).**

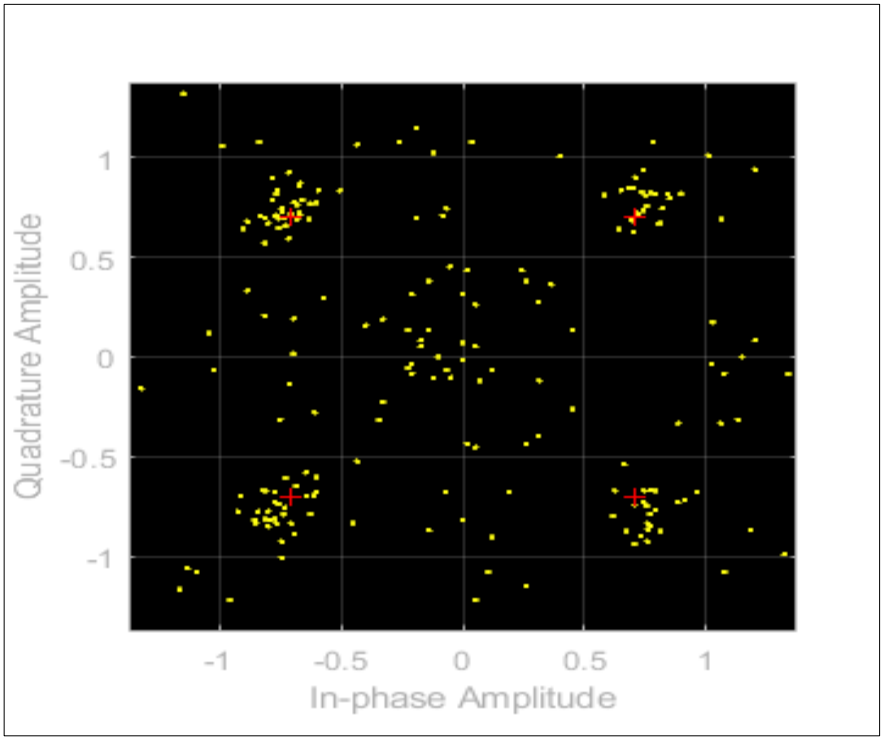


Figure 3.14 : *Diagramme de constellation Tx*

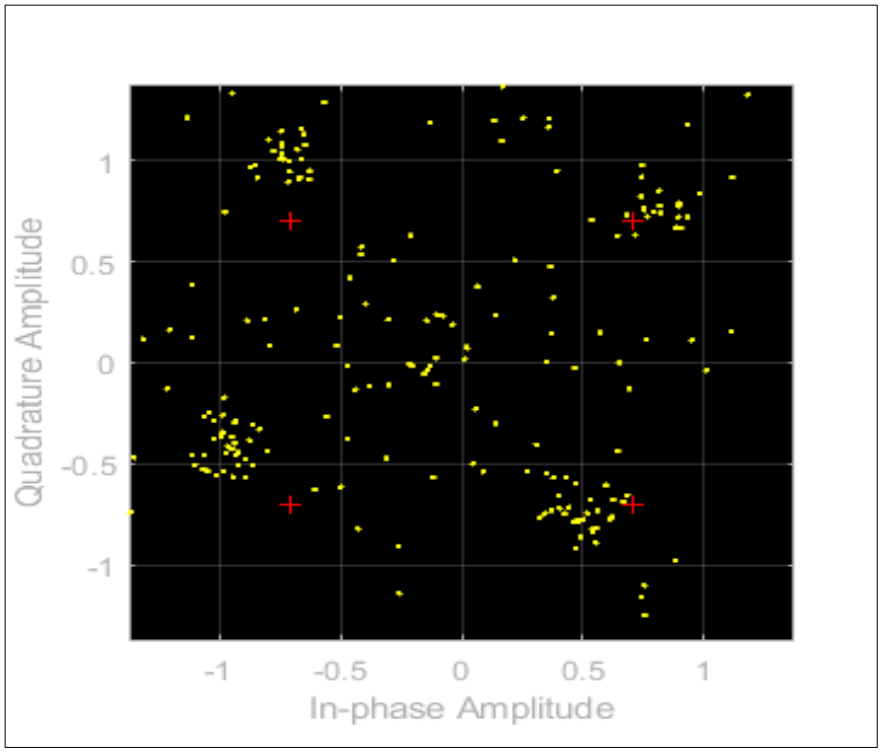


Figure 3.15 : *Diagramme de constellation Rx*

On remarque que le système de communication basé sur la technique beamforming. Hybrides est toujours capable de retrouver la constellation. On remarque également que le spectre du signal reçu contient les effets de non-linéarité dus aux interférences de puissance élevée. Il est donc possible de mettre en corrélation la direction d'arrivée estimée avec le spectre du signal reçu après la beamforming hybrides et avec la constellation reçue.

3.4.3 Impact de la variation du SNR dans la capacité du canal de transmission

Dans cette section, nous avons simulé le canal de transmission et la capacité du canal avec des différents nombres d'antennes des émetteurs et récepteurs. Cette simulation est divisée en deux parties :

1. La première partie, nous avons mesuré la capacité du canal en fonction de SNR pour différents nombre Tx-Rx.
2. La deuxième partie: nous avons donné la probabilité de la capacité en fonction capacité du canal de transmission pour différents nombre des émetteurs et récepteurs

Les résultats de simulations sont présents dans les **(Figure 3.16)** et **(Figure 3.17)**.

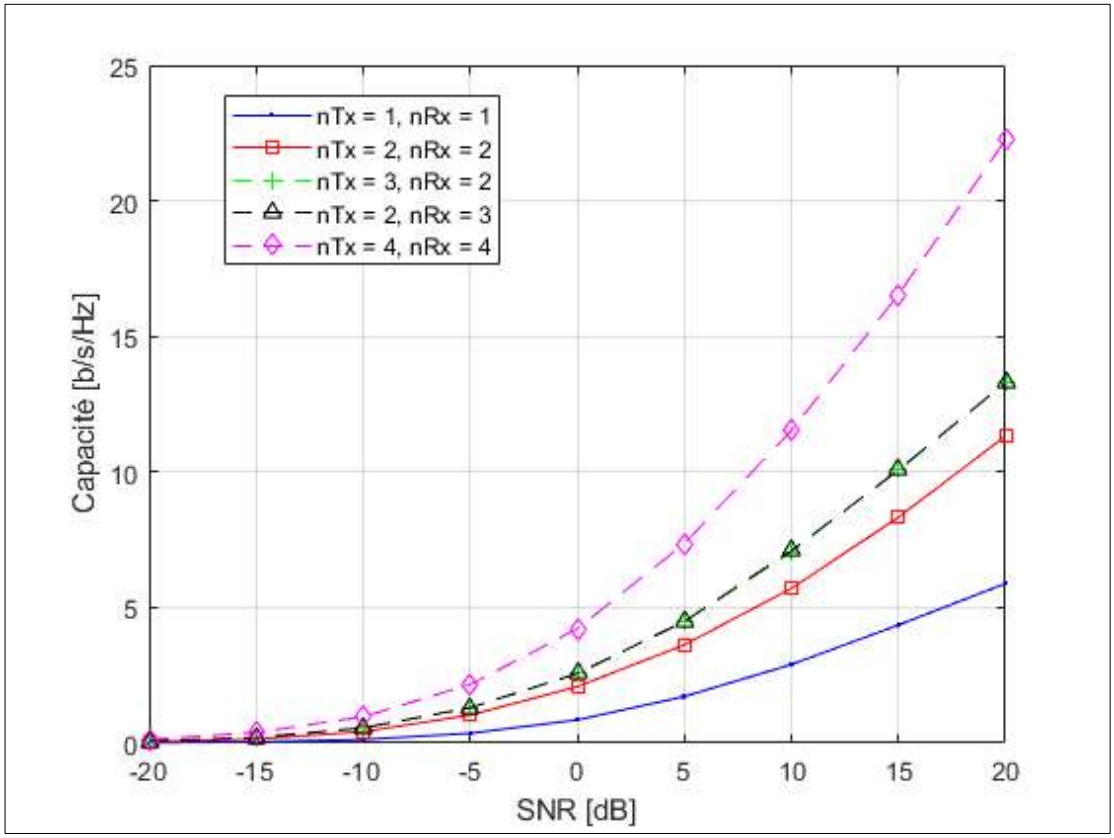


Figure 3.16 : *Capacité en fonction de SNR pour différents nombre Tx-Rx*

A partir de **(la Figure 3.16)**, on remarque que la capacité augmente quand le SNR augmente. Les résultats obtenus montrent que la capacité est augmentée en raison du même nombre

d'antennes utilisées dans l'émetteur et le récepteur. En particulier lorsque SNR=20 dB, la capacité pour 4x4 est d'environ 22.5 [b/s/ HZ]. Dans tous les cas, le récepteur et l'émetteur 4x4 atteignent une meilleure capacité que 1x1.

3.4.4 La probabilité de la capacité du canal de transmission

Pour mesure la capacité du canal, qui permet de caractériser les performances maximales d'un canal de transmission. C'est-à-dire, le nombre maximal de bits susceptible d'être transmis par seconde. Dans cette expérience, nous avons utilisé une probabilité de variation de la capacité du canal pour une valeur de SNR =5 dB. **(La Figure 3.17)** représente la probabilité de la capacité en fonction capacité du canal de transmission pour différents nombre d'émetteur Tx et recepteur Rx.

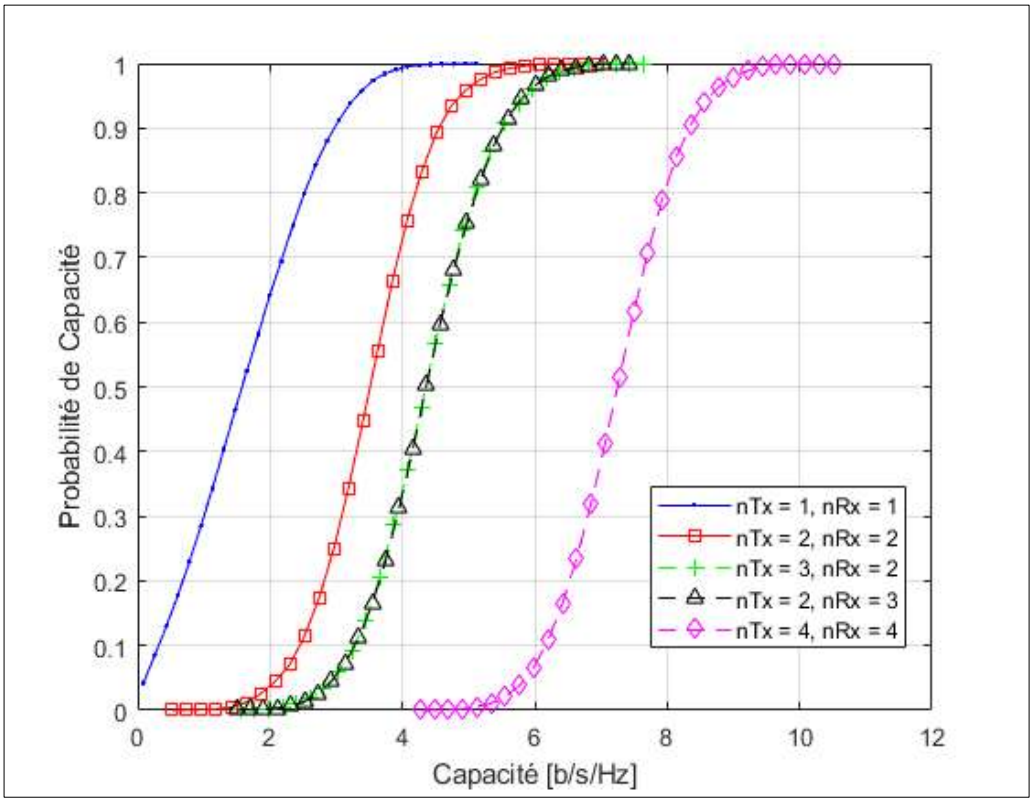


Figure 3.17 : *Probabilité de la capacité en fonction capacité du canal de transmission pour différents nombre Tx-Rx (SNR=5dB)*

A partir de **(la Figure 3.17)**, on remarque que la valeur du SNR est augmentée, la probabilité de capacité augmente également. Lorsque la probabilité de capacité est de 0.1 pour 1x1 la capacité est de 0.3, pour 3x2 la capacité est de 3.2, pour 2x3 la capacité est presque la même valeur de 3x2 qui égale à 3.2. Enfin pour 4x4 la capacité est de 6.2. Il est prouvé que 4x4atteignent une capacité supérieure à d'autres cas respectivement.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé l'architecturale de beamforming hybride. Dans un premier temps nous avons testé la variation de spectre du signal au niveau d'émetteur et récepteur. Puis nous avons simulé et analysé l'impact de la variation du SNR dans la capacité du canal de transmission. En fin de ce chapitre, nous avons mesuré la probabilité de la capacité du canal de transmission. A partir des résultats de simulation nous pouvons dire que l'architecture beamforming hybride est donné un meilleur résultat de performances de spectre du signal au niveau de réception. Nous pouvons aussi conclure que le récepteur et l'émetteur 4x4 atteignent une meilleure capacité.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Le but de ce travail présenté dans ce projet est l'étude et l'analyse de l'architecture Beamforming hybride pour les réseaux 5G.

Dans le premier chapitre, nous avons expliqué généralement la quatrième génération 4G, nous avons aussi étudié sur la cinquième génération 5G des réseaux cellulaires, ses objectifs, les technologies utilisées par cette génération et son architecture réseau. Ce nouveau réseau travaille sur une connectivité 1000 fois supérieure à celle de 4G avec l'augmentation des débits et la gérance d'un grand nombre d'utilisateurs, notamment avec l'apparition des nouvelles applications qui nécessitent des communications massives, une faible consommation d'énergie, une latence réduite. Pour atteindre ces exigences la 5G utilise les ondes millimétriques car, elles sont capables de fournir des bandes plus larges.

La deuxième chapitre nous avons défini des ondes millimétriques et nous avons fourni quelques avantages d'utilisation des mmWaves et nous avons abordé le problème de l'estimation des canaux d'ondes millimétriques. ensuite nous avons présenté les technique MIMO et MIMO massif, ce dernier (Massive MIMO) marque une rupture nette avec la pratique actuelle en utilisant un excès important des antennes de service sur les terminaux actifs Des antennes supplémentaires permettent de concentrer l'énergie dans des régions de plus en plus petites afin d'améliorer considérablement le débit et l'efficacité énergétique rayonnée, Enfin nous avons défini Beamforming lui principe de fonctionnement, beamforming analogiques et numériques et la beamforming hybride.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié et analysé la technique beamforming hybride dans le système mobile 5G. en utilisant l'outil de Simulation de MATLAB, Nous avons commencé par un modèle Simulink, qui peut effectuer une analyse architecturale de Beamforming hybride. Ensuite, nous avons simulé les performances d'un émetteur-récepteur hybride avec plusieurs combinaisons. L'étude des performances est réalisée en analysant la capacité en fonction de le rapport signal sur bruit SNR et la probabilité en fonction de la capacité.

Bibliographie

[1] ALIOUI Bessam et BOUKHELF Ali. Etude des performances des réseaux mobiles 4G : Architecture du système LTE. 79 pages. Génie électrique : Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira : 2017.

[2] BELFETHI Widad et AMIRI Cherine. Etude et Analyse des réseaux mobiles 3G et 4G : Performances des réseaux 4G LTE. 128 pages. Electronique : Université Mohammed Seddik BEN YAHIA , Jijel : 2021.

[3] https://actualiteinformatique.fr/internet-of-things-iot/definition-de-la-5g

[4] SADOU Bachir et ALQUDAMI Dheya Alhaq. Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobile 5G et 6G de nouvelle génération : Objectif de la 5G. 94 pages. Electronique : Université Mohamed Seddik BEN YAHIA, Jijel : 2019-2020.

[5] La 5G, https://radio-waves.orange.com/fr/reseaux-et-antennes/5g/

[6] BARIR Abdessettar et GHERBI Laid et ZAIR Souheil Mohammed Ismail. Analyse des Performances d'un Système d'Accès Multiple Non Orthogonale (NOMA) : Les principales technologies de la 5G. 61 pages. Electrique : Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued : 2020-2021.

[7] Safi Khan.‟ The Backbone of 5G Networks: A Guide to Small Cell Technology‟. Telit, 12 mars 2020, https://www.telit.com/blog/5g-networksguide-to-small-cell-technology/

[8] BARIR Abdessettar et GHERBI Laid et ZAIR Souheil Mohammed Ismail. Analyse des Performances d'un Système d'Accès Multiple Non Orthogonale (NOMA) : Beamforming . 61 pages. Electrique : Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued : 2020-2021.

[9] Sue Marek, Why.‟ full duplex technology is suddenly hot in 5G‟. lightreading. 17/11/2020. https://www.lightreading.com/opticalip/why-full-duplex-technology-is-suddenly-hot-in-5g/d/d-id/765522

[10] Amy Nordrum, Kristen Clark, et IEEE Spectrum.' Staff,5g bytes full duplex explained‟, 01 Apr 2017-19:21 GMT. https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/5g-bytes-full-duplex-explained

[11] HACHEMI Yasser Aboubaker. Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G : Nouvelles bandes de fréquences. 87 pages. Télécommunication : Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen : 19/09/2020.

[12] DACI Kaoutar et DOU Warda. Etude de massive MIMO pour 5G : Intoduction. 55 pages. Télécommunication : Université Echahid Hamma Lakhdar , El-Oued : 2019.

[13] ZARA Messaouda et AFER Doha. Caractérisation et modélisation d'un canal radio en bande millimétrique dans un milieu industriel : Ondes millimétriques. 82 pages. Electronique : Université Mohammed Seddik Ben Yahia-Jijel : 06/2020.

[14] HACHEMI Yasser Aboubaker. Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G : Potentiel technique. 87 pages. Télécommunication : Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen : 19/09/2020.

[15] HACHEMI Yasser Aboubaker. Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G : Problème de l'estimation des canaux d'ondes millimétriques. 87 pages. Télécommunication : Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen : 19/09/2020.

[16] HACHEMI Yasser Aboubaker. Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G : Système MIMO. 87 pages. Télécommunication : Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen : 19/09/2020.

[17] HACHEMI Yasser Aboubaker. Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G : Canal de propagation d'un système MIMO. 87 pages. Télécommunication : Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen : 19/09/2020.

[18] DACI Kaoutar et DOU Warda. Etude de massive MIMO pour 5G : Massive MIMO. 55 pages. Télécommunication : Université Echahid Hamma Lakhdar , El-Oued : 2019.

[19] DACI Kaoutar et DOU Warda. Etude de massive MIMO pour 5G : Avantages des systèmes Massive MIMO. 55 pages. Télécommunication : Université Echahid Hamma Lakhdar , El-Oued : 2019

[20] HACHEMI Yasser Aboubaker. Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G : Massif MIMO pour les ondes millimétriques. 87 pages. Télécommunication : Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen : 19/09/2020.

[21] HACHEMI Yasser Aboubaker. Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G : Beamforming. 87 pages. Télécommunication : Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen : 19/09/2020.

[22] REZGA Safa et YAHIA Hana. Ètude et simulation du système MIMO à Formation de faisceaux : Précodage et Formation des faisceau. 71pages. Electronique : Université Echahid Hamma Lakdhar-EL OUED : 2019/2020.

[23] REZGA Safa et YAHIA Hana. Ètude et simulation du système MIMO à Formation de faisceaux : Formation de faisceaux analogiques, numériques. 71pages. Electronique : Université Echahid Hamma Lakdhar-EL OUED : 2019/2020.

[24] https://stringfixer.com/fr/MATLAB

[25] mailto:https://www.mathworks.com/company/newsroom/mathworks-introduces-release-2021b-of-matlab-and-simulink.html#:~:text=Release%202021b%20(R2021b)%20offers%20hundreds,commands%20and%20scripts%20from%20MATLAB.