

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد القادر بن صالح
جامعة تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par : SEDDAR hidayat et MEGHRAOUI zoulikha chahinez

Sujet

Conception de faisceau hybride pour les systèmes MIMO massif-OFDM multi-utilisateurs

Soutenu publiquement, le 19/06/2024, devant le jury composé de :

Mr MERZOUGUI Rachid	Prof	Université de Tlemcen	Président
Mme BOUCHENACK Khalladi Yasmina	MAB	Université de Tlemcen	Examineur
Mr BAHRI Sidi Mohammed	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2023 /2024

Remerciements

*Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce projet. En premier lieu, nous remercions **ALLAH** pour sa grâce et sa miséricorde qui nous ont permis d'achever ce travail dans les meilleures conditions.*

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos parents, dont le soutien et l'encouragement ont été inestimables tout au long de cette aventure.

*Nous tenons à remercier chaleureusement **Mr. BAHRI Sidi Mohammed**, notre Encadrant, pour sa guidance et son accompagnement précieux tout au long de ce projet.*

*Nous sommes également reconnaissants envers **Mr. MERZOUGUI Rachid** et **Madame Bouchenack Khalladi Yasmina**, membres de notre jury, pour leur temps, leur expertise et leur contribution à l'évaluation de notre travail.*

Enfin, nous exprimons notre gratitude à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien et leurs encouragements, de près ou de loin, tout au long de cette expérience.

Merci.

Dédicace

Chère ma famille, la famille **MEGHRAOUI** et **MEDJADJI**

« A mon père Tu es mon pilier, mon héros, ma source d'inspiration. Ton amour et ton soutien indéfectibles m'ont permis de devenir qui je suis .Tes précieux enseignements et ton exemple guident chacun de mes pas. Je ne te remercierai jamais assez pour tout ce que tu m'apportes .Infiniment reconnaissante et fière d'être ta fille, je t'aime plus que tout au monde»

« A ma mère, Tu es la lumière qui éclaire chacun de mes jours, la force qui me guide à travers les défis, et la tendresse qui enveloppe mon cœur de bonheur. Chaque instant passé avec toi est un trésor précieux, un doux mélange de souvenirs et de rires, de tendresse et de complicité.

Ta présence dans ma vie est un cadeau inestimable, une source infinie d'amour et de réconfort. Merci pour tout ce que tu es, pour tout ce que tu as fait, et pour tout ce que tu représentes pour moi»

اسأل الله ان يشفيكم

*A mes chers frères. **IMEN** et **ABDELDJALIL** Vous êtes les piliers de ma vie, les complices de mes souvenirs, et les gardiens de mon bonheur. Chaque moment partagé avec vous est une source d'inspiration, une étreinte chaleureuse de fraternité et de complicité. Votre soutien inconditionnel, votre humour contagieux et votre amour sincère font de notre lien fraternel un trésor inestimable. Merci pour vos rires partagés, vos conseils avisés et vos épaules sur lesquelles je peux toujours m'appuyer. Je vous aime au-delà des mots, au-delà des frontières du temps et de l'espace. Vous êtes mes anges gardiens, mes amis pour la vie, mes frères bien-aimés. »*

*« A mon binôme « **HIDAYAT** » Notre complicité a fait de nous un duo solide et complémentaire. Travailler avec toi est un bonheur, nos réussites sont le fruit de notre synergie. Au-delà du travail, une belle amitié est née. Ta présence et ton soutien sont précieux. Je suis chanceuse de t'avoir comme binôme et ami(e). Tu m'inspires et me pousses à me dépasser. Merci pour tout ce que tu m'apportes. Je serai toujours là pour toi. Avec toute mon affection et ma gratitude, »*

CHAHINEZ

Dédicace

*Chère ma famille, la famille **SEDDAR** et **ZENAGUI***

« À mon cher père, qui a été ma lumière dans les moments sombres, mon roc dans les tempêtes, mon soutien inconditionnel et mon inspiration quotidienne. Son sourire fait mon bonheur et sa sagesse me guide à chaque pas. Ce projet de fin d'études est un humble témoignage de mon amour et de ma gratitude pour le rôle essentiel qu'il a joué dans ma vie, et je sais que tu es fier de moi ».

« À ma chère maman, Ton amour inconditionnel a été mon refuge dans les moments de doute, et ta force infinie m'a toujours incité à persévérer. Tu es la source de lumière qui a éclairé mon chemin, Je te dédie ce projet de fin d'études en reconnaissance de tout ce que tu as sacrifié pour moi, de tes encouragements et de ton soutien incessants, Avec tout mon amour et ma gratitude éternelle ».

« À ma chère tante, Toi qui as été plus qu'une tante, mais une seconde mère, tu as été ma boussole dans les tempêtes et ma lumière dans l'obscurité. Tes mots doux ont séché mes larmes et ta présence réconfortante a toujours été mon havre de paix, Ce modeste projet de fin d'études est dédié à toi, en reconnaissance de ton dévouement infini, de ton amour inconditionnel et de ton soutien sans faille. Que ces quelques mots témoignent de l'amour et de la gratitude éternelle que je porte dans mon cœur pour toi ».

« A mon grand père Ahmed je t'aime que dieux protège»

« À mes chers frères et sœurs, « Oussama», «Sabrina», «Abd illah», «Khairuddin» et «Hussam», À travers les hauts et les bas de la vie, vous avez été mes compagnons constants, mes alliés inébranlables et mes amis les plus proches, Merci pour votre soutien indéfectible, votre amour inconditionnel et votre présence réconfortante. Puissiez-vous toujours être mes piliers de force Avec tout mon amour et ma gratitude ».

« A mon binôme « Chahinez », Nous avons partagé tant de temps ensemble, vécu des moments inoubliables et traversé de nombreuses épreuves. Ta présence à mes côtés a été précieuse et ton soutien indéfectible m'a porté à travers chaque défi. Merci pour ton encouragement constant et pour avoir été cette personne spéciale sur qui je pouvais toujours compter. Travailler avec toi a été un véritable privilège, Avec toute ma gratitude ».

*« À mes chères amies **ASMA**, **abde razak**, **MERIEM**, **ISRAA**, **SALAH**, **Mustapha**, et toutes celles qui ont été à mes côtés tout au long de cette aventure. Vous êtes des amies extraordinaires, toujours là pour moi dans les bons moments comme dans les mauvais. Je suis honoré de vous avoir comme amies, et je sais que nous allons continuer à faire des choses incroyables ensemble. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi. »*

HIDAYAT

Résumé

L'étude se concentre sur l'évaluation d'un système à formation de faisceaux hybride pour les MIMO massifs-OFDM multi-utilisateurs, avec comme objectif principal l'optimisation des performances du système. En utilisant le logiciel MATLAB, l'analyse et la simulation du système visent à améliorer la fiabilité et l'efficacité spectrale de la technologie 5G et d'augmenter le rapport signal/bruit des communications sans fil en utilisant des réseaux d'antennes. L'accent est mis sur l'optimisation des précodeurs et des combineurs analogiques et numériques à l'aide de l'algorithme génétique, dans le but de simplifier le système et de réduire les coûts de mise en œuvre en optimisant le nombre d'antennes, le nombre de chaînes RF et le nombre de flux de données.

Les mots-clés : 5G, Beamforming, Précodage hybride, mmWave, MIMO massif, OFDM, Optimisation, Algorithme génétique.

Abstract

The study focuses on the evaluation of hybrid beams for multi-user massive MIMO-OFDM systems, with the main objective of optimizing system performance. Using MATLAB software, the system analysis and simulation aims to improve the reliability and spectral efficiency of 5G technology and increase the signal-to-noise ratio of wireless communications using antenna arrays. The focus is on optimizing analog and digital precoders and combiners using the genetic algorithm, with the aim of simplifying the system and reducing implementation costs by optimizing the number of antennas, the number of RF channels and the number of data streams.

Keywords: 5G, Beamforming, Hybrid precoding, mmWave, Massive MIMO, OFDM, Optimization, Genetic algorithm

ملخص

تركز الدراسة على تقييم نظام تشكيل الحزم الهجين لـ OFDM MIMO الضخم متعدد المستخدمين، بهدف رئيسي هو تحسين أداء النظام. باستخدام برنامج MATLAB، يهدف تحليل النظام والمحاكاة إلى تحسين الموثوقية والكفاءة الطيفية لتقنية 5G وزيادة نسبة الإشارة إلى الضوضاء للاتصالات اللاسلكية باستخدام صفائف الهوائيات. ينصب التركيز على تحسين أجهزة التشفير والمجمعات التناظرية والرقمية باستخدام الخوارزمية الجينية، بهدف تبسيط النظام وتقليل تكاليف التنفيذ من خلال تحسين عدد الهوائيات وعدد قنوات الترددات اللاسلكية وعدد تدفقات البيانات.

الكلمات الدالة: 5G، تشكيل الحزم، التشفير المسبق الهجين، mmWave، MIMO الضخم، OFDM التحسين، الخوارزمية الجينية.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	I
DEDICACE	II
RESUME.....	IV
ABSTRACT.....	IV
ملخص.....	IV
TABLE DES MATIERES.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES ABREVIATIONS.....	XI
INTRODUCTION GENERALE	1

Chapitre I : Techniques de formation de faisceaux

1.1	Introduction.....	3
1.2	Les Techniques de réseaux 5G.....	3
1.2.1	Ondes millimétriques	3
1.2.2	Full-Duplex	4
1.2.3	petites cellules.....	5
1.2.4	MIMO massif :	5
1.2.5	Formation de faisceaux :	6
1.3	Formation de faisceaux :	6
1.3.1	Définition de formation de faisceaux :	6
1.3.2	Principe de la formation de faisceaux:	7
1.3.3	Avantages et limites de techniques de formation de faisceaux	8
1.4	Techniques de formation de faisceaux.....	9
1.4.1	Technique de formation de faisceaux analogique :	9
1.4.2	Technique de formation de faisceaux numérique:.....	11
1.5	Avantages et inconvénients de la formation de faisceaux analogique et numérique :12	
1.6	Classification des techniques de formation de faisceaux:.....	12
1.6.1	Formation de faisceau conventionnelle (commutée) :.....	13
1.6.2	Formation de faisceau adaptative	13
1.7	Conclusion	14

Chapitre II : Techniques de formation de faisceaux hybride

II.1	Introduction	16
II.2	Définition de formation de faisceaux hybride	16

II.3 Architecture générale de la formation de faisceaux hybride	17
II.4 La méthodologie proposée	17
II.5 structure de formation de faisceau hybride	19
II.5.1 structure entièrement connectée	19
II.5.2 structure partiellement connectée	20
II.6 Comparaison des architectures de formation de faisceaux hybrides entièrement connectées et partiellement connectées	21
II.7 Avantages fondamentaux des technique HBF	22
II.8 Conclusion.....	22

Chapitre III : Résultats et simulation

III. 1 .Introduction.....	24
III.2 Système MIMO massive beamforming hybride OFDM.....	24
III.3.1 L’algorithme génétique	27
III.3.2 Optimisation par Algorithme Génétique	27
III.3.3 Codage.....	29
III.3.4 Fonction de performance.....	30
III.3.5 Reproduction (Sélection Des Parents).....	31
III.3.6 Croisement (crossover).....	31
III.3.7 Mutation	32
III.3.8 Conception de formateur de faisceaux hybride pour les systèmes MIMO à grande échelle et à utilisateur unique	32
III.4 Notion de base sur langage utilisé (Matlab).....	38
III.5 Simulations et discussion des résultats	38
III.5.1 Impact de la variation du nombre d’antennes à l’émission et à la réception.....	38
III.5.2.1 L’efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_t et N_r	39
III.5.2.2 Le taux d’erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_t et N_r :	40
III.5.3.Impact de la variation du nombre de chaines RF à l’émission et à la réception : .	41
III .5.3.1: L’efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit.....	41
SNR avec la variation de N_{rf}	41
III .5.3.2: Le taux d’erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_{rf} :	41
III .5.3.3: L’efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_s :	42
III .5.3.4: Le taux d’erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_{rf} et N_s :	44
III.6 Conclusion	44
Conclusion Générale.....	59
Bibliographie	61

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : technique réseaux 5G.	3
Figure I.2 : Spectre de fréquence des ondes millimétrique.	4
Figure I.3 : Présentation des différentes figures de répartition.	5
Figure I.4 : MIMO Massive technologie	6
Figure I.5 : Principe de la formation de faisceaux.	7
Figure I.6 : la formation de faisceau analogique.	10
Figure I.7 : Formation de faisceaux analogique en émission.	10
Figure I.8 : Formation de faisceaux analogique en reception	11
Figure I.9 : formation de faisceaux numérique.	12
Figure I.10 : Système à faisceaux commutés	13
Figure I.11 : stratégie adaptative.	14
Figure II.1 : la formation de faisceau hybride	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.2 : Architecture d'un système de formation de faisceaux hybrides	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.3 : 3 Schéma de principe des étapes de précodage au niveau de l'émetteur en ondes millimétriques. Système de formation de faisceau hybride MU-MIMO.	18
Figure II.4 : Schéma de principe des étapes de précodage au niveau du récepteur en ondes millimétriques Système de formation de faisceau hybride MU-MIMO.	19
Figure II.5 : Architecture hybride entièrement connectée	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.6 : Architecture hybride partiellement connectée	Erreur ! Signet non défini.
Figure III.1 : . Structure de l'émetteur-récepteur HBF dans un système MIMO OFDM à ondes millimétriques	25
Figure III.2 : Eléments d'une population.	28
Figure III.3 : Organigramme général de l'Algorithme Génétique.	29

Figure III.4 : Chromosome codé en binaire.	30
Figure III.5 : l'opérateur génétique (croisement).....	32
Figure III.6 : L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_t et N_r pour la technique beamforming hybride.....	39
Figure III.7 : Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_r et N_t pour la technique beamforming hybride.....	32
Figure III.8 : L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_{rf} pour la technique beamforming hybrid.....	41
Figure III.9 : Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_{rf} pour la technique beamforming hybride	42
Figure III.10 : L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_s et N_{rf} pour la technique beamforming hybrid Erreur ! Signet non défini.	43
Figure III.11 : Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_{rf} et N_s pour la technique beamforming hybride.....	44

LISTE DES ABRÉVIATIONS

4G	Quatrième Génération
5G	Cinquième génération
BER	Taux d'erreur binaire
BS	Base Station.
CSI	instantanées sur l'état du canal
DAC	Convertisseur Numérique –Analogique
FD	Flu duplex
FDD	duplex par répartition en fréquence
FBB	Fenêtre de Blackman-Bolten
FRF	Fréquence radio
HBF	Formation de faisceaux hybride
LMS	moindres caree moyens
MATLAB	Laboratoire MATrix
MIMO	Multiple Input Multiple Output.
MMIMO	Massive- Multiple Input Multiple Output
MmWave	Millimètre Wave.
MU-Massive MIMO	Multi User massive MIMO.
NRF	Nombres de chains RF
OFDM	Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence
RLS	moindres carees recusifs
RF	Radio Frequence
RX	Reception
SNR	Signal-to-Noise Ratio.
SE	Efficacité spectral
TX	Transmission

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le domaine des communications sans fil, les systèmes de communications à multiples entrées et multiples sorties (MIMO) massifs ont émergé comme une technologie révolutionnaire, permettant une augmentation significative de la capacité et de l'efficacité spectrale. Couplés avec la modulation par multiplexage orthogonal de fréquence (OFDM), ces systèmes promettent d'atteindre des performances inégalées dans les environnements multi-utilisateurs, répondant ainsi aux exigences croissantes en termes de débit de données et de fiabilité des réseaux de communication modernes.

La conception de faisceau hybride, combinant les avantages du traitement numérique et analogique, se présente comme une solution efficace pour la mise en œuvre de ces systèmes MIMO massifs-OFDM. Cette approche permet non seulement de réduire la complexité matérielle et la consommation énergétique, mais aussi d'optimiser les performances globales du système en adaptant dynamiquement les faisceaux aux conditions de propagation du canal.

Notre objectif principal consiste à améliorer les performances et l'efficacité du système MIMO-OFDM hybride beamforming en optimisant les précodeurs et combinateurs analogiques et numériques à l'aide de l'algorithme génétique. Cette démarche est orientée vers la simplification de l'architecture du système et la réduction des coûts de mise en œuvre. Nous nous concentrons particulièrement sur l'optimisation du nombre d'antennes, de chaînes RF et de flux de données pour atteindre ces objectifs.

Ce mémoire est divisé en trois parties distinctes :

Le premier chapitre aborde d'abord les bases théoriques en introduisant les techniques de formation de faisceaux dans le contexte des réseaux 5G. Il explore les différentes technologies clés des réseaux 5G, telles que les ondes millimétriques, le full-duplex, les petites cellules, et le MIMO massif, En soulignant l'importance de la formation de faisceaux dans ces contextes. En outre, il présente une classification des techniques de formation de faisceaux analogique et numérique, ainsi qu'une discussion sur leurs avantages et inconvénients respectifs.

Le deuxième chapitre est consacré aux techniques de formation de faisceaux hybrides, une approche qui combine à la fois des techniques analogiques et numériques pour exploiter les avantages de chaque méthode. Il définit la formation de faisceaux hybride, décrit son architecture générale, et examine en détail le précodage hybride. De plus, il compare les avantages et inconvénients des structures de formation de

Introduction Générale

faisceaux hybrides entièrement connectées et partiellement connectées, offrant ainsi une compréhension approfondie de cette technique émergente.

Dans le troisième chapitre, Nous présentons les résultats et les simulations obtenus dans le cadre de ce travail. Il détaille le système MIMO-OFDM hybride beamforming, le modèle du système, ainsi que les principes et les méthodologies utilisés pour les simulations. Enfin, il discute des résultats des simulations, notamment l'impact de la variation du nombre d'antennes, du nombre de chaînes RF, et du nombre de flux de données sur l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire.

CHAPITRE I : Techniques de formation de faisceaux

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous passons en revue les techniques traditionnelles et émergentes de formation de faisceaux, en détaillant leurs avantages et leurs limites. Cette dernière, connue sous le nom de "Beamforming", est considérée comme une composante cruciale des réseaux de communication mobiles modernes, notamment dans le contexte de la norme 5G. Nous débutons par une présentation des technologies de réseaux 5G, telles que les ondes millimétriques, le Full-Duplex, les petites cellules et le MIMO massif, avant de nous concentrer sur la formation de faisceaux. Cette technique trouve des applications dans divers domaines tels que la téléphonie cellulaire, la radioastronomie, la biomédecine, la transmission sans fil, le sonar et la sismologie. [1]

1.2 Les Techniques de réseaux 5G

La 5G représente une avancée majeure dans l'évolution des systèmes de communication cellulaire, avec des attentes extrêmement élevées pour répondre aux besoins croissants en termes de nombre d'utilisateurs, de bande passante et de trafic réseau mobile. Les accords établis par des organisations internationales de normalisation ont défini les exigences clés de la 5G, en mettant l'accent sur la prise en charge de nouvelles applications demandant des bandes passantes plus larges.[2]

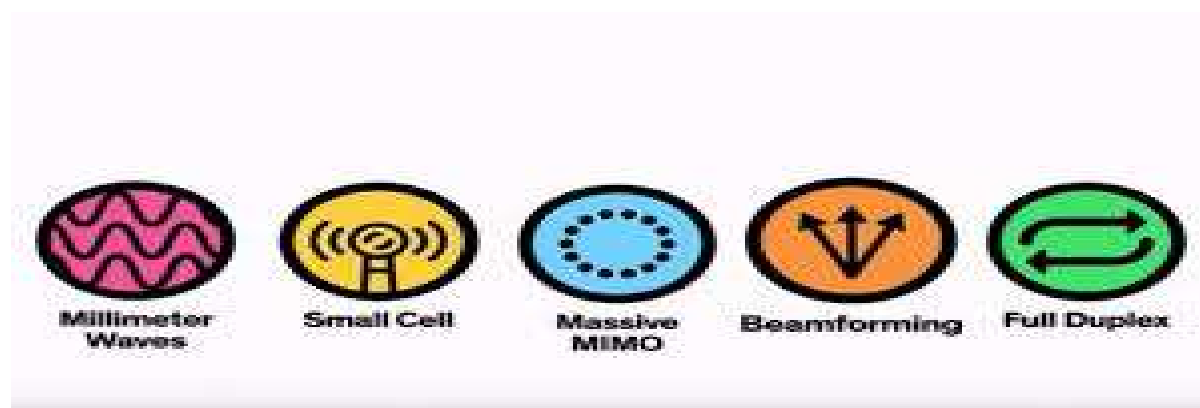


Figure 1.1 : technique réseaux 5G [3].

1.2.1 Ondes millimétriques

Les ondes millimétriques offrent des débits très élevés, ce qui les rend intéressantes pour la technologie 5G. Toutefois, en raison des contraintes de propagation, elles sont utilisées en complément des fréquences

inférieures à 6 GHz afin d'assurer une couverture continue. [4] . Les antennes jouent un rôle crucial dans les systèmes à ondes millimétriques, car les performances des dispositifs actifs augmentent avec l'augmentation de la fréquence. [5][6]

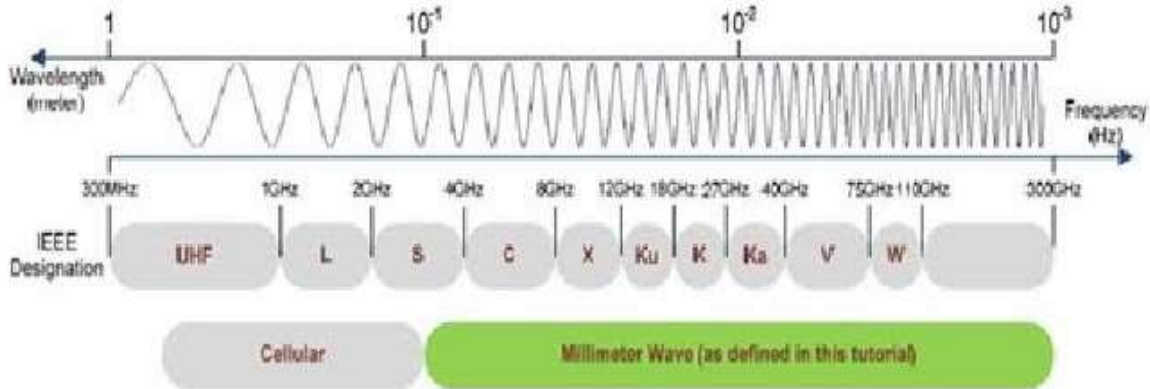


Figure I.2 : Spectre de fréquence des ondes millimétriques [3]

1.2.2 Full-Duplex

Full-duplex (FD) est une technologie sans fil qui permet à une transmission radio d'émettre et de recevoir en même temps sur la même bande de fréquences. En raison de ses bénéfices, elle est perçue comme l'une des technologies envisageables pour les systèmes de communication sans fil de la cinquième génération (5G) et au-delà, en raison de ses avantages, tels que le potentiel de doublement de la capacité et l'amélioration de l'efficacité. Toutefois, l'un des défis majeurs de la technologie FD réside dans la réduction des interférences.

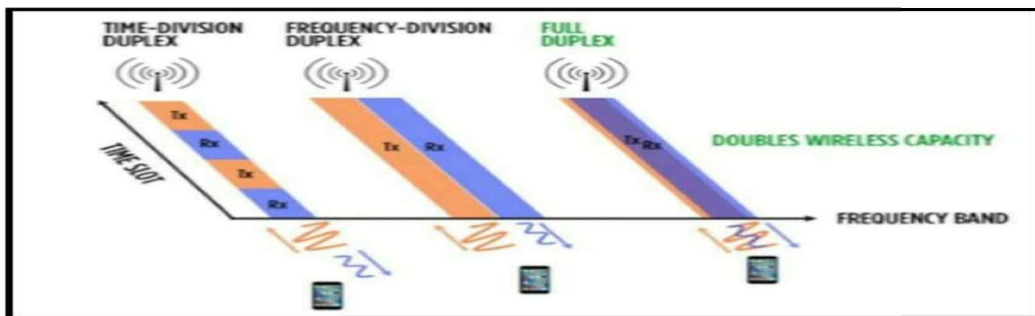


Figure I.3 : Présentation des différentes figures de répartition [7].

1.2.3 Petites cellules :

Les petites cellules, également connues sous le nom de "small cells" en anglais, sont des dispositifs d'accès à un réseau de télécommunications mobiles qui fonctionnent à courte portée et avec une faible puissance d'émission. Cette technologie, conçue pour les réseaux 5G, implique le déploiement d'un grand nombre de stations de base qui couvrent des zones restreintes, y compris des espaces intérieurs tels que les gares ou les centres commerciaux.. Ces caractéristiques font des petites cellules une solution attrayante pour la 5G et pour améliorer le haut débit mobile, notamment dans les zones urbaines densément peuplées. Cependant, leur utilité ne se limite pas à ces zones, car elles peuvent également bénéficier de leur déploiement dans d'autres environnements. [8]

1.2.4 MIMO massif :

Le MIMO massif est une avancée de la technologie MIMO, très répandue à l'époque de la 4G, et ne constitue pas une nouveauté. Contrairement au MIMO 4G classique, limité à un maximum de 8 canaux d'antennes, le MIMO massif en 5G peut gérer 16, 32 voire 64 canaux. Il joue un rôle clé dans la communication 5G, permettant aux systèmes multi-cellulaires d'équiper les réseaux de centaines d'antennes par station de base (BS), capables de desservir plusieurs terminaux avec des ressources temporelles et fréquentielles identiques.

Avec leur capacité à utiliser simultanément des centaines d'antennes, ils offrent une augmentation exponentielle du débit et une efficacité spectrale sans précédent. Cette technologie est essentielle pour répondre à la demande croissante de données dans notre monde connecté, permettant une transmission de données plus rapide et plus fiable. De plus, les systèmes MIMO massifs améliorent la qualité du signal et réduisent les interférences, ce qui est crucial pour les applications nécessitant une connexion ininterrompue et stable. Enfin, ils jouent un rôle clé dans le déploiement des réseaux 5G et futurs, promettant une révolution dans l'Internet des objets et les communications mobiles. [9]



Figure I.4 : MIMO Massive technologie [9]

I.2.5 Formation de faisceaux :

Les systèmes de formation de faisceaux jouent un rôle essentiel dans les télécommunications modernes, en particulier dans les technologies sans fil, en permettant une transmission de signal plus efficace et une réception de meilleure qualité. Ces systèmes tirent parti d'antennes en réseau pour concentrer l'énergie du signal dans des directions spécifiques, améliorant ainsi les performances globales des réseaux cellulaires et des communications par satellite. Cette technique, appelée "beamforming" ou formation de faisceaux, repose sur la coordination des phases et des amplitudes des signaux émis par chaque élément d'antenne. En travaillant ensemble, ces antennes peuvent former un faisceau dirigé vers un point spécifique ou une direction, renforçant le signal dans cette direction tout en le diminuant dans les autres. [10]

1.3 Formation de faisceaux :

1.3.1 Définition de formation de faisceaux :

La formation de faisceaux est une approche utilisée dans les réseaux de capteurs pour ajuster la direction d'émission ou de réception des signaux, ce qui altère le schéma de rayonnement. En matière de transmission, cette méthode permet de concentrer l'énergie dans une direction spécifique en modulant la phase et l'amplitude des signaux émis par chaque émetteur. Cela engendre des phénomènes d'interférences, tant constructives que destructives, dans la propagation des ondes.

En ce qui concerne la réception, la formation de faisceaux agit comme un filtre spatial, augmentant la capacité du récepteur à détecter le signal dans la direction souhaitée tout en réduisant la sensibilité aux

interférences et au bruit provenant d'autres directions. Cela se fait en combinant de manière Optimiser la fusion des informations reçues depuis diverses antennes. en utilisant les les paramètres appropriés du filtre spatial. En somme, la formation de faisceaux permet de diriger et de concentrer les signaux dans des directions spécifiques, améliorant ainsi l'efficacité et la qualité des communications sans fil. [11]

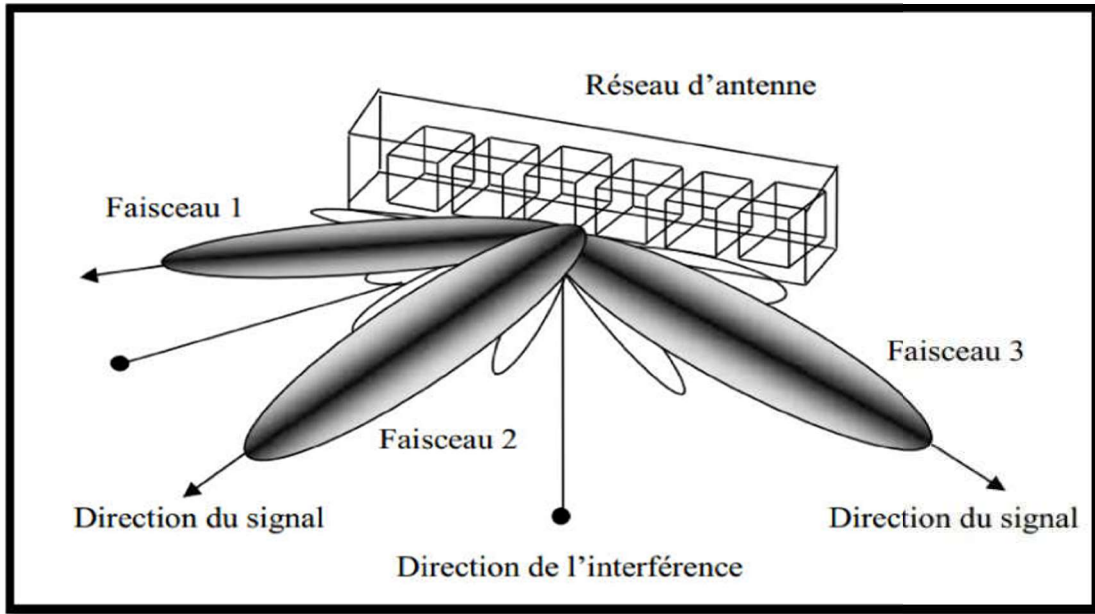


Figure I.5 : Principe de la formation de faisceaux [12]

1.3.2 Principe de la formation de faisceaux :

Le beamforming, aussi connu sous le nom de filtrage spatial , C'est une méthode de traitement de signal couramment employée dans les réseaux d'antennes et de capteurs pour diriger de manière directive l'émission ou la réception de signaux. Voici les principes fondamentaux du beamforming [13]

1. **Contrôle des phases et des amplitudes** : Le beamforming implique la manipulation des phases et des amplitudes relatives des signaux émis par chaque élément d'antenne. En ajustant ces paramètres, on crée un schéma de phénomènes d'addition et de soustraction d'ondes dans le front d'onde. [13]
2. **Émission directionnelle** : Du côté émetteur, le beamformer ajuste les signaux émis par chaque élément d'antenne pour renforcer le signal dans une direction spécifique tout en le réduisant dans les autres directions. [13]
3. **Réception optimisée** : Du côté récepteur, les informations provenant des différents capteurs sont combinées de manière à mettre en évidence le signal souhaité. Par exemple, dans le sonar, le beamforming permet l'envoi d'impulsions depuis chaque hydrophone avec un léger décalage dans le temps, de sorte que toutes les impulsions parviennent au navire simultanément, simulant ainsi l'effet d'une impulsion puissante provenant d'un seul hydrophone.[13]

1.3.3 Avantages et limites de techniques de formation de faisceaux

a. Avantages de la formation de faisceaux :

- i. Fournit une meilleure qualité de signal au récepteur, ce qui permet un transfert d'informations plus rapide et réduit les erreurs.
- ii. Permet de réduire ou d'éliminer la diffusion dans d'autres directions, aidant ainsi à diminuer les interférences pour les utilisateurs tentant de capter d'autres signaux.

b. Limites de la formation de faisceaux :

- i. Nécessite des ressources informatiques importantes, notamment en termes de temps et d'énergie pour les calculs, ce qui peut annuler ses avantages dans certains scénarios.
- ii. Les avantages de la formation de faisceaux diminuent à mesure qu'un récepteur s'éloigne d'un émetteur. [14]

1.4 Techniques de formation de faisceaux

Nous aborderons les différentes méthodes actuellement employées pour créer des faisceaux dans les antennes intelligentes. Il est nécessaire que ces faisceaux possèdent des lobes principaux dirigés vers les sources souhaitées et des lobes nuls dirigés vers les interférences. Nous aborderons d'abord les méthodes analogiques, puis les méthodes numériques. [15]

1.4.1 Technique de formation de faisceaux analogique :

La structure matérielle de base du beamforming analogique rend sa mise en œuvre simple. Cependant, cette technique présente des inconvénients tels qu'un faible gain d'antenne et une inefficacité. Elle est inefficace car seules les phases des signaux d'émission et de réception sont ajustées, sans contrôle sur leurs amplitudes. Bien que les niveaux d'émission puissent être régulés, les amplitudes ne peuvent pas l'être, ce qui limite son utilisation dans les systèmes de communication à ondes millimétriques et massive MIMO.

Le beamforming analogique, comme illustré dans la Figure 1.6, utilise une source RF commune partagée entre plusieurs éléments d'antenne. Le faisceau est dirigé en ajustant les déphaseurs analogiques le long du trajet RF. [16]

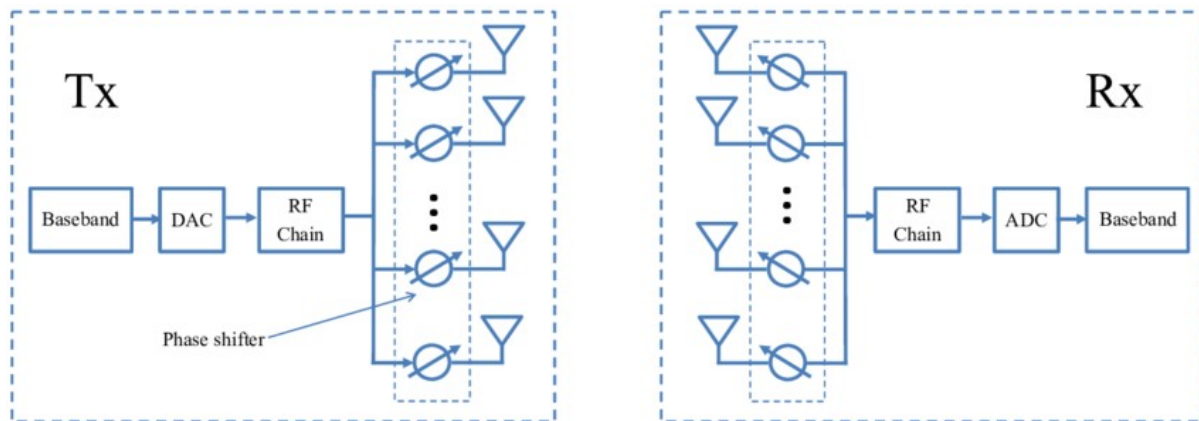


Figure 1.6 : la formation de faisceau analogique .[16]

1.4.1.1 Formation de faisceaux analogique en émission :

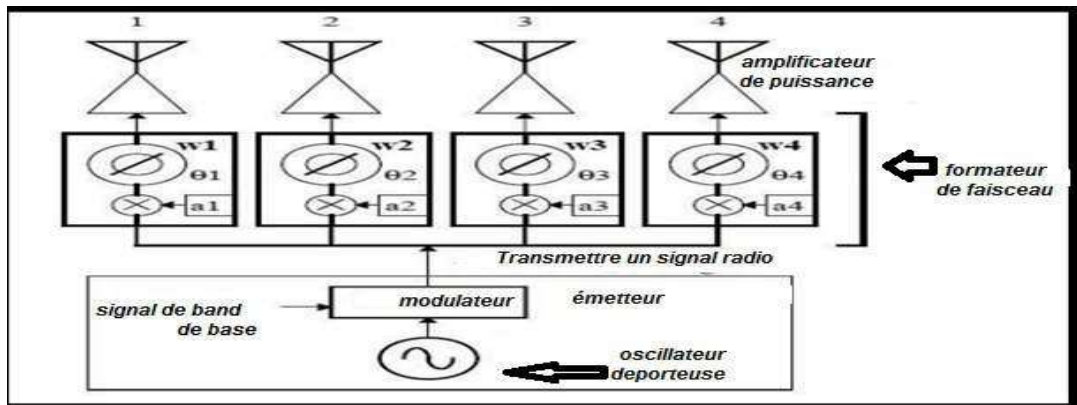


Figure 1.7 : Formation de faisceaux analogique en émission [17].

La Figure I.7 représente un émetteur de formation de faisceaux analogique. Initialement, le signal en bande de base à transmettre subit une modulation. Par la suite, il est divisé à l'aide d'un diviseur de puissance et parcourt le formateur de faisceaux. Ce dernier peut ajuster simultanément l'amplitude (a_k) des signaux dans chaque chemin menant à un ensemble d'antennes. La distribution de la puissance est conditionnée par le quantité d'antennes employées dans le réseau.

1.4.1.2 Formation de faisceaux analogique en réception :

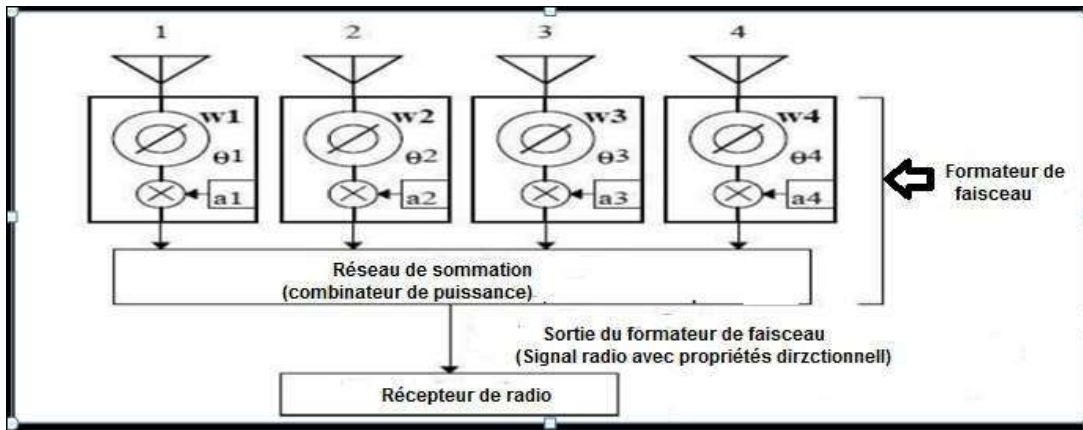


Figure 1.8 : formation de faisceaux analogique en réception [18].

Le Récepteur analogique à formation de faisceaux opère de la manière suivante : des poids complexes, incluant à la fois l'amplitude et la phase, sont appliqués au signal reçu par chaque antenne du réseau tel que représenté dans le schéma fonctionnel. Par la suite, ces signaux sont combinés en une sortie unique, fournissant ainsi le modèle nécessaire pour le réseau d'antennes.

$$W_k = a_k e^{j\sin(\theta k)}$$

$$W_k = a_k \cos(\theta k) + j \sin(\theta k)$$

W_k : représente le poids complexe de la k-ème antenne

a_k : représente l'amplitude du poids

θk : représente le déphasage du poids.

1.4.2 Technique de formation de faisceaux numérique :

La formation de faisceau numérique peut potentiellement prendre en charge un nombre de chaînes RF égal au nombre d'éléments d'antennes, offrant ainsi une plus grande flexibilité pour la transmission et la réception. En revanche, la formation de faisceau analogique est souvent restreinte à une seule voie RF, même avec un grand nombre d'antennes. En effectuant un précodage approprié dans la bande de base numérique, la flexibilité de transmission et de réception peut être améliorée, permettant l'utilisation de techniques avancées telles que le

MIMO à faisceaux multiples. Comparé à d'autres méthodes de formation de faisceaux, ces avantages se traduisent par des performances théoriques maximales. [19]

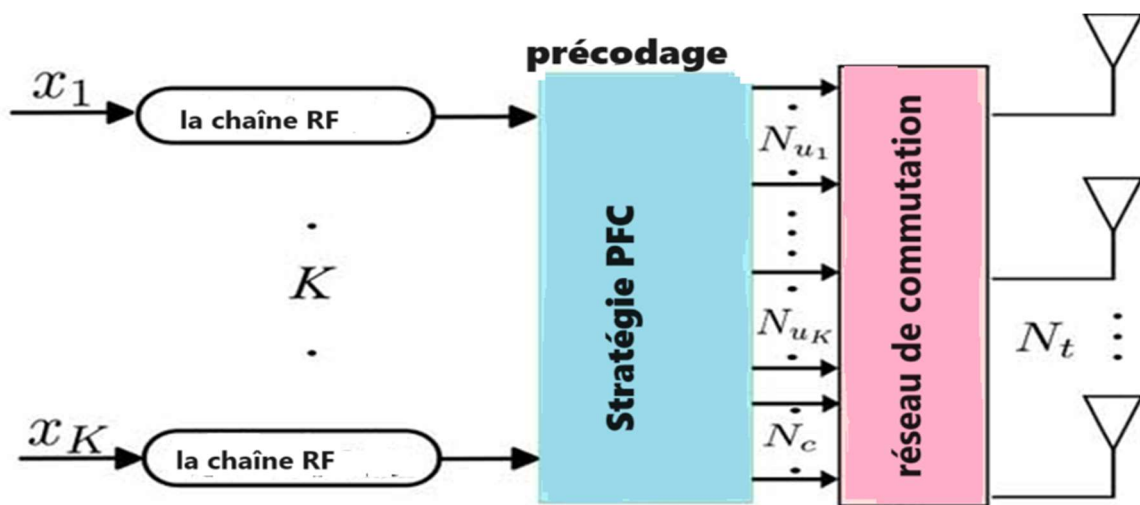


Figure 1.9: formation de faisceaux numérique [19].

Sur une large bande, le contrôle numérique de la chaîne RF permet d'optimiser les phases en fonction de la fréquence. Néanmoins, la formation de faisceau numérique n'est pas toujours idéale pour les applications 5G en pratique. Les exigences matérielles complexes et élevées peuvent augmenter considérablement le coût et la consommation d'énergie et compliquer l'intégration dans les appareils mobiles. La formation de faisceau numérique est plus appropriée pour les stations de base car les performances sont plus importantes que la mobilité. La formation de faisceaux numériques est essentielle au succès car elle peut permettre la transmission de plusieurs flux et desservir plusieurs utilisateurs simultanément [19]

1.5 Avantages et inconvénients de la formation de faisceaux analogique et numérique :

La formation de faisceaux, est une approche de traitement de signal mise en œuvre dans les réseaux d'antennes et de capteurs pour la transmission ou la réception orientée des signaux [19]. Examinons les avantages et inconvénients des deux principales approches : beamforming analogique et beamforming numérique.

Parmi les avantages de la formation de faisceaux analogique, on trouve un coût réduit et une faible latence, mais elle présente moins de flexibilité. En revanche, la formation de faisceaux numérique crée une plus grande flexibilité et des performances améliorées, bien qu'elle soit plus coûteuse et légèrement plus lente.[20]

1.6 Classification des techniques de formation de faisceaux :

On peut classer les techniques de formation de faisceaux en différentes catégories en fonction de différents critères. Voici une classification générale qui repose sur les principaux éléments des méthodes de formation de faisceaux.

1.6.1 Formation de faisceau conventionnelle (commutée) :

Dans la formation de faisceau conventionnelle ou commutée, un ensemble fixe de poids et de déphaseurs est utilisé pour orienter le faisceau dans la direction voulue. Il suffit de connaître la disposition des antennes dans le réseau et l'angle dans lequel on souhaite diriger le faisceau pour effectuer ce calcul. Un exemple courant est le modèle de Butler [21]

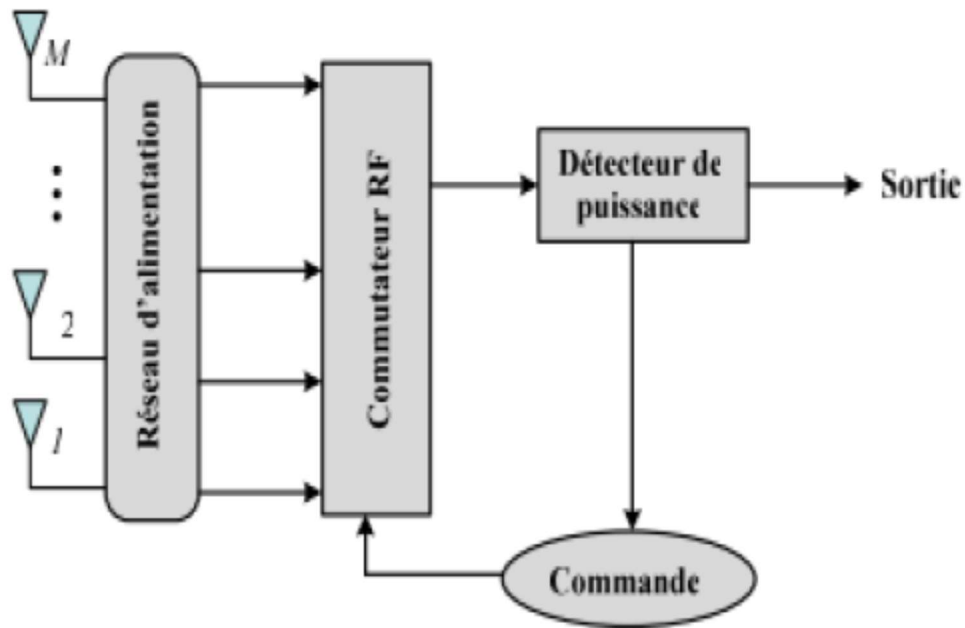


Figure I.10: Système à faisceaux commutés.

1.6.2 Formation de faisceau adaptative

Dans la formation de faisceau adaptative, les poids appliqués au signal de chaque élément de capteur du réseau sont continuellement mis à jour pour optimiser la configuration du faisceau. Cela permet au réseau de diriger automatiquement le faisceau vers la source de signal souhaitée et de minimiser l'énergie dans la direction de la source d'interférence ou de bruit. [21]

Quelques points clés sur la formation de faisceau adaptative :

Il est couramment utilisé dans les radars, les sonars, les communications sans fil, les réseaux de microphones et d'autres applications impliquant des réseaux de capteurs.

Des algorithmes adaptatifs tels que les moindres carrés moyens (LMS) ou les moindres carrés récurrents (RLS) sont utilisés pour ajuster de manière itérative les poids en fonction des caractéristiques du signal reçu.

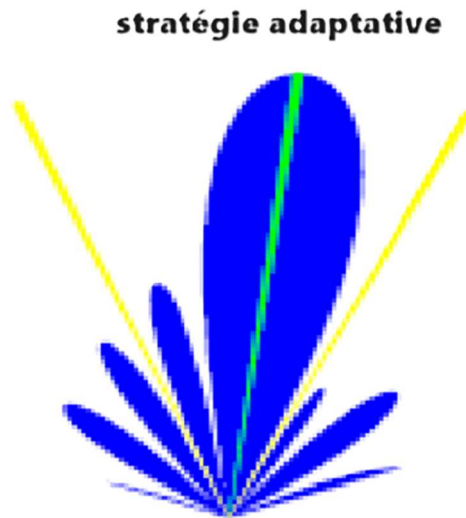


Figure I.11 : stratégie adaptative [22].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les diverses méthodes de formation de faisceaux nécessaires pour optimiser l'efficacité spectrale et réduire les interférences, garantissant ainsi une couverture étendue et une connectivité améliorée. Nous concluons que chacune de ces techniques comporte ses avantages et ses inconvénients. Bien que la formation de faisceau analogique soit économique, elle souffre d'une rigidité inhérente. D'un autre côté, la formation de faisceau numérique offre une souplesse totale mais au prix d'une consommation accrue d'énergie.

La formation de faisceaux hybride représente une avancée cruciale dans le domaine des télécommunications et des technologies sans fil, combinant les avantages des approches analogiques et numériques pour optimiser la performance et l'efficacité des systèmes de transmission de signaux.

Chapitre II : Techniques de formation de faisceaux hybride

II.1 Introduction

La technologie de formation hybride de faisceaux (HBF) a été reconnue comme un élément crucial dans les systèmes de communication massifs à entrées et sorties multiples (MIMO) exploitant les fréquences millimétriques (mmWave). Son avantage réside dans sa capacité à considérablement réduire le nombre de chaînes de radiofréquences, réduisant ainsi les coûts matériels et la consommation d'énergie, tout en maintenant des performances comparables à celles des architectures de formation de faisceaux entièrement numériques. Les conceptions conventionnelles de HBF se concentrent principalement sur l'optimisation de l'efficacité spectrale pour des architectures de connexion spécifiques, telles que celles entièrement ou partiellement connectées. [23]

II.2 Définition de formation de faisceaux hybride

Les systèmes de communication à ondes millimétriques (mmWave) ont récemment développé une technique intéressante appelée formation de faisceaux hybride analogiques et numériques (HBF). Elle trouve une solution satisfaisante entre la nécessité de gains de formation de faisceau adéquats pour surmonter la perte de propagation et le souhait de diminuer les coûts du matériel et la consommation d'énergie.[24]

La formation de faisceau hybride fusionne les approches analogique et numérique. (Figure II.1)[21].

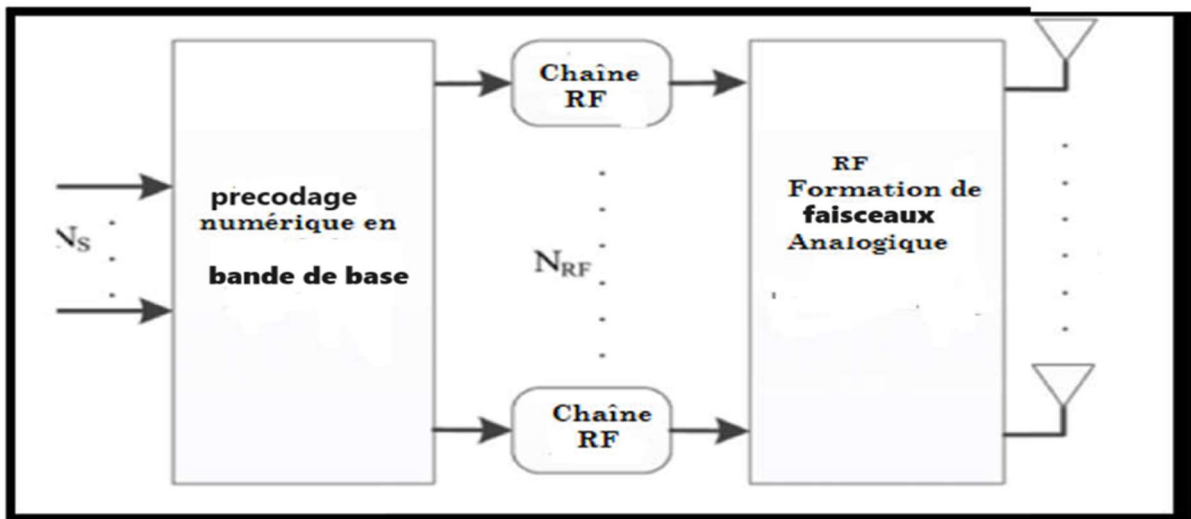


Figure II.1 : la formation de faisceau hybride [25]

II.3 Architecture générale de la formation de faisceaux hybride

La formation de faisceaux hybride (HBF) n'exige pas l'installation d'un commutateur TX/RX (de transmission et de réception) derrière chaque composant. Au lieu de cela, elle rassemble les éléments d'un réseau dans des sous réseaux. Chaque cluster est doté d'un commutateur TX/RX, mais à l'intérieur, il n'y a qu'un déphaseur par élément. Ainsi, il est possible de contrôler à la fois l'amplitude et la phase du signal au niveau des clusters, mais seulement la phase au niveau du composant. Les déphaseurs sont généralement construits avec des composants analogiques, tandis que les poids des sous réseaux peuvent être appliqués numériquement, d'où le nom de formation de faisceaux hybride. Le schéma bloc suivant illustre une configuration typique d'un système de formation de faisceaux hybride (figure II.2). [2].

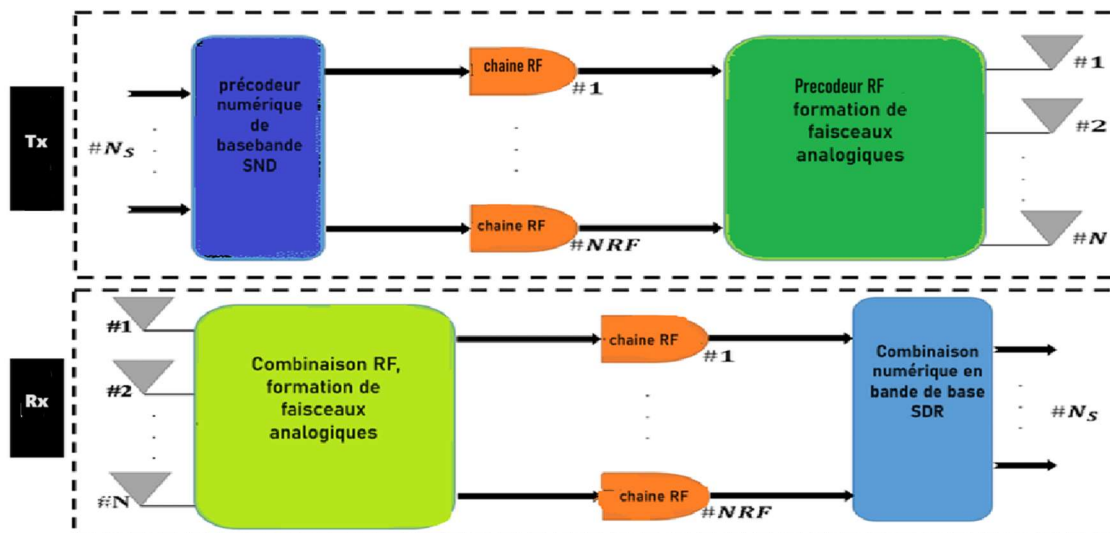


Figure II.2 : Architecture d'un système de formation de faisceaux hybrides. [26]

II.4 La méthodologie proposée

Dans le système de formation de faisceaux hybride MU-mMIMO, les processus de formation de faisceaux, de précodage et de combinaison sont partiellement réalisés dans le domaine numérique en bande de base et partiellement dans le domaine analogique des radiofréquences, comme indiqué dans les figures II 3 et II.4.

La combinaison des poids numériques dans le domaine de la bande de base et des poids analogiques dans le domaine RF constitue les poids de précodage et de combinaison. Dans le domaine de la bande de

base, les poids numériques transforment les flux de données en signaux d'entrée pour chaque chaîne RF. Par la suite, les valeurs de déphasage analogiques dans le domaine RF transforment le signal de sortie de chaque chaîne RF en signal rayonné de chaque élément d'antenne. Selon la figure II. 4, les flux de données sont ajustés en utilisant des poids de précodage, F à la TX, et transmis par un canal. En ce qui concerne la réception, les flux de données sont collectés en utilisant des poids composites W , comme illustré dans la figure II.3. [27]

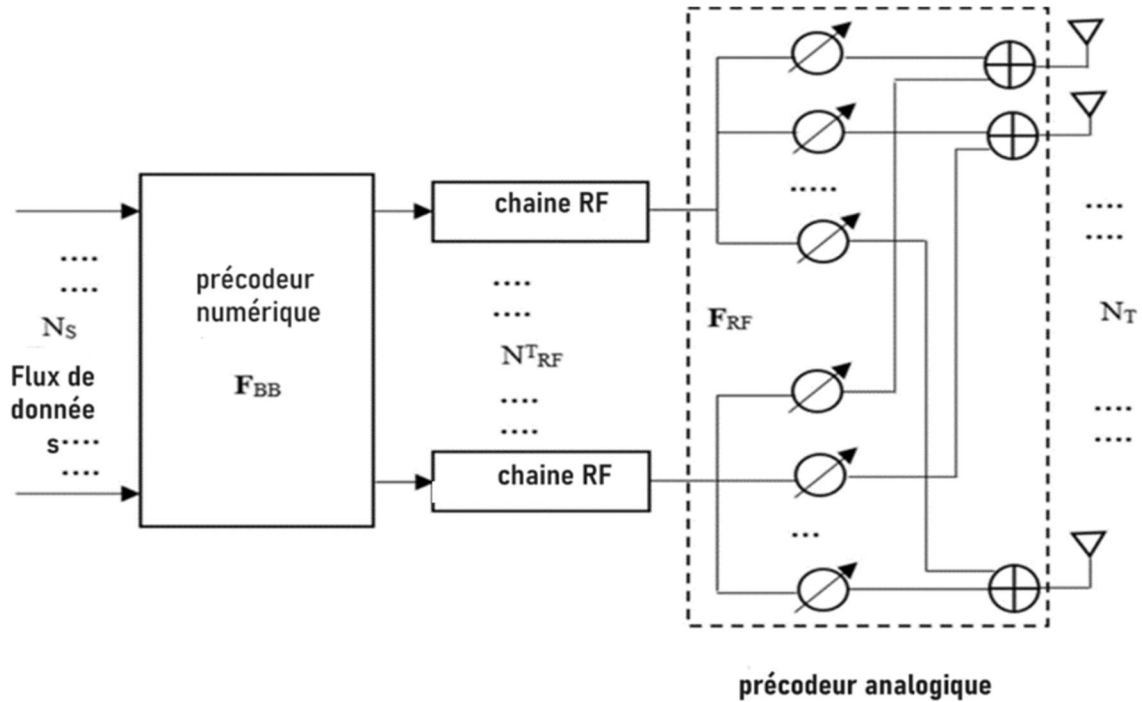


Figure II.3 : Schéma de principe des étapes de précodage au niveau de l'émetteur en ondes millimétriques. Système de formation de faisceau hybride MU-MIMO [27]

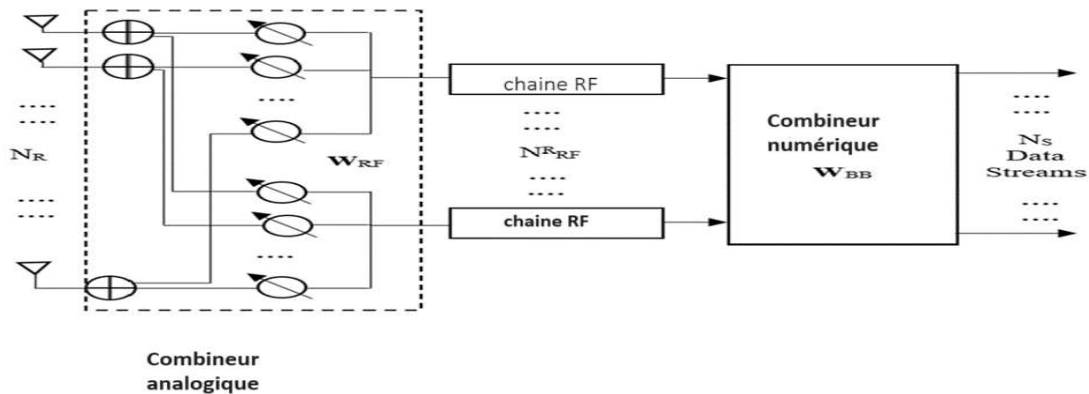


Figure II. 4: Schéma de principe des étapes de précodage au niveau du récepteur en ondes millimétriques
Système de formation de faisceau hybride MU-MIMO [27]

II.5 structure de formation de faisceau hybride

Les architectures hybrides de formation de faisceaux peuvent être classées en structures entièrement connectées et partiellement connectées. [28]

II.5.1 structure entièrement connectée

Tel que présenté dans la figure II.5, l'architecture entièrement connectée est caractérisée par la liaison de chaque chaîne RF à toutes les antennes via des additionneurs. Cette configuration conduit au passage du signal émis à travers M voies RF, comprenant chacune des composants tels que des mélangeurs, des amplificateurs de puissance et des déphaseurs. Les signaux sont ensuite combinés avant d'être appliqués à chaque antenne, comme démontré dans la figure II.5. Cette conception hybride entièrement connectée offre un gain significatif en beamforming ainsi qu'une grande souplesse dans l'orientation du faisceau (mimo massive beamforming). [29]

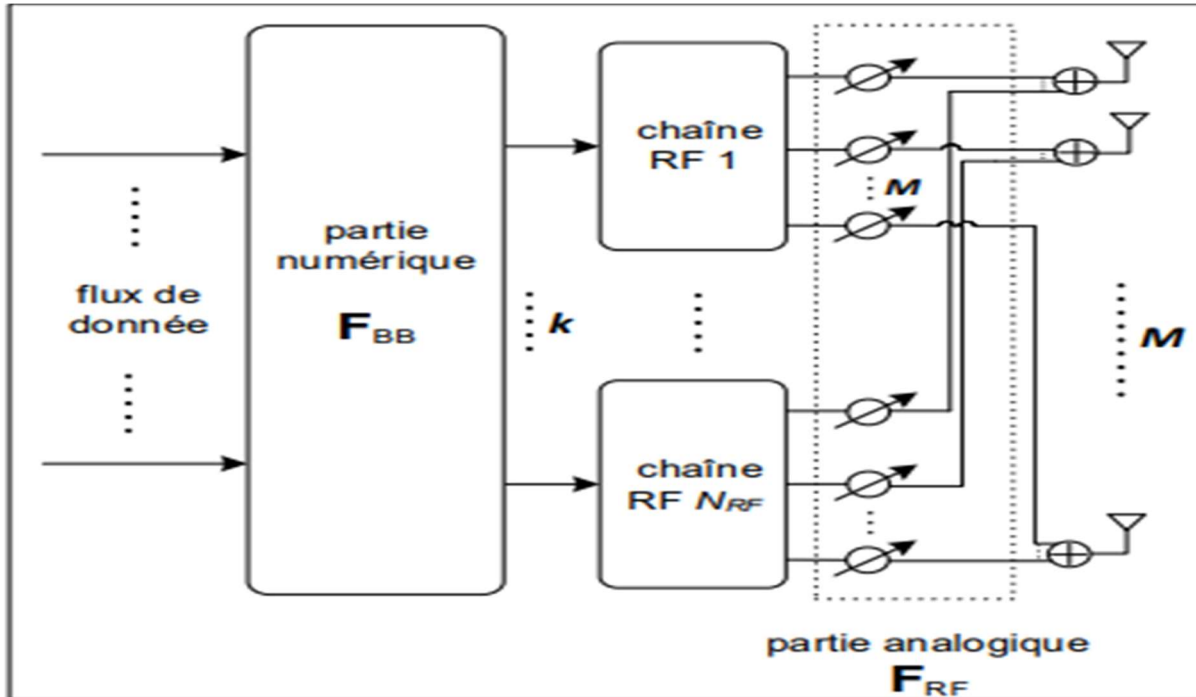


Figure II.5 : Architecture hybride entièrement connectée [29].

II.5.2 structure partiellement connectée

Le précodage hybride entièrement connecté offre des avantages notables en termes de gain en beamforming et de flexibilité dans l'orientation du faisceau, sa mise en œuvre se révèle complexe en raison de la nécessité d'un additionneur pour chaque antenne. Cette configuration requiert que le signal traverse un nombre de canaux égal à $N_{RF} \times M$, ce qui augmente considérablement sa complexité. En revanche, le précodage hybride partiellement connecté, comme indiqué dans la figure II.6, simplifie ce processus en divisant le réseau d'antennes en M/N_{RF} sous-réseaux, chacun étant connecté à une chaîne RF spécifique. Bien que cette approche réduit la complexité globale du système à M canaux RF, toutefois, le bénéfice en beamforming est limité à $1/N_{RF}$ par rapport à l'architecture hybride entièrement connectée. Néanmoins, l'intégration du MIMO massif et du précodage hybride partiellement connecté permet de drastiquement diminuer la quantité d'émetteurs-récepteurs nécessaires et la consommation énergétique des infrastructures 5G. [30]

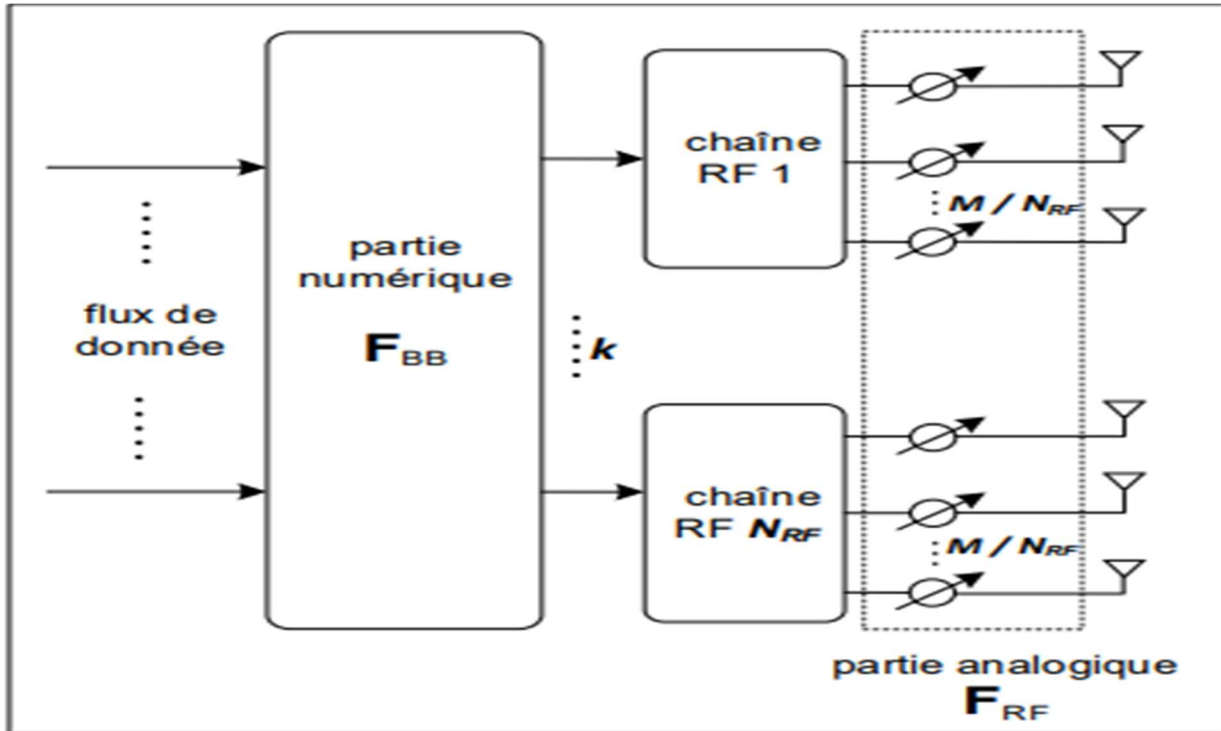


figure II.6: Architecture hybride partiellement connectée.[29]

II.6 Comparaison des architectures de formation de faisceaux hybrides entièrement connectées et partiellement connectées

L'architecture entièrement connectée présente l'avantage majeur de permettre une formation de faisceau complète pour chaque émetteur et récepteur, bien que cela soit associé à une complexité élevée. D'un autre côté, une architecture hybride partiellement connectée offre l'avantage de réduire la complexité matérielle, même si cela se traduit par un gain de formation de faisceau moins important.

Il est important de noter que l'architecture partiellement connectée peut entraîner une diminution des performances en augmentant le nombre d'antennes, ce qui représente un compromis réaliste entre la réduction des performances et le nombre de déphaseurs par rapport à l'architecture entièrement connectée.

En termes de performances, la structure entièrement connectée ne peut pas rivaliser avec le précodeur entièrement numérique, sauf si le nombre de chaînes RF est légèrement supérieur au nombre de flux de données. En revanche, la structure partiellement connectée offre des performances supérieures en termes d'efficacité spectrale (SE) et présente des avantages significatifs. Elle propose un précodage hybride progressif qui réduit les interférences, permettant ainsi d'atteindre des performances presque optimales avec une complexité minimale. De plus, cette architecture nécessite moins de déphaseurs que l'architecture entièrement connectée, ce qui se traduit par des économies d'énergie. [2,30]

II.7 Avantages fondamentaux des technique HBF

Les avantages essentiels des fonctionnalités de traitement du signal, comme la formation de faisceaux hybride, peuvent être résumés comme suit :

- Amélioration des communications MIMO massives à ondes millimétriques : Le MIMO massif à ondes millimétriques se révèle être le moteur central des réseaux sans fil, augmentant la capacité 5G jusqu'à 1 000 fois. La technologie HBF propose une alternative aux communications MIMO à ondes millimétriques, qui sont soit coûteuses et complexes à déployer, soit souffrent d'imprécisions et d'interférences mutuelles avec la formation de faisceaux analogiques.
- Réduction des coûts d'équipement : La mise en œuvre de la formation de faisceaux hybride diminue les coûts d'investissement en réduisant le nombre de chaînes RF nécessaires, tout en maintenant le même nombre d'antennes.
- Amélioration de l'efficacité énergétique : Comparativement aux systèmes MIMO opérant en dessous de 6 GHz, les systèmes MIMO à ondes massives déploient des réseaux d'antennes à l'échelle millimétrique via la mise en place de faisceaux, ce qui peut réduire la puissance de transmission nécessaire tant pour la liaison descendante que pour la liaison montante. Cette amélioration peut accroître l'efficacité énergétique de la liaison montante en diminuant la puissance de transmission requise pour chaque terminal utilisateur (UE), proportionnellement au nombre d'antennes des stations de base, sans compromettre les performances. [2,31]

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les techniques de formation de faisceaux hybrides (HBF), représentant une avancée majeure dans les communications MIMO à ondes millimétriques. Sans cette

approche, ces communications deviennent coûteuses, complexes et sensibles aux interférences et aux inexactitudes.

Nous avons identifié deux architectures de base de formation de faisceaux hybrides qui nécessitent moins de chaînes RF par rapport à la méthode de formation de faisceaux numérique. C'est cette stratégie de formation de faisceaux hybrides qui permet une réduction du nombre de chaînes RF, engendrant ainsi des économies de coûts et de consommation d'énergie. [2]

Après avoir exploré les différentes techniques de formation de faisceaux hybride, nous nous pencherons désormais sur les résultats et les simulations qui illustrent l'efficacité et les performances de ces méthodes dans des scénarios pratiques.

Chapitre III : Résultats et simulation

III. 1 .Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au système MIMO massif hybride beamforming associé à la modulation multi-porteuse OFDM. Cette architecture combine un formateur de faisceau numérique de faible dimension avec un formateur de faisceau RF analogique utilisant des déphaseurs. L'objectif de cette architecture est d'augmenter la capacité du système en termes de débit tout en simplifiant et réduisant les coûts de mise en œuvre grâce à la diminution du nombre de canaux RF. Pour évaluer les performances du système, nous allons d'abord étudier l'impact du nombre d'antennes à l'émission et à la réception sur la qualité et la capacité du système. Ensuite, nous analyserons l'impact du nombre de chaînes RF à l'émission et à la réception sur l'efficacité du système. Enfin, nous examinerons l'influence du nombre de flux de données à l'entrée du système sur la qualité et la capacité du système.

III.2 Système MIMO massive beamforming hybride OFDM

Ce chapitre présente une solution pour limiter le nombre de chaînes RF en utilisant une architecture de formation de faisceau hybride à deux étages, combinant un formateur de faisceau numérique de faible dimension et un formateur de faisceau RF analogique avec la modulation multi-porteuse OFDM. La première partie démontre que le nombre de chaînes RF nécessaires est égal au nombre total de flux de données, permettant ainsi des performances équivalentes à une formation de faisceau entièrement numérique, indépendamment du nombre d'éléments d'antennes. La deuxième partie se concentre sur la conception de cette architecture pour les communications MIMO point à point avec des réseaux d'antennes à grande échelle, en utilisant des algorithmes génétiques pour optimiser l'efficacité spectrale tout en respectant les contraintes de puissance. Il est supposé que des informations parfaites et instantanées sur l'état du canal sont disponibles. Le chapitre met en avant l'intérêt croissant pour cette architecture hybride dans la recherche sur les systèmes de réseaux d'antennes à grande échelle.[30],[31]

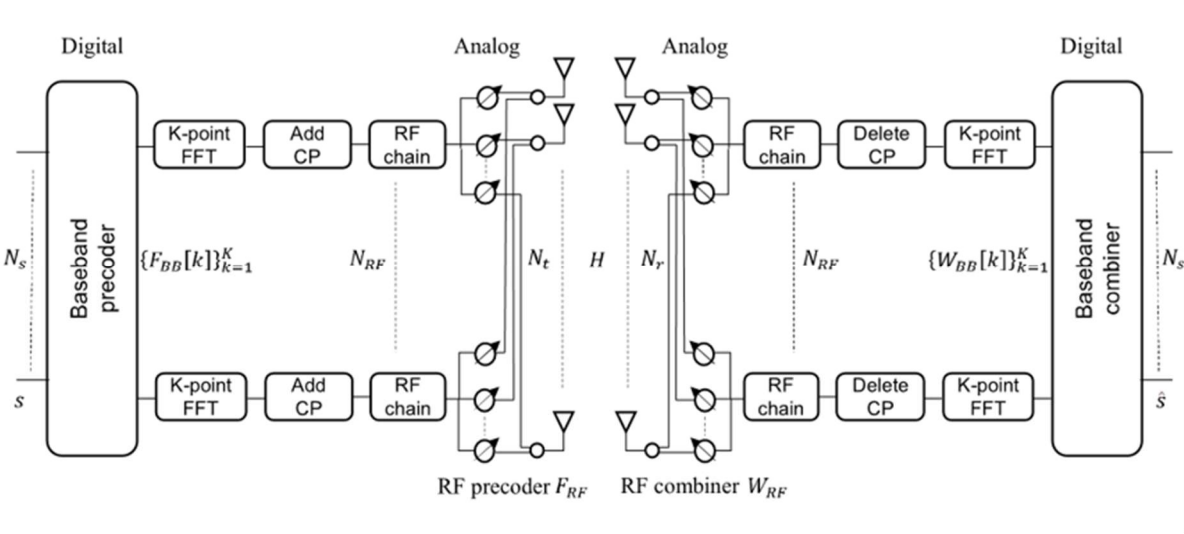


Figure .III 1 : Structure de l'émetteur-récepteur HBF dans un système MIMO OFDM à ondes millimétriques [32]

Considérons un système MIMO-OFDM équipé d'émetteurs et de récepteurs dotés respectivement de N_t et N_r antennes. Nous supposons, que l'émetteur et le récepteur disposent du même nombre de chaînes RF, noté $N_{RF} (N_{RF} \leq \min(N_t, N_r))$. Avec K représentant le nombre de sous-porteuses, et $s_k \in \mathbb{C}^{N_s \times 1}$ ($N_s \leq N_{RF}$) le vecteur de symboles transmis pour la k -ème sous-porteuse, $E (s_k s_k^H) = I_{N_s}, \forall k=1, \dots, K$ où I_{N_s} désigne la matrice identité de dimension $N_s \times N_s$.

Le processus de transmission commence par le précodage du vecteur transmis s^k par le précodeur de bande de base de faible dimension $F_{BB}[K] \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}$, suivi de sa transformation dans le domaine temporel via des transformées de Fourier rapides inverses (IFFT_S) à N_{RF} points. Le signal résultant dans le domaine temporel est ensuite étendu par un préfixe cyclique (CP) et précodé par le précodeur analogique commun de haute dimension, noté $F_{RF} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}$, où $F_{RF}(i, j) = 1/\sqrt{N_t}, \forall i, j$, pour chaque sous-porteuse.

$$x_k = F_k s_k \tag{III.1}$$

Où, $F_k = F_{RF} F_{BB}(k)$ et $\|F_k\|_F^2 \leq P_b$ avec P_b étant le la puissance pour chaque sous-porteuse.

Au récepteur, le signal reçu est tout d'abord combiné par un combineur analogique commun, représenté par $W_{RF} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_{RF}}$, où $W_{RF}(i, j) = 1/\sqrt{N_r}, \forall i, j$. Après le rejet du CP et l'application des transformées de Fourier rapides ((FFT_S) à N_{RF} K-points, le signal combiné est traité dans le domaine fréquentiel par un

combineur de bande de base de faible dimension $\mathbf{W}_{BB}|\mathbf{k}| \in \mathbb{C}^{N_s \times N_{RF}}$ pour chaque sous-porteuse. Enfin, le signal reçu pour la k-ème sous-porteuse via le canal $H_k \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ est donné par

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{W}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{W}_k^H \mathbf{n}_k \quad (\text{III.2})$$

Où $\mathbf{W}_k = \mathbf{W}_{RF} \mathbf{W}_{BB}[\mathbf{k}]$, et $\mathbf{n}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_r})$ est le vecteur de bruit gaussien blanc additif au niveau de la k-ème sous-porteuse, σ_n^2 étant la variance du bruit.

B. Modèle de canal

Le canal mmWave peut être décrit par le modèle Saleh-Valenzuela [33]. Pour les systèmes OFDM, le canal sélectif en fréquence est subdivisé en K sous-canaux à fréquence plate avec des sous-porteuses non interférentes. Dans le domaine fréquentiel, la matrice de canal au niveau de la kième sous-porteuse peut être exprimée comme suit [34], [35] :

$$\mathbf{H}_k = \sqrt{\frac{N_r N_t}{N_{c,l} N_{ray}}} \sum_{c=0}^{N_{cl}-1} \sum_{l=1}^{N_{ray}} \alpha_{c,l} \mathbf{a}_r(\boldsymbol{\theta}_{c,l}^r) \mathbf{a}_t^H(\boldsymbol{\theta}_{c,l}^t) e^{-\frac{j2\pi c \times (k-1)}{k}} \quad (\text{III.3})$$

Où $\alpha_{c,l} \sim \mathcal{CN}(0,1)$, $\theta_{c,l}^r$ et $\theta_{c,l}^t$ sont respectivement le gain de trajet, les angles d'arrivée et de départ du ème chemin dans le ème cluster. De plus, $\theta_{c,l}^r$ et $\theta_{c,l}^t$ suivent une distribution laplacienne avec des angles moyens θ_c^r et θ_c^t , uniformément répartis sur $(0, 2\pi)$ et la propagation angulaire de σ_r et σ_t [43]. $\alpha_r(\cdot)$ et $\alpha_t(\cdot)$ sont des vecteurs de réponse de réseau au niveau du récepteur et de l'émetteur, respectivement. Pour plus de simplicité, nous supposons que le nombre de clusters de diffusion et de propagation, les chemins et les écarts angulaires sont les mêmes pour toutes les sous-porteuses. De plus, nous supposons que le réseau linéaire uniforme (ULA) est utilisé. Le vecteur de direction de l'ULA avec N antennes et une distance d'espacement d'antenne adjacente est modélisé comme suit [44] :

$$\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[\mathbf{1}, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (N-1) d \sin(\theta)} \right]^T \quad (\text{III.4})$$

Où λ est la longueur d'onde du signal. Il convient de noter que dans cette représentation, la fréquence de fonctionnement est supposée être beaucoup plus élevée que la bande passante totale du système OFDM, de sorte que la longueur d'onde du signal λ dans toutes les sous-porteuses est approximativement la même.

C. Formulation du problème

Dans ce travail, notre attention se porte sur le problème de la conception des filtres de formation de faisceaux hybrides (HBF), en supposant que des informations complètes sur l'état du canal (CSI) sont disponibles à la fois au niveau de l'émetteur et du récepteur [36], [37], [38], [39]. Notre objectif est de concevoir des matrices HBF d'émission et de réception qui maximisent l'efficacité spectrale (SE) globale du système, tout en respectant des contraintes de puissance pour les sous-porteuses et des contraintes de module constant pour les formateurs de faisceaux analogiques. Le problème peut être formulé comme suit :

$$\max_{\substack{F_{RF} W_{RF} \\ (F_{BB}(k), W_{BB}(k))_{k=1}^K}} \frac{1}{K} \sum_{K=1}^K \beta_k R_K \quad (\text{III. 5.a})$$

$$\|F_{[K]}\|_F^2 \leq P_b, \quad (\text{III. 5.b})$$

$$|F_{RF}(i, j)| = \frac{1}{\sqrt{N_t}} \quad \forall i, j \quad (\text{III. 5.c})$$

$$|W_{RF}(i, j)| = \frac{1}{\sqrt{N_r}} \quad \forall i, j \quad (\text{III. 5.d})$$

III.3.1 L'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques développés par J. Holland sont particulièrement efficaces pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Leur fonctionnement s'inspire des principes de l'évolution naturelle, en appliquant les concepts de la génétique et les théories de la sélection naturelle développées par Charles Darwin [40].

III.3.2 Optimisation par Algorithme Génétique

Un algorithme génétique est une technique de recherche itérative qui travaille sur un groupe de chromosomes, où chaque chromosome symbolise une solution potentielle à un problème spécifique. Chaque chromosome est constitué d'une séquence de gènes (bits), et la taille de la population de chromosomes demeure constante [41].

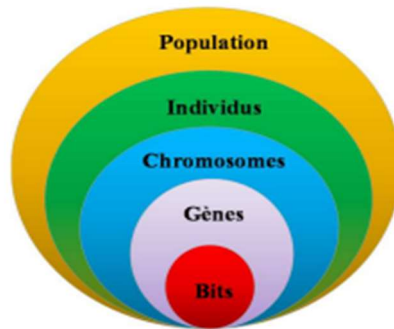


Figure III.2 : Eléments d'une population

Structure de l'Algorithme Génétique

L'application d'un algorithme génétique dépend du problème à traiter et nécessite les éléments suivants :

1. La représentation des individus : Le succès des algorithmes génétiques dépend fortement de la qualité de la représentation des données.
2. La création de la population initiale : Ce processus doit engendrer une population d'individus diversifiés, qui servira de point de départ pour les générations futures.
3. La fonction d'optimisation : Cette fonction évalue la qualité de chaque individu en fournissant une valeur appelée "fitness" ou fonction d'évaluation.
4. Opérateurs de diversification : Ces opérateurs permettent de modifier la population au fil des générations et d'explorer diverses solutions.
5. Des paramètres de dimensionnement : Ils incluent la taille de la population, le nombre total de générations, ainsi que les probabilités associées à l'application des opérateurs de croisement et de mutation.

La structure l'Algorithme Génétique est illustrée dans l'organigramme fonctionnel de la figure III.2. Dans la suite, nous détaillons les différentes phases qui le composent [42].

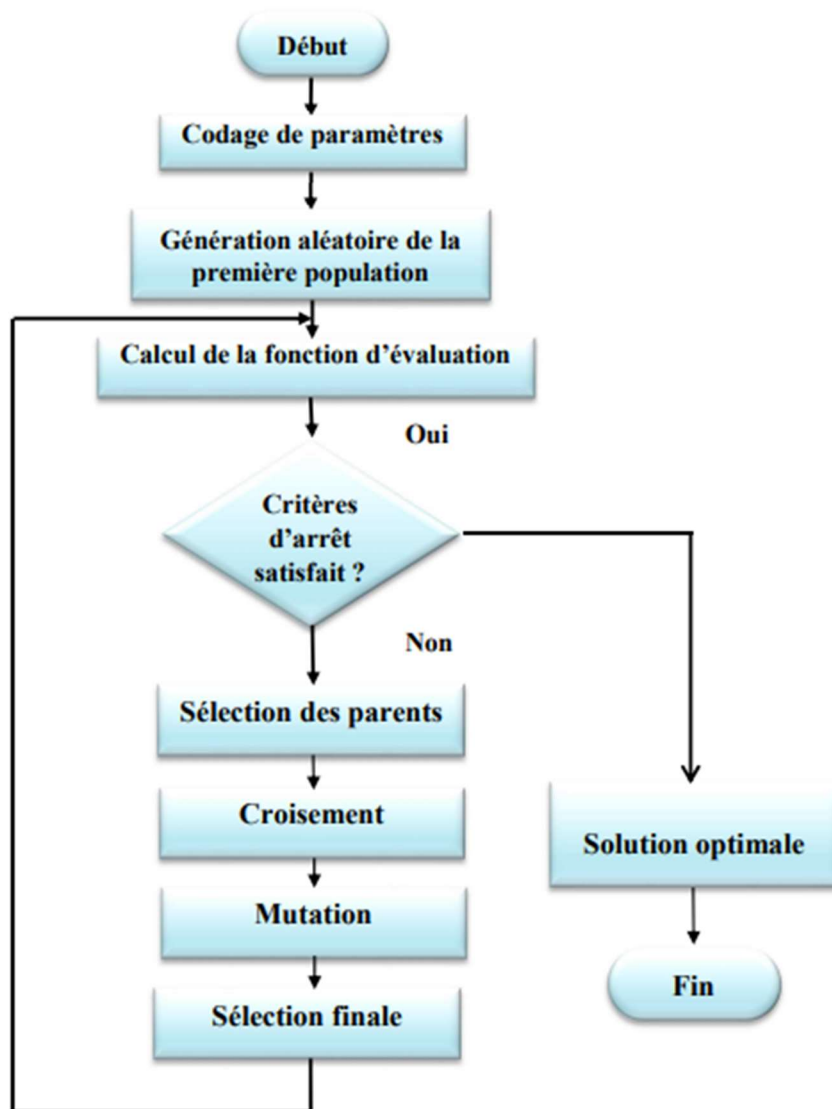


Figure III.3 : Organigramme général de l'Algorithme Génétique.

Une fois qu'une population initiale a été générée aléatoirement, les étapes d'évaluation, de sélection et de recombinaison sont répétées de façon itérative sur cette population jusqu'à l'obtention de la condition de convergence.

III.3.3 Codage

Le codage des variables est crucial dans l'Algorithme Génétique. Il s'agit de représenter les différents états possibles de la variable recherchée de manière adaptée à l'algorithme génétique. Ce codage établit une

correspondance entre la valeur de la variable et les individus de la population comme illustré dans la Figure III.4.

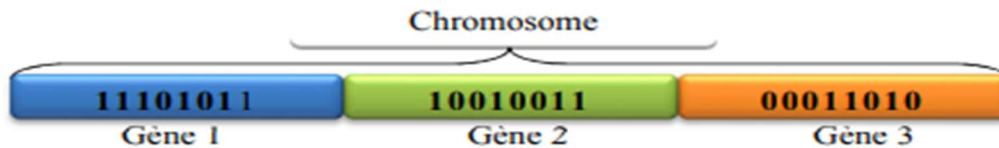


Figure III.4 : Chromosome codé en binaire.

À chaque paramètre x_i , se trouvant dans l'intervalle $[X_{imin}, X_{imax}]$, est associée une chaîne binaire $b_0 b_1 \dots b_{lxi-1}$, composée de lxi bits. Cette chaîne est en correspondance avec un entier naturel y_i :

$$y_i = \sum_{j=0}^{lxi-1} b_j \cdot 2^{lxi-j-1} \tag{III.6.a}$$

Afin d'évaluer la fonction objective, il est essentiel de décoder cette chaîne binaire. Le paramètre réel x_i , équivalent à y_i dans l'espace de recherche, est obtenu par ce processus de décodage de la chaîne.

Interpolation linéaire :

$$x_i = x_{imin} + \frac{x_{imax} - x_{imin}}{2^{lxi} - 1} \cdot y_i \tag{III.6.b}$$

III.3.4 Fonction de performance

La fonction de performance évalue le rendement de chaque individu et guide leur sélection pour la reproduction ou leur remplacement. Parfois, cette fonction correspond également à l'objectif à atteindre. Il est crucial de formuler le problème comme une maximisation d'une fonction numérique positive sur son domaine. Par exemple, résoudre un système d'équations $S(x) = 0$ peut être exprimé comme la recherche du maximum de $1/(a + \text{abs}(S(x)))$, où $\text{abs}(V)$ indique la valeur absolue du vecteur V et a est une constante positive non nulle [44].

III.3.5 Reproduction (Sélection Des Parents)

La sélection constitue un mécanisme déterminant quels individus de la génération précédente seront choisis pour se reproduire et former la génération suivante. Pendant cette étape, les individus les plus performants sont souvent reproduits pour devenir les parents de la génération en cours [43]. Quatre méthodes principales de sélection sont généralement utilisées

- La sélection par roue de loterie biaisée.
- La sélection élitiste.
- La sélection par tournois.
- La sélection par rang.

III.3.6 Croisement (Crossover)

Le croisement est une opération fondamentale en recherche, impliquant l'utilisation de deux parents pour créer un ou deux descendants. Cette opération est généralement stochastique, ce qui signifie que répéter le croisement du même couple de parents produira des descendants différents à chaque fois. Le taux de croisement détermine la proportion d'individus soumis au croisement parmi ceux qui remplaceront la génération précédente. Lorsque ce taux est de 1, tous les descendants sont obtenus par croisement [44-45]. Il existe plusieurs types de croisement, dont le mono-croisement (ou croisement en un point) qui est le plus répandu. D'autres méthodes incluent le double croisement (croisement en deux points) ou le croisement uniforme (ou multi-point).

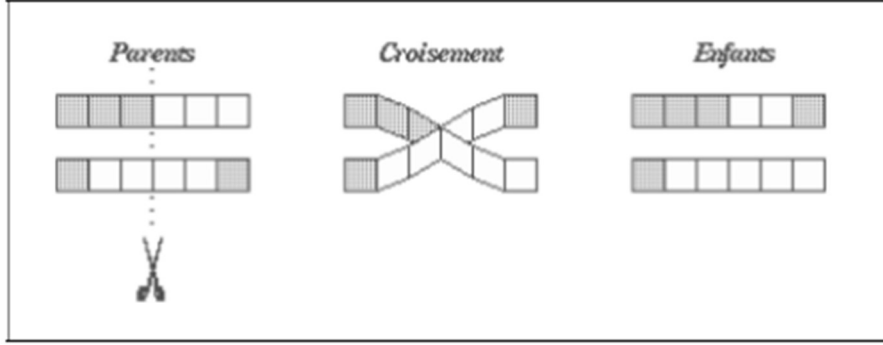


Figure III.5 : L'opérateur génétique (croisement).

III.3.7 Mutation

La mutation représente une altération aléatoire qui affecte un chromosome. Les individus issus d'un croisement peuvent être sujets à une mutation, avec une probabilité P_m généralement située entre 0,001 et 0,01. Cette mutation contribue à maintenir la diversité au sein de la population. [46]

III.3.8 Conception de formateur de faisceaux hybride pour les systèmes MIMO à grande échelle et à utilisateur unique

Dans cette partie, nous nous penchons sur la conception de formateurs de faisceaux hybrides dans le contexte d'un système MIMO point-à-point à grande échelle. Dans ce système, une station de base avec N antennes transmet N_s symboles de données à un utilisateur disposant de

M antennes. Il est crucial de noter que N_s est bien plus grand que N . De plus, pour simplifier la notation, nous supposons un nombre identique de chaînes RF d'émission/réception, soit $N_t^{RF} = N_r^{RF} = N_{RF} = N_r$. Pour un système à structure hybride de ce type, l'expression de l'efficacité spectrale donnée en (III.4) peut être simplifiée de la manière suivante :

$$R_k = \log_2 \left(I_M + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{W}_{tk} (\mathbf{W}_{tk}^H \mathbf{W}_{tk})^{-1} \mathbf{W}_{tk}^H \mathbf{h}_k \mathbf{V}_{tk} \mathbf{V}_{tk}^H \mathbf{H}_k^H \right) \quad (\text{III.7})$$

Avec

$$\mathbf{V}_{tk} = \mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_D[k]$$

$$\mathbf{W}_{tk} = \mathbf{W}_{RF} \mathbf{W}_D[k]$$

Dans cette section, notre attention se porte initialement sur la conception de la formation de faisceau hybride dans le cas où le nombre de chaînes RF est équivalent au nombre de flux de données, c'est-à-dire $N_{RF} = N_s$. Pour ce scénario, nous introduisons un algorithme méta-heuristique (algorithme génétique) visant à approcher le taux de capacité. Finalement, nous démontrons que, moyennant certaines approximations, l'algorithme de conception de formation de faisceau hybride proposé pour $N_{RF} = N_s$ peut également être étendu au cas où $N_s < N_{RF} < 2N_s$.

Maximiser l'efficacité selon l'équation III.5 représente un défi majeur, nécessitant une optimisation simultanée des précodeurs et des combinateurs hybrides. Toutefois, la conception conjointe de la matrice d'émission-réception pour un problème d'optimisation avec des contraintes similaires est souvent difficile à résoudre [47]. De plus, les contraintes sur les éléments des formateurs de faisceaux analogiques dans les équations III.5.c et III.5.d compliquent le développement d'un algorithme simple pour trouver la solution optimale exacte. [48].

C'est pourquoi ce chapitre propose une approche différente. Nous entamons d'abord la conception des précodeurs hybrides en considérant l'utilisation du récepteur optimal. Ensuite, une fois les vecteurs de pondération à l'émission sont calculés, nous nous concentrons sur la conception du combinateur hybride. Le calcul des pondérations à l'émission se décompose en deux étapes distinctes. Le problème de conception de l'émetteur peut être formulé comme suit

$$\max_{V_{RF}V_D[k]} \log_2(I_M + \frac{1}{\sigma} H_k V_{RF} V_D[k] V_D^H[k] H_k^H) \quad (\text{III.8.a})$$

$$\text{St. } T_r(V_{RF}V_D[k]V_D^H[k]V_{RF}^H) \leq P \quad (\text{III.8.b})$$

$$V_{RF}(i,j)^2 = 1 \quad \forall i,j \quad (\text{III.8.c})$$

Ce chapitre expose une méthode méta-heuristique pour résoudre le problème (III.7). Notre approche proposée commence par identifier la solution du précodeur numérique pour un précodeur RF fixe, désigné sous le nom de VRF. Ensuite, en partant de cette solution présumée du précodeur numérique, nous introduisons un algorithme visant à localiser un précodeur RF optimal.

III.3.8.1 Conception d'un pré-codeur numérique pour $N^{RF} = N_s$

La phase initiale de l'algorithme se concentre sur la conception de V_D tout en maintenant V_{RF} constant. Lorsqu'un précodeur RF est fixé, nous pouvons envisager que $H_{eff} = H V_{RF}$ constitue un canal effectif.

Par conséquent, le problème de conception du précodeur numérique peut se formuler de la manière suivante

$$\max_{V_D[k]} \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} H_{eff_k} V_D[k] V_D^H[k] H_{eff_k}^H \right| \quad (\text{III.9.a})$$

$$St. T_r(Q V_D[k] V_D^H[k]) \leq P \quad (\text{III.9.b})$$

Où
$$Q = V_{RF}^H V_{RF}$$

1- Optimisation par l'algorithme génétique

Pour mettre en œuvre un algorithme d'optimisation, il est généralement nécessaire de définir une fonction d'évaluation qui mesure la pertinence des solutions potentielles en fonction des critères d'optimisation.

La fonction objectif (ou fonction coût ou fitness) sert d'intermédiaire entre le problème physique à résoudre et le processus d'optimisation. Elle constitue un outil essentiel pour définir l'objectif de l'optimisation et guider le développement des chromosomes dans les algorithmes génétiques. La fonction d'évaluation doit convertir les préférences de l'utilisateur en une expression mathématique.

Du point de vue mathématique, le défi est de trouver la loi de précodage numérique V_D appliquée à l'entrée du système afin de maximiser l'efficacité spectrale définie par l'équation suivante :

$$R1 = \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} H_{eff_k} V_D[k] V_D^H[k] H_{eff_k}^H \right| \quad (\text{III.10})$$

Dans le cadre de l'algorithme génétique, la loi de précodage numérique V_D est assimilée à un chromosome, où chaque gène correspond à une valeur de ce vecteur (V_D dans ce cas).

La première étape de l'Algorithme Génétique consiste à initier une population d'individus de manière aléatoire, représentée sous forme d'une matrice binaire. Cette matrice de dimensions $L \times C$, contient des zéros et des uns.

Tels que :

L : Le nombre de lignes correspond au nombre d'individus dans la population.

C : Le nombre de colonnes est égal au produit du nombre de paramètres du vecteur V_D par le nombre de bits du code binaire simple utilisé.

Chaque individu dans la population est représenté par un chromosome. Le processus de décodage des gènes à N bits est défini par la formule suivante :

$$\mathbf{P} = \frac{P_{max} - P_{min}}{2^N} \sum_{i=0}^{N-1} 2^i \mathbf{b}_i + P_{min} \quad (\text{III.11})$$

P_{max} et P_{min} définissent respectivement les bornes supérieure et inférieure de l'intervalle de valeurs des paramètres, tandis que \mathbf{b}_i représente le bit d'index i le long du gène associé au paramètre P (qui peut être un ou plusieurs paramètres, tels que V_{Di}).

Le vecteur P obtenu sera ensuite inséré dans la fonction R pour évaluer les performances de cet individu.

Nous employons une approche élitiste pour garantir la présence du meilleur individu dans les générations futures. À cette fin, nous avons adopté une méthode de sélection appelée classement. Le croisement adopté est celui connu sous le nom de croisement en un point.

III.3.8.2 Conception du précodeur RF pour $N_{RF} = N_s$

En ce moment, notre but est de concevoir le précodeur RF en supposant. que $V_D V_D^H \approx \gamma 2I$. Avec cette condition, la contrainte de puissance de l'émetteur (III.9b) est automatiquement respectée, quelle que soit la conception de V_{RF} . Ainsi, le précodeur RF peut être déterminé en traitant ce problème

$$\max_{V_{RF}} \log_2 \left| \mathbf{I}_M + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} V_{RF}^H \mathbf{F}_1 V_{RF} \right| \quad (\text{III.12.a})$$

$$\text{st. } |V_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j \quad (\text{III.12.b})$$

Où

$$\mathbf{F}_1 = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k$$

La problématique de concevoir un précodeur analogique peut être formulée comme un problème d'optimisation visant à maximiser l'efficacité spectrale R_2 , définie par l'équation suivante :

$$R2 = \log_2 \left| I + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} V_{RF}^H F_1 V_{RF} \right| \quad (\text{III.13})$$

Dans le cadre de l'algorithme génétique, le précodeur numérique V_{RF} est représenté comme un chromosome, avec ses gènes correspondant aux valeurs du vecteur V_{RF} . L'algorithme commence par créer aléatoirement une population de chromosomes, représentée par une matrice binaire de taille $L \times C$ (L étant le nombre d'individus et C le produit du nombre d'éléments du V_{RF} par le nombre de bits du codage). Les performances des individus sont ensuite évaluées via une fonction d'adaptation, utilisant une formule de décodage pour convertir les chromosomes en paramètres. La méthode de sélection basée sur le classement garantit la survie des meilleurs individus, et le croisement en un point est utilisé pour générer de nouveaux individus.

III.3.8.3 Conception de la combinaison hybride pour $N_{RF} = N_s$

Enfin, nous visons à calculer les vecteurs du combinateur hybride de manière à optimiser l'efficacité spectrale globale, comme défini dans l'équation (III.7), en partant du postulat que les vecteurs de pondération à la réception sont déjà établis. Lorsque le vecteur de pondération numérique à la réception devient une matrice carrée sans contrainte sur ses valeurs, la conception de W_{RF} et W_D peut être séparée en deux étapes distinctes sans sacrifier l'optimalité : d'abord, la conception du vecteur de pondération RF à la réception en supposant que le vecteur de pondération numérique est optimal. Ensuite, nous cherchons à trouver le vecteur de pondération numérique optimal pour ce vecteur de pondération RF. Ainsi, le problème de conception du vecteur de pondération RF peut être formulé comme suit :

$$\max_{W_{RF}} \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} (W_{RF}^H W_{RF})^{-1} W_{RF}^H F_2 W_{RF} \right| \quad (\text{III.15.a})$$

$$s. t. |W_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j \quad (\text{III.15.b})$$

Où
$$F_2 = H V_t V_t^H H^H$$

Ce problème ressemble beaucoup à la conception du précodeur RF..

Par conséquent, le défi (III.15) peut être modélisé comme le problème de conception du précodeur RF énoncé dans (III.13), et l'algorithme génétique peut être employé pour concevoir W_{RF} en remplaçant F_2 et M_1 par F_2 et γ^2 , respectivement, c'est-à-dire :

$$\max_{W_{RF}} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \log_2 \left| I + \frac{1}{M\sigma^2} W_{RF}^H F_{2k} W_{RF} \right| \quad (\text{III.16.a})$$

$$\text{st. } |W_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, (I, j) \quad (\text{III.16.b})$$

Le défi de concevoir un combineur analogique peut être reformulé en un problème d'amélioration visant à maximiser l'efficacité spectrale (R3) telle que définie par l'équation suivante :

$$R3 = \log_2 \left| I + \frac{1}{M\sigma^2} W_{RF}^H F_{2k} W_{RF} \right| \quad (\text{III.17})$$

Dans le contexte de l'algorithme génétique, le précodeur numérique W_{RF} est représenté Dans le cadre de l'algorithme génétique, le précodeur numérique W_{RF} est représenté comme un chromosome, avec ses gènes correspondant aux valeurs du vecteur W_{RFi} . L'algorithme commence par créer aléatoirement une population de chromosomes, représentée par une matrice binaire de taille $L \times C$ (L étant le nombre d'individus et C le produit du nombre d'éléments du W_{RF} par le nombre de bits du codage). Les performances des individus sont ensuite évaluées via une fonction d'adaptation, utilisant une formule de décodage pour convertir les chromosomes en paramètres. La méthode de sélection basée sur le classement garantit la survie des meilleurs individus, et le croisement en un point est utilisé pour générer de nouveaux individus.

Finalement, En admettant que tous les autres paramètres du faisceau restent inchangés, l'obtention du meilleur combineur numérique implique de résoudre le problème du minimum quadratique :

$$W_D[k] = J_k^{-1} W_{RF}^H H_k V_{tk} \quad (\text{III.18.a})$$

$$\text{Où} \quad J_k = W_{RF}^H H_k V_{tk} \quad V_{tk}^H H^H W_{RF} + \sigma^2 W_{RF}^H W_{RF} \quad (\text{III.18.b})$$

III.3.8.4 Conception de la formation de faisceaux hybride pour $N_s < N^{RF} < 2 N_s$

Dans la partie III, nous présentons une méthode pour concevoir des formateurs de faisceaux hybrides lorsque $N^{RF} \geq 2N_s$. Dans cette configuration, la structure hybride peut rivaliser en efficacité avec un formateur de faisceau entièrement numérique optimal. Nous avons également introduit un algorithme méta-heuristique pour concevoir ces formateurs lorsque $N^{RF} = N_s$. Maintenant, nous abordons la conception des formateurs de faisceaux hybrides lorsque $N_s < N^{RF} < 2N_s$. Pour cette gamme de valeurs, le problème de conception de l'émetteur est formulé de manière similaire à l'équation (III.7). Il est possible de déterminer le précodeur numérique optimal pour un précodeur RF fixe en utilisant l'équation (III.10), tout en satisfaisant également une condition supplémentaire. La fonction objectif de l'équation (III.7) peut être

réexprimée de manière pratique pour N^{RF} proche de N_s , ce qui permet de formuler le problème de conception du précodeur RF selon l'équation (III.11).

III.4 Notion de base sur langage utilisé (Matlab)

Le choix de MATLAB pour nos simulations découle de ses multiples fonctionnalités adaptées à l'ingénierie et aux sciences. Sa simplicité de programmation et sa syntaxe intuitive permettent une mise en œuvre rapide d'algorithmes complexes. MATLAB excelle dans la gestion efficace des matrices et vecteurs, essentiels pour les simulations multi-variables. Ses outils graphiques avancés facilitent la visualisation des résultats, simplifiant ainsi l'analyse et l'interprétation des données. De plus, la vaste communauté d'utilisateurs et les ressources en ligne offrent un soutien précieux pour résoudre les problèmes et optimiser l'utilisation du logiciel.

III.5 Simulations et discussion des résultats

Dans notre étude, nous examinerons l'efficacité spectrale ainsi que le taux d'erreur binaire en relation avec le rapport signal sur bruit pour les systèmes MIMO-OFDM qui intègrent le beamforming hybride. Nous allons explorer différentes configurations en ajustant le nombre d'antennes, le nombre de canaux RF et le nombre de flux de données.

III.5.1 Impact de la variation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception

Dans notre analyse, nous étudions une station de base exploitant le MIMO-OFDM avec beamforming hybride, comprenant deux canaux RF ($N_{RF}=2$) pour l'émission et la réception, ainsi que deux flux de données ($N_s = 2$). Nous prenons également en compte un canal MIMO à trajets multiples et une modulation multi-porteur OFDM avec 64 sous porteuses.

L'optimisation des précodeurs et des combineurs via l'algorithme génétique peut être facilement réalisée en ajustant les paramètres d'entrée de l'algorithme.

Après plusieurs essais, voici les paramètres d'entrée de l'algorithme génétique :

- Nombre de générations : 100
- Effectif de la population : 80
- Nombre de bits : 16
- Probabilité de croisement : 0.01

- Probabilité de mutation : 0.7

Pour évaluer les performances, nous modifions le nombre d'éléments d'antenne et analysons l'efficacité spectrale ainsi que le taux d'erreur binaire.

III.5.2 .1 L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_t et N_r

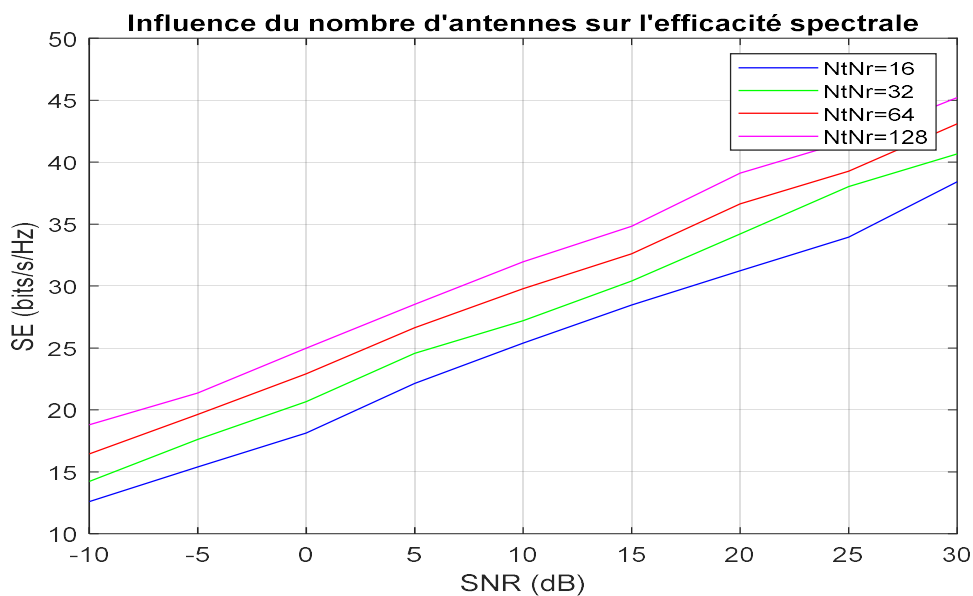


Figure III .6 : L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_t et N_r pour la technique beamforming hybride.

D'après les résultats de la figure III.6, nous remarquons que :

- L'efficacité spectrale augmente avec une élévation du rapport signal sur bruit (SNR). De plus, l'efficacité spectrale s'améliore avec l'augmentation du nombre d'antennes utilisées pour l'émission et la réception. Par exemple, dans un système MIMO massif avec beamforming (128x128) par rapport à un système MIMO (16x16), l'efficacité spectrale augmente de 7 bits/s/Hz à un rapport signal sur bruit de 30 dB

III.5.2.2 Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_t et N_r :

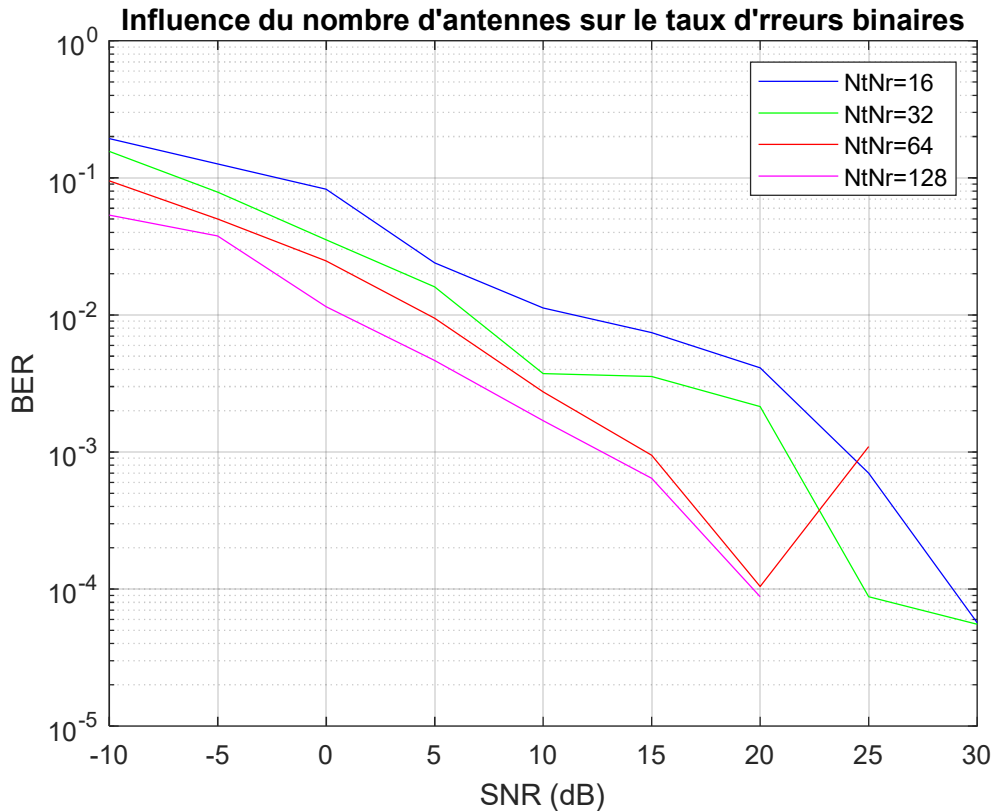


Figure III .7 : Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_t et N_r pour la technique beamforming hybride

D'après les résultats de la figure III.7. Nous remarquons que

- Le taux d'erreurs binaires décroît de manière continue avec l'accroissement du rapport signal sur bruit (SNR).
- De même, le taux d'erreurs binaires diminue à mesure que le nombre d'antennes utilisées pour la transmission et la réception augmente : le gain est amélioré de 9 dB en passant d'un système MIMO-OFDM (16x16) à un système MIMO-OFDM (128x128) avec un taux d'erreur de 10^{-4} .
- En adoptant un ordre de diversité élevé, on peut atténuer les distorsions et interférences affectant le signal pendant sa transmission, ce qui améliore considérablement les performances du système.

III.5.3.Impact de la variation du nombre de chaînes RF à l'émission et à la réception :

Dans cette section de la simulation, nous étudions l'efficacité spectrale d'un système MIMO-OFDM hybride beamforming, configuré pour deux flux de données ($N_s = 2$), en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Nous explorons l'impact du nombre de chaînes RF à la fois à l'émission et à la réception pour chaque configuration évaluée. En variant le nombre de chaînes RF, nous examinons comment cela influence l'efficacité spectrale du système dans différents scénarios en fonction du rapport signal sur bruit.

III .5.3.1 : L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit

SNR avec la variation de Nrf

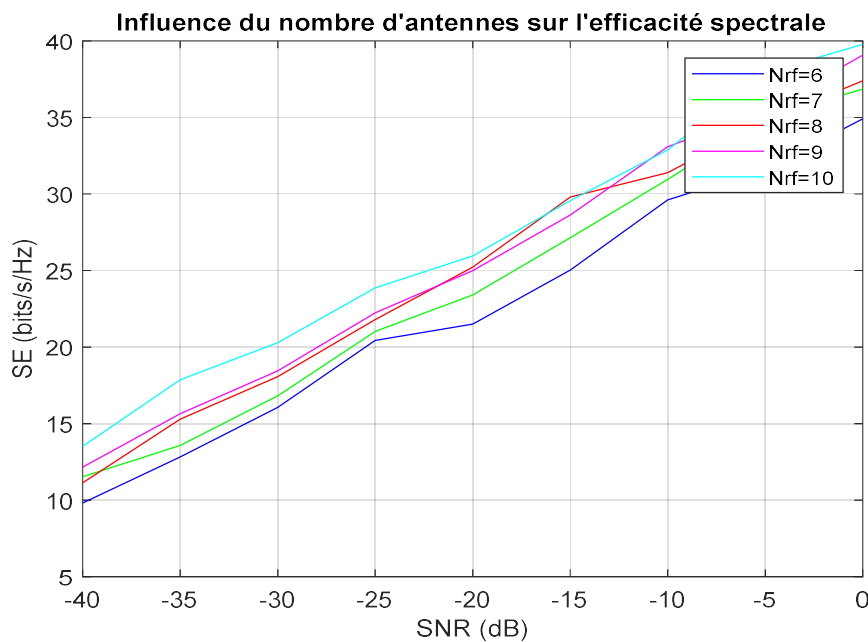


Figure 0.8 : L'efficacité spectrale obtenue par la variation de Nrf pour la technique beamforming hybride.

En se basant sur les données présentées dans la Figure III.8, il est notable que :

L'efficacité spectrale croît à mesure que le SNR augmente, quelle que soit la valeur de Nrf .

L'efficacité du système croît avec l'élévation du nombre de chaînes RF, mais cette amélioration reste limitée par rapport au gain en coût obtenu en limitant le nombre de chaînes RF.

III .5.3.2: Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la

variation de Nrf :

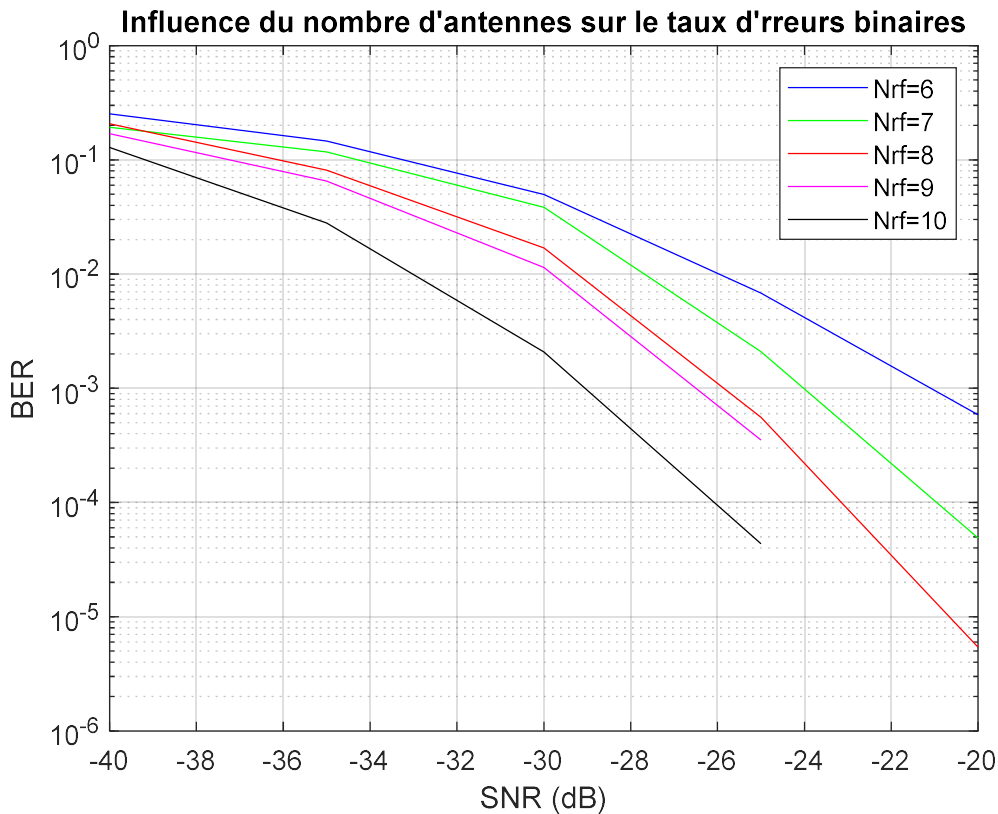


Figure III .9 : Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de Nrf pour la technique beamforming hybride

Les résultats de la Figure III.9 mettent en lumière plusieurs observations significatives. Premièrement, on constate une diminution du taux d'erreur binaire à mesure que le rapport signal sur bruit augmente. Deuxièmement, l'augmentation du nombre de chaînes RF, à la fois pour l'émission et la réception, se traduit par une diminution du taux d'erreur binaire. Par exemple, pour un BER de 10^{-4} , le SNR s'améliore de 5 dB en passant de 7 à 10 chaînes RF. Cependant, cette amélioration demeure modeste, soulignant ainsi une influence limitée des chaînes RF sur la qualité et la capacité du système. Par conséquent, réduire le nombre de chaînes RF apparaît comme une stratégie judicieuse pour alléger les coûts associés au système.

III .5.3.3: L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de

N_s :

Dans cette section, nous examinons comment l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire varient en fonction du rapport signal sur bruit d'un système MIMO-OFDM beamforming hybride (64x64). Nous modifions le nombre de flux de données à l'entrée (N_s) à chaque fois pour étudier son impact sur les performances.

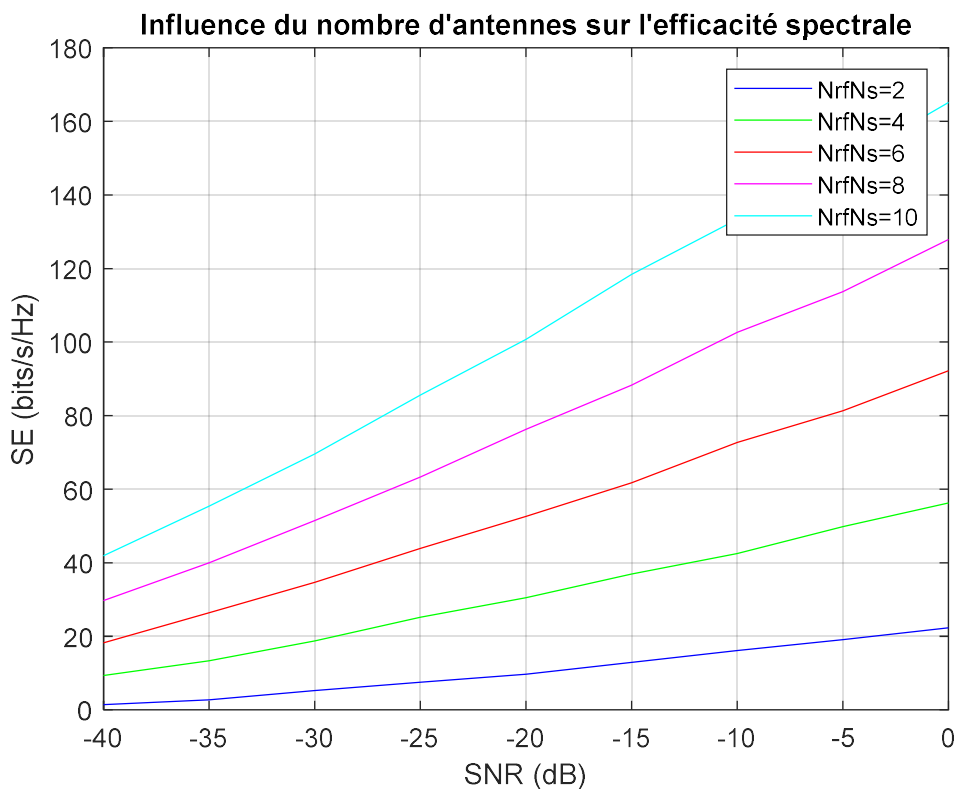


Figure 0.10: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de Nrf et N_s pour la technique beamforming hybride.

Les données de la figure III.10 mettent en évidence plusieurs tendances importantes. Premièrement, on observe une augmentation de l'efficacité spectrale avec l'élévation du rapport signal sur bruit (SNR). Deuxièmement, l'efficacité spectrale croît également avec l'augmentation du nombre de flux de données à l'entrée du système. Par exemple, à un SNR de 0 dB, l'efficacité spectrale s'accroît de 72 bits/s/Hz pour un système MIMO-OFDM hybride avec beamforming, $N_s=10$, comparé à deux flux de données à l'entrée du système. Ces résultats soulignent l'importance cruciale du SNR et du nombre de flux de données dans l'amélioration de l'efficacité spectrale des systèmes de communication.

III .5.3.4: Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de Nrf et Ns :

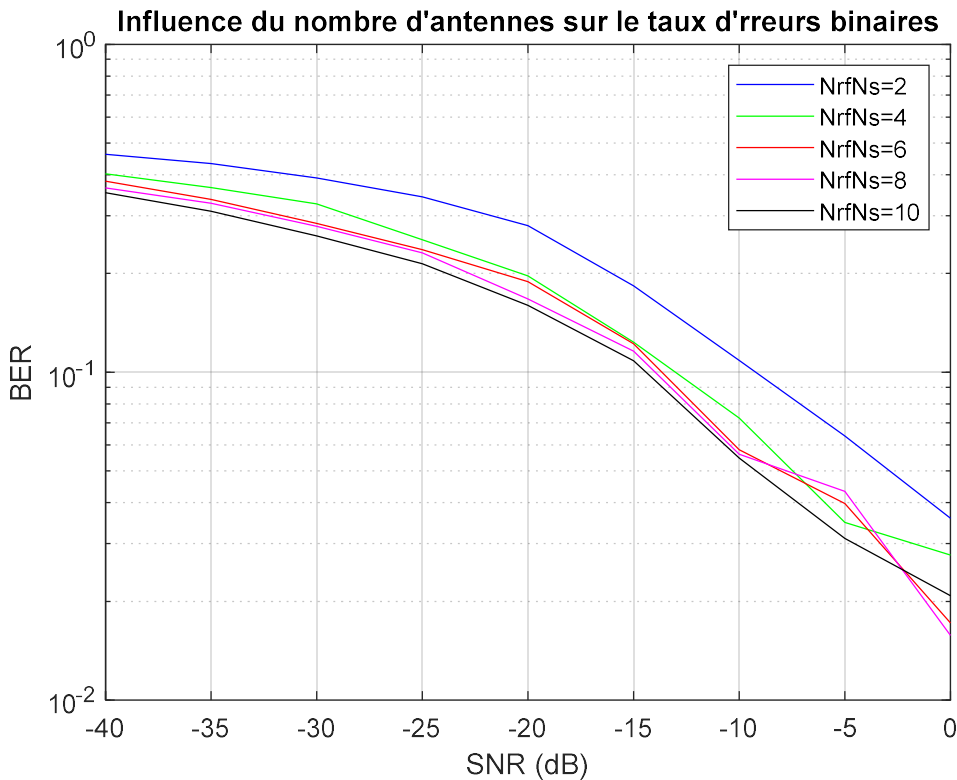


Figure III .11 : Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de Nrf et Ns pour la technique beamforming hybride

Les données de la Figure III.11 mettent en évidence deux observations importantes. Tout d'abord, on observe une diminution du taux d'erreur binaire à mesure que le rapport signal sur bruit augmente. Ensuite, on constate également une diminution du taux d'erreur binaire lorsque le nombre de flux de données (Ns) et le nombre de chaînes RF augmentent. Ces résultats soulignent l'importance cruciale du rapport signal sur bruit, du nombre de flux de données et du nombre de chaînes RF dans la réduction du taux d'erreur binaire, ce qui contribue à améliorer la fiabilité et les performances globales du système de communication.

III.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre présente l'application de l'algorithme génétique pour la conception d'un système de Faisceaux Hybride (HBF) dans un système MIMO-OFDM à ondes millimétriques. En utilisant cet algorithme, nous avons pu obtenir des solutions explicites pour les formateurs de faisceaux analogiques

et numériques, ce qui a permis de maximiser la limite supérieure de l'efficacité spectrale (SE) et d'améliorer le taux d'erreur binaire (BER). Nous avons examiné l'influence du nombre d'antennes, tant en émission qu'en réception, sur les performances globales du système. De plus, nous avons étudié l'impact de la modification du nombre de canaux RF, à la fois en émission et en réception, sur l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire du système. En outre, nous avons évalué comment le nombre de flux de données influence ces performances. Les résultats obtenus révèlent que la réduction du nombre de canaux RF a un effet limité sur la qualité et la capacité du système MIMO-OFDM hybride beamforming, ce qui confirme que cette approche simplifie la conception et réduit les coûts sans compromettre les performances du système.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'augmentation continue des services et applications sans fil, ainsi que du nombre d'utilisateurs, impose des contraintes de débit toujours plus importantes. Pour y faire face, il est essentiel d'améliorer les débits de transmission des données dans les communications sans fil. Cela pousse les chercheurs à optimiser les systèmes existants et à développer de nouvelles solutions pour les futures normes. Ces efforts sont nécessaires pour assurer une expérience utilisateur fluide et répondre à la demande croissante de services sans fil de haute qualité.

L'objectif principal de ce mémoire est de développer et d'évaluer des techniques de conception de faisceau hybride pour les systèmes MIMO massifs-OFDM multi-utilisateurs, en utilisant l'algorithme génétique. Cette approche vise à améliorer les performances et l'efficacité du système tout en simplifiant son architecture et en réduisant les coûts de mise en œuvre grâce à l'optimisation du nombre d'antennes, du nombre de chaînes RF et du nombre de flux de données.

Dans un premier temps, nous avons établi les bases théoriques en introduisant les différentes technologies des réseaux 5G, telles que les ondes millimétriques, le full-duplex, les petites cellules et le MIMO massif. Nous avons également examiné en détail les techniques de formation de faisceaux analogiques et numériques, en soulignant leurs avantages et inconvénients respectifs. Cette exploration nous a permis de comprendre l'importance cruciale de la formation de faisceaux pour exploiter pleinement les capacités des réseaux 5G.

Dans un second temps, nous nous sommes penchés sur les techniques de formation de faisceaux hybrides, une approche novatrice qui combine les avantages des techniques analogiques et numériques. En décrivant l'architecture générale de la formation de faisceaux hybride et en comparant les structures entièrement connectées et partiellement connectées, nous avons mis en évidence les possibilités offertes par cette approche pour améliorer l'efficacité et la flexibilité des systèmes de communication sans fil.

Dans le troisième chapitre, nous avons exploré le système MIMO-OFDM à beamforming hybride, qui utilise deux vecteurs de pondération à l'émission et deux vecteurs de pondération à la réception. L'objectif était de simplifier le système et de réduire les coûts de mise en œuvre en minimisant le nombre de canaux RF. Pour ce faire, nous avons optimisé les précodeurs et les combinateurs analogiques et numériques à

Conclusion Générale

l'aide de l'algorithme génétique afin d'améliorer l'efficacité et les performances du système. Nous avons ensuite analysé l'impact du nombre d'antennes et du nombre de chaînes RF en émission et en réception sur l'efficacité spectrale et les performances du système. Enfin, nous avons étudié l'impact du nombre de flux de données sur ces performances. Nos observations ont révélé que la réduction du nombre de chaînes RF a un impact limité sur la qualité et la capacité du système MIMO-OFDM à beamforming hybride. Cependant, cette réduction permet de simplifier le système et de minimiser les coûts de mise en œuvre.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] ZAOUI IMENE , LADRAA BOUCHRA , ” LA FORMATION DE FAISCEAUX DANS LE SYSTEMES DE COMMUNICATION DE MIMO MASSIVE ” , MEMOIRE MASTER , UNIVERSITE SAAD DAHLAH , BLIDA ANNEES 2019-2020 .
- [2] DOUIS HABIBA , FEDEL CHOUROUK ET MERZOUGUI OUMAIMA , ”ETUDE ET SIMULATION DU BEAMFORMING HYBRIDE” ,MASTER ACADEMIQUE ,UNIVERSITE ECHAHIDHAMMALAKHDER ,EL-OUED ANNES 2020 -2021
- [3] [HTTPS://WWW.UNIVERSFREEBOX.COM/ARTICLE/50589/5G-LES-TECHNOLOGIES-MISES-EN-OEU\(Mai2021\).](https://www.universfreebox.com/article/50589/5G-LES-TECHNOLOGIES-MISES-EN-OEU(Mai2021).)
- [4] PATRICE COLLET ; ”LA 5G ET LES ONDES MILLIMETRIQUES”, ECOLE POLYTECHNIQUE, FRANCE, 2020.
- [5] ANANJAN BASU; TATSUO ITOH; "MILLIMETER-WAVE ANTENNAS", ANNALES DES TÉLÉCOMMUNICATIONS,- VOL52 ,pp. 178 -187 1997.
- [6] SYLVAIN MEYER ; ”INTRODUCTION DES ONDES MILLIMETRIQUES DANS LE RESEAU DE DISTRIBUTION EN FRANCE”, ANNALES DES TÉLÉCOMMUNICATIONS, VOL40, P 202-208 1985.
- [7] NGOM, A. CONCEPTION DE PETITS RESEAUX D'ANTENNES RECONFIGURABLES OU" SMALL CELLS" POUR LE STANDARD 5G (DOCTORAL DISSERTATION, COTE D'AZUR), Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 2019.
- [8] LES PETITES CELLULES, UNE TECHNOLOGIE PROMETTEUSE POUR LA 5G, 2021, (ORANGE.COM)
- [9] CHAHBI, I. "EXPLOITATION DES ANTENNES MULTIPLES POUR L'OPTIMISATION DANS LES RESEAUX SANS FIL", DOCTORAL DISSERTATION, INSTITUT NATIONAL DES TELECOMMUNICATIONS, 2011.
- [10] <https://www.electricity-magnetism.org/fr/systemes-de-formation-de-faisceaux/>
- [11] BENYAROU MOURAD, " OPTIMISATION DES SYSTEMES MULTI-ANTENNES APPLIQUES AUX SYSTEMES MCCDMA. ", UNIVERSITE ABOU BAKR-BELKAID, TLEMCEM. THESE DE DOCTORAT 2012- 2013.
- [12] MABROUK, K. " CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME DE TELECOMMUNICATIONS MIMO AVEC FORMATION NUMERIQUE DE FAISCEAUX EN RECEPTION ; CALIBRAGE AVEUGLE DU DEMODULATEUR

BIBLIOGRAPHIE

TRIPHASE ZERO-IF ET COMPARAISON AU DEMODULATEUR CLASSIQUE A 2 VOIES I ET Q”, DOCTORAL DISSERTATION, TELECOM PARISTECH, 2008.

[13] [HTTPS://FR.M.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/BEAMFORMING](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Beamforming)

[14] [HTTPS://WWW.ELECTRICITY-MAGNETISM.ORG/FR/SYSTEMES-DE-FORMATION-DE-FAISCEAUX/](https://www.electricity-magnetism.org/fr/systemes-de-formation-de-faisceaux/)

[15] [HTTPS://WWW.ELECTRICITY-MAGNETISM.ORG/FR/SYSTEMES-DE-FORMATION-DE-FAISCEAUX/](https://www.electricity-magnetism.org/fr/systemes-de-formation-de-faisceaux/)

[15] [HTTPS://WWW.ELECTRICITY-MAGNETISM.ORG/FR/SYSTEMES-DE-FORMATION-DE-FAISCEAUX/](https://www.electricity-magnetism.org/fr/systemes-de-formation-de-faisceaux/)

[16] CAI,M. MODELING AND MITIGATING BEAM SQUIT IN "MILLIMETER WAVE WIRELESS COMMUNICATION ",DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSITY OF NOTRE DAME, 2018.

[17] M. RATSIMBAZAFY ANDRIAMANGA,"ETUDES DE PERFORMANCES DES TECHNIQUES DE BEAMFORMING DANS UN SYSTEME MASSIVE MIMO", THESE DE MASTER,UNIVERSITE D’ANTANANARIVO,2017/2018.

[18] M. RATSIMBAZAFY ANDRIAMANGA,"ETUDES DE PERFORMANCES DES TECHNIQUES DE BEAMFORMING DANS UN SYSTEME MASSIVE MIMO", THESE DE MASTER,UNIVERSITE D’ANTANANARIVO,2017/2018.

[19] WHITE, P., &REIL, G. L. "MILLIMETER-WAVE BEAMFORMING: ANTENNA ARRAY DESIGN CHOICES & CHARACTERIZATION WHITE PAPER" ROHDE-SCHWARZ-AD. COM. 2016.

[20] SYSTEMES DE FORMATION DE FAISCEAUX | COMMENT ÇA MARCHE, APPLICATION ET AVANTAGES (ELECTRICITY-MAGNETISM.ORG)

[21] AHMED, S. "BEAMFORMING MANAGEMENT AND BEAM TRAINING IN 5G SYSTEM’’, MASTER’S THESIS. 2019.

[22] ADVANCES IN MOBILE COMMUNICATION BY IMPLEMENTATION OF SMART ANTENNAS (RESEARCHGATE.NET)

[23] IOUSHUA, S., & ELDAR, Y. A FAMILY OF HYBRID ANALOG–DIGITAL BEAMFORMING METHODS FOR MASSIVE MIMO SYSTEMS. IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, 67, 3243-3257. (2019).

[24] LIN, T., CONG, J., ZHU, Y., ZHANG, J., & LETAIEF, K. "HYBRID BEAMFORMING FOR MILLIMETER WAVE SYSTEMS USING THE MMSE CRITERION. IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS", 67, 3693-3708, 2019.

BIBLIOGRAPHIE

- [25] [HTTPS://SPECTRUM.IEEE.ORG/TELECOM/WIRELESS/THE-CASE-FOR-HYBRID-BEAMFORMING-IN-5GMMWAVE-PROTOTYPES](https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/the-case-for-hybrid-beamforming-in-5gmmwave-prototypes), MAI 2021
- [26] DESIGN OF TRUE TIME DELAY "MILLIMETER WAVE BEAMFORMERS FOR 5G MULTIBEAM "PHASED ARRAYS - SCIENTIFIC FIGURE ON RESEARCHGATE. AVAILABLE ARCHITECTURE_FIG2_343714298 [ACCESSED 15 APR, 2024]
- [27] DILLI, R. PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTI USER "MASSIVE MIMO HYBRID BEAMFORMING SYSTEMS AT MILLIMETER WAVE FREQUENCY BANDS. WIRELESS NETWORKS, 27(3), 1925-1939, 2021.
- [28] JUNG, J. S., LEE, W. S., LEE, Y. R., KIM, J., & SONG, H. K. "IMPROVED HYBRID BEAMFORMING FOR MMWAVE MULTI-USER MASSIVE MIMO". CMC-COMPUTERS MATERIALS & CONTINUA, 67(3), 3057-3070, 2021.
- [29] HANAFI AHLAM ET MADANI RADJAA, "FORMATION DE FAISCEAUX HYBRIDE POUR LES RESEAUX D'ANTENNES DESTINES AU MASSIVE MIMO", diplôme de MASTER, Université, Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2022 /2023
- [30] T. E. Bogale, L. B and A. Haghghat, "Hybrid analog-digital beamforming: How many RF chains and phase shifters do we need?" IEEE Commun. and Afshin Haghghat, vol1 pp 26-09, 2014.
- [31] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, « Capacity limits of MIMO channels » IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, no. 5, pp. 684–702, 2003.
- [32] CLOSED-FORM "HYBRID BEAMFORMING SOLUTION FOR SPECTRAL EFFICIENCY UPPER BOUND MAXIMIZATION IN MMWAVE MIMO-OFDM SYSTEMS. MENGYUAN MA NHAN THANH NGUYEN AND MARKKU JUNTTI CENTRE FOR WIRELESS COMMUNICATIONS (CWC), UNINVESITY OF OULU, PO BOX 4500, F1-90014, FINLAND EMAIL (MENGYUAN MA, NHAN.NGUYEN, MARKKU.JUNTTI) @OULU.FI
- [33] T. S. RAPPAPORT, R. W. HEATH JR, R. C. DANIELS, AND J. N. MURDOCK, "MILLIMETER WAVE WIRELESS COMMUNICATIONS". PEARSON EDUCATION, 2015.
- [34] SOHRABI AND W. YU, "HYBRID ANALOG AND DIGITAL BEAMFORMING FOR MMWAVE OFDM LARGE-SCALE ANTENNA ARRAYS," IEEE J. SEL. AREAS COM-MUN., VOL. 35, NO. 7, PP. 1432-1443, APR 2017.

BIBLIOGRAPHIE

- [35] G. M. ZILLI AND W.-P. ZHU, "CONSTRAINED TENSOR DECOMPOSITION-BASED HYBRID BEAMFORMING FOR MM WAVE MASSIVE MIMO-OFDM COMMUNICATION SYSTEMS." IEEE TRANS. VEH. TECHNOL., APR 2021.
- [36] O. EL AYACH, S. RAJAGOPAL, S. ABU-SURRA, Z. PI, AND R. W. HEATH, "SPATIALLY SPARSE PRECODING IN MILLIMETER WAVE MIMO SYSTEMS," IEEE TRANS. WIRELESS COMMUN., VOL. 13, NO. 3, PP. 1499-1513, JAN 2014.
- [37] A. M. SAYEED, "DECONSTRUCTING MULTIAN TENNA FADING CHANNELS," IEEE TRANS. SIGNAL PROCESS. VOL. 50, NO. 10, PP. 2563-2579-2002.
- [38] X. YU, J.-C. SHEN, J. ZHANG, AND K. B. LETAIEF, "ALTERNATING MINIMIZATION ALGORITHMS FOR HYBRID PRECODING IN MILLIMETER WAVE MIMO SYSTEMS," IEEE J. SEL. TOPICS SIGNAL PROCESS. VOL. 10, NO. 3, PP. 485-500, FEB 2016.
- [39] H.-W. KU, W.-H. FANG, H.-L. TSO, P.-Y. TSAI AND Y.-H. HUANG, "LOW- COMPLEXITY WIDEBAND HYBRID PRECODING FOR MM WAVE MIMO-OFDM." IN PROC. IEEE INT. SYMP. ON CIRCUITS AND SYSTEMS. IEEE. MAY 2021. PP. 1-5.
- [40] MERABTI.Y, MMEOURZIFI.O « OPTIMISATION DES RESEAUX DE NEURONES MLP PAR L'ALGORITHME HYBRIDE AG-RT POUR LE CONTROLE D'UN SYSTEME NON LINEAIRE ». UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI D'OUM EL BOUAGHI. MEMOIRE DE MASTER 2015.
- [41] C. F. JUANG, « A HYBRID OF GENETIC ALGORITHM AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR RECURRENT NETWORK DESIGN ». IEEE TRANS. SYST., MAN, CYBERN. B, CYBERN., VOL. 34, NO. 2, PP. 997– 1006, 2004
- [42] D. E. GOLDBERG, « ALGORITHMES GÉNÉTIQUES, » EDITIONS ADDISON-WESLEY FRANCE ». JUIN 1994.
- [43] BOUSAHLA .M « ANALYSE ET SYNTHÈSE DE RESEAUX PLANS OU CONFORMES D'ANTENNES IMPRIMÉES PAR META-HEURISTIQUES FLOUES ». UNIVERSITE DE TLEMCE N . THESE DE DPCTORAT 2012.
- [44] Ali d.L. « Introduction aux métaheuristiques ». Faculté des sciences exactes et informatique . Université de jijel, 2014.
- [45] J.H. HOLLAND, « ADAPTATION IN NATURAL AND ARTIFICIAL SYSTEMS » 2EME EDITION. MIT PRESS, 1992.

BIBLIOGRAPHIE

[46] C.L BRIDGES AND D.E GOLDBERG « AN ANALYSIS OF MULTIPOINT CROSSOVER » IN PROCEEDINGS OF THE FOUNDATION OF GENETIC ALGORITHMS. FOGA, 1991.

[47] M.SHEHTA. « HYBRID ANALOG AND DIGITAL TECHNIQUES APPLIED TO MASSIVE MIMO SYSTEMS FOR 5G TRANSMISSION AT MILLIMETER WAVES » THESE DE DOCTORAT.UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE, 07/11/2019.

[48] C. H. DOAN, S. EMAMI, D. A. SOBEL, A. M. NIKNEJAD, AND R. W. BRODERSEN, « DESIGN CONSIDERATIONS FOR 60 GHz CMOS RADIOS » IEEE COMMUN. MAG., VOL. 42, NO. 12, PP. 132–140, 2004.

Résumé

L'étude se concentre sur l'évaluation d'un système à formation de faisceaux hybride pour les MIMO massifs-OFDM multi-utilisateurs, avec comme objectif principal l'optimisation des performances du système. En utilisant le logiciel MATLAB, l'analyse et la simulation du système visent à améliorer la fiabilité et l'efficacité spectrale de la technologie 5G et d'augmenter le rapport signal/bruit des communications sans fil en utilisant des réseaux d'antennes. L'accent est mis sur l'optimisation des précodeurs et des combineurs analogiques et numériques à l'aide de l'algorithme génétique, dans le but de simplifier le système et de réduire les coûts de mise en œuvre en optimisant le nombre d'antennes, le nombre de chaînes RF et le nombre de flux de données.

Les mots-clés : 5G, Beamforming, Précodage hybride, mmWave, MIMO massif, OFDM, Optimisation, Algorithme génétique.

Abstract

The study focuses on the evaluation of hybrid beams for multi-user massive MIMO-OFDM systems, with the main objective of optimizing system performance. Using MATLAB software, the system analysis and simulation aims to improve the reliability and spectral efficiency of 5G technology and increase the signal-to-noise ratio of wireless communications using antenna arrays. The focus is on optimizing analog and digital precoders and combiners using the genetic algorithm, with the aim of simplifying the system and reducing implementation costs by optimizing the number of antennas, the number of RF channels and the number of data streams.

Keywords: 5G, Beamforming, Hybrid precoding, mmWave, Massive MIMO, OFDM, Optimization, Genetic algorithm

ملخص

تركز الدراسة على تقييم نظام تشكيل الحزم الهجين لـ OFDM MIMO الضخم متعدد المستخدمين، بهدف رئيسي هو تحسين أداء النظام. باستخدام برنامج MATLAB، يهدف تحليل النظام والمحاكاة إلى تحسين الموثوقية والكفاءة الطيفية لتقنية 5G وزيادة نسبة الإشارة إلى الضوضاء للاتصالات اللاسلكية باستخدام صفائف الهوائيات. ينصب التركيز على تحسين أجهزة التشفير والمجمعات التناظرية والرقمية باستخدام الخوارزمية الجينية، بهدف تبسيط النظام وتقليل تكاليف التنفيذ من خلال تحسين عدد الهوائيات وعدد قنوات الترددات اللاسلكية وعدد تدفقات البيانات.

الكلمات الدالة: 5G، تشكيل الحزم، التشفير المسبق الهجين، mmWave، MIMO الضخم، OFDM التحسين، الخوارزمية الجينية.