

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunication

Spécialité : Réseaux et Télécommunication

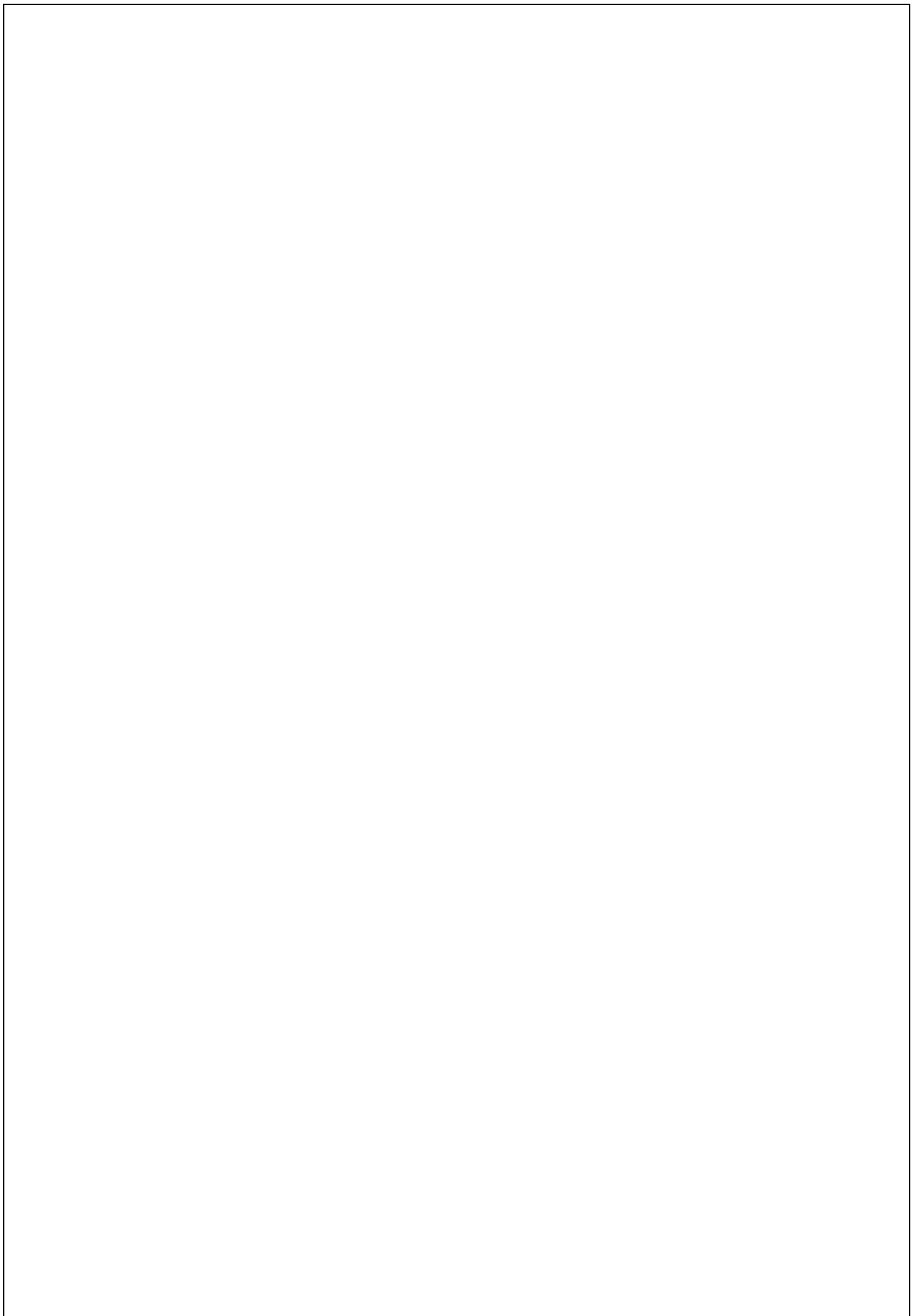
Par : Yasser Aboubaker HACHEMI

Sujet

**Etude et simulation d'un système
Beamforming hybride à ondes
millimétriques pour les réseaux 5G**

Soutenu en visioconférence, le 19/ 09 / 2020 devant le jury composé de :

Président :	T.F. BENDIMERED	Professeur	Univ. Tlemcen
Examineur :	S.M. MERIAH	Professeur	Univ. Tlemcen
Examineur :	F.DERRAZ	M.C.A	Univ. Tlemcen
Encadreur :	M.BOUSSAHLA	M.C.A	Univ. Tlemcen
Co-Encadreur :	I. DAYOUB	Professeur	Univ. Valenciennes



Dedicaces

JE dédie ce travail :

- À mon père, grâce à qui je n'ai jamais manqué de rien ;
- À ma mère qui a décimé sa santé et sa vie pour mon succès ;
- À mon frère et mes Sœurs ;
- Aux martyrs de la lutte de libération nationale qui par leur sacrifice ont permis à nos générations d'accéder à la liberté et à la science.

HACHEMI Yasser Aboubaker
Tlemcen, le 16 septembre 2019

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Tout d'abord, Je remercie ALLAH Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience.

En premier lieu,Je voudrais remercier mes parents pour m'avoir encouragé, pour m'avoir donné l'opportunité à chaque étape de ma vie.

Je tien à exprimer ma gratitude á monsieur, le Docteur M.BOUSAHLA , Maitre de Conférence à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen pour ces efforts et son soutien , afin de me guider sur la meilleure voie, vers la réussite.

Je désire remercier le professeur Iyad Dayoub, Co-encadreur de ce mémoire, pour sa patience, sa présence constante, et ces encouragements.

Nous sommes particulièrement sensibles à l'honneur que nous a fait T.BENDIMERED, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, de présider notre jury de soutenance.

Je tien également à adresser mes remerciements au Professeur S.MERIAH, Directeur du laboratoire de recherche TELECOM pour ces idées et au Docteur F.DERRAZ pour ses remarques constructives.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

HACHEMI Yasser Aboubaker
Tlemcen, le 16 septembre 2020

ÉTUDE ET SIMULATION D'UN SYSTÈME BEAMFORMING HYBRIDE À ONDES MILLIMÉTRIQUES POUR LES RÉSEAUX 5G

Résumé

Les systèmes de communication à ondes millimétriques sont devenus l'un des sujets de recherche courants en raison de leurs rôles importants dans la nouvelle génération de réseau la 5G, elles offrent un large spectre de fréquences qui peut répondre à la demande croissante sur les nouvelles bandes dans le secteur des télécommunications, cependant leur utilisation pose de nombreux défis notamment, la complexité du système et le coût élevé. Les grands réseaux d'antennes MIMO ainsi que des techniques de Beamforming sont nécessaires pour lutter contre la perte de trajectoire importante. L'objectif principal de ce projet est l'étude et la simulation d'une architecture à complexité réduite en utilisant le logiciel de simulation MATLAB-Simulink .

Mots clés

Communication sans fil, 5G , MIMO massif, Formation de faisceaux, ondes millimétriques, Hybride, Architecture à complexité réduite

STUDY AND SIMULATION OF A MILLIMETER WAVE HYBRID BEAMFORMING SYSTEM FOR 5G NETWORKS

Abstract

Millimeter wave communication systems have become one of the current research topics due to their important roles in the new generation of 5G network, they offer a wide spectrum of frequencies which can spread with increasing demand on new bands in the telecommunications sector, however, their use poses many challenges, in particular, the complexity of the system and the high cost, large MIMO antenna arrays as well as Beamforming techniques are necessary to combat the loss of important trajectory. The main objective of this project is the study and simulation of a reduced complexity architecture using the MATLAB-Simulink simulation software.

Keywords

Wireless communication, 5G, Massive MIMO, Beamforming, Millimeter waves, Hybrid, Reduced complexity architecture

دراسة ومحاكاة نظام تشكيل حزم الموجات الهجينة المليمترية لشبكات الجيل الخامس

ملخص

أصبحت أنظمة اتصالات الموجات المليمترية أحد موضوعات البحث الحالية نظرًا لأدوارها المهمة في الجيل الجديد من شبكة (5G) فهي توفر مجموعة واسعة من الترددات التي يمكن أن تنتشر مع زيادة الطلب على النطاقات الجديدة في قطاع الاتصالات، ومع ذلك، فإن استخدامها يطرح العديد من التحديات، على وجه الخصوص، تعقيد النظام والتكلفة العالية، تعد مصفوفات هوائيات (MIMO) الكبيرة بالإضافة إلى تقنيات تشكيل الحزمة ضرورية لمكافحة فقدان المسار المهم. الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو دراسة ومحاكاة بنية منخفضة التعقيد باستخدام برنامج محاكاة (MATLAB-Simulink).

الكلمات المفتاحية

اتصالات لاسلكية، الجيل الخامس، MIMO massif، تشكيل الشعاع، بنية منخفضة التعقيد

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
GLOSSAIRE	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE LA 5ÈME GÉNÉRATION	3
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 LES RÉSEAUX DE LA 5ÈME GÉNÉRATION	4
1.3 PRINCIPE	4
1.4 TECHNOLOGIES UTILISER PAR LA 5G	4
1.5 ARCHITECTURE D'UN RÉSEAU 5G	5
1.5.1 Architecture Cloud-Native	5
1.5.1.1 Attributs d'une architecture réseau Cloud-Native E2E	6
1.5.1.2 Reconstruire le RAN avec le Cloud (CloudRAN)	6
1.5.2 NFV et la 5G	7
1.5.3 Architecture 5G axée sur les services	7
1.6 NOUVELLES BANDES DE FRÉQUENCES	8
1.7 MEC (MULTI-ACCESS EDGE COMPUTING)	9
1.8 DÉCOUPAGE DU RÉSEAU (NETWORK SLICING)	9
1.9 OPTIONS D'ARCHITECTURE 5G	9
1.9.1 Mode Non Stand-Alone	9
1.9.2 Mode Stand-Alone	10
1.10 DSS	10
1.11 AMÉLIORATIONS APPORTÉ PAR LA 5G	10
1.12 SERVICES ET PERFORMANCES VISÉES PAR LA 5G	10
1.13 ASPECTS RÉGLEMENTAIRES DE LA 5G	12
1.14 DIFFÉRENCES AVEC L'ARCHITECTURE 4G	12
1.15 SÉCURITÉ DANS LA 5G	12
1.16 CONCLUSION	13
2 ONDES MILLIMÉTRIQUES (MMWAVES)	14
2.1 INTRODUCTION	15
2.2 DÉFINITION D'UNE ONDE MILLIMÉTRIQUE	15
2.3 RAISON D'UTILISATION DES MMWAVES	15

2.4	CARACTÉRISTIQUES DE COMMUNICATION AVEC ONDES MILLIMÉTRIQUES . . .	17
2.4.1	Caractéristiques de propagation	17
2.4.1.1	Incapacité à pénétrer	18
2.4.1.2	Absorption par leau et loxygène	18
2.4.2	Potentiel technique	19
2.4.3	Technologies clés pour les communications mmWaves	19
2.5	DIFFÉRENCE ENTRE LA BANDE MMWAVES ET LA SUB-6 GHz	19
2.6	SMALL CELLS	20
2.7	AVANTAGES DE L'UTILISATION DES MM WAVES POUR LA 5G	20
2.8	NOUVELLES APPLICATIONS DE MMWAVE	21
2.9	PROBLÈME DE L'ESTIMATION DES CANAUX D'ONDES MILLIMÉTRIQUES . . .	21
2.10	CONCLUSION	22
3	ARCHITECTURE DES TRANCEIVERS À ONDE MILLIMÉTRIQUE	23
3.1	INTRODUCTION	24
3.2	CHAÎNE DE TRANSMISSION	24
3.3	ANTENNES ET PROPAGATION	25
3.3.1	Réseaux d'antennes	25
3.3.2	Antennes intelligentes	25
3.3.3	Antennes adaptatives	26
3.4	DIFFÉRENTS SCHÉMAS DE TRANSMISSIONS	26
3.4.1	Système SISO	26
3.4.2	Système MISO	27
3.4.3	Système SIMO	28
3.4.4	Système MIMO	29
3.5	CANAL DE PROPAGATION D'UN SYSTÈME MIMO	30
3.5.1	Diversité du canal	30
3.5.1.1	Diversité temporelle	30
3.5.1.2	Diversité spatial	30
3.5.1.3	Diversité de fréquence	30
3.5.1.4	Diversité de polarisation	31
3.5.1.5	Diversité spatio-temporelle	31
3.5.2	Multiplexage spatial (MS)	31
3.5.2.1	OL-MIMO	31
3.5.2.2	CL-MIMO	31
3.5.3	Efficacité spectrale	31
3.5.3.1	Importance de l'efficacité spectrale	32
3.6	PRESENTATION DE LA TECHNIQUE MIMO MASSIF	32
3.6.1	Principe de fonctionnement	32
3.6.2	Antennes MIMO massif	33
3.6.3	Massif MIMO pour les ondes millimétriques	34
3.6.4	Avantages d'utilisation du massive MIMO	34
3.7	BEAMFORMING	34
3.7.1	Principe de fonctionnement	34
3.7.2	Différents types de Beamforming	35

3.7.3	Beamforming :la clé des communication mmWaves	35
3.7.4	Précodage	35
3.8	DIFFÉRENTES ARCHITECTURES DES SYSTÈMES MIMO-BEAMFORMING À ONDES MILLIMÉTRIQUES	35
3.8.1	Architecture analogique (Fully-analog)	36
3.8.1.1	Déphaseurs (Phase shifters)	36
3.8.1.2	Beamforming analogique	36
3.8.1.3	Limitation du Beamforming analogique	37
3.8.2	Architecture hybride analogique-numérique (Hybrid digital-analog)	37
3.9	ARCHITECTURE À COMPLEXITÉ RÉDUITE POUR LES COMMUNICATIONS MMWAVE	38
3.9.1	Architecture à Réseau de lentilles (Lens Array)	39
3.9.2	Architecture CAN à quelques bits (Few-Bit ADCs)	40
3.9.3	Précodage et combinaison hybride	40
3.9.3.1	Précodage hybride multi-utilisateur	41
3.9.4	Estimation de canal pour les systèmes mmWaves	42
3.9.5	Algorithmes d'apprentissage	42
3.10	CONCLUSION	43
4	SIMULATIONS & INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS	44
4.1	INTRODUCTION	45
4.2	LANGAGE UTILISÉ	45
4.3	MATLAB-SIMULINK	45
4.4	CHOIX DE LA PLATEFORME DE SIMULATION	45
4.5	PLATEFORME DE SIMULATION	46
4.6	PARAMÈTRES DE SIMULATION	47
4.7	ALGORITHMES DE POURSUITE DE CORRESPONDANCE QSHB ET HBPS	48
4.8	PARAMÈTRES DE SIMULATION	50
4.9	SIMULATION DES PERFORMANCES D'UN TRANSCIVER HYBRIDE	51
4.9.1	Résultats obtenus avec les différentes configurations	52
4.9.1.1	Simulation avec NTRF=8 et NRRF=8	53
4.9.1.2	Simulation avec NTRF=4 et NRRF=4	54
4.9.1.3	Simulation avec NTRF=4 et NRRF=2	55
4.9.2	Simulation multi-flux	56
4.9.3	Comparaison entre les algorithmes QSHB et HBPS	57
4.9.4	Effet du multi-flux sur l'efficacité	59
4.9.4.1	Efficacité spectrale avec NTRF=8 et NRRF=8	60
4.9.4.2	Efficacité spectrale avec NTRF=4 et NRRF=4	60
4.9.4.3	Efficacité spectrale avec NTRF=4 et NRRF=2	61
4.10	OPTIMISATION DE LA PLATEFORME	62
4.10.1	Fonction coût	63
4.10.2	Performances de l'architecture optimisée	64
4.11	PROBLÈMES RENCONTRÉS	65
4.12	TRAVAUX ULTÉRIEURS	66
4.13	CONCLUSION	67

CONCLUSION GÉNÉRALE

68

BIBLIOGRAPHIE

72

TABLE DES FIGURES

1.1	Architecture commune du réseau à travers différentes technologies et couches [2]	7
1.2	Les trois groupes de fréquences utilisés par la 5G [2]	8
1.3	Les trois catégories de services du réseau mobile 5G [2]	11
2.1	Plage de fonctionnement typique des communications mobiles existantes, par rapport au spectre des ondes millimétriques[11]	16
2.2	Croissance du trafic mobile mondial par type d'appareil [14].	17
2.3	Absorption atmosphérique des ondes millimétriques en dB / km [26]	19
2.4	les différents types de stations de base [1]	20
2.5	La bande passante disponible dans le spectre des ondes millimétriques inférieur à 90 GHz[15]	20
3.1	Une chaîne de transmission sans fil[24]	25
3.2	Différentes géométries de réseaux d'antennes	26
3.3	Illustration d'un système SISO	27
3.4	Illustration d'un système MISO	28
3.5	Illustration d'un système SIMO	28
3.6	Illustration d'un système MIMO	29
3.7	Une antenne 64 émetteurs/récepteurs massive MIMO de Nokia	33
3.8	Illustrations d'une antenne 64 émetteurs/récepteurs constituée de 192 éléments rayonnants regroupés par groupe de 3	33
3.9	Système MmWave MIMO utilisant uniquement le Beamforming analogique[18]	36
3.10	Système MmWave MIMO utilisant uniquement le Beamforming hybride analogique-numérique [18]	37
3.11	Traitement analogique, Chaque chaîne RF est connectée à toutes les antennes[18]	38
3.12	Traitement analogique pour l'hybride Beamforming basé sur des déphaseurs : Chaque chaîne RF est connectée à un sous-ensemble d'antennes[18].	39
3.13	Traitement analogique pour le Beamforming hybride basée sur des commutateurs : (a) chaque chaîne RF peut être connectée à toutes les antennes ; (b) chaque chaîne RF peut être connectée à un sous-ensemble d'antennes[18]	40
3.14	Architecture à Réseau de lentilles [17]	40
3.15	Architecture CAN à quelques bits [17].	41
3.16	Modèle de système pour la conception de précodage hybride multi-utilisateur[18].	42
4.1	Bloc de l'émetteur MIMO	46
4.2	Bloc du canal MIMO	47

4.3	Bloc du récepteur MIMO	48
4.4	Bloc du calculateur de poids hybride	49
4.5	Bloc du calculateur de TEB	50
4.6	Paramètre du choix de l'algorithme	51
4.7	TEB en en fonction du SNR pour un système 64x16 MIMO avec NTRF=8 et NRRF=8, en utilisant les algorithmes QSHB et HBPS	53
4.8	TEB en en fonction du SNR pour un système 64x16 MIMO avec NTRF=4 et NRRF=4, en utilisant les algorithmes QSHB et HBPS	54
4.9	TEB en en fonction du SNR pour un système 64x16 MIMO avec NTRF=4 et NRRF=2, en utilisant les algorithmes QSHB et HBPS	55
4.10	Le diagramme constellation du premier flux Ns1 avec : 64x16 MIMO , NTRF=4 et NRRF=4, en utilisant l'algorithme QSHB et la modulation QAM16	56
4.11	Le diagramme constellation du deuxième flux Ns2 avec : 64x16 MIMO , NTRF=4 et NRRF=4, en utilisant l'algorithme QSHB et la modulation QAM16	57
4.12	Le diagramme constellation du premier flux Ns1 avec : 64x16 MIMO , NTRF=4 et NRRF=4, en utilisant l'algorithme HBPS et la modulation QAM16	58
4.13	Le diagramme constellation du deuxième flux Ns2 avec : 64x16 MIMO , NTRF=4 et NRRF=4, en utilisant l'algorithme HBPS et la modulation QAM16	59
4.14	L'efficacité spectrale en fonction du SNR avec NTRF=8 et NRRF=8	60
4.15	L'efficacité spectrale en fonction du SNR avec NTRF=4 et NRRF=4	61
4.16	L'efficacité spectrale en fonction du SNR avec NTRF=4 et NRRF=2	62
4.17	le taux d'erreurs binaires en fonction du nombre des chaines RF	63
4.18	le TEB en fonction du SNR d'un système 64x16 MIMO avec une configuration NTRF =3, NRRF=2	64

Glossaire

Acronyme	Signification
1G	Première Gèneation
1D	Une Dimension
2D	Deux Dimension
2G	Deuxième Génération
3G	Troisième Génération
3GPP	3rd Génération Partnership Project
4G	Quatrième Génération
5G	Cinquième Génération
AAU	Active Antenna Unit
AC	Access Center
ADC	Analog to Digital Converter
AMF	Access and Mobility management Function
AP	Access Point
AWGN	Add White Gaussian Noise
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
BER	Bit Error Ratio
BBU	Base Band Unit
CL	Close Loop
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DSS	Dynamic Spectrum Switching
DC	Data Center

eMBB	enhanced Mobile Broad Band
EPC	Evolved Packet Core
GW	Gateway
GSM	Global System for Mobile Communications
HBPS	Hybrid Beamforming with Peak Search
IA	Intelligence Artificielle
IMT	International Mobile Télécommunications
LTE	Long Term Evolution
mMTC	massifs Machine Type Communications
MEC	Multi-Access Edge Computing
MCE	Mobile Cloud Engine
MS	Multiplexage Spatial
NGC	New Generation Core
NS	Network Slicing
NFV	Network Functions Virtualization
OL	Open Loop
QoS	Quality of Service
QSHB	Quantized Sparse Hybrid Beamforming
RF	Radio Fréquence
RRU	Remote Radio Unit
RAN	Radio Access Network
SNR	Signal to Noise Ratio
SDN	Software Dynamics Networks
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UHF	Ultra High Frequencies
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication
UDN	Ultra Denses Network

Introduction générale

Il existait un temps, il y a quelques décennies de cela, où les téléphones, les ordinateurs, et la connexion internet devaient nécessairement être câblés et utilisés uniquement à des endroits prédéfinis. Les technologies de communication sans fil ont fondamentalement changé la façon dans nous communiquons. Ces technologies proposent des services qui sont devenus aujourd'hui accessibles partout sur terre grâce au déploiement de réseau étendu cellulaire, comme par exemple, les normes GSM, UMTS et LTE, de réseaux locaux basés sur différentes versions de la norme Wi-Fi IEEE 802.11 et les services par satellite. Les services de télécommunications sont devenus donc une partie essentielle de notre société. Ils sont aussi vitaux que l'électricité, cette intégration en masse ouvre grandement le portail des innovations et de l'adoption de nouvelles technologies dans notre vie quotidienne, une vie où on assiste à la révolution des médias en continu, où la musique et la vidéo sont livrées à la demande. Avec la nouvelle génération des réseaux sans fil, les premiers pas vers une société entièrement en réseau sont déjà installés, avec des réalités augmentées, des maisons et des voitures connectées et des communications de machine à machine ont également été franchis. Avec cette cadence, dans 20 ans, nous trouverons des nouveaux services sans fil que nous ne pouvons pas prédire aujourd'hui.

Le développement de la cinquième génération (5G) est né dans le but de répondre aux besoins de ces nouvelles applications en matière de débit, de latence, de capacité de données et de nature des services. Pour répondre à cette panoplie d'exigence, les réseaux de nouvelle génération doivent franchir multiples obstacles. Parmi eux, l'utilisation de nouvelles bandes de fréquences disponibles dans le spectre d'ondes millimétriques (mmWaves).

L'utilisation des ondes millimétriques n'est pas facile à cause de leurs caractéristiques de propagation et de leurs incapacités à pénétrer. En outre les systèmes à ondes millimétriques sont très compliqués à mettre en place et cette complexité revient au fait d'utiliser une combinaison de techniques comme le multi entrée multi sortie MIMO et les techniques de formation de faisceau (Beamforming) pour diriger les faisceaux dans des directions précises et surmonté les défis de propagation.

Plusieurs solutions ont été proposées pour remédier à la complexité des systèmes à ondes millimétriques. Parmi ces solutions l'utilisation d'architecture hybride pour le guidage des faisceaux qui combine les bienfaits du Beamforming analogique, qui se base sur

les réseaux de déphaseurs pour former les faisceaux, et du Beamforming numérique, qui est beaucoup plus complexe et gourmand en énergie.

L'objectif de notre travail est l'étude et l'analyse des architectures MIMO-Beamforming pour des systèmes mmWaves pour la 5G, notamment, l'architecture hybride Beamforming.

Le premier chapitre donne un aspect général sur la nouvelle génération de réseaux mobile, avec une présentation de la 5G, en commençant par une explication de son principe de fonctionnement ensuite la description de son architecture réseau, les améliorations apportées, les services et performances visées et finalement l'aspect de la sécurité dans un tel réseau.

Le deuxième chapitre présente les problèmes liés à la propagation des ondes millimétriques. Il décrit les mmWaves, ainsi que les avantages de leurs utilisations et enfin il va aborder le problème de l'estimation des canaux d'ondes millimétriques.

Le troisième chapitre présente la technologie MIMO et MIMO massif. Une partie de ce chapitre est consacrée aux calculs des capacités des différentes configurations SISO, SIMO, MISO et MIMO. Ensuite, les caractéristiques d'un canal MIMO sont présentées avec notamment une description sur les différentes diversités.

Ce chapitre couvre aussi les différents aspects des architectures MIMO-Beamforming et particulièrement l'architecture hybride. En fin de ce chapitre, une partie est dédiée aux architectures à complexité réduite et leurs différentes caractéristiques.

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. Cette étude des performances est réalisée en analysant le taux d'erreur binaire BER en fonction du rapport signal sur bruit SNR. Après ça, une comparaison entre les algorithmes et une présentation l'efficacité des différentes configurations hybrides ont été faites.

En fin du chapitre, un travail d'optimisation et d'automatisation de la plateforme de simulation est présenté.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux de la 5ème génération

SOMMAIRE

1.1	INTRODUCTION	4
1.2	LES RÉSEAUX DE LA 5ÈME GÉNÉRATION	4
1.3	PRINCIPE	4
1.4	TECHNOLOGIES UTILISER PAR LA 5G	4
1.5	ARCHITECTURE D'UN RÉSEAU 5G	5
1.5.1	Architecture Cloud-Native	5
1.5.2	NFV et la 5G	7
1.5.3	Architecture 5G axée sur les services	7
1.6	NOUVELLES BANDES DE FRÉQUENCES	8
1.7	MEC (MULTI-ACCESS EDGE COMPUTING)	9
1.8	DÉCOUPAGE DU RÉSEAU (NETWORK SLICING)	9
1.9	OPTIONS D'ARCHITECTURE 5G	9
1.9.1	Mode Non Stand-Alone	9
1.9.2	Mode Stand-Alone	10
1.10	DSS	10
1.11	AMÉLIORATIONS APPORTÉ PAR LA 5G	10
1.12	SERVICES ET PERFORMANCES VISÉES PAR LA 5G	10
1.13	ASPECTS RÉGLEMENTAIRES DE LA 5G	12
1.14	DIFFÉRENCES AVEC L'ARCHITECTURE 4G	12
1.15	SÉCURITÉ DANS LA 5G	12
1.16	CONCLUSION	13

1.1 Introduction

Depuis l'apparition des communications mobile le progrès dans ce secteur n'a pas cessé d'évoluer, de nos jours les sociétés de plus en plus connectées exigent le haut débit et la performance notamment les nouvelles techniques émergentes (IOT, Smart City, voitures autonomes) qui imposent un large éventail de défis aux nouveaux systèmes de communication mobile 5G cela nécessite un changement majeur pour répondre à la demande d'un temps de latence.

Beaucoup d'efforts et de nombreuses idées révolutionnaires ont été proposé et explorer dans le monde entier pour contribuer à cette avancée technologique parmi eux l'utilisation d'un spectre d'ondes millimétriques, la virtualisation des fonctions de réseau, l'utilisation du MIMO massif, le cloud computing, la connectivité appareil à appareil avec une mobilité élevée, ces derniers ont apporté la renaissance aux réseaux de communication son fils [2].

Ce chapitre va présenter une introduction à la 5G en commençant par une explication de son principe de fonctionnement, son architecture réseau, les améliorations apportées, les services et performances visées et finalement nous terminons l'aspect de la sécurité dans les réseaux 5G.

1.2 Les réseaux de la 5^{ème} génération

1.3 Principe

La nouvelle génération des standards de la téléphonie mobile 5G est différente des générations précédentes car l'infrastructure physique est séparée de l'infrastructure logique, un réseau défini par logiciel « SDN » (Software Dynamics Networks) est mis en place et il est supprimé, agrandi ou réduit selon la demande. Ce réseau permet de gérer logiquement certaines fonctions comme le « Network Slicing » qui sépare le réseau virtuellement en fonction des besoins et en temps réel.

Toute la complexité de gestion est effectuée par apprentissage automatique (*Machine Learning*) et au moyen de l'intelligence artificielle (AI), tout cela indique qu'il s'agit d'une innovation révolutionnaire dans les réseaux mobiles.

1.4 Technologies utiliser par la 5G

La 5G a révolutionné le monde des télécommunications en introduisant des nouvelles technologies clés [16].

- **L'utilisation d'une nouvelle génération d'antennes intelligentes** : dans les générations précédentes, 1G à 4G, le signal émis se propage dans tous les sens à 360 degré, par contre la 5G utilise la technique MIMO combiner avec la technique de la

configuration du faisceau (beam shaping), tout cela permet de concentrer intelligemment les rayons radio vers des emplacements spécifiques et déterminés.

- **L'utilisation de l'Intelligence Artificielle** : Il est nécessaire de faire appel à l'intelligence artificielle pour gérer l'architecture complexe de la 5G, les humains sont incapables de gérer des flux de décisions simultanées nécessaires pour maintenir la surveillance des performances du réseau, assurer les fonctions de sécurité et répondre de manière appropriée aux pannes ou autres incidents sur le réseau.
- **L'utilisation de plus hautes fréquences** : C'est un des éléments les plus caractéristiques de la 5G les UHF (*extremely high frequencies*) ou mmWaves, ce terme sera défini et discuté dans la suite de ce chapitre.
- **La réutilisation du spectre électromagnétique** : Les distances qui séparent les antennes et les utilisateurs sont considérablement réduites car l'utilisation des hautes fréquences réduit la distance de propagation, cela permet une meilleure réutilisation des fréquences.
- **Le déploiement d'un réseau virtuel de type SDNs** : C'est un ensemble de technologies qui permet un contrôle centralisé des ressources réseau et virtualisation des ressources physiques et tout cela vise une plus grande agilité dans le déploiement et le fonctionnement des infrastructures réseau en s'inspirant des technologies du Cloud Computing.

1.5 Architecture d'un réseau 5G

La nouvelle architecture doit prendre en considération la quantité massive de nouvelles bandes passantes mises à disposition mais aussi la croissance importante attendue du nombre d'appareils connectés et une large gamme d'applications à prendre en charge avec des différentes caractéristiques de qualité de service (QoS) pour chaque utilisation, donc elle est conçue d'une manière inédite et ingénieuse.

1.5.1 Architecture Cloud-Native

La 5G œuvre pour une transformation numérique dans le but de créer un monde numérique meilleur et fournir aux entreprises et aux particuliers une expérience numérique tant attendue, cela nécessite une architecture coordonnée de bout en bout (E2E) avec un fonctionnement automatique, agile et intelligent à chaque phase, donc l'adaptation complète au cloud des réseaux, des systèmes d'exploitation et des services est une condition préalable à cette transformation numérique.

Pour simplifier l'explication, l'architecture Cloud-Native est d'une architecture réseau basée sur un centre de données (DC) dans lequel toutes les fonctions et applications de service

s'exécutent sur le cloud DC.

La stratégie « All Cloud » est essentielle pour permettre des exigences de service diversifiées car, elle permet une exploration éclairée des ressources matérielles, de l'architecture logicielle distribuée et du déploiement automatique.

1.5.1.1 Attributs d'une architecture réseau Cloud-Native E2E

Les attributs d'une architecture réseau Cloud-Native E2E sont [2] :

- Fournis un découpage du réseau logiquement indépendant sur une infrastructure de réseau unique pour répondre à des exigences de service diversifiées et fournit une architecture cloud basée sur DC pour prendre en charge divers scénarios d'application.
- Utilise CloudRAN pour reconstruire les réseaux d'accès radio (RAN) pour fournir des connexions massives de plusieurs normes et mettre en œuvre le déploiement à la demande des fonctions RAN requis par la 5G.
- Simplifie l'architecture du réseau central pour implémenter la configuration à la demande des fonctions réseau.
- Implémente la génération, la maintenance et la terminaison automatiques de services de découpage de réseau pour divers services afin de réduire les dépenses d'exploitation grâce à un fonctionnement et une maintenance agile du réseau.

1.5.1.2 Reconstruire le RAN avec le Cloud (CloudRAN)

l'architecture CloudRAN est utilisée du côté RAN pour implémenter les fonctions RAN temps réel, le déploiement à la demande de ressources non temps réel, les fonctions basées sur les composants, la coordination flexible et le découpage RAN.

Avec le Mobile Cloud Engine (MCE), CloudRAN peut mettre en œuvre une orchestration flexible pour les fonctions RAN en temps réel et non temps réel en fonction des différentes exigences de service et de la configuration des ressources de transmission pour effectuer la cloudification du RAN comme illustré dans la figure (1.1).

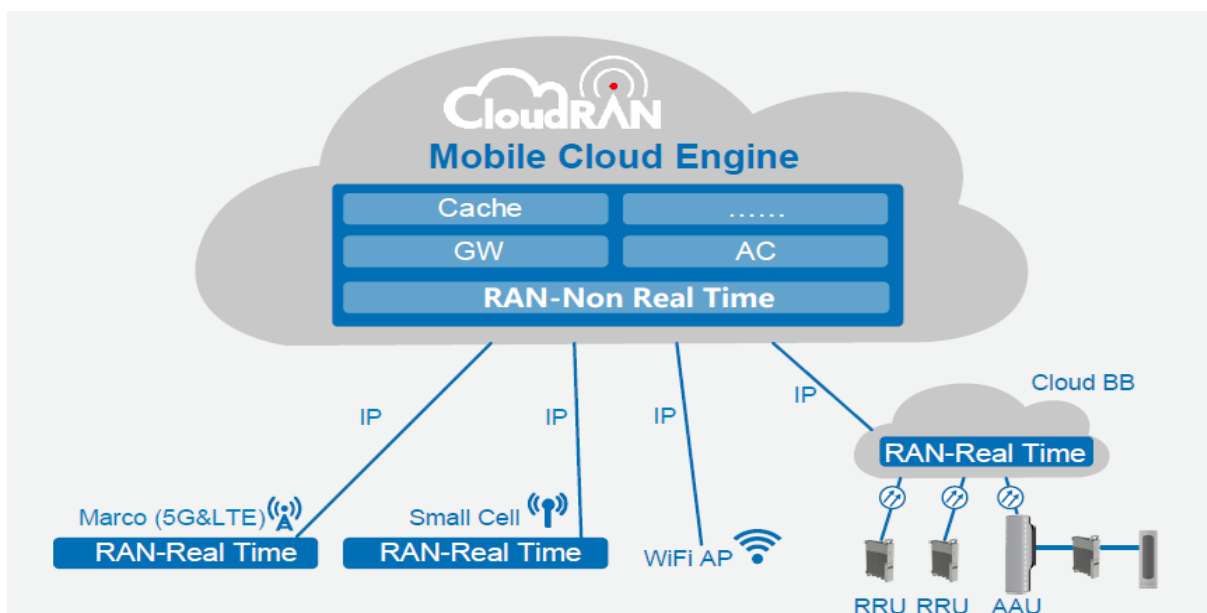


FIGURE 1.1 – Architecture commune du réseau à travers différentes technologies et couches [2]

1.5.2 NFV et la 5G

La virtualisation des fonctions réseau (NFV) dissocie le logiciel du matériel, elle remplace diverses fonctions réseau tels que les pare-feux et les routeurs par des instances virtualisées exécutées en tant que logiciel et cela élimine le besoin d'investir dans de nombreux éléments matériels coûteux et peut également accélérer les temps d'installation, fournissant ainsi des services plus rapidement.

La NFV ouvre le chemin vers des nouvelles techniques comme le découpage de réseau qui permet à plusieurs réseaux virtuels de fonctionner simultanément, elle peut aussi relever d'autres défis de la 5G grâce à des ressources informatiques, de stockage et de réseau virtualisées, personnalisées en fonction des applications et des segments de clientèle.

1.5.3 Architecture 5G axée sur les services

L'architecture de réseau 5G axée sur les services vise à répondre de manière flexible et efficace aux exigences de services mobiles diversifiées ; avec le réseautage défini par logiciel (SDN) et la NFV prenant en charge l'infrastructure physique sous-jacente, la 5G cloudifie complètement l'accès, le transport et les réseaux centraux.

L'adoption du cloud permet une meilleure prise en charge des services 5G diversifiés.

1.6 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.



FIGURE 1.2 – Les trois groupes de fréquences utilisés par la 5G [2]

1.7 MEC (Multi-Access Edge Computing)

Le MCE est un des éléments le plus important de l'architecture 5G, c'est une évolution du cloud computing qui crée essentiellement un raccourci dans la livraison de contenu entre l'utilisateur et l'hôte en rapprochant les applications des centres de données centralisées à la périphérie du réseau, et donc plus proche des utilisateurs finaux et de leurs appareils.

Cette technologie fait certainement partie intégrante de l'efficacité de la 5G.

1.8 Découpage du réseau (Network Slicing)

Le découpage du réseau est une base pour prendre en charge des services 5G diversifiés, il est essentiel à l'évolution de l'architecture de réseau 5G, il est l'ingrédient clé permettant de réaliser le plein potentiel de la 5G et il ajoute une dimension supplémentaire au NFV en permettant à plusieurs réseaux logiques de s'exécuter simultanément sur une infrastructure de réseau physique partagée, tout cela devient partie intégrante de l'architecture 5G en créant des réseaux virtuels de bout en bout qui incluent à la fois des fonctions de mise en réseau et de stockage.

Le découpage du réseau est extrêmement utile pour des applications comme l'IoT où le nombre d'utilisateurs peut être extrêmement élevé, mais la demande globale de bande passante est faible et chaque utilisateur a ses propres exigences, donc le découpage du réseau devient une considération de conception importante pour le réseau 5G.

1.9 Options d'architecture 5G

L'emblématique du changement entre la 4G et la 5G sera la transition progressive du mode non autonome (non stand-alone) aux options d'architecture 5G en mode autonome (stand-alone).

1.9.1 Mode Non Stand-Alone

La norme non autonome 5G a été finalisée fin 2017 et elle utilise le LTE RAN et les réseaux centraux existants comme point d'ancrage, avec l'ajout d'un support de composants 5G, malgré la dépendance aux architectures des réseaux existants, le mode non autonome augmentera la bande passante en exploitant des fréquences d'ondes millimétriques.

Ce mode cède progressivement la place aux nouveaux déploiements d'architecture de réseau mobile 5G.

1.9.2 Mode Stand-Alone

Le mode autonome 5G est essentiellement un déploiement 5G à partir de zéro avec la nouvelle architecture de base et le déploiement complet de tout le matériel et des fonctionnalités 5G.

1.10 DSS

Le DSS (*dynamic spectrum switching*) permet de basculer rapidement entre la 4G et la 5G directement depuis l'antenne pour chaque bande de fréquence et cela permet d'ajuster le réseau en temps réel selon la demande et basculer petit à petit de la 4G LTE vers la 5G.

1.11 Améliorations apporté par la 5G

La soif de nos sociétés de plus en plus connectées et gourmandes en matière de performance oblige la 5G à répondre à un large éventail de défi, et pour cela elle doit fournir des améliorations telles que [16], [25] :

- Augmentation considérable de densité de connexion : cela permet l'activation de la connectivité de l'internet des objets (*Internet of Things-IoT*) avec peu de complexité.
- Débit très élevé : plus uniformes et multi-Gbps jusqu'à 10 Gbps.
- 100 fois plus d'efficacité de réseau : réseaux énergétiquement efficaces avec traitement du signal et matériel efficaces.
- Temps de latence réduit : les niveaux de latence doivent être aussi bas que 1 ms.
- Augmentation dans l'efficacité spectrale : une utilisation efficace de la bande passante.
- 100 fois plus de capacité de trafic : réseaux très densifiés avec plus de points d'accès partout.

1.12 Services et performances visées par la 5G

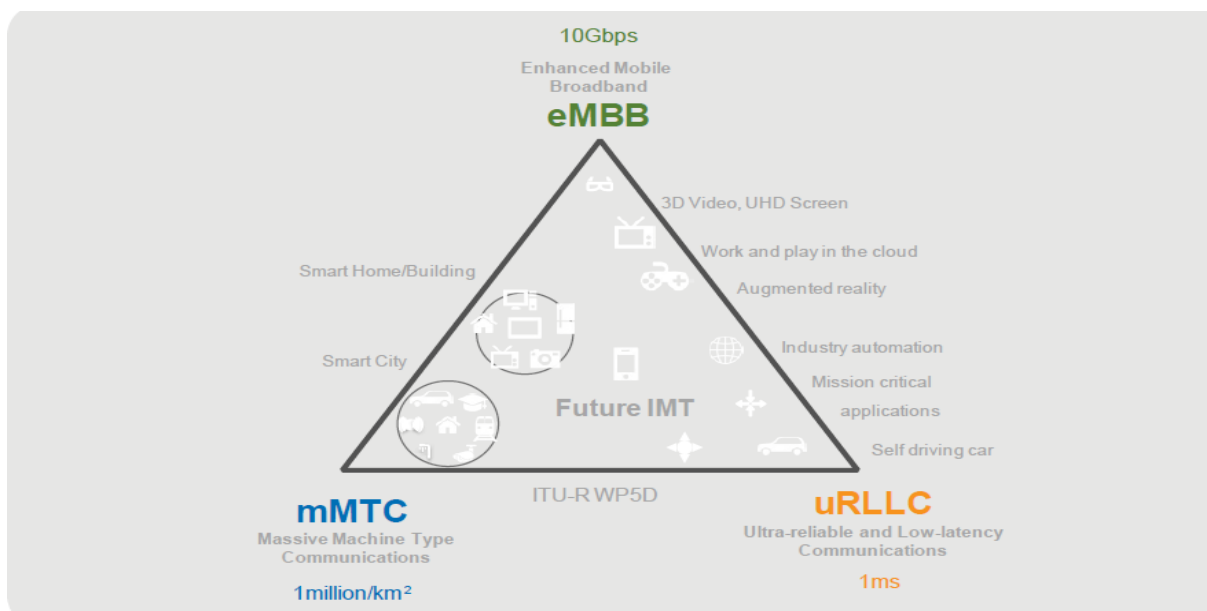


FIGURE 1.3 – Les trois catégories de services du réseau mobile 5G [2]

Le développement des objectifs de performance de haut niveau pour la 5G a eu lieu dans le cadre d'International Mobile Télécommunications (IMT)-2020 à l'initiative de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) pour définir les bases de 5G, comme le montre la figure (1.3) trois cas d'utilisation majeures sont associées à ces exigences : la communications ultra-fiables et à faible latence (Ultra-reliable low latency communication (URLLC)), le Haut débit mobile amélioré (enhanced Mobile Broadband (eMBB)), Communications massives de type machine (massifs Machine Type Communications (mMTC)) :

– **Haut débit mobile amélioré eMBB :**

Vise à répondre à la demande de la population pour un mode de vie numérique, et se concentre sur les services qui ont des besoins élevés en bande passante, tels que les vidéos haute définition (HD), la réalité virtuelle (VR) et la réalité augmentée (RA).

– **Communications massives de type machine mMTC :**

Vise à répondre à la demande d'une société numérique plus développée et se concentre sur les services qui incluent des exigences élevées en matière de densité de connexion, comme la ville intelligente et l'agriculture intelligente.

– **Communications ultra-fiables et à faible latence URLLC :**

Il se concentre sur les services qui exigent la fiabilité et un temps de latence très réduit comme les voitures autonomes, la chirurgie médicale à distance, la fabrication industrielle contrôlée à distance.

1.13 Aspects réglementaires de la 5G

Il est clair que cette nouvelle architecture soulèvera des questions de nature réglementaire. La nature émergente de la 5G et les caractéristiques originales de ces hautes fréquences oblige à une réflexion approfondie sur le fonctionnement et la gestion des réseaux mobiles à venir.

1.14 Différences avec l'architecture 4G

Les changements au niveau central (Core Level) font partie des changements architecturaux qui accompagnent le passage de la 4G à la 5G, notamment la migration vers les ondes millimétriques, le MIMO massif et le découpage du réseau et essentiellement tous les autres éléments discrets de l'écosystème 5G diversifié. Le 4G Evolved Packet Core (EPC) est très différent du noyau 5G car, le noyau 5G est basé sur la virtualisation et la conception logicielle cloud-native à des niveaux sans précédent.

Parmi les autres changements qui différencient le noyau 5G de son prédécesseur 4G il y a la fonction de plan utilisateur UPF (user plane function) pour découpler le contrôle de la passerelle de paquets et les fonctions du plan utilisateur, et aussi la fonction de gestion des accès et de la mobilité AMF (access and mobility management function) pour séparer les fonctions de gestion de session des tâches de gestion de connexion et de mobilité.

Les changements apportés par la 5G sont très prometteurs en matière de débit qui est multiplié par 1000 par rapport à celui de la 4G tout en réduisons le temps de latence.

1.15 Sécurité dans la 5G

Les changements et les avantages en matière de performances et utilisation intensive des ressources basées sur le cloud et aussi la virtualisation s'accompagnent de nouveaux risques de sécurité et d'attaque de surfaces supplémentaires.

La 5G s'appuie sur les pratiques de sécurité des générations passées de technologie mobile, mais le modèle de confiance est devenu beaucoup plus vaste avec davantage d'acteurs impliqués dans le processus de prestation de services.

Parmi les fonctionnalités de sécurité 5G détaillées par les normes 3GPP figurent l'authentification unifiée pour découpler l'authentification des points d'accès, des protocoles d'authentification extensibles pour permettre des transactions sécurisées, des politiques de sécurité flexibles pour traiter plus de cas d'utilisation et des identifiants permanents d'abonné pour garantir la confidentialité sur le réseau.

À mesure que le déploiement de la 5G se poursuit et que les nœuds de performance critiques sont de plus en plus virtualisés, les opérateurs devront surveiller et évaluer en permanence

les performances de sécurité.

1.16 Conclusion

Sans aucun doute, la nouvelle génération 5G offrira l'amélioration exponentielle de la vitesse à laquelle les utilisateurs se sont habitués à chaque nouvelle génération de réseaux mobiles, mais la vitesse n'est que le début, tous les changements attendus dans les industries allant du transport personnel à la fabrication et à l'agriculture seront si importants que beaucoup ont surnommé la 5G la prochaine révolution industrielle.

Chapitre 2

Ondes millimétriques (mmWaves)

SOMMAIRE

2.1	INTRODUCTION	15
2.2	DÉFINITION D'UNE ONDE MILLIMÉTRIQUE	15
2.3	RAISON D'UTILISATION DES MMWAVES	15
2.4	CARACTÉRISTIQUES DE COMMUNICATION AVEC ONDES MILLIMÉTRIQUES	17
2.4.1	Caractéristiques de propagation	17
2.4.2	Potentiel technique	19
2.4.3	Technologies clés pour les communications mmWaves	19
2.5	DIFFÉRENCE ENTRE LA BANDE MMWAVES ET LA SUB-6 GHz	19
2.6	SMALL CELLS	20
2.7	AVANTAGES DE L'UTILISATION DES MM WAVES POUR LA 5G	20
2.8	NOUVELLES APPLICATIONS DE MMWAVE	21
2.9	PROBLÈME DE L'ESTIMATION DES CANAUX D'ONDES MILLIMÉTRIQUES	21
2.10	CONCLUSION	22

2.1 Introduction

Les communications à ondes millimétriques (mmWave) sont une technologie clé pour la 5G, elles permettent de répondre aux exigences de la nouvelle génération grâce à ses potentiels techniques qui peuvent être complémentaires d'autres technologies, tels que les réseaux ultra-denses (UDN) et les entrées multiples et sorties multiples massives (massives MIMO).

Néanmoins, il existe des défis techniques qui sont principalement liés aux caractéristiques spécifiques de la propagation mmWave qui doivent être relevées, ces points seront discutés dans ce chapitre après une brève définition des mmWaves. Par la suite, nous fournirons quelques avantages d'utilisation des mmWaves et enfin nous allons aborder le problème de l'estimation des canaux d'ondes millimétriques.

Nous avons remarqué ces dernières années l'intérêt grandissant pour les ondes millimétriques mais il faut savoir que l'étude des mmWaves est en fait aussi ancienne que la transmission sans fil elle-même, certaines de ces premières expériences comme celle de Bose et Lebedev [13] ont été réalisées dans les années 1890 dans la bande mmWaves.

Certains points relatifs à l'architecture des transceivers seront discutés en détail dans le chapitre suivant.

2.2 Définition d'une onde millimétrique

Pour comprendre la signification du mot ondes millimétriques il faut revenir à la définition d'une onde électromagnétique, si on parle souvent de la fréquence (en hertz) il ne faut pas oublier que les ondes sont avant tout définies par leur longueur qui représente la distance parcourue par l'onde pendant une période d'oscillation lorsqu'elle se propage dans un espace donné, plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est courte, donc les ondes millimétriques sont tout simplement des ondes ayant une longueur d'onde λ de l'ordre du millimètre, elle est plus petite que les longueurs d'onde en mètres ou kilomètres utilisés pour les ondes radio.

La 5G utilise qu'une petite partie de cette large gamme de fréquences située entre 30 et 300 GHz.

2.3 Raison d'utilisation des mmWaves

De nos jours les ressources spectrales inférieur à 6 GHz (micro Waves) sont très prises par les technologies de télécommunication actuel (4G, 3G.) comme le montre la figure(2.1). C'est parmi les raisons principales qui pousse la nouvelle génération vers la recherche de nouvelles perspectives notamment l'utilisation des ondes millimétriques.

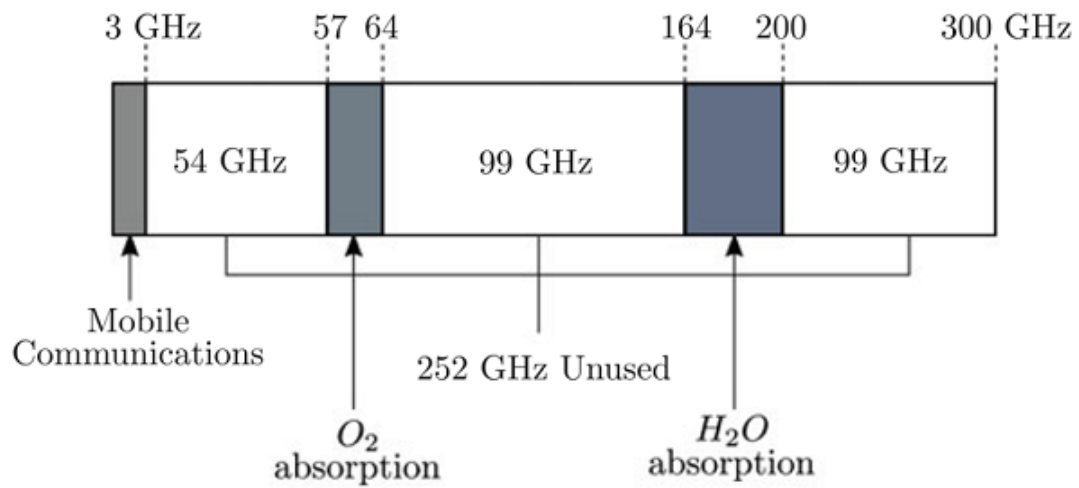


FIGURE 2.1 – Plage de fonctionnement typique des communications mobiles existantes, par rapport au spectre des ondes millimétriques[11]

Les bandes de fréquences mmWave offrent un énorme spectre qui peut répondre à l'augmentation du trafic mondial.

Pour comprendre l'ampleur de cette croissance, la figure(2.2) montre une projection récente de la croissance mondiale du trafic mobile ["<Cisco visual networking index : Global mobile data traffic forecast update, 20162021 white paper,"> Cisco Public Information, 2017].

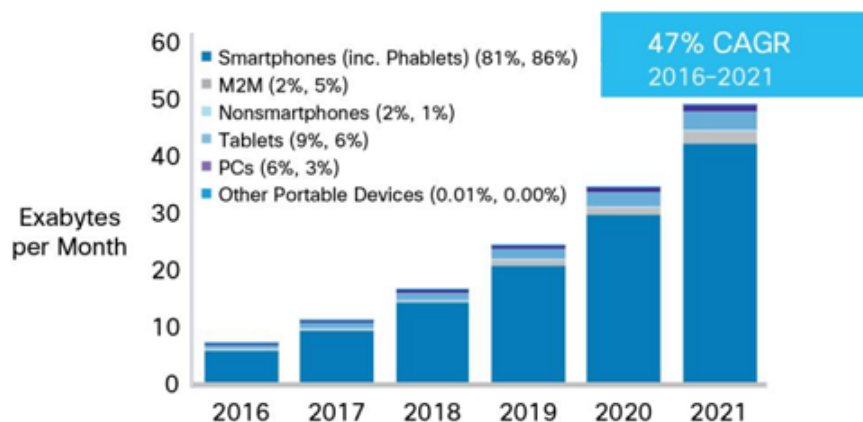


FIGURE 2.2 – Croissance du trafic mobile mondial par type d'appareil [14].

Selon les prévisions de Cisco Systems, Inc., le trafic mondial de données mobiles devrait connaître un taux de croissance annuel de 57% entre 2016 et 2021, entraînant une augmentation de près de huit fois et atteignant près de 50 exaoctets par mois d'ici 2021. Comme le montre également la figure(2.2) , les smartphones devraient représenter plus de 80% du trafic sans fil d'ici 2021, une technologie qui vient tout juste d'apparaître au cours de la dernière décennie [19].

En raison de la pression toujours croissante sur l'infrastructure de réseau mobile, les systèmes de communication de nouvelle génération auront besoin d'une augmentation significative du débit pour répondre à ces prévisions, en plus de se préparer à une croissance explosive supplémentaire qui pourrait résulter d'un certain nombre d'applications imprévues à forte intensité de données, ou dispositifs [8], [23].

2.4 Caractéristiques de communication avec ondes millimétriques

L'utilisation des ondes millimétriques pose plusieurs défis techniques complexe à cause de leur longueur d'onde courte.

2.4.1 Caractéristiques de propagation

Si l'infrastructure physique de la 3G/4G est réutilisée telle quelle pour la 5G rien ne fonctionnerait parce que ces ondes se comportent différemment, cela impose l'élaboration d'une architecture apte à supporter leur utilisation et qui prend en considération les vulnérabilités.

TABLE 2.1 – Atténuations pour différents matériaux et fréquences [7],[3].

/	/	Atténuation (dB)		
		< 3 GHz	40 GHz	60 GHz
Mâtereaux	Epaisseur(cm)			
Cloison	2.5	5.4	-	6.0
Tableau blanc	19	0.5	-	9.6
Verre transparent	0.3/0.4	6.4	2.5	3.6
Verre à mailles	0.3	7.7	-	10.2
Bois de sciage	1.6	-	0.6	-
Bois	0.7	5.4	3.5	-
Placoplâtre	1.5	-	2.9	-
Mortier	10	-	160	-
Mur de briques	10	-	178	-
Béton	10	17.7	175	-

rabilités suivantes :

2.4.1.1 Incapacité à pénétrer

L'un des problèmes les plus difficiles concernant l'utilisation des mmWave est les fortes pertes de pénétration à travers de nombreux matériaux courants, ces ondes ne sont pas en mesure de traverser les murs des bâtiments ou une végétation dense comme une forêt et même une simple rangée d'arbres, cela veut dire que la distance minimale à prévoir entre l'antenne émettrice et le récepteur doit être considérablement réduite.

Comme le montre le tableau(2.1), de nombreux matériaux de construction comme la brique et le béton atténuent les signaux de manière si significative qu'il y a peu de chances d'établir une communication cohérente, c'est pour cette raison qu'il est peu probable que les stations de base extérieures mmWave fournissent une couverture à l'intérieur des bâtiments de la même manière que les réseaux mobiles GSM/2G/3G/4G.

Donc pour compléter un tel réseau cellulaire, la couverture intérieure peut être fournie par des femtocellules ou des solutions Wi-Fi.

2.4.1.2 Absorption par leau et loxygène

Outre que la pénétration, les ondes millimétriques sont vulnérables, elles sont absorbées par l'humidité de l'air et par l'oxygène, et donc l'absorption atmosphérique est un autre facteur contribuant aux pertes de propagation.

Comme le montre la figure(2.3), les mmWaves subissent une atténuation accrue en raison de l'absorption d'oxygène à 60 GHz et de la vapeur d'eau à 24 GHz [20].

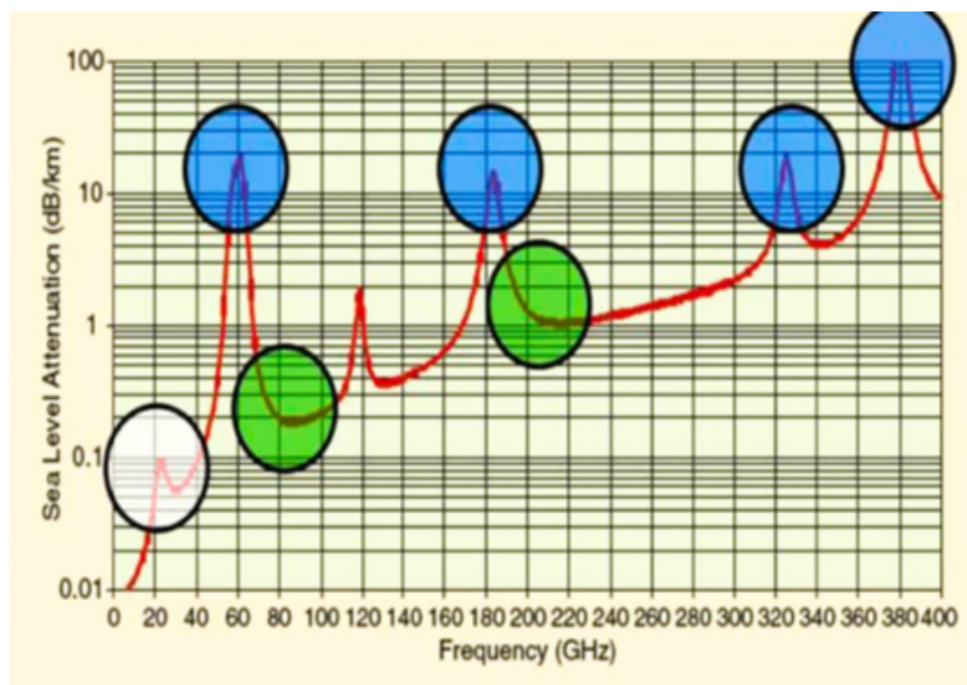


FIGURE 2.3 – Absorption atmosphérique des ondes millimétriques en dB / km [26]

2.4.2 Potentiel technique

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 [17].

2.4.3 Technologies clés pour les communications mmWaves

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 :

- 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.

2.5 Différence entre la bande mmWaves et la Sub-6 GHz

Les raisons principales pour lesquelles les fréquences d'ondes millimétriques sont différentes par rapport aux fréquences inférieures sont :

- Il y a de nouvelles contraintes sur le matériel en partie en raison des canaux de communication à haute fréquence et à bande passante.
- Les modèles de canaux sont différents.
- De grands réseaux d'antennes seront utilisés à la fois au niveau de l'émetteur et des récepteurs.

2.6 Small Cells

Les Small Cells, petites cellules en français, sont des points d'accès à un réseau qui consomment peu d'énergie et leur portée est inférieure à 1 km. Leur utilisation est très avantageuse pour les mmWaves et cela est dû à leur faible portée de propagation. Les small

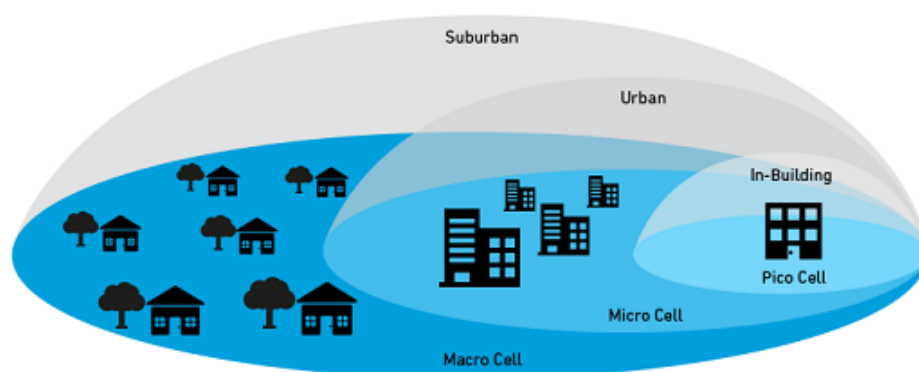


FIGURE 2.4 – les différents types de stations de base [1]

cell incluent les femtocellules, les picocellules, et les les microcellules qui sont classées en fonction de leur taille, comme le montre la figure(2.4).

2.7 Avantages de l'utilisation des mm Waves pour la 5G

Les avantages de l'utilisation des ondes millimétriques pour la 5G sont :

- Une large bande passante, par exemple, la figure(2.5) montre la bande passante disponible dans le spectre des ondes millimétriques inférieur à 90.

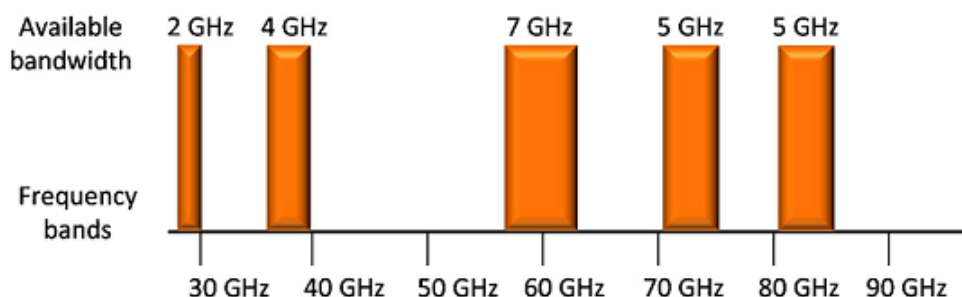


FIGURE 2.5 – La bande passante disponible dans le spectre des ondes millimétriques inférieur à 90 GHz[15]

- Antenne de petite taille permettant l'intégration de centaines d'antennes miniatures dans un espace très réduit d'où le principe des cellules miniatures (small cells).
- Augmentation du potentiel de réutilisation des fréquences grâce à la largeur de faisceau réduite.

2.8 Nouvelles applications de mmWave

Il est clair que l'avenir est radieux pour les nouvelles applications de mmWave car, elles ont beaucoup d'applications potentielles, elles présentent un intérêt pour les réseaux portables à haut débit qui connectent un téléphone portable, une montre intelligente, des lunettes de réalité augmentée et des casques de réalité virtuelle mais aussi des secteurs beaucoup plus sensibles.

Prenant exemple avec l'engouement récent lié aux véhicules connectés et autonomes, les mmWave peuvent jouer un rôle dans la fourniture de connexions à haut débit entre les voitures, cela est naturel car les mmWave sont déjà l'épine dorsale du radar automobile, qui a été largement déployé et développé au cours des dix dernières années, notamment, la combinaison de la communication mmWave et du radar est également intéressant pour les applications de ce type d'ondes.

Un autre exemple des applications dans le secteur automobile, les mmWave pourrait être utilisé pour permettre des connexions à haut débit à faible latence vers les clouds qui permettent la conduite à distance de véhicules via de nouvelles applications de véhicules à infrastructure mmWave.

2.9 Problème de l'estimation des canaux d'ondes millimétriques

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 signal sur bruit (SNR) reçu très faible, ce qui conduit finalement à une estimation de canal moins précise [20].

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 [4].

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 [20]

2.10 Conclusion

Les ondes millimétriques reviennent sur le devant de la scène pour leurs avantages en proposant une large bande passante, pratique pour multiplier les débits, nous avons parlé dans ce chapitre de leur l'aspect général et leurs comportements.

Les mmWaves sont à la fois un outil très efficace qui comble la pénurie dans la bande passante globale, et une clé essentielle au développement de la 5ème génération de réseaux mobile qui élargit énormément la portée des services.

Chapitre 3

Architecture des trancivers à onde millimétrique

SOMMAIRE

3.1	INTRODUCTION	24
3.2	CHAÎNE DE TRANSMISSION	24
3.3	ANTENNES ET PROPAGATION	25
3.3.1	Réseaux d'antennes	25
3.3.2	Antennes intelligentes	25
3.3.3	Antennes adaptatives	26
3.4	DIFFÉRENTS SCHÉMAS DE TRANSMISSIONS	26
3.4.1	Système SISO	26
3.4.2	Système MISO	27
3.4.3	Système SIMO	28
3.4.4	Système MIMO	29
3.5	CANAL DE PROPAGATION D'UN SYSTÈME MIMO	30
3.5.1	Diversité du canal	30
3.5.2	Multiplexage spatial (MS)	31
3.5.3	Efficacité spectrale	31
3.6	PRESENTATION DE LA TECHNIQUE MIMO MASSIF	32
3.6.1	Principe de fonctionnement	32
3.6.2	Antennes MIMO massif	33
3.6.3	Massif MIMO pour les ondes millimétriques	34
3.6.4	Avantages d'utilisation du massive MIMO	34
3.7	BEAMFORMING	34
3.7.1	Principe de fonctionnement	34
3.7.2	Différents types de Beamforming	35
3.7.3	Beamforming :la clé des communication mmWaves	35
3.7.4	Précodage	35
3.8	DIFFÉRENTES ARCHITECTURES DES SYSTÈMES MIMO-BEAMFORMING À ONDES MILLIMÉTRIQUES	35
3.8.1	Architecture analogique (Fully-analog)	36
3.8.2	Architecture hybride analogique-numérique (Hybrid digital-analog)	37
3.9	ARCHITECTURE À COMPLEXITÉ RÉDUITE POUR LES COMMUNICATIONS MMWAVE	38
3.9.1	Architecture à Réseau de lentilles (Lens Array)	39
3.9.2	Architecture CAN à quelques bits (Few-Bit ADCs)	40
3.9.3	Précodage et combinaison hybride	40
3.9.4	Estimation de canal pour les systèmes mmWaves	42
3.9.5	Algorithmes d'apprentissage	42
3.10	CONCLUSION	43

3.1 Introduction

Alors que la nouvelle génération des réseaux mobile 5G tire parti de la grande quantité de spectre disponible dans les bandes mmWave, les systèmes de communication à onde millimétrique sont confrontés à de nombreux défis, notamment, le choix adéquat d'architecture des émetteurs-récepteurs pour atteindre les hautes performances et efficacité exigée. Pour surmonter les défis relatifs à l'utilisation des ondes millimétriques, la 5G repose principalement sur les systèmes massifs MIMO-Beamforming. Principalement, le MIMO massif qui se base sur l'utilisation de plusieurs antennes soit à l'émission où à la réception est associé au Beamforming qui focalise la puissance émise vers le récepteur concerné, une fois ces deux techniques réunis, le transceiver devient plus robuste en améliorant la qualité de transmission.

Dans ce chapitre nous allons présenter les technique MIMO et MIMO massif, ces défèrent caractéristiques et avantages d'utilisation, ensuite nous allons parler du Beamforming et ces déférents aspects et enfin, nous allons voir les différentes architectures des systèmes MIMO-Beamforming à ondes millimétriques et les choix d'architecture à complexité réduite.

3.2 Chaîne 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 schéma de principe d'une chaîne de transmission est représenté sur la figure(3.1). 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.

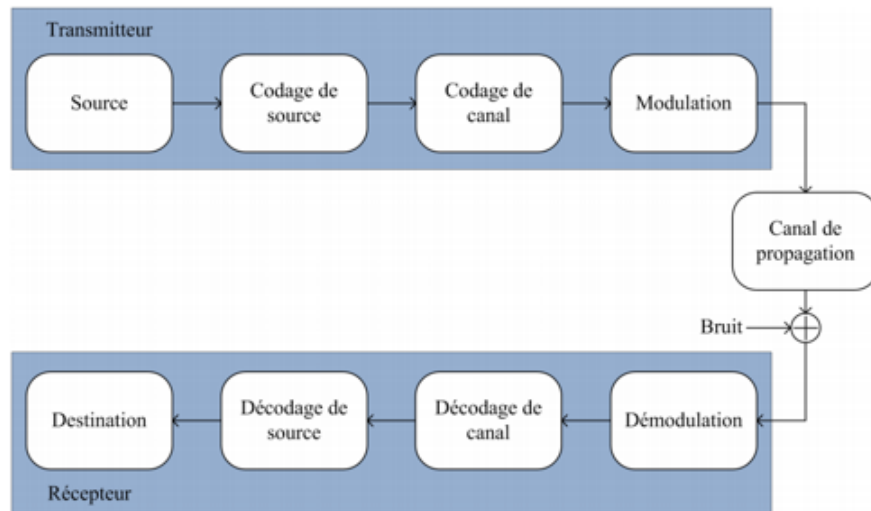


FIGURE 3.1 – Une chaîne de transmission sans fil[24]

3.3 Antennes 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 rencontrés 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.

3.3.1 Réseaux d’antennes

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(3.2) représente les différentes structures géométriques d’un réseau d’antennes. D’où :

- (1) Réseau linéaire uniforme.
- (2) Réseau circulaire.
- (3) Réseau planaires.

3.3.2 Antennes intelligentes

Les antennes intelligentes (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 lobe 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

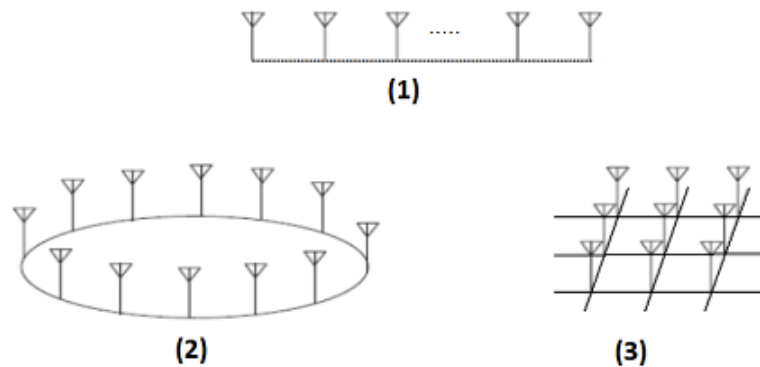


FIGURE 3.2 – Différentes géométries de réseaux d’antennes

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’envoi du signal se fait d’une manière très large.

3.3.3 Antennes adaptatives

Dans un réseau d’antennes adaptatives chaque élément d’antenne a son propre coefficient de pondération qui se met à jour d’une 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 adaptatives à focaliser l’énergie et de poursuivre l’utilisateur.

3.4 Différents schémas de transmissions

Les systèmes de communication sont conçus avec une architecture permettant d’atteindre les meilleures performances possibles, il existe différents schémas ou configurations possibles selon le nombre d’antennes à l’émission et celui à la réception (SISO, MISO, SIMO, et MIMO).

Cependant les techniques de traitement de signal, de codage spatio-temporel et de multiplexage spatial diffèrent d’une architecture à une autre. Pour un système utilisant N_t antennes à l’émission et N_r antenne en réception, les différentes configurations sont :

3.4.1 Système SISO

Le SISO (Single Input Single Output) est le système le plus simple (voir fig. (3.3)), il ressemble à un canal radio standard qui fonctionne avec une antenne du côté de l’émetteur et du récepteur ($N_t=N_r=1$) et il n’y a aucun traitement en fonction de diversité, et sa

capacité du canal est donnée par :

$$C_{SISO} = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{WN_0} \right) \quad (3.1)$$

Où :

P : la puissance du signal utile en Watt.

N_0 : la densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz.

W : la bande passante donnée en Hz.

La capacité normalisée par la bande utile W, on obtient :

$$C_{SISO} = \log_2 (1 + \rho) \quad (3.2)$$

Avec ρ est le rapport signal sur bruit (P/N_0).

La capacité du canal sera moindre par rapport aux autres mais le modèle de conception est simple [27].



FIGURE 3.3 – Illustration d'un système SISO

3.4.2 Système MISO

Le système MISO (multiples input single output) utilise plusieurs antennes à l'émission ($N_t \geq 2$) d'où le terme diversité d'émission (voir fig. (3.4)), les données sont donc transmises en redondance à partir des antennes émettrices.

Du côté récepteur, les données seront récupérées par un traitement du signal optimal c'est-à-dire la somme des signaux reçus des différents trajets.

La capacité d'un canal MISO est donnée par :

$$C_{MISO} = N_t W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.3)$$

N_t : le nombre d'antenne émettrices.

Avec S/N est le rapport signal sur bruit.

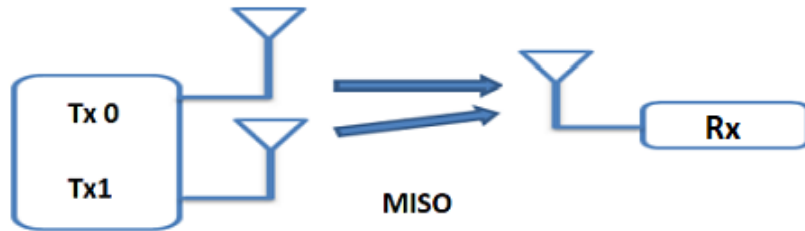


FIGURE 3.4 – Illustration d'un système MISO

3.4.3 Système SIMO

Le système SIMO (Single Input Multiple Output) utilise à l'émission une seule antenne par contre à la réception ($N_r \geq 2$) (voir fig. (3.5)).

La capacité du canal SIMO est donnée par :

$$C_{SIMO} = N_r W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.4)$$

N_r : le nombre d'antenne réceptrice.

Avec S/N est le rapport signal sur bruit.



FIGURE 3.5 – Illustration d'un système SIMO

3.4.4 Système MIMO

La technologie MIMO (Multiple input Multiple output) utilise N_t antennes de transmission et N_r antennes de réception (voir fig. (3.6)).

Ce système améliore le débit ainsi que la capacité des canaux.

Le canal MIMO est traduit par une matrice H de taille $N_r \times N_t$ dite matrice de canal H .

$$(3.5) \quad H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \cdots & h_{N_R N_T} \end{pmatrix}$$

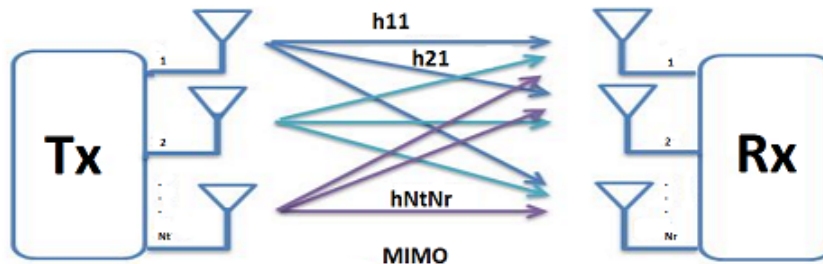


FIGURE 3.6 – Illustration d'un système MIMO

Un signal MIMO est défini par :

$$Y = HX + \eta \quad (3.6)$$

Où :

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

$$C_{MIMO} = N_r N_t W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.7)$$

N_r : le nombre d'antenne réceptrice.

N_t : le nombre d'antenne émettrices.

Avec S/N est le rapport signal sur bruit.

3.5 Canal de propagation d'un système MIMO

3.5.1 Diversité du canal

Lorsqu'on se sert de la nature dispersive du canal pour envoyer plusieurs répliques d'un signal, alors on parle d'exploitation de la diversité du canal. Cette exploitation est nécessaire en présence de multi-trajets car, l'évanouissement à petite échelle causé par ces derniers dégrade la performance des systèmes de transmission. En effet, la qualité du lien radio s'améliore car, plus il y a de répliques reçues moins il y a de chances que toutes aient subi une forte atténuation.

À la réception les signaux sont combinés d'une certaine manière afin de réduire l'évanouissement.

Cette technique utilise les ressources temporelles, spectrale et spatiale d'un canal, des ressources aussi rares que précieuses mais ça en vaut la peine car, les techniques de diversité se révèlent comme un outil très important pour combattre les évanouissements.

Il existe quatre types de diversités exploitées en transmissions numériques : la diversité temporelle, la diversité de fréquence, la diversité spatiale et la diversité de polarisation. Ils seront décrits dans ce qui suit.

3.5.1.1 Diversité temporelle

L'exploitation de la diversité temporelle consiste à répartir les données utiles dans le temps en envoyons le même signal à des instants différents.

La répétition se fait à intervalles plus grand que le temps de cohérence T_{coh} du canal (durée minimale qui sépare deux évanouissements selon un certain degré de décorrélation).

3.5.1.2 Diversité spatiale

La diversité spatiale peut être exploitée lorsqu'un signal est émis de plusieurs points distincts de l'espace dans ce cas, le récepteur traite les versions indépendantes du signal, obtenues à partir de capteurs disposés judicieusement.

Il est possible d'utiliser des antennes multiples à l'émission ou à la réception ou les deux à la fois. Les systèmes SIMO exploitent la diversité spatiale en réception. Les systèmes MISO exploitent la diversité spatiale en émission. Les systèmes MIMO exploitent la diversité spatiale à la fois à l'émission et la réception, ils nous permettent non seulement de réduire l'effet de fading mais atteindre aussi les bornes de capacité largement supérieures à celles données par d'autres structures mais à condition que l'émetteur et le récepteur soient dans un milieu riche en diffuseurs.

3.5.1.3 Diversité de fréquence

La retransmission du signal se fait sur plusieurs fréquences porteuses. L'écart fréquentiel est supérieur à la bande de cohérence du canal B_{coh} (l'espace fréquentiel minimal entre deux fréquences affectées d'évanouissements indépendants). On a le même désavantage de

la diversité de fréquence que celui de la diversité temporelle. On perd l'efficacité spectrale qui est liée au débit de transmission [24].

3.5.1.4 Diversité de polarisation

La diversité de polarisation consiste à introduire une paire d'antennes verticale et horizontale au récepteur pour capter le signal radio-électrique qui contient les deux composantes de polarisation. L'avantage se trouve dans le fait qu'il n'est pas nécessaire d'espacer les deux antennes pour avoir deux canaux à évanouissement indépendant[24].

3.5.1.5 Diversité spatio-temporelle

Cette technique est un exemple de combinaison de deux techniques de diversité. L'idée consiste à envoyer des versions de signal différées dans le temps via plusieurs antennes transmetteurs.

3.5.2 Multiplexage spatial (MS)

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 :

3.5.2.1 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.

3.5.2.2 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 .

3.5.3 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.

L'efficacité spectrale est donnée par :

$$\eta = \frac{D}{B} \quad (3.8)$$

En "bit par seconde et par hertz". $[\eta] = \text{bit/s/Hz}$

Où :

D : le débit binaire (en bit/s) .

B : est la largeur de la bande occupée par le signal modulé (en Hz).

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

$$\eta = (1/T.B) * \log_2(M) \quad (3.9)$$

Avec :

M :la valence.

$$n = \log_2(M) \quad (3.10)$$

n : le nombre de bits/symbole à transmettre.

3.5.3.1 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.

3.6 Présentation de la technique MIMO massif

L'utilisation du MIMO massif (massive MIMO) est lune des nouveautés parmi les multiples moyens et les technologies utilisés par la 5G.

3.6.1 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 3.7 – Une antenne 64 émetteurs/récepteurs massive MIMO de Nokia

3.6.2 Antennes 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.

Une antenne MIMO massif, par exemple, peut être constituée de 192 éléments rayonnants (voir figure (3.8)) organisés sur 12 lignes, 8 colonnes et 2 polarisations croisées pour former 64 émetteurs/récepteurs en regroupant verticalement par trois les éléments rayonnants.

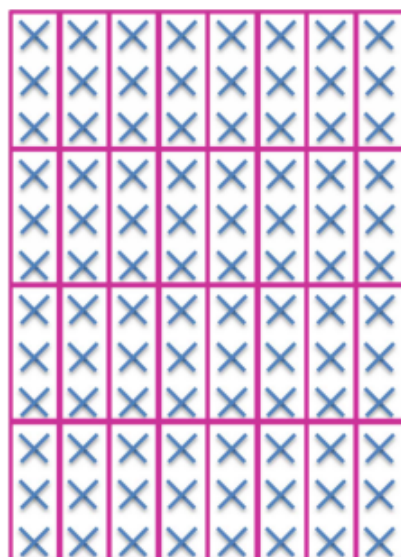


FIGURE 3.8 – Illustrations d'une antenne 64 émetteurs/récepteurs constituée de 192 éléments rayonnants regroupés par groupe de 3

3.6.3 Massif MIMO pour les ondes millimétriques

Les systèmes à ondes millimétriques offrent 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 [17], 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 [26]. 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 [10].

3.6.4 Avantages d'utilisation du massive MIMO

Le MIMO massif permet de mieux couvrir les zones surchargées comme les centres commerciaux, les gares, les stades ou les aéroports, il permet aussi de réduire la latence, d'améliorer la qualité du SNR (rapport signal sur bruit), d'améliorer la fiabilité et d'augmenter le débit de transmission. En intégrant le Beamforming il permet de réduire la pollution électromagnétique environnante en ciblant le récepteur.

3.7 Beamforming

En français appelé 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 .

3.7.1 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.

3.7.2 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 sélectionnés pour la liaison.
- Adaptive Beamforming : ce type est capable automatiquement d'adapter la puissance du signal rayonner d'une antenne à différentes situations et scénarios de communications.

3.7.3 Beamforming :la clé des communication mmWaves

L'utilisation du Beamforming permet de surmonter les défis causés par le comportement des ondes millimétriques en augmentant le gain de liaison, le gain de directivité et en réduisant les interférences. Cependant, afin de réaliser ces gains importants qui sont offerts par la technique de Beamforming, des informations précises du canal doivent être obtenues, pour cela, il existe plusieurs techniques d'estimation de canal.

3.7.4 Précodage

Le principe du précodage est basé sur l'utilisation d'une forme de connaissance du canal à l'émission afin de personnaliser les signaux transmis à la structure propre de la matrice canal H . il permet d'améliorer le taux de transmission, de diminué la probabilité d'erreur et donc augmenté 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.

3.8 Différentes architectures des systèmes MIMO-Beamforming à ondes millimétriques

Il existe trois types d'architecture MIMO Beamforming, à savoir, l'architecture analogique, l'architecture numérique et l'architecture hybride, chaque architecture a son propre compromis entre la complexité et les performances. Cependant l'architecture numérique (Fully- digital), qui utilise un nombre de chaînes RF (Radiofréquence) égal à celui des antennes, est très souvent écarté dans le choix d'architecture pour les systèmes mmWaves à cause du coût élevé, de la consommation d'énergie élevée et de la complexité de mise en place.

3.8.1 Architecture analogique (Fully-analog)

L'architecture Beamforming analogique est l'une des approches les plus simples pour appliquer le MIMO. Il peut être appliqué à la fois à l'émetteur et au récepteur.

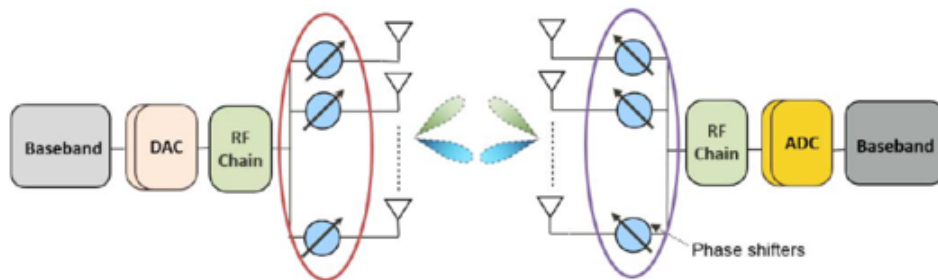


FIGURE 3.9 – Système MmWave MIMO utilisant uniquement le Beamforming analogique[18]

3.8.1.1 Déphaseurs (Phase shifters)

Le déphaseur est un circuit qui permet de changer la phase d'un signal hyperfréquence. Pour une performance optimale, un tel circuit doit avoir de faibles pertes d'insertion et une amplitude de transmission stable.

Il existe deux types de déphaseurs : les déphaseurs analogiques et numériques.

- Les déphaseurs analogiques : ils permettent d'obtenir tous les degrés de déphasage, car ils font varier la phase continuellement en fonction d'une commande appliquée.
- Les déphaseurs numériques : ils ne présentent qu'un nombre restreint d'états de phase, par contre, ils ont une meilleure immunité au bruit et une meilleure linéarité.

3.8.1.2 Beamforming analogique

Le Beamforming analogique est souvent mis en œuvre à l'aide d'un réseau de déphaseurs à commande numérique. Dans cette configuration, les déphaseurs RF peuvent être actifs ou passifs, plusieurs éléments d'antenne sont connectés via des déphaseurs à une seule chaîne RF, comme illustrés sur la figure(3.9).

Les poids des déphaseurs sont ajustés de manière adaptative en utilisant un traitement numérique du signal en utilisant une stratégie spécifique pour diriger le faisceau et atteindre un objectif donné, par exemple pour maximiser la puissance du signal reçu[18].

Cette architecture ne nécessite qu'une seule chaîne RF, donc elle permet une réduction significative du coût du matériel, de la complexité et de la consommation d'énergie.

3.8.1.3 Limitation du Beamforming analogique

Les performances obtenues avec le Beamforming analogique basée sur des réseaux phasés sont limitées par l'utilisation de déphasages quantifiés et le manque d'ajustement d'amplitude. Cela augmente la difficulté du réglage des faisceaux. Les déphaseurs actifs pratiques introduisent également une dégradation des performances due à la perte de déphasage, au bruit et à la non-linéarité. Bien que les déphaseurs passifs aient une consommation plus faible et n'introduisent pas de distorsion non linéaire, ils occupent une plus grande surface et subissent des pertes d'insertion plus importantes [18].

Le Beamforming analogique avec un seul Beamformer ne prend en charge que la transmission mono-utilisateur et a flux unique, cela signifie qu'il n'est pas possible de profiter des avantages multi-flux ou multi-utilisateurs associés aux systèmes MIMO.

3.8.2 Architecture hybride analogique-numérique (Hybrid digital-analog)

Le compromis proposé plus récemment entre les architectures de Beamforming numériques conventionnelles où le nombre de chaînes RF est égal à celui des antennes, et les architectures analogiques à complexité réduite impliquent l'utilisation d'une combinaison des deux [4]. Cette architecture hybride tire parti des avantages des deux architectures, elle divise le processus d'optimisation MIMO entre les domaines analogique et numérique. Dans ces systèmes hybrides, des chaînes RF numériques qui sont beaucoup moins nombreuses que le nombre total d'antennes sont adoptées, comme représentée sur la figure(3.10) : $N_s < L_t < N_t$ et $N_r > L_r > N_s$, chacune étant liée au réseau d'antennes via un réseau de déphaseurs analogique, cela augmente considérablement le nombre de déphaseurs, mais, il s'agit d'un faible coût par rapport à la chaîne RF numérique.

En supposant que $N_s > 1$, alors l'approche hybride permet la mise en œuvre du multiplexage spatial et du MIMO multi-utilisateur.

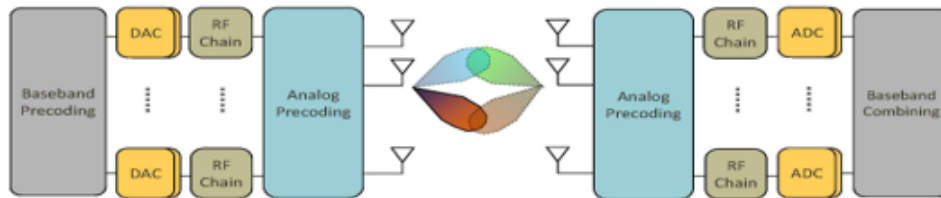


FIGURE 3.10 – Système MmWave MIMO utilisant uniquement le Beamforming hybride analogique-numérique [18]

Deux structures hybrides sont possibles :

Dans le premier, toutes les antennes peuvent se connecter à chaque chaîne RF (comme illustré sur la figure (3.11)(a)).

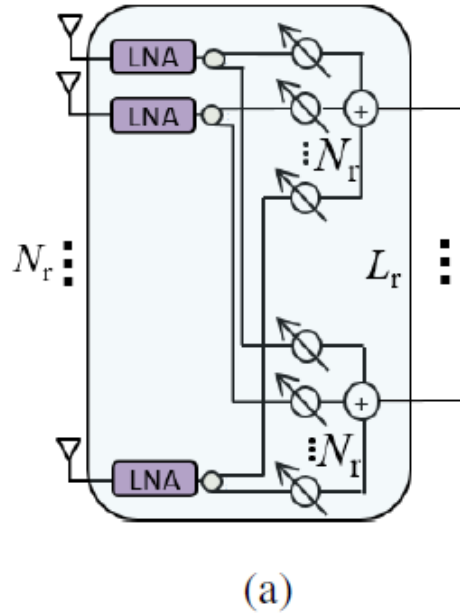


FIGURE 3.11 – Traitement analogique, Chaque chaîne RF est connectée à toutes les antennes[18]

Dans le second (voir Fig (3.12)(b)), le réseau peut être divisé en sous-réseaux, où chaque sous-réseau se connecte à son propre émetteur-récepteur individuel.

Le fait d'avoir plusieurs sous-réseau réduit la complexité matérielle au détriment d'une moindre flexibilité globale. Une architecture hybride mmWave alternative utilisant des réseaux de commutation a été proposée [21], afin de réduire encore la complexité et la consommation d'énergie de l'architecture hybride basée sur des déphaseurs. Cette architecture, illustrée sur la figure (3.13), exploite la nature clairsemée du canal d'onde mmWaves en mettant en uvre un échantillonnage spatial compressé (compressed spatial sampling) du signal reçu. La conception du combineur analogique est réalisée par un algorithme de sélection d'antenne de sous-ensemble au lieu d'une optimisation sur toutes les valeurs de phase quantifiées.

3.9 Architecture à complexité réduite pour les communications mmWave

L'utilisation des mmWaves apporte des nouvelles contraintes matérielles découlent de considérations pratiques comme, par exemple, la consommation d'énergie, le coût et la technologie des circuits. La technique Beamforming est très gourmande et complexe en matière de traitement et cette complexité augmente le coût du matériel, pour remédier à ça, les systèmes basés sur l'analogique Beamforming joux très bien en faveur du coût mais

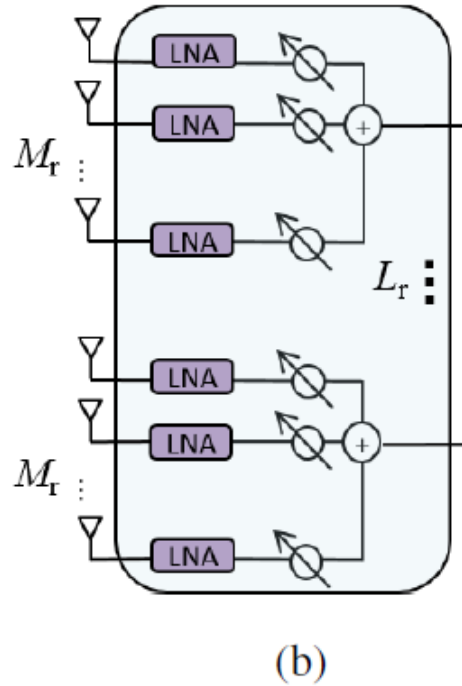


FIGURE 3.12 – Traitement analogique pour l’hybride Beamforming basé sur des déphaseurs : Chaque chaîne RF est connectée à un sous-ensemble d’antennes[18].

cela est au détriment de la performance. En rendant plus d’une chaîne RF numérique disponible par l’adoption de l’hybride Beamforming, il est possible d’utiliser des canaux avec plusieurs chemins en communiquant différents flux spatiaux en même temps, et comme les signaux mmWave sont facilement bloqués, il est hautement souhaitable d’avoir plusieurs flux spatiaux disponibles pour transmission à tout moment. Pour cette raison, les architectures hybrides sont généralement préférées dans les systèmes à ondes millimétriques par rapport au Beamforming analogique. L’implication du traitement du signal est très importante pour le partitionnement des opérations de traitement du signal entre les domaines analogique et numérique pour réduire, par exemple, le nombre de convertisseurs analogique-numérique ou leur résolution. Cela a conduit au développement d’antennes de Beamforming analogiques à lentille et la méthode ADC à faible débit.

3.9.1 Architecture à Réseau de lentilles (Lens Array)

Une nouvelle approche très intéressante consiste à combiner des réseaux d’antennes à lentilles avec des réseaux de commutation[28].

Contrairement aux réseaux d’antennes planaires, 1D ou 2D, un réseau de lentilles est une lentille électromagnétique avec des antennes d’alimentation situées sur la surface focale de la lentille comme illustré sur la figure(3.14), ce qui permet de concentrer le signal arrivant de différentes directions sur différentes antennes [17].

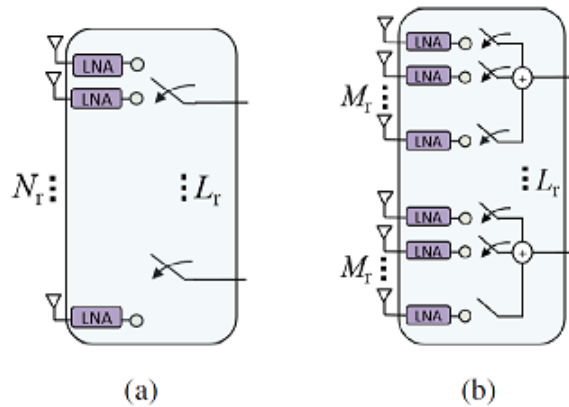


FIGURE 3.13 – Traitement analogique pour le Beamforming hybride basée sur des commutateurs : (a) chaque chaîne RF peut être connectée à toutes les antennes ; (b) chaque chaîne RF peut être connectée à un sous-ensemble d’antennes[18]

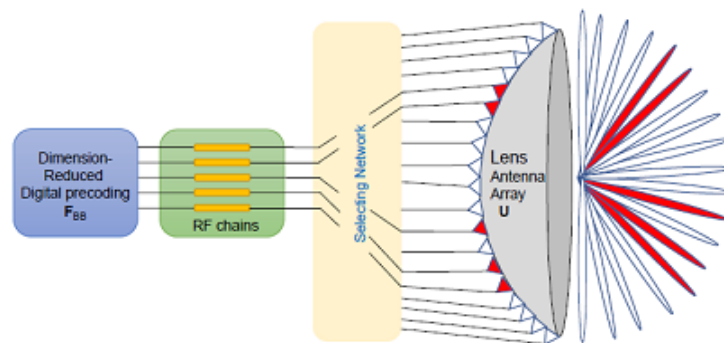


FIGURE 3.14 – Architecture à Réseau de lentilles [17]

3.9.2 Architecture CAN à quelques bits (Few-Bit ADCs)

Cette architecture propose de remplacer les ADC (Analog-to-Digital Converter) haute résolution par des ADC de quelques bits, par exemple, 1 à 4 bits, car les ADC haute résolution haute fréquence sont bien connues pour consommer beaucoup d’énergie[6], en réduisant l’énergie consommée par chaîne RF, la consommation totale d’énergie diminue et c’est la principale motivation de cette technique.

Le système mmWave avec CAN à quelques bits est illustré à la figure(3.15).

3.9.3 Précodage et combinaison hybride

L’étage de précodage / combinaison RF peut être mis en œuvre en utilisant différentes approches analogiques comme les déphaseurs, les commutateurs ou les lentilles. Un précodeur / combineur hybride basé sur des déphaseurs utiliserait normalement des déphaseurs

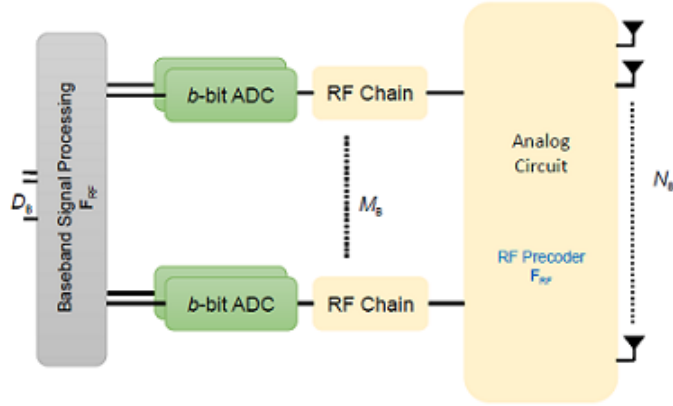


FIGURE 3.15 – Architecture CAN à quelques bits [17].

à commande numérique avec un petit nombre de phases quantifiées. L'avantage de cette approche hybride est que le précodeur / combineur numérique peut corriger le manque de précision de l'analogique, par exemple pour annuler les interférences résiduelles multi-flux[18].

Dans un tel système, les processus de précodage et de combinaison correspondants sont exécutés sur la bande de base et RF. En général, le Beamforming obtenu en RF implique des déphasages. Donc un élément essentiel pour le bon fonctionnement du système consiste à déterminer comment répartir les poids entre la bande de base et la bande RF en fonction du canal.

3.9.3.1 Précodage hybrid multi-utilisateur

Le précodage hybride a également été envisagé pour les systèmes mmWave multi-utilisateurs[5]. Dans [5], le système mmWave de liaison descendante a été considéré avec la station de base employant une architecture hybride analogique / numérique et des utilisateurs mobiles ayant une combinaison analogique uniquement (voir Fig.(3.16)). Pour ce système, un algorithme de précodage hybride en deux étapes a été proposé et s'est avéré atteindre une performance quasi optimale par rapport à une certaine approche entièrement numérique. Lors de la première étape, le formateur et le combineur de faisceaux analogiques sont conçus pour maximiser la puissance de chaque utilisateur par un entraînement au faisceau mono-utilisateur[18]. À la seconde étape, le précodeur de bande de base est conçu à partir des estimations de canal effectuées du côté des utilisateurs pour réduire les interférences entre utilisateurs. Seuls les canaux efficaces doivent être formés, en raison de la réduction de la dimensionnalité. La performance des systèmes mmWave multi-utilisateurs avec un retour limité(Limited feedback), a également été étudiée dans [5]. Il a été montré que la quantification des précodeurs en bande de base est particulièrement critique pour préserver le gain de précodage hybride par rapport aux stratégies de guidage de faisceau uniquement analogique.

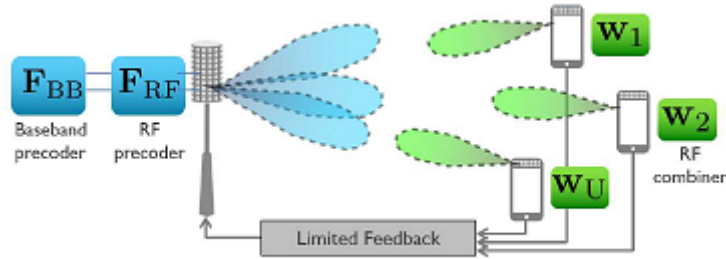


FIGURE 3.16 – Modèle de système pour la conception de précodage hybride multi-utilisateur[18].

3.9.4 Estimation de canal pour les systèmes mmWaves

L'estimation de canal donne des informations précises à l'émetteur/récepteur, une fois obtenues, ce dernier peut aligner ses directions de faisceau (Beams) avec tous les chemins de propagation disponible. Cette étape est cruciale pour la technique Beamforming. Ces informations de canal sont caractérisées par une grande matrice de canaux à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) et sont difficiles à estimer avec précision, même aux fréquences micro-ondes, ce problème devient plus difficile avec des fréquences mmWave, à cause des conditions de canal défavorables et des contraintes matérielles importantes.

3.9.5 Algorithmes d'apprentissage

Diriger les faisceaux n'est pas anodin, surtout lorsqu'une liaison de communication n'a pas encore été établie. Ceci conduit à la nécessité d'algorithmes d'apprentissage de faisceau très élaboré.

Les Beamformers analogiques en mmWave sont généralement conçus en utilisant une stratégie d'apprentissage de faisceau en boucle fermée (Closed-loop beam training), basée sur l'utilisation d'un « Codebook » qui comprend des modèles de faisceau à différentes résolutions. Certains protocoles simples utilisent un processus itératif pour échanger des informations entre l'émetteur et le récepteur en utilisant une largeur de faisceau de plus en plus étroite à chaque étape, dans le but de découvrir les directions angulaires du signal le plus fort entre le récepteur et l'émetteur, c'est-à-dire, le meilleur angle d'arrivée AoA (Angle-of-arrival) et le meilleur angle de départ AoD (Angle-of-departure), sans estimation de canal explicite.

Les stratégies d'apprentissage de faisceau basé sur les « Codebooks » utilisent un processus itératif pour mesurer la puissance angulaire, chaque code du « Codebook » dirige le faisceau dans une direction angulaire particulière.

3.10 Conclusion

Ce chapitre a présenté les différents aspects de la technique MIMO en passant par la nouvelle ère des systèmes MIMO massif, cette technologie clé pour les mmWaves, une fois combinée avec les nouvelles techniques de Beamforming, permet de surmonter les défis posés par l'utilisation des mmWaves. Les différentes solutions d'architecture à ondes millimétriques mentionnées précédemment dans ce chapitre donnent naissance à des transceivers aussi performants qu'économiques, notamment la conception de systèmes de communication hybrides mmWave analogiques numériques de faible complexité.

Chapitre 4

Simulations & interprétations des résultats

SOMMAIRE

4.1	INTRODUCTION	45
4.2	LANGAGE UTILISÉ	45
4.3	MATLAB-SIMULINK	45
4.4	CHOIX DE LA PLATEFORME DE SIMULATION	45
4.5	PLATEFORME DE SIMULATION	46
4.6	PARAMÈTRES DE SIMULATION	47
4.7	ALGORITHMES DE POURSUITE DE CORRESPONDANCE QSHB ET HBPS	48
4.8	PARAMÈTRES DE SIMULATION	50
4.9	SIMULATION DES PERFORMANCES D'UN TRANSCIVEUR HYBRIDE	51
4.9.1	Résultats obtenus avec les différentes configurations	52
4.9.2	Simulation multi-flux	56
4.9.3	Comparaison entre les algorithmes QSHB et HBPS	57
4.9.4	Effet du multi-flux sur l'efficacité	59
4.10	OPTIMISATION DE LA PLATEFORME	62
4.10.1	Fonction coût	63
4.10.2	Performances de l'architecture optimisée	64
4.11	PROBLÈMES RENCONTRÉS	65
4.12	TRAVAUX ULTÉRIEURS	66
4.13	CONCLUSION	67

4.1 Introduction

La conception des systèmes de communication nécessite une étude à l'avance et une évaluation de leurs performances. Notre but dans ce chapitre de commencer avec un modèle Simulink, un outil qui peut effectuer une analyse architecturale et une simulation multi domaine dans des applications Beamforming hybrides. La cible principale de ce chapitre est d'arriver à réaliser cette analyse pour les systèmes MIMO Massifs Beamforming à ondes millimétriques à travers une simulation. Le défi consiste à réduire le coût matériel sans affecter les performances du système.

Nous allons commencer par une présentation de la plateforme choisie pour cette simulation, ensuite, nous allons simuler les performances d'un transceiver hybride avec plusieurs combinaisons.

Cette étude des performances est réalisée en analysant le taux d'erreur binaire BER en fonction du rapport signal sur bruit SNR, après une comparaison entre les algorithmes est faite. Elle est suivie de la présentation l'efficacité des différentes configurations hybrides. En fin de ce chapitre, un travail d'optimisation et d'automatisation de la plateforme de simulation est présenté.

4.2 langage utilisé

Pour le bon développement des projets, le choix du bon environnement de programmation est très important, cela se fait suivant plusieurs facteurs, notamment la facilité d'utilisation, la puissance de compilation, la disponibilité de plusieurs fonctionnalités et la communication avec d'autres environnements. Afin de réaliser les différentes simulations de notre système, nous avons eu recours aux outils du logiciel MATLAB-Simulink.

4.3 Matlab-Simulink

Simulink est une plate-forme qui permet une simulation multi-domaine et la modélisation de systèmes dynamiques. Ce dernier offre un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal. Simulink est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un environnement interactif pour le développement des plateformes. En utilisant MATLAB-Simulink, nous pouvons résoudre des problèmes de calcul plus rapidement qu'avec les langages de programmation traditionnels parce qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer les tâches de programmation de bas niveau, comme la déclaration des variables, la spécification des types de données et l'allocation de la mémoire.

4.4 Choix de la plateforme de simulation

Nous avons choisi pour ce travail de simulation le modèle de plateforme Simulink développé par MathWorks en se basant sur les travaux et les algorithmes de [22], [12],[9]. Ce modèle offre la possibilité d'une durée de simulation minimale et la possibilité d'explorer

plusieurs configurations hybrides. En contrôlant ces sous-systèmes on peut choisir les décisions de partitionnement de Beamforming entre les domaines RF et numérique, en donnant la possibilité de contrôler le nombre des chaînes RF, on peut aller du fully-analog jusqu'à le fully digital.

4.5 Plateforme de simulation

plateforme de simulation comprend 5 principaux bloc :

- Émetteur MIMO.(voir fig.(4.1))
- Canal MIMO.(voir fig.(4.2))
- Récepteur MIMO.(voir fig.(4.3))
- Calculateur de poids hybride.(voir fig.(4.4))
- Calculateur de TEB.(voir fig.(4.5))

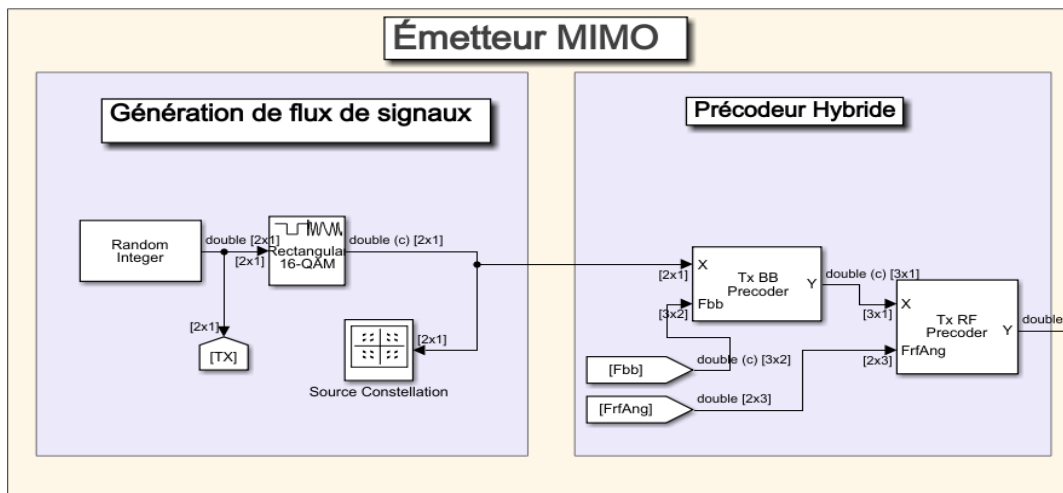


FIGURE 4.1 – Bloc de l'émetteur MIMO

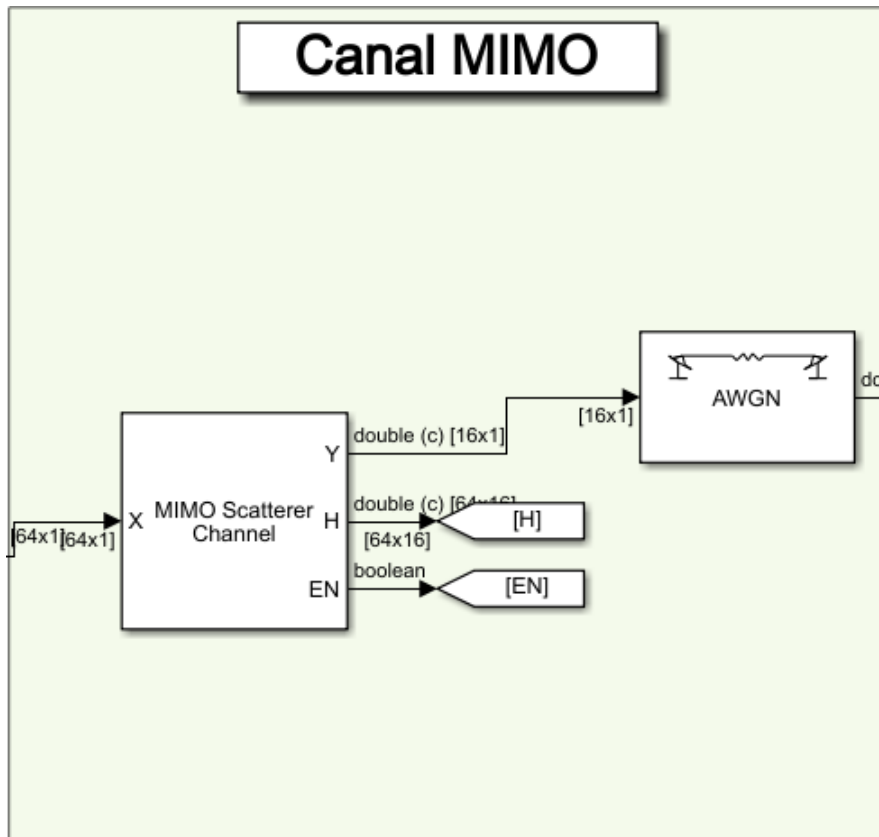


FIGURE 4.2 – Bloc du canal MIMO

4.6 Paramètres de simulation

La matrice de canal MIMO générée H est invariante au nombre de symboles transmis, et donc, les matrices de précodage et de combinaison seront les mêmes pour tous les symboles. Dans ce système, les structures des blocs de canal MIMO, de l'émetteur et du récepteur sont indépendantes du précodage et de la génération de la matrice de poids. Les algorithmes QSHB et HBPS sont implémentés dans le bloc de calcul de poids du modèle.

L'émetteur MIMO génère le flux de signaux et applique le précodage. Le signal modulé est propagé à travers un canal de diffusion défini dans le canal MIMO puis passe par un AWGN pour simuler un bruit blanc additif et enfin, il sera décodé et démodulé côté récepteur.

Pour les sous-systèmes émetteur et récepteur, l'objectif du compromis technique est le coût par rapport aux performances. Ceci entraîne à son tour le partitionnement de l'architecture du Beamforming entre les domaines RF et numérique.

La répartition des poids entre la bande de base et la bande RF est faite dans le bloc de calcul de poids, où les poids de précodage, F_{bb} et F_{rfAng} , et les poids de combinaison, W_{bb} et W_{rfAng} , sont calculés sur la base de la matrice de canal H .

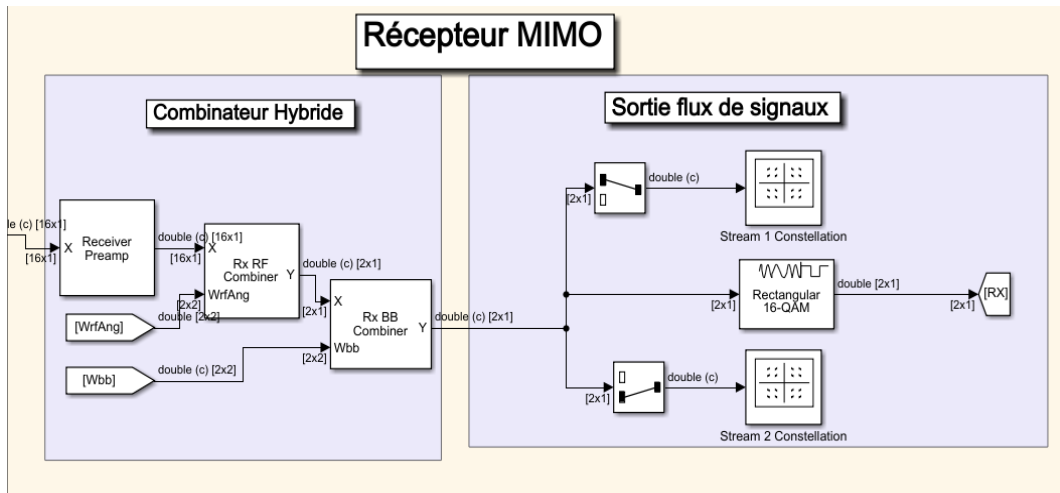


FIGURE 4.3 – Bloc du récepteur MIMO

4.7 Algorithmes de poursuite de correspondance QSHB et HBPS

Le QSHB(Quantized Sparse Hybrid Beamforming) est un algorithme de poursuite de correspondance orthogonale. En utilisant cet algorithme, les poids de précodage / combinaison analogiques résultants sont des vecteurs de direction correspondant aux modes dominants de la matrice de canal.

L'algorithme QSHB produit les informations suivantes :

- Matrices de précodage FRF et FBB
- Matrices de combinaison WRF et WBB

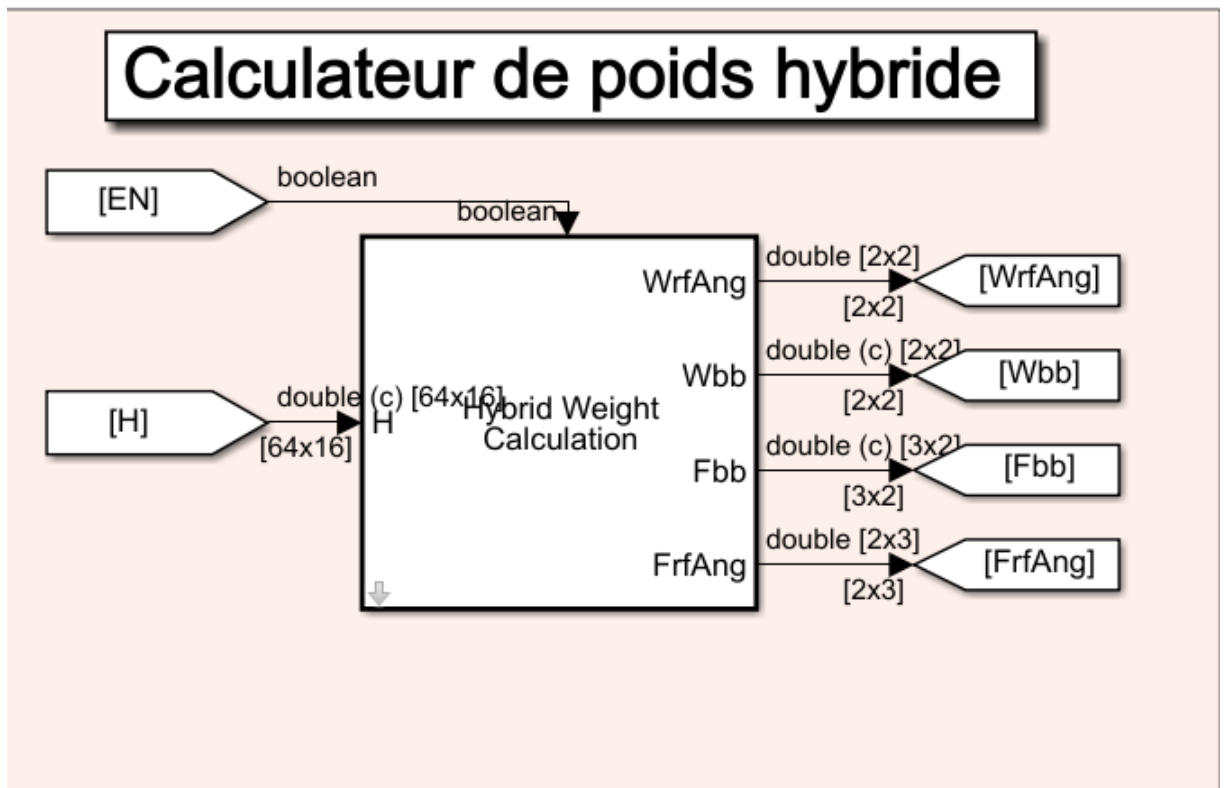


FIGURE 4.4 – Bloc du calculateur de poids hybride

Le HBPS (Hybrid Beamforming with Peak Search) est une version simplifiée de QSHB. Au lieu de rechercher le mode dominant de la matrice de canal de manière itérative, le HBPS projette tous les poids numériques dans une grille de directions et identifie les pics NTRF et NRRF pour former les vecteurs de poids de formation de faisceaux analogiques correspondants.

On peut paramétrer le choix de l'algorithme dans le bloc (voir fig.(4.6)) "<calculateur de poids hybride">.

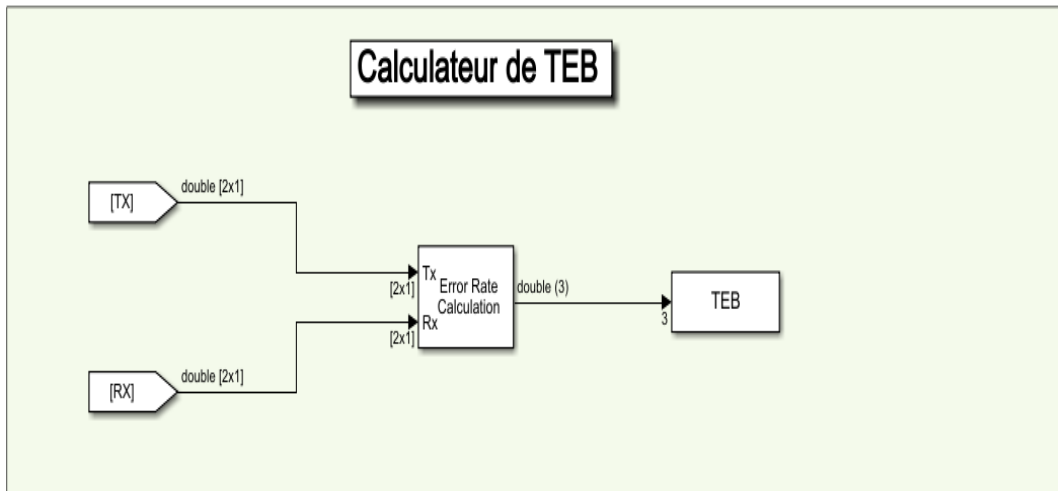


FIGURE 4.5 – Bloc du calculateur de TEB

TABLE 4.1 – Tableau des différents paramètres de simulation

TAbréviation	Paramètre
FRF	Précodeur analogique
FBB	Précodeur numérique
WRF	Combinateur analogique
WBB	Combinateur numérique
H	Matrice de canal MIMO
NT	Nombre d'antennes Tx
NR	Nombre d'antennes Rx
NS	Nombre de flux de signaux
NTRF	Nombre de chaînes RF Tx
NRRF	Nombre de chaînes RF Rx
M	La valence
FC	La fréquence

4.8 Paramètres de simulation

Le tableau suivant montre les différents paramètres de simulation :

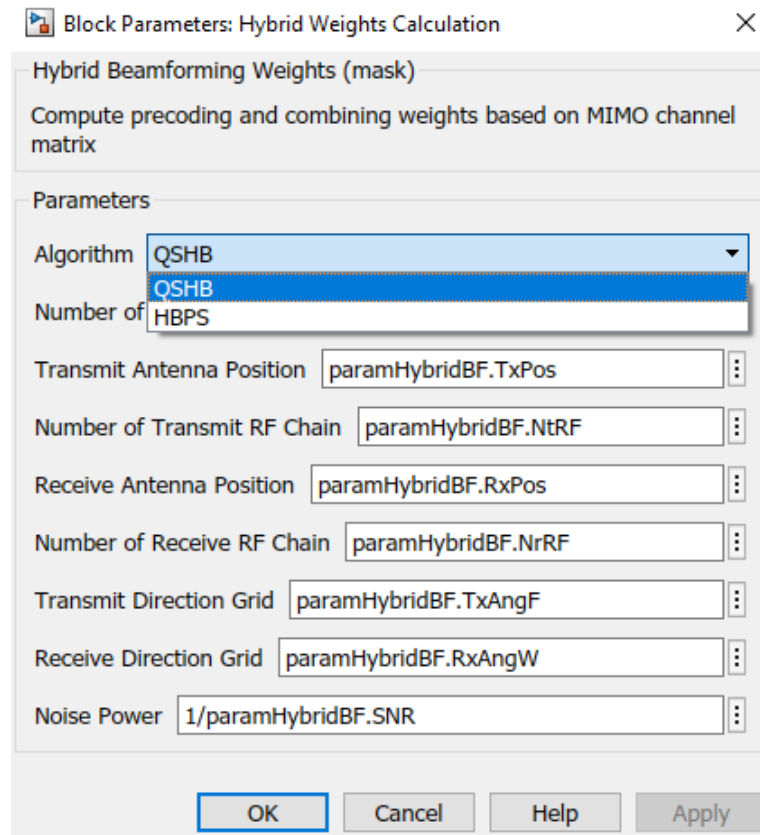


FIGURE 4.6 – Paramètre du choix de l’algorithme

4.9 Simulation des performances d’un transceiver hybride

À ce stade de simulation, nous allons varier le nombre des chaînes RF et fixer le nombre de flux de signaux sur $N_s=2$. Le système émetteur se compose de 64 antennes d’émission ($N_T=64$) et il y a 16 antennes de réception ($N_R=16$). Les fréquences utilisées dans les différentes simulations sont de l’ordre de 28 GHz ($f_c = 28$ GHz).

4.9.1 Résultats obtenus avec les différentes configurations

Notre but dans cette section est de tester plusieurs combinaisons de Beamforming hybride, à chaque fois, nous réduisons le nombre des chaînes RF des deux côtés, émetteur et récepteur, en essayant d'analyser le niveau de performances.

Pour chaque configuration que nous envisageons, nous allons tester les performances grâce au calcul BER, avec le bloc « Calculateur de TEB », en fonction du SNR pour évaluer les différentes configurations en se basant à chaque fois sur l'algorithme QSHB puis sur le HBPS.

4.9.1.1 Simulation avec NTRF=8 et NRRF=8

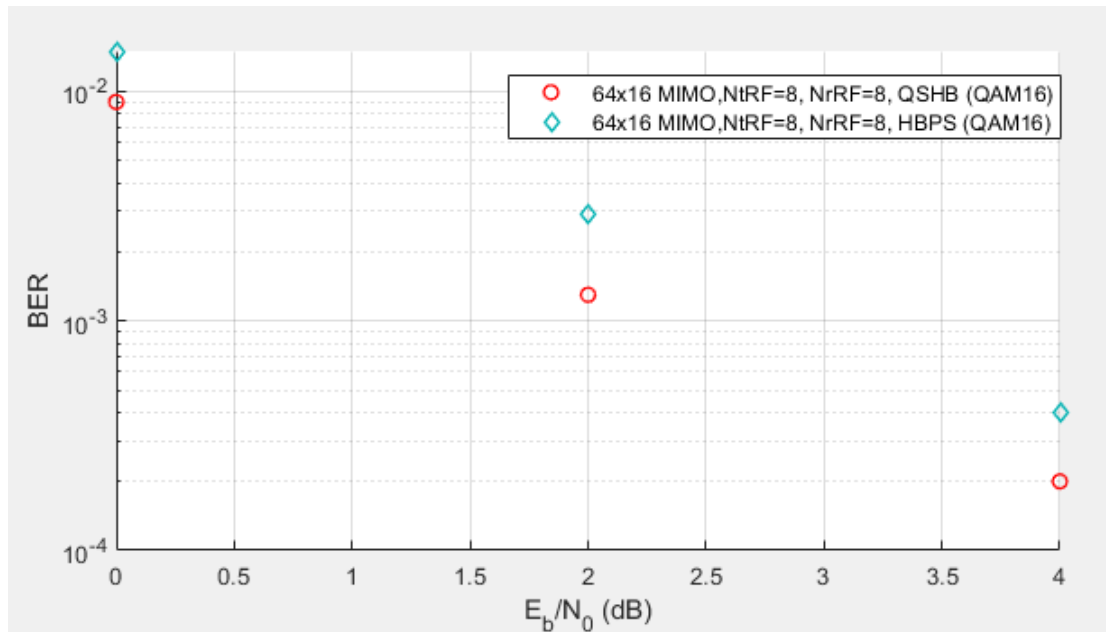


FIGURE 4.7 – TEB en en fonction du SNR pour un système 64x16 MIMO avec NTRF=8 et NRRF=8, en utilisant les algorithmes QSHB et HBPS

La figure(4.7) représente le taux d'erreurs binaires TEB en fonction du SNR pour un système 64x16 MIMO avec une architecture hybride, les deux courbes sont obtenues grâce à la simulation d'un scénario avec deux flux de signaux $N_s=2$. La première courbe (en bleu) représente les résultats obtenus avec l'algorithme HBPS et la deuxième (en rouge) avec l'algorithme QSHB. Dans les deux cas la modulation utilisée est la QAM16 (Quadrature Amplitude Modulation).

Avec un tel choix de configuration, on remarque que les performances sont presque optimales, c'est le cas avec cette simulation car nous avons utilisé 8 chaînes RF dans chaque côté du transceiver. L'utilisation d'un grand nombre de chaîne RF implique une grande consommation d'énergie et plus de complexité de calcul, dans ce qui suit nous essayons de réduire ce nombre tout en gardant l'œil sur le graphe des performances.

4.9.1.2 Simulation avec NTRF=4 et NRRF=4

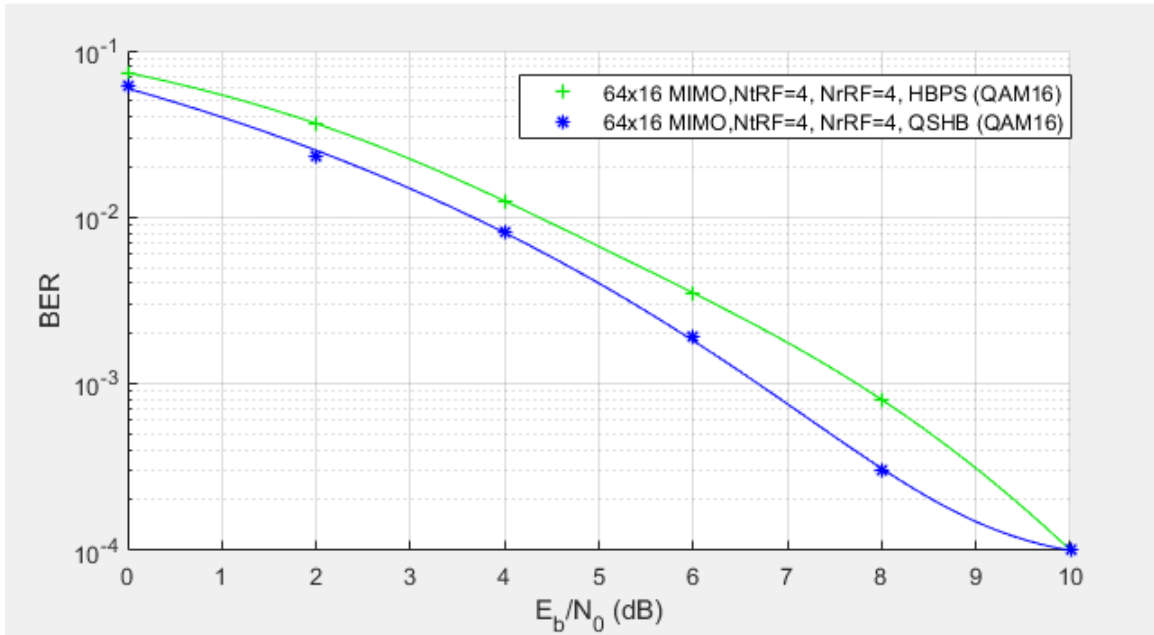


FIGURE 4.8 – TEB en en fonction du SNR pour un système 64x16 MIMO avec NTRF=4 et NRRF=4, en utilisant les algorithmes QSHB et HBPS

La figure(4.8) représente le TEB en fonction du SNR pour un système 64x16 MIMO avec une architecture hybride, le même scénario est appliqué avec deux flux de signaux $N_s=2$. La première courbe (en vert) représente les résultats obtenus avec l'algorithme HBPS et la deuxième (en bleu) avec l'algorithme QSHB.

On remarque, avec cette simulation, que les résultats des performances représentées par les deux courbes sont très proches, cela signifie que les deux algorithmes se comportent bien avec cette configuration. Dans cette dernière nous avons utilisé 4 chaînes RF dans chaque côté, c'est-à-dire de l'émetteur et du récepteur. Malgré la réduction le nombre des chaînes radiofréquence les performances du système restent acceptables.

4.9.1.3 Simulation avec NTRF=4 et NRRF=2

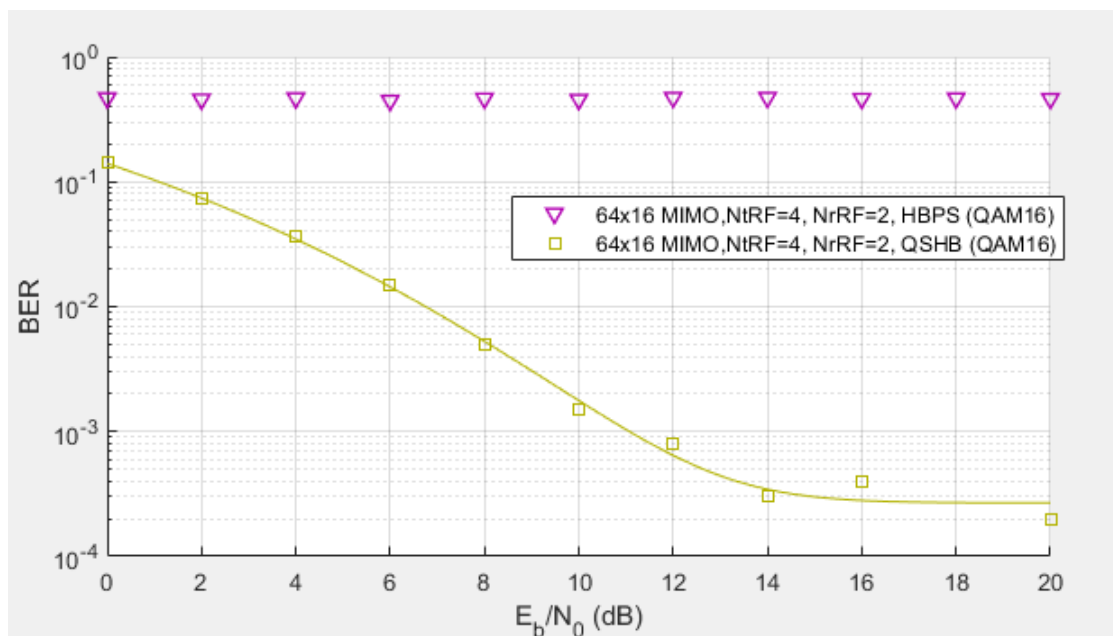


FIGURE 4.9 – TEB en en fonction du SNR pour un système 64x16 MIMO avec NTRF=4 et NRRF=2, en utilisant les algorithmes QSHB et HBPS

La figure(4.9) représente le TEB en fonction du SNR pour un système 64x16 MIMO avec une architecture hybride, le même scénario des simulations précédentes est appliqué. La première courbe (avec les triangles) représente les résultats obtenus avec l'algorithme HBPS et la deuxième (avec les carrés) avec l'algorithme QSHB.

On remarque directement que la réduction du nombre des chaînes RF au niveau du récepteur (NTRF=2) a particulièrement affecté les performances du système, notamment avec l'utilisation de l'algorithme HBPS, car, malgré l'augmentation du SNR, le taux d'erreur binaire quant à lui est presque fixe avec des valeurs élevées, cela nous montre que l'algorithme de poursuite HBPS est limité en ce qui concerne la configuration hybride utilisée. Par contre l'algorithme de poursuite de correspondance orthogonale QSHB à relever le défi en permettant au système de fonctionner normalement, cela signifie que la réduction du coût affecte le système mais le bon choix de la méthode d'apprentissage et de l'algorithme de poursuite nous permet d'atteindre notre objectif.

Nous avons exploré avec ces simulations différentes combinaisons de valeurs pour le nombre de chaînes RF, ce nombre est important car c'est là où il est possible de réduire les coûts. En partageant les poids numériques sur plusieurs canaux RF, moins de matériel peut être utilisé et c'est le but principal de l'hybridation.

4.9.2 Simulation multi-flux

Dans un scénario avec multi-flux avec $NS=2$, nous pouvons récupérer les flux NS1 et NS2 au niveau du récepteur à la sortie du combineur hybride, ensuite, avec l'aide d'un sélecteur de flux, les 2 flux sont séparés, une fois cette étape franchie, on peut observer les différents symboles reçus à l'aide d'un diagramme de constellation, une telle observation peut se révéler très utile pour juger les performances d'une chaîne de communication. Nous avons choisi pour cette simulation une configuration $NTRF=NRRF=4$ pour une meilleure observation du multi-flux.

À l'aide de l'algorithme QSHB, nous avons récupéré les résultats suivants :

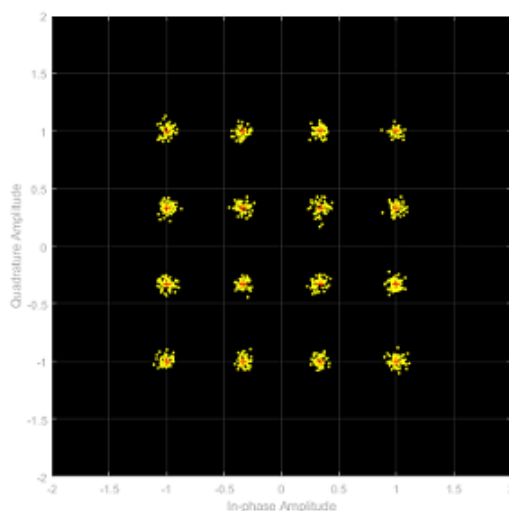


FIGURE 4.10 – Le diagramme constellation du premier flux NS1 avec : 64x16 MIMO , $NTRF=4$ et $NRRF=4$, en utilisant l'algorithme QSHB et la modulation QAM16

Les Figures(4.10)et(4.11) représentent les diagrammes de constellations résultant de la simulation d'un système MIMO 64x16 avec hybride Beamforming. Ces résultats montrent que par rapport à la constellation source, les symboles récupérés pour un schéma de modulation QAM16 sont correctement localisés dans les deux flux.

Cependant, le diagramme de constellation de la figure (4.10) montre que la variance du premier flux récupéré NS1 est meilleure que celle du deuxième flux NS2, car les points sont moins dispersés dans le diagramme de constellation du premier flux. C'est parce que le premier flux utilise le mode le plus dominant du canal MIMO et a donc le meilleur SNR. En envoyant simultanément plusieurs flux la capacité d'un système est améliorée, ce résultat démontre qu'une architecture hybride peut parfaitement adopter ce principe.

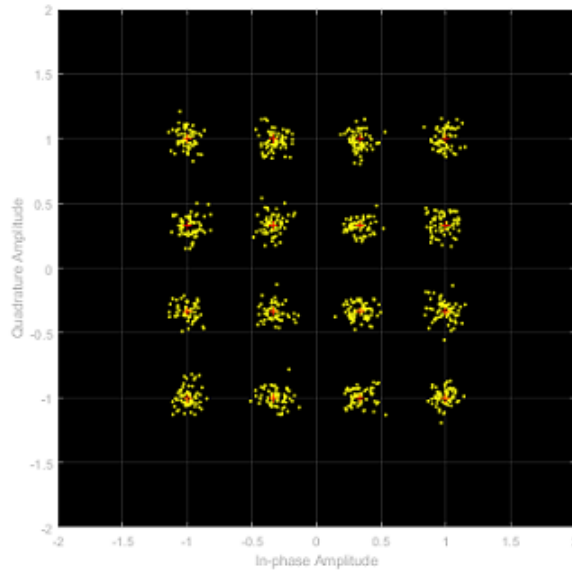


FIGURE 4.11 – Le diagramme constellation du deuxième flux Ns2 avec : 64x16 MIMO , NTRF=4 et NRRF=4, en utilisant l’algorithme QSHB et la modulation QAM16

4.9.3 Comparaison entre les algorithmes QSHB et HBPS

Les figures(4.12)et(4.13) montrent les résultats de simulation obtenus avec une architecture hybride NTRF= NRRF =4 en utilisant l’algorithme HBPS. Avec cette configuration, le diagramme de constellation révèle que l’algorithme HBPS atteint des performances similaires à QSHB et cela signifie qu’il est un bon choix pour le système MIMO 64 x 16 car il offre un compromis sur la complexité de calcul étant donné qu’il est moins complexe.

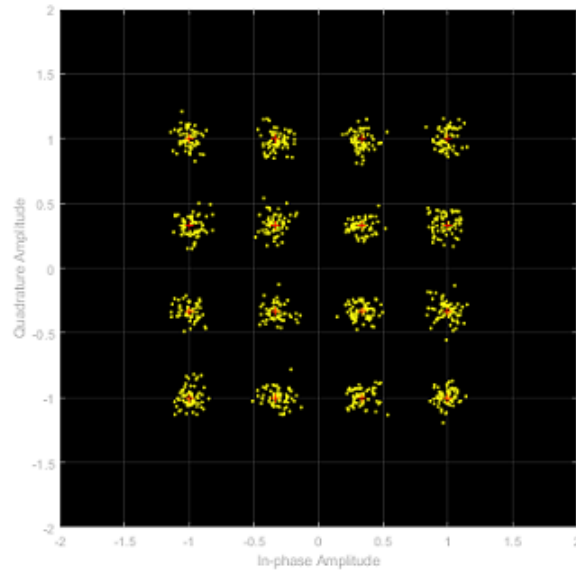


FIGURE 4.12 – Le diagramme constellation du premier flux $Ns1$ avec : 64x16 MIMO , NTRF=4 et NRRF=4, en utilisant l’algorithme HBPS et la modulation QAM16

D’un autre côté, il est moins performant comparé à l’algorithme QSHB car, lorsqu’on a considérablement diminué le nombre chaînes RF, les résultats de simulation ont montré que les performances du système diminuent et ne permettant pas le bon fonctionnement du Beamforming, cela peut se voir sur la figure(??).

L’algorithme HBPS reste un bon choix pour réduire la complexité de calcul pour les grandes cellules utilisées dans les systèmes massifs MIMO, mais pour cela il faut trouver la bonne configuration.

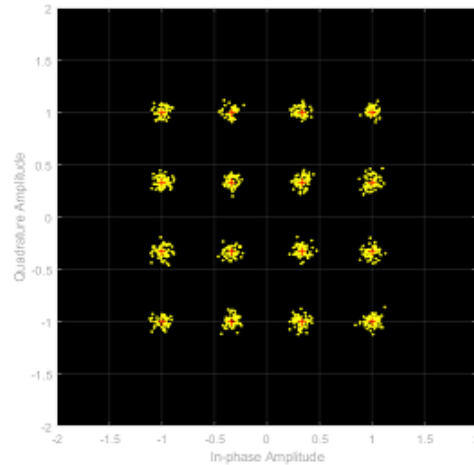


FIGURE 4.13 – Le diagramme constellation du deuxième flux Ns_2 avec : 64x16 MIMO , NTRF=4 et NRRF=4, en utilisant l’algorithme HBPS et la modulation QAM16

4.9.4 Effet du multi-flux sur l’efficacité

Dans cette partie de projet, nous avons étudié l’efficacité du partitionnement de plusieurs manières. Les tests sont effectués en matière d’efficacité spectrale car, elle est couramment utilisée dans les mesures de performance du système MIMO.

Nous avons comparé l’efficacité spectrale obtenue en utilisant les poids optimaux (poids entièrement numériques) à ceux qui utilisent le Beamforming hybrides avec plusieurs configurations, en se basant seulement sur l’algorithme QSHB pour cette fois-ci.

Pour faciliter la compréhension, la simulation utilise des flux à un et deux signaux ($NS=1$ puis $NS=2$). Avec cette simulation on souhaite analyser l’efficacité spectrale des configurations proposées dans la section précédente.

4.9.4.1 Efficacité spectrale avec $N_{TRF}=8$ et $N_{RRF}=8$

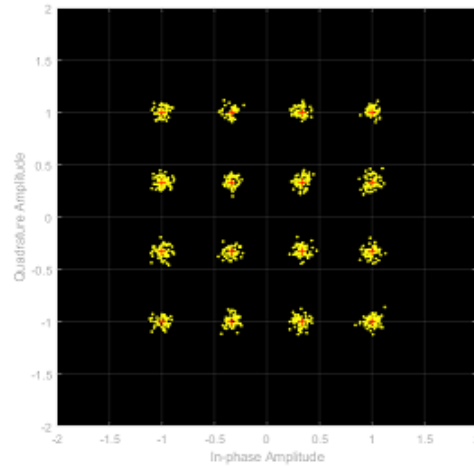


FIGURE 4.14 – L’efficacité spectrale en fonction du SNR avec $N_{TRF}=8$ et $N_{RRF}=8$

La figure(4.14)montre les résultats de simulation de l’efficacité spectrale en fonction du SNR obtenus avec une architecture numérique et une architecture hybride $N_{TRF}= N_{RRF}=8$. On remarque que l’utilisation du multi-flux augmente l’efficacité spectrale d’environ 14 bits/s/Hz.

D’après La comparaison entre la configuration totalement numérique et la configuration hybride, nous pouvons voir qu’utiliser le multi-flux pour l’architecture hybride n’a pas changé signification l’efficacité spectrale. Cela est dû au nombre considérable des chaînes RF utilisées pour cette architecture.

4.9.4.2 Efficacité spectrale avec $N_{TRF}=4$ et $N_{RRF}=4$

Cette figure(4.15) représente une comparaison entre une configuration optimale, totalement numérique, et celle que nous avons choisi comportant 4 chaînes RF de chaque côté de la chaîne de transmission. On remarque que lorsqu’on utilise deux flux, c’est-à-dire $NS=2$, pour la transmission, l’efficacité spectrale augmente pour chacune des architectures, cela signifie qu’on a une meilleure utilisation des ressources spectrales et que le multi-flux aide à optimiser ces ressources très convoitées.

La diminution du nombre des chaînes RF par rapport à la première simulation nous montre que l’efficacité spectrale de l’architecture hybride, en la comparant avec l’optimal, a légèrement diminué, mais, les performances en matière d’efficacité spectrale restent très proches.

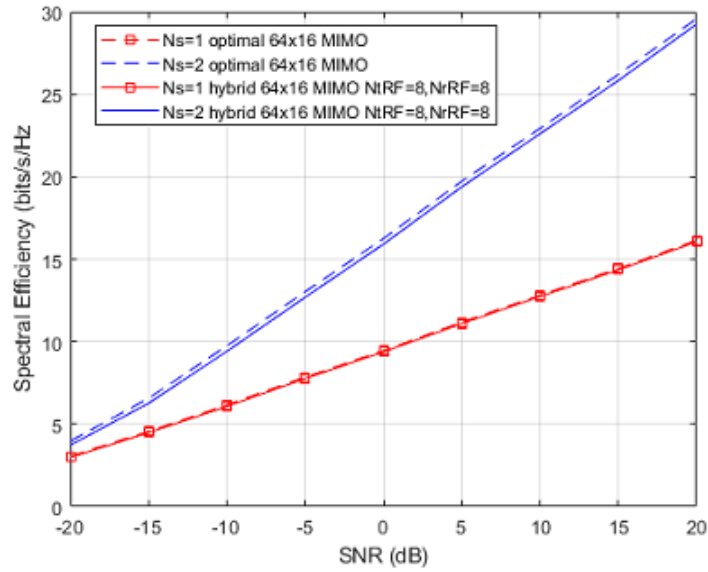


FIGURE 4.15 – L’efficacité spectrale en fonction du SNR avec $NTRF=4$ et $NRRF=4$

4.9.4.3 Efficacité spectrale avec $NTRF=4$ et $NRRF=2$

La figure(4.16)représente l’efficacité spectrale en fonction du SNR avec la configuration hybride $NTRF=4$ et $NRRF=2$ et une configuration optimale. On remarque que l’efficacité spectrale augmente d’environ 10 bits/s/Hz lorsque $NS=2$, cela signifie que même lorsqu’on réduit le nombre des chaines RF de moitié chez le récepteur, l’utilisation du multi-flux reste une très bonne option pour améliorer l’efficacité spectrale.

D’un autre côté, on remarque que le choix de l’architecture numérique donne, sans aucun doute, une meilleure efficacité spectrale comparée à l’architecture hybride comme montré sur la figure (4.9), mais, les avantages d’une telle architecture restent supérieures, comme par exemple, la réduction considérable du coût et de la complexité.

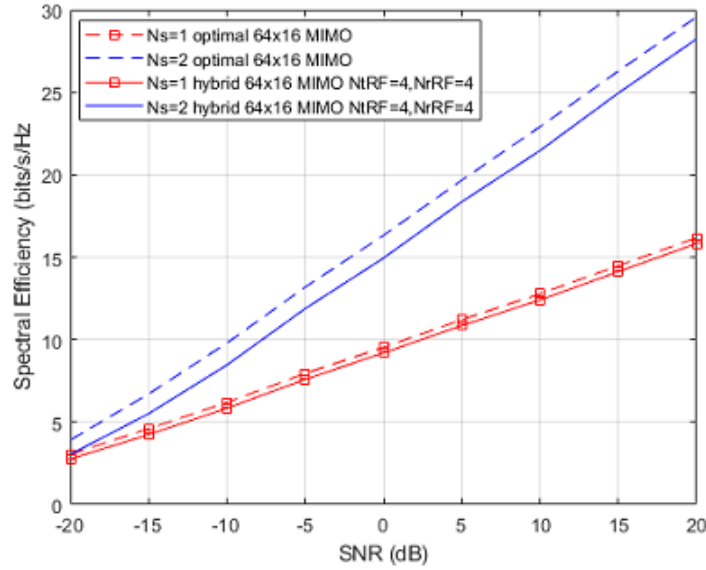


FIGURE 4.16 – L’efficacité spectrale en fonction du SNR avec NTRF=4 et NRRF=2

4.10 Optimisation de la plateforme

Nous allons présenter dans cette section notre travail d’optimisation qui consiste à la recherche du meilleur compromis entre la performance et le coût. Notre but principal consiste à automatiser la recherche de la configuration hybride Beamforming optimal, c’est-à-dire la meilleure répartition des poids entre le numérique et l’analogique, avec le plus petit nombre de chaînes RF possible. Pour cela, l’algorithme proposé change automatiquement le nombre des chaînes RF des deux côtés de la chaîne et teste à chaque fois les performances en minimisant la fonction coût du système jusqu’à ce qu’il trouve la configuration la moins complexe qui optimise le mieux le coût.

Un niveau d’exigence en matière de performances est prédéfini, cette option permet de ne pas franchir cette limite lors de la minimisation de la fonction coût. On peut choisir comme paramètres d’entrée le nombre d’antennes N_t et N_r , la fréquence F_c , le nombre de flux, l’algorithme de poursuite et le schéma de modulation. En se basant sur ces paramètres le programme optimise l’architecture, trace la courbe des performances optimisées et trace la fonction coût.

Pour les paramètres $N_t=64$, $N_r=16$, $F_c=28$ GHz, $M=16$, $N_s=2$, avec un niveau d’exigence de 5 dB, le programme donne les résultats suivants :

4.10.1 Fonction coût

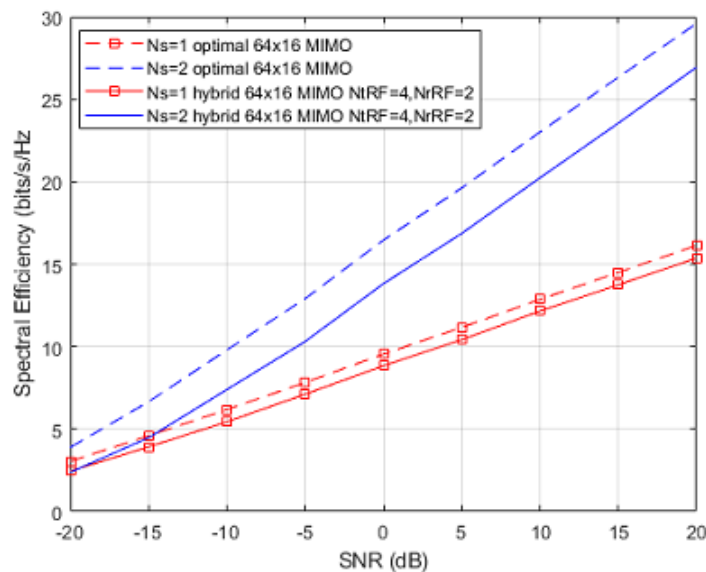


FIGURE 4.17 – le taux d’erreurs binaires en fonction du nombre des chaines RF

La figure(4.17)représente le taux d’erreurs binaires en fonction du nombre des chaines RF utilisées (NTRF x NRRF) pour un système 64x16 MIMO avec un niveau d’exigence de 5 dB et en utilisant la modulation QAM16. On remarque que pour chaque configuration testée par le programme, le TEB reste très élevé jusqu’à la configuration NTRF =3, NRRF=2, la valeur du TEB diminue, le programme détecte ce changement et arrête les simulations, il a ainsi trouvé la valeur optimale.

La courbe de la fonction coût tracé sur la figure(4.17)nous montre que pour un coût plus petit que celui proposé, c’est-à-dire $NTRF < 3$ et $NRRF < 2$, les performances du système sont très faibles. Par exemple, analysons la configuration NTRF =2 et NRRF=2, pour une telle configuration les performances du système sont très faibles avec un TEB=0.49. Dans cette simulation on a minimisé la fonction coût, c’est-à-dire trouvé TEB minimal pour le meilleur coût possible.

4.10.2 Performances de l'architecture optimisée

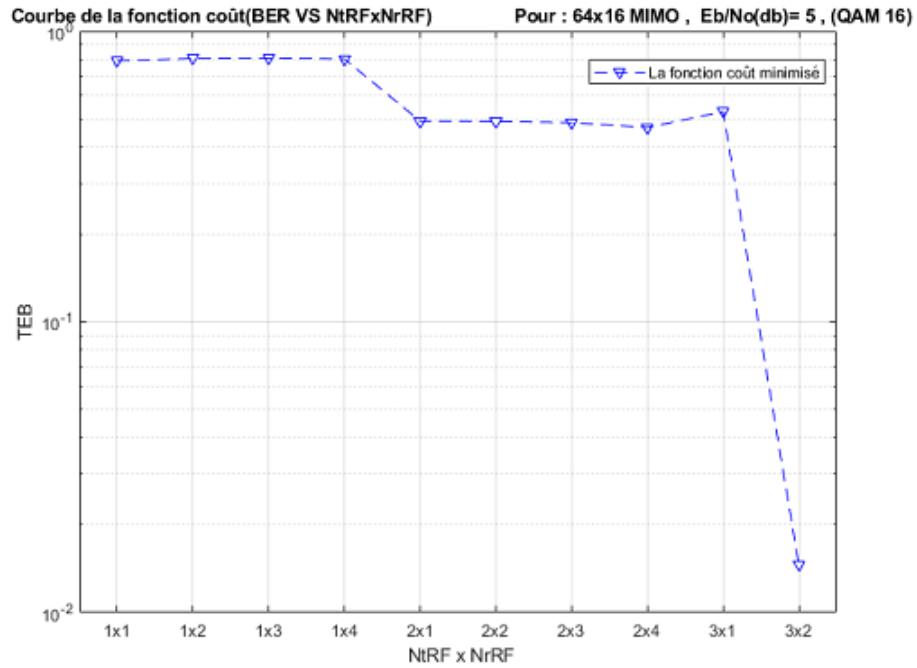


FIGURE 4.18 – le TEB en fonction du SNR d'un système 64x16 MIMO avec une configuration NTRF =3, NRRF=2

La figure(4.18) représente le taux d'erreurs binaires TEB en fonction du SNR d'un système 64x16 MIMO avec une configuration NTRF =3, NRRF=2. Cette figure donne la performance de la configuration hybride proposée par le programme d'optimisation. On remarque que les performances restent acceptables par rapport au nombre réduit des chaînes RF proposées.

4.11 Problèmes rencontrés

Les principaux problèmes rencontrés lors de ce projet de fin d'études étaient , dans un premier temps, de trouver une plate-forme de simulation qui permet de tester différentes configurations d'architectures Beamforming hybride et puis trouver le matériel performant pour permettre à ces simulations de fonctionner, étant donné qu'il s'agit d'un ensemble programme longs et complexe, une complexité de calcul qui nécessite les unités de calculs puissantes et efficaces du laboratoire. Malheureusement, les laboratoires universitaires ont été fermés à cause de la pandémie du virus Corona (COV ID - 19) dans le monde, pour surmonter ces défis, il nous a fallu trouver d'autres alternatives notamment, la simulation en ligne avec les serveurs MATLAB et l'augmentation des performances des ordinateurs personnels.

4.12 Travaux ultérieurs

À cause des limitations matérielles, nous n'avons pas pu simuler des architectures hybrides avec des réseaux d'antenne plus grands. Une seule fois ce défi dépassé, ce travail peut être approfondi avec une étude des architectures hybrides complexe et des réseaux d'antennes MIMO massif plus grands et pourquoi pas l'étude approfondie du canal de propagation pour différentes applications comme le transport, la santé et l'implémentation matérielle.

4.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé et comparé plusieurs configurations hybrides. Dans un premier temps nous avons testé les performances d'un système 64x16 MIMO avec différents nombres de chaînes RF. Puis nous avons simulé et analysé l'efficacité spectrale de nos différents choix d'architecture avec et sans le multi-flux et nous avons aussi donné une comparaison entre les deux algorithmes utilisés, le HBPS et le QSHB. En fin de ce chapitre nous avons présenté notre travail d'optimisation et le tracé de la fonction coût.

A partir des résultats de simulation nous pouvons dire que l'architecture hybride Beamforming est un bon choix pour les systèmes à ondes millimétriques car, malgré la réduction de la complexité avec l'utilisation de moins de chaînes radiofréquence, cette architecture offre une performance proche des architectures Beamforming entièrement numérique.

Nous pouvons aussi conclure qu'il existe plusieurs manières pour permettre aux systèmes à ondes millimétriques de fonctionner avec une complexité réduite.

Conclusion générale

Le but de ce travail présenté dans ce projet de fin d'étude est l'étude et l'analyse de l'architecture Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G. Il traite la problématique suivante : comment réduire la complexité des systèmes MIMO Beamforming pour permettre l'utilisation du spectre de fréquences présentes dans la bande millimétrique ?

Nous avons structuré notre mémoire en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons mené une étude sur la cinquième génération des réseaux cellulaires et les technologies utilisées par cette génération avec les nouvelles techniques adoptées. Nous avons aussi abordé dans ce chapitre l'architecture révolutionnaire basée sur le Cloud computing qui différencie la 5G des générations précédentes.

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.

Le deuxième chapitre répond à la question suivante : pourquoi la 5G utilise les ondes millimétriques ? nous avons répondu à cette question en commençant par une définition des ondes millimétriques puis, nous avons traité le problème de l'encombrement du spectre sub-6 GHz, qui est l'une des raisons majeures qui ont conduit la 5G à la recherche de nouvelle bande de fréquences. Nous avons par la suite étudié les différents aspects de la propagation des ondes millimétriques et leurs avantages. En fin de ce chapitre, nous avons abordé le problème de l'estimation de canal pour les mmWaves.

Dans le troisième chapitre, nous avons identifié les différentes architectures des systèmes MIMO-Beamforming en commençant par les techniques MIMO avec leurs différentes caractéristiques et avantages d'utilisation. Par la suite, nous avons présenté le système MIMO Massif multi-utilisateur et le Beamforming et ces différents aspects basés sur les antennes intelligentes, ce dernier permet la détection de l'angle d'arrivée et la formation du diagramme de rayonnement en direction du récepteur et enfin, nous avons étudié les choix des architectures à complexité réduite une clé dans les communications mmWaves.

Dans le quatrième chapitre, en utilisant l'outil Simulink de MATLAB, un environnement

interactif pour le développement des plateformes, nous avons simulé les performances d'un transceiver hybride avec plusieurs combinaisons en variant le nombre des chaînes RF. Ensuite, une analyse des performances a été réalisée en évaluant le taux d'erreur binaire BER en fonction du rapport signal sur bruit SNR.

Enfin, nous avons clôturé ce projet de fin d'étude par un travail d'optimisation présenté dans la fin du quatrième chapitre. Nous avons essayé à travers un programme MATLAB-Simulink de chercher la meilleure configuration hybride pour le meilleur coût en prenant en compte plusieurs paramètres et algorithmes.

Bibliographie

- [1] <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g> 06/09/2020. 2020.
- [2] Ian F AKYILDIZ, Shuai NIE, Shih-Chun LIN et Manoj CHANDRASEKARAN : 5g road-map : 10 key enabling technologies. *Computer Networks*, 106:17–48, 2016.
- [3] Ana Vázquez ALEJOS, Manuel GarcÍa SANCHEZ et IÑigo CUINAS : Measurement and analysis of propagation mechanisms at 40 ghz : Viability of site shielding forced by obstacles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(6):3369–3380, 2008.
- [4] Ahmed ALKHATEEB, Omar EL AYACH, Geert LEUS et Robert W HEATH : Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 8(5):831–846, 2014.
- [5] Ahmed ALKHATEEB, Geert LEUS et Robert W HEATH : Limited feedback hybrid precoding for multi-user millimeter wave systems. *IEEE transactions on wireless communications*, 14(11):6481–6494, 2015.
- [6] Ahmed ALKHATEEB, Jianhua MO, Nuria GONZALEZ-PRELCIC et Robert W HEATH : Mimo precoding and combining solutions for millimeter-wave systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(12):122–131, 2014.
- [7] Christopher Robert ANDERSON et Theodore S RAPPAPORT : In-building wideband partition loss measurements at 2.5 and 60 ghz. *IEEE transactions on wireless communications*, 3(3):922–928, 2004.
- [8] Jeffrey G ANDREWS, Xinchun ZHANG, Gregory D DURGIN et Abhishek K GUPTA : Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification? *IEEE Communications Magazine*, 54(10):184–190, 2016.
- [9] Emil BJÖRNSON, Jakob HOYDIS et Luca SANGUINETTI : Massive mimo networks : Spectral, energy, and hardware efficiency. *Foundations and Trends in Signal Processing*, 11(3-4):154–655, 2017.
- [10] Emil BJORNSON, Liesbet Van der PERRE, Stefano BUZZI et Erik G LARSSON : Massive mimo in sub-6 ghz and mmwave : Physical, practical, and use-case differences. *IEEE Wireless Communications*, 26(2):100–108, 2019.
- [11] Jaco du PREEZ et Saurabh SINHA : Introduction to the world of millimeter-wave systems. In *Millimeter-Wave Antennas : Configurations and Applications*, pages 1–18. Springer, 2016.

- [12] Omar EL AYACH, Sridhar RAJAGOPAL, Shadi ABU-SURRA, Zhouyue PI et Robert W HEATH : Spatially sparse precoding in millimeter wave mimo systems. *IEEE transactions on wireless communications*, 13(3):1499–1513, 2014.
- [13] Darrel T EMERSON : The work of jagadis chandra bose : 100 years of millimeter-wave research. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 45(12):2267–2273, 1997.
- [14] Global Mobile Data Traffic FORECAST : Cisco visual networking index : global mobile data traffic forecast update, 2017–2022. *Update*, 2017:2022, 2019.
- [15] Amitava GHOSH, Timothy A THOMAS, Mark C CUDAK, Rapeepat RATASUK, Prakash MOORUT, Frederick W VOOK, Theodore S RAPPAPORT, George R MACCARTNEY, Shu SUN et Shuai NIE : Millimeter-wave enhanced local area systems : A high-data-rate approach for future wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6):1152–1163, 2014.
- [16] Salah Eddine HAJRI : *L ?mélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs*. Thèse de doctorat, 2018.
- [17] Kais HASSAN, Mohammad MASARRA, Marie ZWINGELSTEIN et Iyad DAYOUB : Channel estimation techniques for millimeter-wave communication systems : Achievements and challenges. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020.
- [18] Robert W HEATH, Nuria GONZALEZ-PRELCIC, Sundeep RANGAN, Wonil ROH et Akbar M SAYEED : An overview of signal processing techniques for millimeter wave mimo systems. *IEEE journal of selected topics in signal processing*, 10(3):436–453, 2016.
- [19] Matthew Luke KOKSHOORN : Channel estimation and beam training for millimeter wave mobile networks : Point-to-point, multi-user, and multi-cell. 2018.
- [20] Matthew Luke KOKSHOORN : Channel estimation and beam training for millimeter wave mobile networks : Point-to-point, multi-user, and multi-cell. 2018.
- [21] Roi MÉNDEZ-RIAL, Cristian RUSU, Ahmed ALKHATEEB, Nuria GONZÁLEZ-PRELCIC et Robert W HEATH : Channel estimation and hybrid combining for mmwave : Phase shifters or switches? *In 2015 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, pages 90–97. IEEE, 2015.
- [22] Andreas F MOLISCH, Vishnu V RATNAM, Shengqian HAN, Zheda LI, Sinh Le Hong NGUYEN, Linsheng LI et Katsuyuki HANEDA : Hybrid beamforming for massive mimo : A survey. *IEEE Communications Magazine*, 55(9):134–141, 2017.
- [23] Zhouyue PI, Junil CHOI et Robert HEATH : Millimeter-wave gigabit broadband evolution toward 5g : Fixed access and backhaul. *IEEE Communications Magazine*, 54(4):138–144, 2016.
- [24] Nuttapol PRAYONGPUN : *Modélisation et étude de la capacité du canal pour un système multi-antennes avancé exploitant la diversité de polarisation*. Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2009.
- [25] QUALCOMM : Making 5g nr a reality : leading the technology inventions for a unified, more capable 5g air interface. *White paper*, 2016.

- [26] Theodore S RAPPAPORT, James N MURDOCK et Felix GUTIERREZ : State of the art in 60-ghz integrated circuits and systems for wireless communications. *Proceedings of the IEEE*, 99(8):1390–1436, 2011.
- [27] Ashish Kumar SARANGI et Amlan DATTA : Capacity comparison of siso, simo, miso & mimo systems. *In 2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, pages 798–801. IEEE, 2018.
- [28] Yong ZENG et Rui ZHANG : Millimeter wave mimo with lens antenna array : A new path division multiplexing paradigm. *IEEE Transactions on Communications*, 64(4):1557–1571, 2016.

