

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABOUBAKR BELKAID – TLEMCCEN



FACULTE DES TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

***Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER En :
Télécommunications***

***Spécialité : Systèmes des Télécommunications et
Réseaux de Télécommunications***

Par :

- ***HADJ SLIMANE MOUAD***
- ***SENOUCI BEREKSI ALI***

THEME

***Étude du beamforming hybride MIMO massif-OFDM pour la
5G en utilisant l'algorithme heuristique***

Soutenu publiquement, le 15 juin 2025 devant le jury composé de :

<i>M. BOUACHA Abdelhafid</i>	<i>Prof</i>	<i>Université de Tlemcen</i>	<i>Président</i>
<i>M. KHELLADI Mounir</i>	<i>MCA</i>	<i>Université de Tlemcen</i>	<i>Examineur</i>
<i>M. BAHRI Sidi Mohammed</i>	<i>MCB</i>	<i>Université de Tlemcen</i>	<i>Encadreur</i>

Année universitaire 2024/2025

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 **M. BAHRI Sidi Mohammed**, notre encadrant, pour sa guidance et son accompagnement précieux tout au long de ce projet.

Nous exprimons également notre reconnaissance à **M. BOUACHA Abdelhafid** et **M. KHELLADI Mounir**, membres de notre jury, pour le temps qu'ils nous ont consacré, la qualité de leurs remarques 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.

DEDICACE

Je dédie ce mémoire, fruit de plusieurs années d'efforts, de sacrifices et de persévérance, à toutes les personnes qui ont marqué mon parcours académique et personnel.

A mes chers parents, et pour nous deux famille SENOUCI BEREKSI et HADJ SLIMANE , qui m'ont transmis les valeurs du travail, de l'honnêteté et du courage. Leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien moral ont toujours été ma force motrice. Sans eux, ce parcours n'aurait pas été possible. Merci pour vos prières, vos encouragements silencieux et votre confiance indéfectible.

A mes frères et sœurs, qui ont su me motiver, me soutenir et m'encourager même dans les moments de doute. Leur présence m'a souvent redonné l'énergie nécessaire pour avancer.

A mes amis fidèles, pour leur bienveillance, leur écoute, leurs conseils et tous les moments partagés qui ont égayé ce long chemin. Vous avez su me rappeler que l'équilibre entre les études et les relations humaines est essentiel.

A mes enseignants et encadrants, pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité, et les conseils précieux qu'ils m'ont apportés tout au long de ma formation. Je leur dois une grande part de ma réussite.

Et enfin, à toute les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire et à notre évolution personnelle et intellectuelle. Je leur exprime ma profonde gratitude.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'évaluation d'un système de formation de faisceaux hybride, appliqué aux réseaux MIMO massifs multi-utilisateurs intégrant la modulation multi-porteuses OFDM, dans le contexte des réseaux 5G. L'objectif principal est d'optimiser l'efficacité spectrale et la fiabilité du système, tout en réduisant les coûts matériels grâce à une architecture hybride combinant des traitements analogiques et numériques.

Un algorithme heuristique est utilisé pour optimiser conjointement les précodeurs et les combineurs, en recherchant un compromis entre complexité, consommation énergétique et qualité du lien radio. Les résultats obtenus montrent que l'architecture hybride peut offrir des performances proches de celles d'un système entièrement numérique, tout en étant plus économique.

Mots-clés : 5G, formation de faisceaux, précodage hybride, ondes millimétriques, MIMO massif, OFDM, optimisation, Algorithme heuristique.

Summary

This dissertation focuses on evaluation of a hybrid beamforming system applied to multi-user massive MIMO networks incorporating OFDM multicarrier modulation in the context of 5G networks. The main objective is to optimize the spectral efficiency and reliability of the system while reducing hardware costs through a hybrid architecture that combines analog and digital processing.

A heuristic algorithm is used to jointly optimize the precoders and combiners, aiming for a balance between complexity, energy consumption, and radio link quality. The results show that the hybrid architecture can achieve performance close to that of a fully digital system, while being more cost-effective.

Keywords : 5G, Beamforming, Hybrid Precoding, mmWave, Massive MIMO, OFDM, Optimization, Heuristic algorithm.

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Summary	iii
Liste des Figures	vii
Liste des abréviations	viii
Introduction générale :	1
Chapitre 1 : Technique de formation de faisceaux pour les systèmes mimo massif	
----- Error! Bookmark not defined.	
1.1 Introduction :	3
1.2 La technologie du 5G :	3
1.2.1 Les ondes millimétriques :	4
1.2.2 duplex intégré :	4
1.2.3 Petites cellules :	5
1.2.4 MIMO massif :	5
1.2.5 Beamforming (Formation des faisceaux) :	6
1.2.6 Technique OFDM :	6
1.3 Formation des faisceaux :	6
1.3.1 Principes fondamentaux :	6
A/ Contrôle des phases et des amplitudes :	7
B/ Emission directionnelle :	7
C/ Réception optimisée :	7
1.3.2 Avantages et limites de techniques de formation de faisceaux :	7
1.4 Techniques de formation de faisceaux :	8
1.4.1 Technique de formation de faisceaux analogique :	8
1.4.2 Technique de formation de faisceaux numérique :	9
1.5 Comparaison entre Formation de faisceaux analogique et numérique :	10
1.6 Avantages et inconvénients de la formation de faisceaux analogique et numérique :---	10
1.7 Classification de la technique formation de faisceaux :	11
1.7.1 Formation de faisceaux conventionnelle (commutée) :	11

1.7.2 Formation des faisceaux adaptative :-----	11
Conclusion : -----	12
Chapitre 2 : formation de faisceaux hybride -----	Error! Bookmark not defined.
2.1.Introduction -----	13
2.2. Définition de formation des faisceaux hybride : -----	13
2.3. Architecture générale de formation des faisceaux hybride : -----	14
2.4. la méthodologie proposée :-----	14
2.5. Architecture d'un Système de Formation de Faisceau Hybride : -----	16
2.6. Structure de formation de faisceau hybride : -----	16
2.6.1 Structure entièrement connectée :-----	16
2.6.2 Structure partiellement connectée : -----	17
2.7. Comparaison entre les structures : -----	18
2.8. Avantage de formation faisceaux hybride (HBF) : -----	18
2.9. Conclusion-----	19
Chapitre 3 : Résultat et simulation -----	Error! Bookmark not defined.
3.1.Introduction :-----	20
3.2.Système MIMO massif avec beamforming hybride et OFDM :-----	20
A. Modèle de canal :-----	22
B. Formulation du problème-----	23
3.3.Conception de la formation de faisceaux hybride pour les systèmes MIMO à grande échelle a utilisateur unique : -----	23
A. Conception du pré-codeur numérique pour $N_{RF} = N_S$:-----	24
B. Conception du précodeur RF $N_{RF} = N_S$:-----	25
B. Conception du combinateur hybride pour $N_{RF} = N_S$ -----	27
C. Conception de la formation de faisceaux hybride pour $N_S < N_{RF} < 2N_S$ -----	28
3.4. Notion de base sur langage utilisé (Matlab) :-----	28
3.5. Simulation et discussion des résultats -----	29
3.5.1 Impact de la variation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception-----	29
3.5.1.1 L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_t et N_r :-----	30
3.5.1.2 Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_t et N_r : -----	31
3.5.2 L'impact de la variation du nombre de chaines RF a l'émission et à la réception : 31	

3.5.2.1: L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_{RF} : -----	32
3.5.2.2: Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_{RF} : -----	33
3.5.2.3: L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_S -----	34
3.5.2.4: Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_{RF} et N_S : -----	34
3.6. Conclusion : -----	35
Conclusion générale : -----	37
Bibliographie -----	38

LISTE DES FIGURES

Figure1. 1: Les différents technologie de la 5G[3] -----	3
Figure1. 2: Spectre de fréquence des ondes millimétrique [6] -----	4
Figure1. 3: Présentation des différentes figures de répartition [7]-----	5
Figure1. 4: Système MIMO [9]-----	5
Figure1. 5: Principe de formation de faisceaux [12]-----	7
Figure1. 6: la formation de faisceau analogique.[15]-----	9
Figure1. 7: Formation de faisceaux numérique [17]-----	9
Figure1. 8: Système à faisceaux commutés. -----	11
Figure1. 9: Faisceaux adaptatifs [22] -----	11
Figure2. 1: formation de faisceaux hybride [24] -----	13
Figure2. 2: Architecture d'un système de formation de faisceaux hybrides.[25]-----	14
Figure2. 3: Schéma de principe des étapes de pré-codage au niveau de l'émetteur en ondes [26]-----	15
Figure2. 4: Schéma de principe des étapes de pré-codage au niveau du récepteur en ondes millimétriques [26] -----	15
Figure2. 5: Architecture hybride entièrement connectée [28]-----	16
Figure2. 6: Architecture hybride partiellement connectée.[28] -----	17
Figure3. 1: Structure de l'émetteur-récepteur HBF dans un système MIMO OFDM à ondes [32]-----	21
Figure3. 2: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_t et N_r -----	30
Figure3. 3: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_t et N_r . -----	31
Figure3. 4: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_{RF} -----	32
Figure3. 5: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_{RF} -----	33
Figure3. 6: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_s -----	34
Figure3. 7: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_s -----	35

LISTE DES ABREVIATIONS

5G	Cinquième génération.
BER	Taux d'erreur binaire.
BS	Station de base.
FD	Duplex intégral.
FDD	duplex par répartition en fréquence.
VR	Fréquence radio.
HBF	Formation de faisceaux hybride.
MATLAB	Laboratoire MATrix.
MIMO	Entrées Multiples sorties Multiple.
MmWave	Ondes millimétrique.
N_{RF}	Nombres de chaines RF.
N_s	Nombre de flux de données.
N_t	Nombre d'antenne à l'émission.
N_r	Nombre d'antenne à la réception.
OFDM	Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence.
RF	Radio Fréquence.
RX	Réception.
SNR	Rapport Signal sur bruit.
SE	Efficacité spectral
TX	Transmission

Introduction générale :

L'évolution rapide des technologies de communication sans fil a conduit à l'émergence de la cinquième génération de réseaux mobiles (5G), qui vise à répondre à la demande croissante en bande passante, en connectivité fiable et à faible latence. Parmi les technologies clés qui rendent cette avancée possible, le MIMO massif (Massive Multiple Input Multiple Output) combiné à l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) constitue une solution prometteuse pour améliorer significativement la capacité, la couverture et l'efficacité spectrale des réseaux.

Le concept de MIMO massif repose sur l'utilisation d'un grand nombre d'antennes à la station de base afin d'exploiter pleinement la diversité spatiale et le multiplexage. Toutefois, la mise en œuvre de systèmes MIMO à grande échelle soulève plusieurs défis matériels et énergétiques, en particulier à cause de la complexité et du coût des chaînes RF (Radio Fréquence). Pour faire face à ces contraintes, la formation de faisceaux hybride (hybrid beamforming) a été introduite. Elle permet de combiner la flexibilité du traitement numérique avec l'efficacité du traitement analogique, tout en réduisant le nombre de chaînes RF nécessaires.

Dans ce contexte, l'objectif de ce projet est de mener une étude théorique du beamforming hybride dans un système MIMO massif-OFDM, en mettant particulièrement l'accent sur un algorithme heuristique et une approche MMSE (Minimum Mean Square Error) pour l'estimation et le pré-codage des signaux. Cette méthode, largement utilisée dans les systèmes de communication modernes, vise à minimiser l'erreur quadratique moyenne entre le signal transmis et le signal reçu, contribuant ainsi à une meilleure qualité de service et à une robustesse accrue face aux interférences.

Afin d'évaluer les performances de cette architecture, des simulations ont été réalisées dans l'environnement MATLAB. Ces analyses permettent d'examiner l'impact de divers paramètres tels que le nombre d'antennes, le nombre de chaînes RF et le nombre de flux de données sur l'efficacité du système. Les résultats obtenus offriront une meilleure compréhension des compromis à établir entre performance, complexité et coût dans la conception de systèmes 5G exploitant le beamforming hybride.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente les principes de base du MIMO massif ainsi que les différentes techniques de formation de faisceaux appliquées dans le cadre de l'OFDM.

Le deuxième chapitre traite de la formation de faisceaux hybrides, qui combine des techniques analogiques et numériques. Il présente l'architecture générale, détaille le précodage hybride et compare les structures entièrement et partiellement connectées. Cette analyse met en lumière les avantages et les limites de cette approche.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation et à l'analyse des performances du système étudié, en soulignant les gains apportés par l'approche hybride.

Enfin, nous concluons ce mémoire par une synthèse des résultats et des perspectives de recherche.

1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous examinons les méthodes de formation de faisceaux (beamforming), qu'elles soient traditionnelles ou émergentes, en analysant leurs contraintes. Le beamforming, l'une des technologies clés des systèmes de communication mobiles avancés, joue un rôle central dans la 5G.

Nous commençons par introduire les principales innovations de la 5G, notamment les ondes millimétriques, le Full-Duplex, les petites cellules et le MIMO massif, avant d'aborder en détail le principe et les applications du beamforming. Cette technique, en effet, ne se limite pas aux télécommunications : elle est également utilisée en radioastronomie, en imagerie biomédicale, dans les systèmes sonar et même en sismologie. [1]

1.2 La technologie du 5G :

La cinquième génération de réseaux mobiles (5G) marque une rupture technologique significative par rapport aux précédentes normes de communication. Conçue pour répondre à l'explosion de la demande utilisateur et à l'essor des applications gourmandes en données, cette technologie vise à offrir des débits inédits, une latence ultra-faible et une capacité réseau accrue. Les instances internationales de standardisation, telles que l'ITU et le 3GPP, ont établi des spécifications rigoureuses pour la 5G, en particulier concernant son aptitude à supporter des bandes de fréquences étendus et des cas d'usage innovants.



Figure1. 1: Les différentes technologies de la 5G[2]

1.2.1 Les ondes millimétriques :

Les ondes millimétriques permettent d'atteindre des débits très élevés, ce qui en fait un élément clé de la technologie 5G. Cependant, en raison de leurs limitations en termes de propagation, elles sont principalement utilisées en complément des fréquences inférieures à 6 GHz afin de garantir une couverture réseau continue.[3]

Les antennes jouent un rôle essentiel dans les systèmes exploitant ces fréquences, car les performances des dispositifs actifs s'améliorent avec l'augmentation de la fréquence.[4]

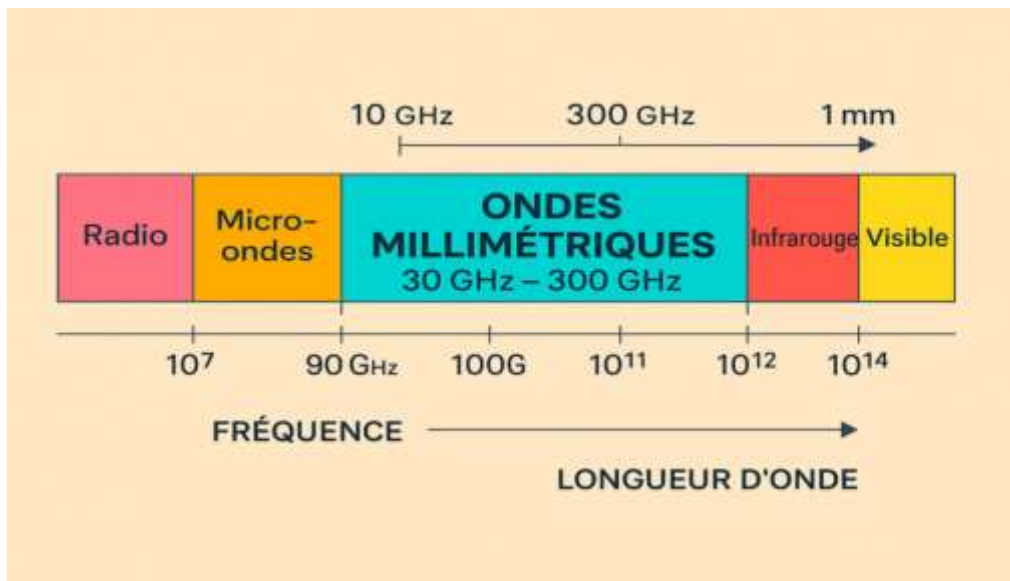


Figure1. 2: Spectre de fréquence des ondes millimétrique

1.2.2 Duplex intégré :

La technologie Full-Duplex (FD) permet une transmission radio simultanée en émission et en réception sur la même bande de fréquences. Grâce à ses nombreux avantages, elle est considérée comme une solution prometteuse pour les systèmes de communication sans fil de la 5G et des générations futures. Parmi ses atouts figurent notamment le potentiel de doublement de la capacité réseau et l'amélioration de l'efficacité spectrale. Cependant, l'un des principaux défis du Full-Duplex réside dans la gestion et la réduction des interférences, qui peuvent affecter la qualité de transmission et limiter ses performances réelles.

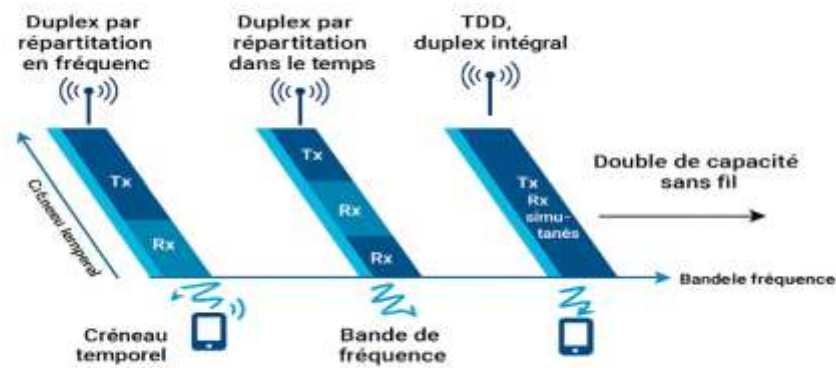


Figure1. 3: Présentation des différentes figures de répartition [5]

1.2.3 Petites cellules :

Les petites cellules, sont des équipements de télécommunications mobiles conçus pour fonctionner à courte portée avec une faible puissance d'émission. Essentielles au déploiement de la 5G, elles nécessitent l'installation de nombreuses stations de base couvrant des zones limitées, y compris des environnements intérieurs tels que les gares et les centres commerciaux. Leur capacité à densifier le réseau en fait une solution idéale pour améliorer le haut débit mobile, notamment dans les zones urbaines fortement peuplées. Toutefois, leur déploiement ne se limite pas aux centres urbains, car elles peuvent être utilisées dans divers environnements pour optimiser la connectivité.

1.2.4 MIMO massif :

Le MIMO massif (multiple-input, multiple-output) permet d'utiliser plusieurs antennes à la transmission et la réception pour améliorer la capacité et la fiabilité de signal. Le MIMO massif va plus loin en utilisant des dizaines voire des centaines d'antennes sur les stations de base pour servir plusieurs utilisateurs simultanément. [6]

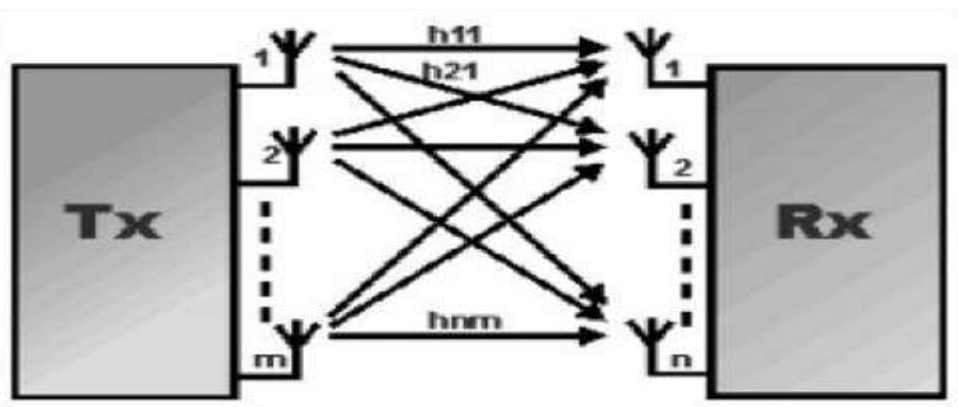


Figure1. 4: Système MIMO [7]

1.2.5 Beamforming (Formation des faisceaux) :

Les systèmes de formation de faisceaux occupent une place clé dans la télécommunication moderne, notamment dans les technologies sans fil, en optimisant la transmission et la réception des signaux. En s'appuyant sur des antennes en réseaux, ces systèmes concentrent l'énergie du signal vers des directions précises, ce qui améliore la performance de réseaux cellulaires et des communications satellitaires. Cette technique connue sous nom de « **beamforming** » ou formation des faisceaux, repose sur un ajustement précis des phases et des amplitudes des signaux émis par chaque élément d'antenne. En synchronisant leur fonctionnement, ces antennes génèrent un faisceau orienté vers une cible spécifique, renforçant ainsi le signal dans cette direction tout en réduisant son intensité ailleurs.

1.2.6 Technique OFDM :

L'OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) est une technique de modulation qui permet de transmettre plusieurs signaux en parallèle sur des sous-porteuses orthogonales. Elle est utilisée en 5G pour réduire les interférences inter-symbole et améliorer l'efficacité spectrale. [8]

1.3 Formation des faisceaux :

Le beamforming ou formation des faisceaux est une technique utilisée en télécommunication c'est pour diriger le signal dans une direction spécifique en combinant les signaux de plusieurs antennes. Cela améliore la qualité de transmission et réduit les interférences et augmente l'efficacité.

1.3.1 Principes fondamentaux :

La formation de faisceaux (beamforming) est une technique essentielle dans les systèmes de communication MIMO massif, notamment pour la 5G. Elle consiste à orienter les signaux transmis ou reçus par un réseau d'antennes dans des directions spécifiques, améliorant ainsi le rapport signal sur bruit (SNR) et réduisant le taux d'erreur binaire (BER). [9]

Pour comprendre pleinement le fonctionnement du beamforming, il est essentiel d'examiner les mécanismes physiques qui le sous-tendent, notamment le contrôle des phases et des amplitudes, l'émission directionnelle, ainsi que la réception optimisée.

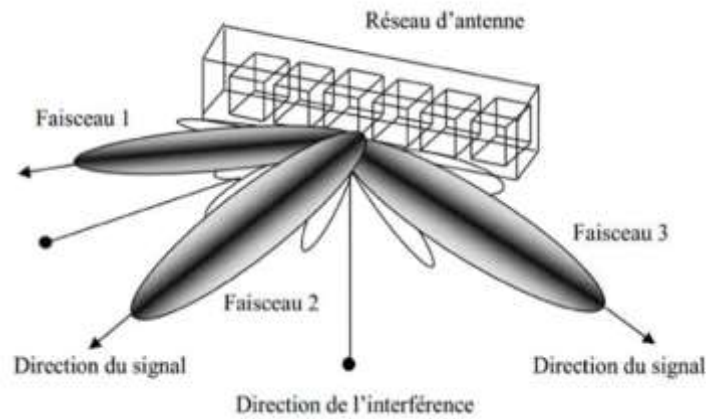


Figure1. 5: Principe de formation de faisceaux [10]

A/ 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 plan d'onde.[11]

B/ Emission 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]

C/ 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.[11]

1.3.2 Avantages et limites de techniques de formation de faisceaux :

Après avoir présenté le principe du beamforming, il convient désormais d'examiner ses avantages ainsi que ses limites.

a. Avantages de la formation de faisceaux :

1. **Amélioration de la qualité du signal :** Le beamforming optimise la transmission en concentrant le signal vers le récepteur, ce qui améliore la qualité de réception, accélère le transfert des données et réduit les erreurs.

2. **Réduction des interférences** : En limitant la diffusion du signal aux directions ciblées, il minimise les interférences pour les autres utilisateurs et améliore la clarté des communications.
3. **Optimisation de l'Efficacité Spectral** : La focalisation des ondes via le beamforming optimise l'exploitation du spectre, contribuant ainsi à une augmentation significative de la capacité réseau.

b. Limites de la formation de faisceaux :

1. **Forte Exigence en Ressources** : Le beamforming nécessite des calculs complexes et une puissance de traitement élevée, ce qui peut ralentir son efficacité et augmenter la consommation d'énergie dans certains cas.
2. **Diminution des performances avec la Distance** : l'efficacité du faisceau diminue à mesure que le récepteur s'éloigne de l'émetteur, entraînant une dégradation du signal et une réduction du débit de transmission.

1.4 Techniques de formation de faisceaux :

Dans cette section, nous examinerons les différentes approches utilisées pour générer des faisceaux dans les antennes intelligentes. L'objectif est de diriger les lobes principaux vers les sources désirées tout en orientant les lobes nuls vers les interférences. Nous commencerons par explorer les méthodes analogiques avant de passer aux techniques numériques.[14]

1.4.1 Technique de formation de faisceaux analogique :

Le beamforming analogique repose sur une architecture matérielle relativement simple, ce qui facilite sa mise en œuvre. Cependant, cette méthode présente certaines limitations, notamment un gain d'antenne réduit et une efficacité moindre. Son inefficacité provient du fait que seules les phases des signaux d'émission et de réception sont ajustées, sans possibilité de contrôle sur leurs amplitudes. Bien que l'intensité du signal puisse être modulée, l'absence de contrôle sur l'amplitude limite son application aux systèmes de communication exploitant les ondes millimétriques et la MIMO massive.

Comme illustré dans la Figure 1.6, le beamforming analogique repose sur une source RF unique partagée entre plusieurs éléments d'antenne. L'orientation du faisceau est obtenue en modulant les déphaseurs analogiques le long du trajet RF. [15]

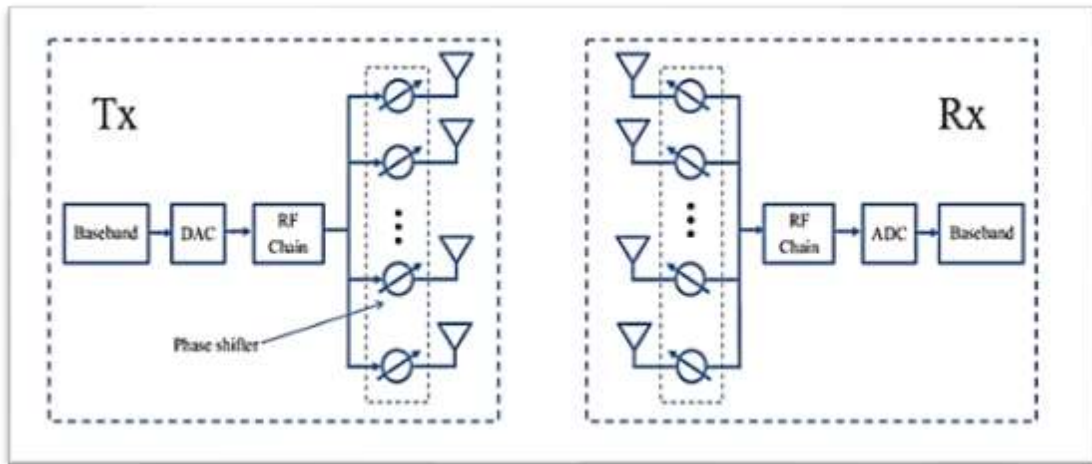


Figure1. 6: la formation de faisceau analogique.[15]

1.4.2 Technique de formation de faisceaux numérique :

La formation des faisceaux numérique permet de gérer un nombre de chaînes RF équivalent au nombre d'éléments d'antenne, offrant ainsi une flexibilité accrue pour l'émission et la réception. A l'inverse, la formation de faisceaux analogique est généralement limitée à une seule chaîne RF, même en présence d'un grand nombre d'antennes.

Grace à un recodage efficace au niveau de la bande de base numérique, il est possible d'optimiser la transmission et la réception, facilitant ainsi l'intégration de techniques avancées telles que le MIMO à faisceaux multiples. Comparée aux autres méthodes de formation de faisceaux, cette approche offre des performances théoriques maximales.[17]

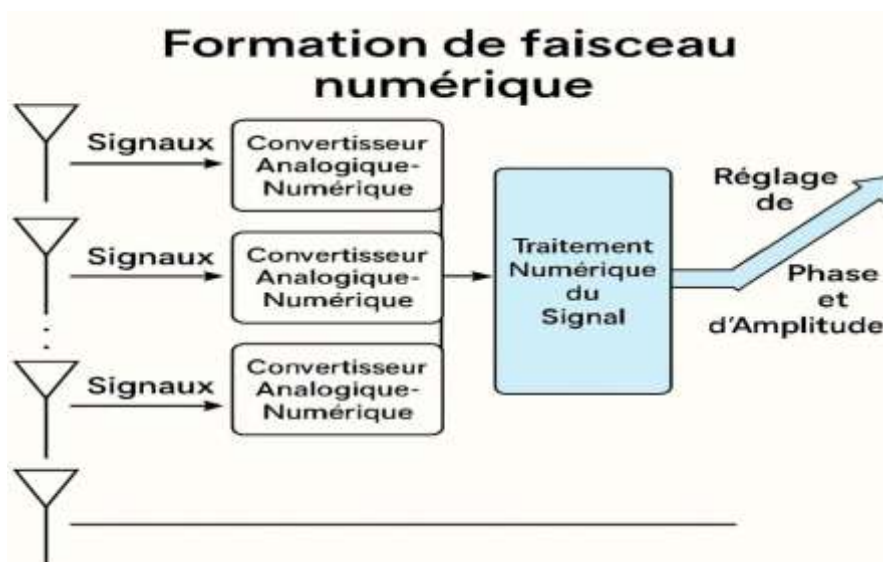


Figure1. 7: Formation de faisceaux numérique [17]

Sur une large bande de fréquences, le contrôle numérique de la chaîne RF permet d'optimiser les phases en fonction de la fréquence. Toutefois, en pratique, la formation de

faisceaux numérique n'est pas toujours la solution idéale pour les applications 5G. En effet, ses exigences matérielles complexes et coûteuses entraînent une consommation d'énergie accrue et compliquent son intégration dans les appareils mobiles.

Cette approche est mieux adaptée à la station de base, où la priorité est donnée aux performances plutôt qu'à la mobilité. Elle joue un rôle clé dans l'optimisation des réseaux, permettant la transmission simultanée de plusieurs flux et la prise en charge de plusieurs utilisateurs en même temps.[19]

1.5 Comparaison entre Formation de faisceaux analogique et numérique :

Critère	Formation de faisceaux analogique	Formation de faisceaux numérique
Architecture	Utilise un seul chemin RF partagé entre plusieurs antennes.	Chaque antenne dispose de sa propre chaîne RF .
Performance	Moins performant en raison du manque de contrôle sur l'amplitude .	Performances optimales grâce au précodage numérique .
Consommation d'énergie	Faible, car peu de composants actifs sont utilisés .	Elevée en raison du grand nombre de chaînes RF.
Coût	Relativement bas .	Elevée ,en raison des exigences matérielles complexes
Adaptation aux ondes millimétriques	Moins adapté en raison du manque de flexibilité	Bien adapté grâce au contrôle numérique avancé
Latence	Faible en raison de sa simplicité	Potentiellement plus élevée en raison du traitement numérique
Capacité MIMO	Limitée	Permet le MIMO à faisceaux multiples, optimisant la transmission et la réception

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

Le beamforming analogique se distingue par son faible coût et sa latence réduite, ce qui en fait une solution économique et rapide. Cependant, il offre une flexibilité limitée, ce qui peut restreindre son adaptabilité à des environnements complexes. À l'inverse, le beamforming numérique se caractérise par une flexibilité accrue et des performances optimisées, mais au prix d'une complexité matérielle plus élevée, d'un coût plus important et d'une latence légèrement supérieure.

1.7 Classification de la technique formation de faisceaux :

Les techniques de formation de faisceaux peuvent être classées selon différents critères. Voici une classification générale basée sur les principaux aspects des méthodes employées.

1.7.1 Formation de faisceaux conventionnelle (commutée) :

La formation de faisceaux conventionnelle, aussi appelée formation commutée, repose sur un ensemble prédéfini de poids et de déphaseurs permettant d'orienter le faisceau dans une direction spécifique. Ce processus nécessite uniquement la connaissance de la disposition des antennes dans le réseau ainsi que de l'angle souhaité pour orienter le faisceau. Un exemple typique de cette approche est le réseau de Butler.[20]

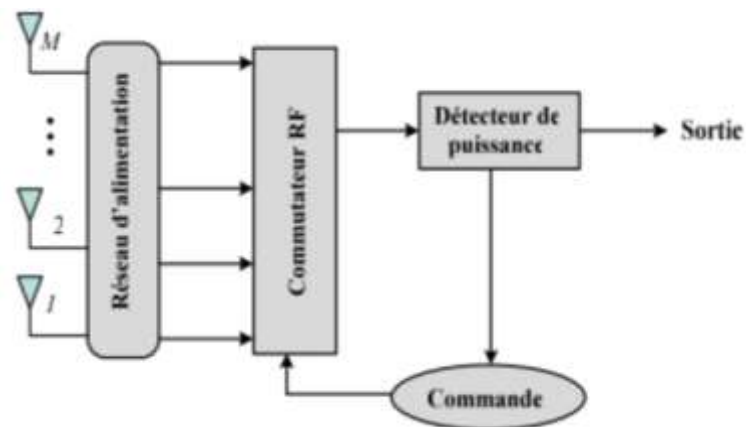


Figure1. 8: Système à faisceaux commutés.

1.7.2 Formation des faisceaux adaptative :

Contrairement à la méthode conventionnelle, la formation de faisceaux adaptative ajuste en continu les poids appliqués aux signaux de chaque élément du réseau. Cette adaptation permet d'optimiser dynamiquement la direction du faisceau afin de maximiser la réception du signal souhaité tout en minimisant l'impact des interférences et du bruit.[21]

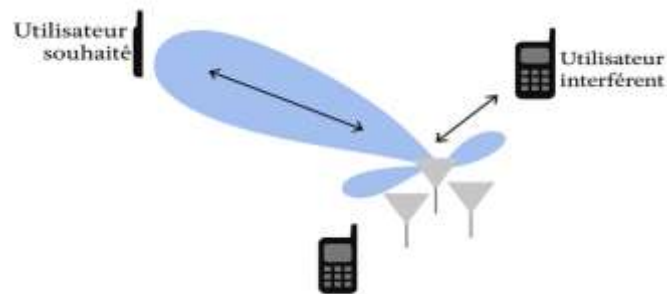


Figure1. 9: Faisceaux adaptatifs [22]

Quelque caractéristique clés de la formation de faisceaux adaptative :

- Couramment utilisée dans des domaines tels que les radars, les sonars, la communication sans fils et les réseaux de microphone.
- Mise en œuvre grâce a des algorithmes adaptatifs, tels que les moindres carrés moyens (LMS) et les moindres carrés récurrents (RLS), qui ajustent de manière itérative les poids en fonction des propriétés du signal reçu.

Conclusion :

Dans ce chapitre , nous avons exploré les différents méthodes de formation de faisceaux, essentielles pour optimiser l'efficacité spectrale, réduire les interférences et améliorer la connectivité des réseaux sans fil. Chaque approche présente des avantages et des inconvénients. La formation de faisceaux analogique, bien que simple et économique, manque de flexibilité et de précision. A l'inverse, la formation de faisceaux numérique offre un contrôle optimal des signaux, mais au prix d'une complexité accrue et d'une consommation énergétique plus élevée.

Pour concilier ces contraintes, la formation de faisceaux hybride représente une avancée majeure en combinant les bénéfices des deux approches. Elle permet d'optimiser les performances des systèmes de transmission tout en maintenant un bon équilibre entre cout, efficacité et consommation d'énergie. L'évolution continue de ces technologies, notamment avec l'intégration d'algorithmes intelligents, jouera un rôle clé dans l'optimisation des futurs réseaux sans fil, répondant aux exigences croissantes des applications modernes comme l'internet des objets, la réalité augmentée et les véhicules autonomes.

2.1 Introduction :

La technologie de formation hybride de faisceaux (HBF) s'impose comme un composant clé dans les systèmes de communication massifs MIMO utilisant les ondes millimétriques (mmWave). Elle permet de réduire significativement le nombre de chaînes radiofréquences, ce qui entraîne une diminution des coûts matériels et de la consommation énergétique, tout en offrant des performances proches de celles des architectures de formation de faisceaux entièrement numériques. Les approches classiques en HBF visent principalement à optimiser l'efficacité spectrale, en s'adaptant à des architectures spécifiques de connexion, qu'elles soient entièrement ou partiellement connectées.

2.2 Définition de formation des faisceaux hybride :

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

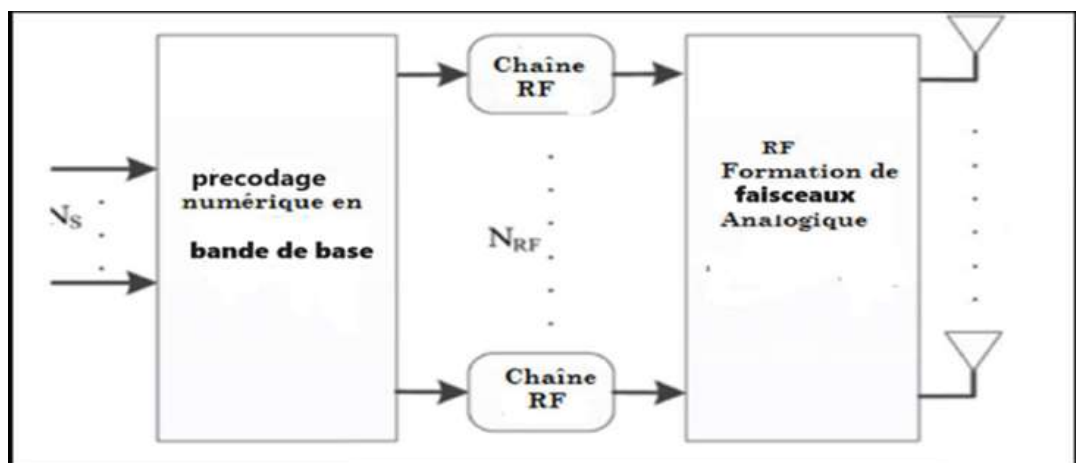


Figure2. 1: formation de faisceaux hybride [24]

2.3 Architecture générale de formation des faisceaux hybride :

La formation de faisceaux hybride (HBF) ne nécessite pas l'installation d'un commutateur de transmission/réception (TX/RX) derrière chaque élément du réseau. A la place, les éléments sont regroupés en sous-réseaux, ou chaque élément est équipé d'un déphaseur unique. Cette approche permet de contrôler a la fois l'amplitude et la phase de signal au niveau des sous-réseaux, tandis que seuls les réglages de phase sont possibles au niveau des éléments individuels. Les déphaseurs sont généralement conçus a l'aide de composants analogiques, tandis que les pondérations appliquées aux sous-réseaux sont gérées numériquement, ce qui justifie l'appellation de formation de faisceaux hybride. Le schéma bloc ci-dessous illustre une configuration typique d'un tel système.

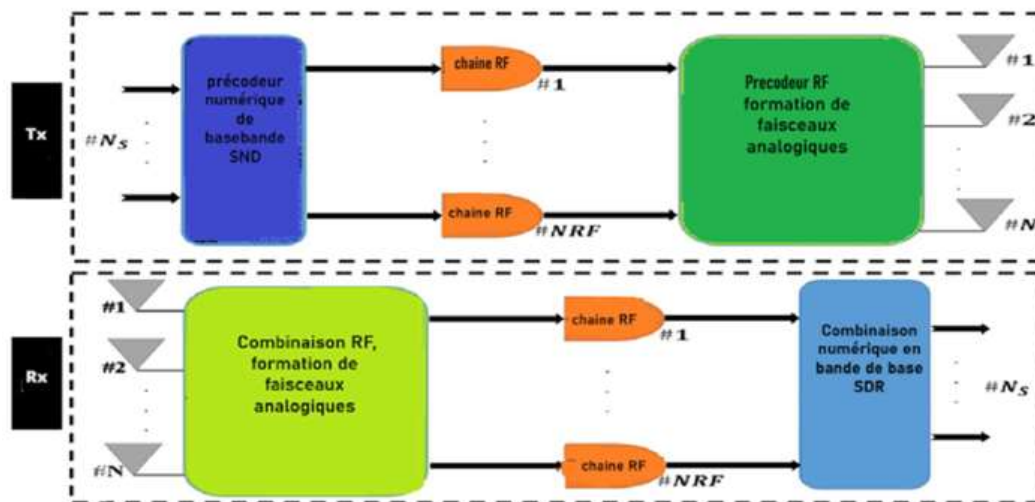


Figure2. 2: Architecture d'un système de formation de faisceaux hybrides.[25]

2.4 la méthodologie proposée :

La formation de faisceaux dans un système hybride MU-mMIMO repose sur une combinaison de traitements numériques en bande de base et de traitements analogiques en radiofréquence. Comme illustré dans les figures (2.1) et (2.2) , le processus débute par l'application de pondérations numériques qui convertissent les flux de données en signaux d'entrée pour chaque chaîne RF. Ensuite, des déphasages analogiques sont appliqués dans le domaine RF afin de transformer ces signaux en ondes rayonnées par les éléments d'antenne.

D'après la figure (2.3), l'émission des flux de données implique l'utilisation de poids de pré codage F à l'émetteur, avant leur transmission à travers le canal. A la réception, les flux de données sont récupérés et traités à l'aide de poids composites W , comme représenté dans la figure 4. Ainsi, la formation de faisceaux repose sur une combinaison de poids numériques et analogiques, qui assurent respectivement le pré codage et la combinaison des signaux. [26]

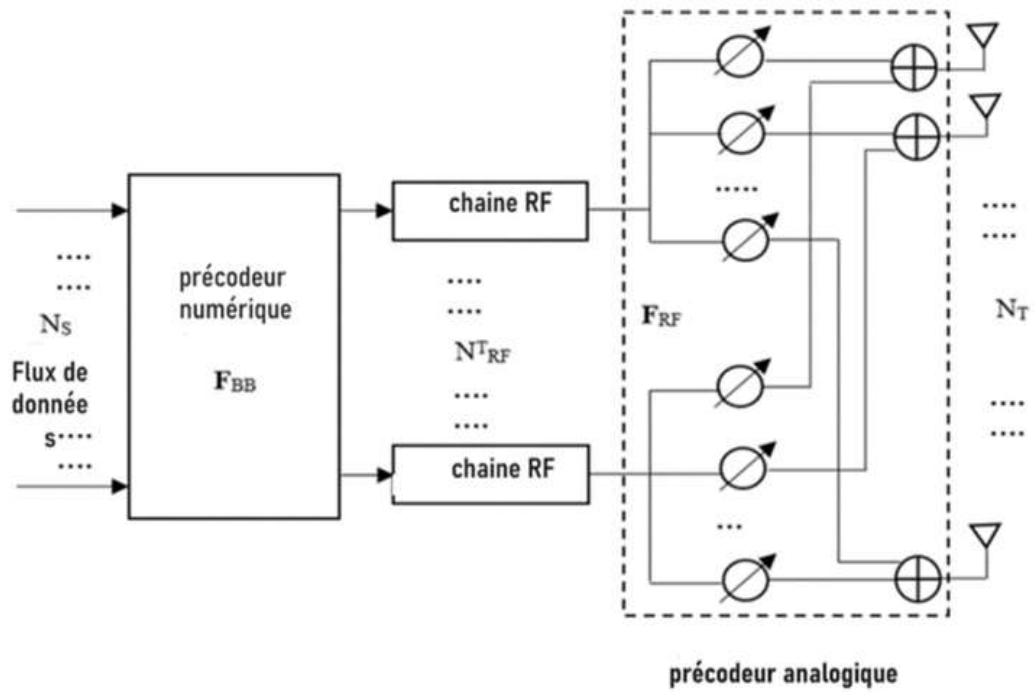


Figure2. 3: Schéma de principe des étapes de pré-codage au niveau de l'émetteur en ondes [26]

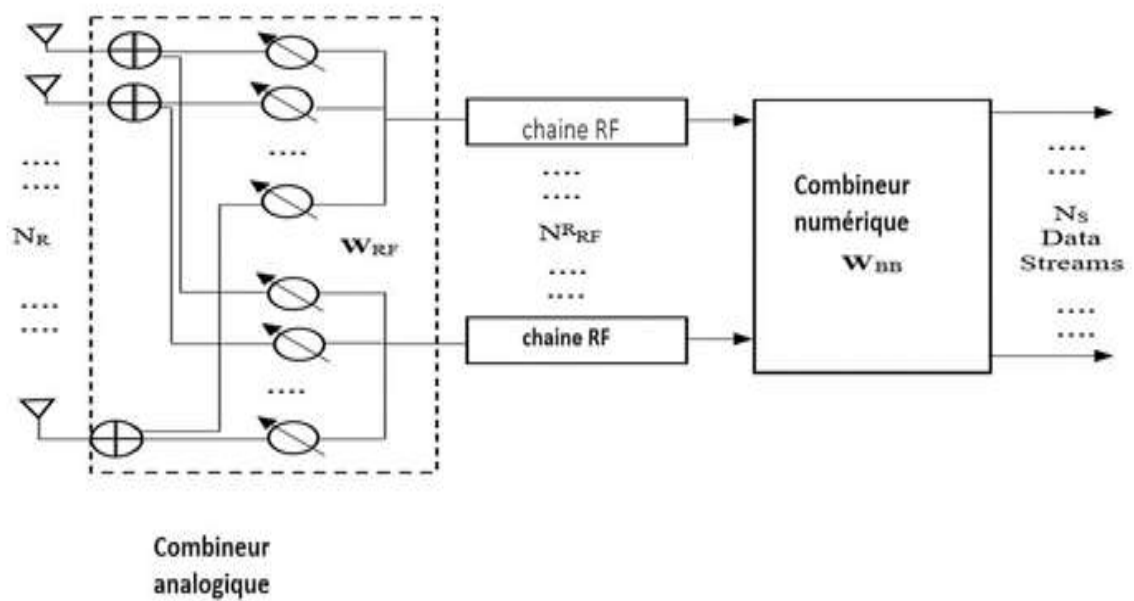


Figure2. 4: Schéma de principe des étapes de pré-codage au niveau du récepteur en ondes millimétriques [26]

2.5 Architecture d'un système de formation de faisceau hybride :

Un système de formation de faisceau hybride comprend généralement les éléments suivants :

- **Traitement en bande de base numérique :** Effectue le pré-codage des signaux pour plusieurs flux de données en déterminant les poids numériques optimaux pour chacun d'eux.
- **Réseau de phaseur analogiques :** applique des déphasages analogiques aux signaux pré codés pour orienter les faisceaux dans les directions souhaitées.
- **Réseau d'antennes :** Composé de multiples éléments d'antenne, il émet les signaux formés en faisceaux vers les utilisateurs ou les cibles. Cette configuration permet une gestion efficace des ressources, en combinant la précision du traitement numérique avec la rapidité et l'efficacité énergétique du traitement analogique

2.6 Structure de formation de faisceau hybride :

Les architectures hybrides de formation de faisceaux se divisent en deux catégories : les structures entièrement connectées et les structures partiellement connectées. [27]

2.6.1 Structure entièrement connectée :

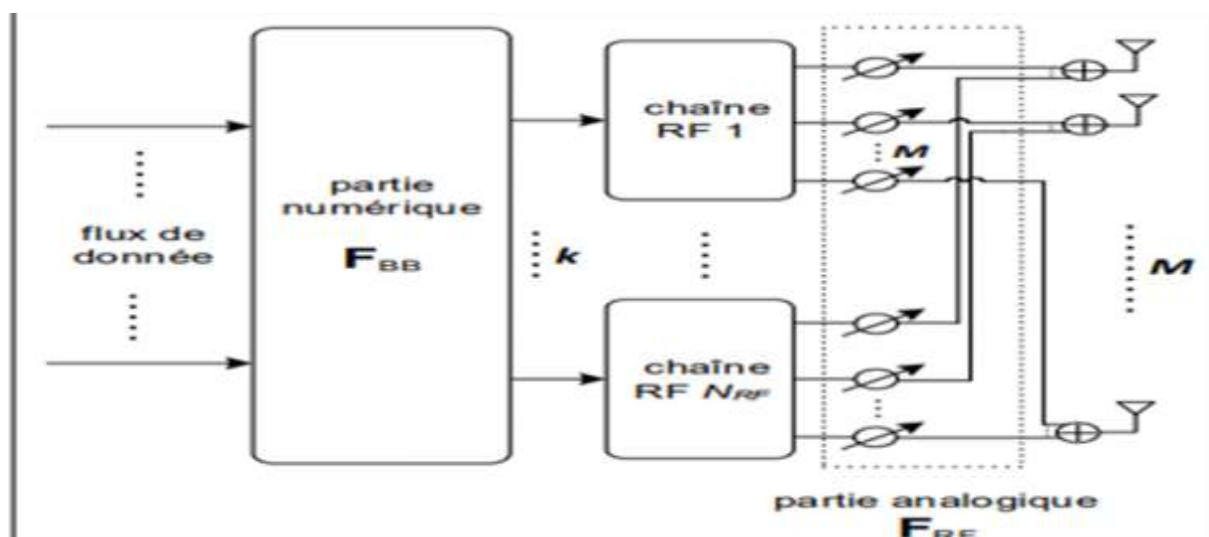


Figure2. 5: Architecture hybride entièrement connectée [28]

Comme illustré dans la figure (2.5), l'architecture entièrement connectée se distingue par la connexion de chaque chaîne RF à l'ensemble des antennes via des additionneurs. Dans cette configuration, le signal émis traverse M voies RF, chacune intégrant des composants tels que des mélangeurs, des amplificateurs de puissance et des déphaseurs. Les signaux sont

ensuite combinés avant d'être transmis à chaque antenne, comme le montre la figure 5. Cette conception hybride entièrement connectée permet un gain élevé en formation de faisceaux (beamforming) et offre une grande flexibilité dans l'orientation du faisceau, ce qui est particulièrement avantageux pour les systèmes Massive MIMO beamforming [28].

2.6.2 Structure partiellement connectée :

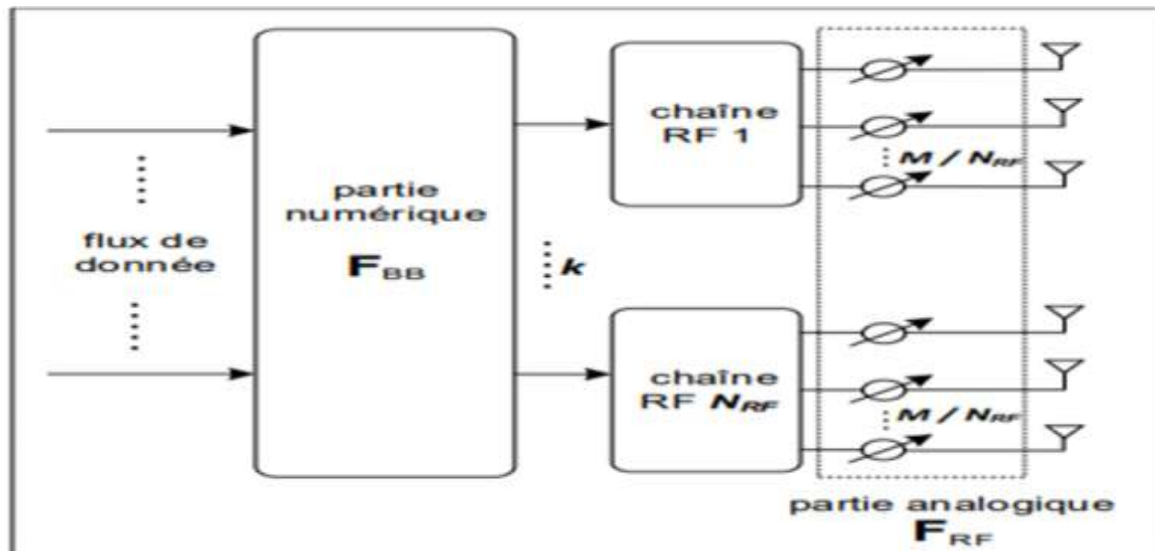


Figure2. 6: Architecture hybride partiellement connectée.[28]

Le précodage hybride entièrement connecté présente des avantages significatifs en matière de gain en formation de faisceaux (beamforming) et de flexibilité directionnelle. Cependant, sa mise en œuvre est complexe, nécessitant un additionneur par antenne. Cette architecture implique que le signal traverse un nombre de canaux équivalent à $(N_{RF} * M)$, ce qui accroît considérablement la complexité du système.

A l'inverse, le pré codage hybride partiellement connecté, illustré dans la figure II.6, simplifie cette conception en segmentant le réseau d'antennes en (M/N_{RF}) sous-réseaux, chaque sous-réseau étant relié à une chaîne RF spécifique. Cette approche réduit la complexité globale à M canaux RF, mais entraîne une diminution du gain en beamforming, limité à $(1/N_{RF})$ comparé à l'architecture entièrement connectée.

Toutefois, l'association du MIMO massif et du pré codage hybride partiellement connecté permet une réduction significative du nombre d'émetteurs-récepteurs requis, tout en optimisant l'efficacité énergétique des infrastructures 5G. [29]

2.7 Comparaison entre les structures :

L'architecture entièrement connecté présente l'avantage majeur de permettre une formation de faisceaux optimale pour chaque émetteur et récepteur, bien qu'elle soit associée à une complexité accrue. En revanche, l'architecture hybride partiellement connectée réduit la complexité matérielle, mais au prix d'un gain de formation de faisceau moins important.

Cependant, il convient de souligner que l'augmentation du nombre d'antennes dans une architecture partiellement connectée peut entraîner une baisse des performances. Cela illustre un compromis entre la réduction des performances et le nombre de déphaseurs, par rapport à l'architecture entièrement connectée.

Sur le plan des performances, la structure entièrement connectée ne peut égaler un précodage entièrement numérique que si le nombre des chaînes RF dépasse légèrement le nombre de flux de données. A l'inverse, l'architecture partiellement connectée se distingue par une meilleure efficacité spectrale (SE) et offre des avantages considérables. Grâce à un précodage hybride progressif, elle réduit les interférences et atteint des performances proches de l'optimum tout en maintenant une complexité minimale. De plus, cette architecture requiert moins de déphaseurs que la version entièrement connectée, ce qui permet une réduction significative de la consommation énergétique. [29]

2.8 Avantage de formation faisceaux hybride (HBF) :

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

- **Optimisation des communications MIMO massives à ondes millimétriques :** Le MIMO massif à ondes millimétriques joue un rôle clé dans l'essor des réseaux sans fil, permettant d'augmenter la capacité de la 5G. La formation de faisceaux hybride (HBF) constitue une alternative efficace à la communication MIMO à ondes millimétriques, qui sont soit onéreuses et complexes à déployer, soit sujettes à des imprécisions et des interférences mutuelles lorsqu'elles reposent uniquement sur une formation de faisceaux analogique.
- **Réduction des coûts d'équipement :** L'intégration de la formation de faisceaux hybride permet de diminuer les coûts d'investissement en limitant le

nombre de chaînes RF requises, tout en conservant un même nombre d'antennes.

- **Amélioration de l'efficacité énergétique :** Par rapport aux systèmes MIMO fonctionnant sous 6GHZ, les systèmes MIMO à ondes millimétriques utilisent des réseaux d'antennes plus denses, optimisant ainsi la formation des faisceaux. Cette approche réduit la puissance de transmission nécessaire pour la liaison descendante et montante, améliorant ainsi l'efficacité énergétique. En particulier, elle permet de minimiser la puissance de transmission requise pour chaque terminal utilisateur (UE) en fonction du nombre d'antennes des stations de base, sans altérer les performances globales du réseau [30]

2.9 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'analyser en détail les techniques de beamforming hybride (HBF), une solution innovante pour les systèmes MIMO en ondes millimétriques. Sans cette approche, ces systèmes présenteraient des coûts prohibitifs, une complexité accrue et une plus grande sensibilité aux interférences et aux imperfections matérielles.

Notre étude a comparé les principales architectures de beamforming hybride, dont l'avantage majeur réside dans la réduction significative du nombre de chaînes RF par rapport aux solutions entièrement numériques. Cette optimisation permet non seulement de diminuer les coûts matériels, mais aussi de réduire la consommation énergétique, améliorant ainsi la viabilité technique et économique de ces systèmes pour des applications réelles.

Dans la prochaine section, nous examinerons les résultats de simulation afin d'évaluer concrètement l'efficacité et les performances de ces approches dans différents scénarios opérationnels.

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudions le système MIMO massif avec beamforming hybride associé à la modulation multi-porteuse OFDM. Cette architecture repose sur une combinaison d'un formateur de faisceau numérique de faible dimension et d'un formateur de faisceau RF analogique utilisant des déphaseurs. Son principal objectif est d'accroître la capacité du système en termes de débit tout en optimisant le coût et la complexité de mise en œuvre grâce à la réduction du nombre de canaux RF. Pour évaluer ses performances, nous examinerons d'abord l'impact du nombre d'antennes en émissions et en réception sur la qualité et la capacité du système. Ensuite, nous analyserons l'effet du nombre de chaînes RF sur l'efficacité globale. Enfin, nous étudierons l'influence du nombre de flux de données en entrée sur les performances du système.

3.2 Système MIMO massif avec beamforming hybride et OFDM :

Ce chapitre propose une approche visant à réduire le nombre de chaînes RF en adoptant une architecture de formation de faisceaux hybride à deux niveaux. Celle-ci associe un formateur de faisceaux numérique de faible dimension à un formateur de faisceau RF analogique, tout en intégrant la modulation multi-porteuse OFDM.

Dans un premier temps, il est démontré que le nombre de chaînes RF requises correspond au moins le nombre total de flux de données, garantissant ainsi des performances comparables à une formation de faisceau entièrement numérique, et ce, quel que soit le nombre d'éléments d'antennes. Ensuite, l'étude se focalise sur la conception de cette architecture dans le cadre des communications MIMO point à point avec des réseaux d'antennes à grande échelle. A cet effet, un algorithme heuristique est utilisé afin d'optimiser l'efficacité spectrale tout en respectant les contraintes de puissance.

Enfin, il est supposé que l'état du canal est connu de manière parfaite et instantanée. Ce chapitre met en avant l'intérêt croissant de cette architecture hybride dans le domaine de la recherche sur les réseaux d'antennes à grande échelle.[30] [31]

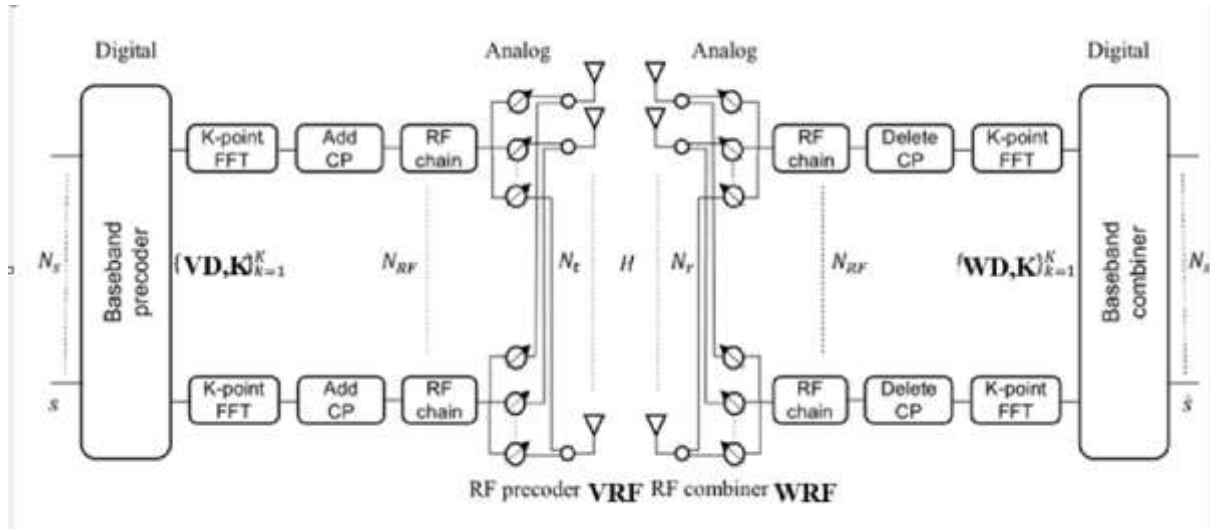


Figure3. 1: Structure de l'émetteur-récepteur HBF dans un système MIMO OFDM à ondes [32]

Considérons un système MIMO-OFDM comportant des émetteurs et des récepteurs équipés de N_t d'antennes en émission et de N_r antennes en réception. Nous supposons que l'émetteur et le récepteur possèdent un nombre identique de chaînes RF, noté N_{RF} ($N_{RF} \leq \min(N_t, N_r)$).

La transmission débute par le pré-codage du vecteur transmis \mathbf{S}_k à l'aide d'un précodeur de bande de base de faible dimension $\mathbf{V}_{D,k} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}$, suivi de sa conversion dans le domaine temporel à l'aide de transformée de Fourier rapides inverses (IFFT) à N_{RF} point, le signal obtenu dans le domaine temporel est ensuite étendu par un préfixe cyclique (CP) et précodé à l'aide du précodeur analogique commun de haute dimension, noté $\mathbf{V}_{RF} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}$ ou $\mathbf{V}_{RF}(i, j) = 1/\sqrt{N_t}$, $\forall i, j$ pour chaque sous-porteuse.

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_{D,k} \mathbf{S}_k = \mathbf{V}_{tk} \mathbf{S}_k \quad (\text{III.1})$$

Avec $\mathbf{S}_k \in \mathbb{C}^{N_s \times 1}$ ($N_s \leq N_{RF}$) est le vecteur des symboles transmis pour la k-ième sous-porteuse,

$\mathbf{E}(\mathbf{S}_k \mathbf{S}_k^H) = \mathbf{I}_{N_s}$, $\forall k=1, \dots, K$ ou \mathbf{I}_{N_s} désigne la matrice identité de dimension $N_s \times N_s$ et K est le nombre de sous porteuses.

$$\mathbf{V}_{tk} = \mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_{D,k}$$

et $\|\mathbf{V}_{tk}\|^2 \leq p_b$ avec p_b représentant la puissance allouée à chaque sous-porteuse.

A la réception, le signal reçu est d'abord traité par un combineur analogique commun, représenté par $\mathbf{W}_{RF} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}$, ou $\mathbf{W}_{RF}(i, j) = \mathbf{1}/\sqrt{N_r}$, $\forall (i, j)$ après la suppression du préfixe cyclique (CP) et l'application de transformées de Fourier rapides (FFT) à K points, le signal combiné est traité dans le domaine fréquentiel par un combineur de bande de base de faible dimension $\mathbf{W}_{D,k} \in \mathbb{C}^{N_s \times N_{RF}}$ pour chaque sous-porteuse. Donner par :

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{W}_{t,k}^H \mathbf{H}_K \mathbf{V}_{t,k} \mathbf{S}_k + \mathbf{W}_{t,k}^H \mathbf{n}_k \quad (\text{III.2})$$

Avec : $\mathbf{H}_K \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$

Et $\mathbf{W}_{t,k} = \mathbf{W}_{RF} \mathbf{W}_{D,k}$ et $\mathbf{n}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_N^2 \mathbf{I}_{N_r})$ Représente le vecteur de bruit gaussien blanc additif à la k-ième sous-porteuse, où σ_N^2 désigne la variance du bruit.

A. Modèle de canal :

Le canal mmWave est représenté par le modèle de Saleh-Valenzuela [33]. Dans les systèmes OFDM, le canal sélectif en fréquence est décomposé en K sous-canaux à réponse en fréquence plate, avec des sous-porteuses orthogonales ne générant pas d'interférences mutuelles.

Dans le domaine fréquentiel, la matrice de canal à la k-ième sous-porteuse s'exprime comme suit [34],[35]

$$\mathbf{H}_K = \sqrt{\frac{N_r N_t}{N_{c,l} N_{ray}}} \sum_{c=0}^{N_{cl}-1} \sum_{l=1}^{N_{ray}} \alpha_{c,l} \alpha_r(\theta_{c,l}^r) \alpha_t^H(\theta_{c,l}^t) e^{-\frac{j2\pi c \times (k-1)}{k}} \quad (\text{III.3})$$

Où $\alpha_{c,l} \sim \mathcal{CN}(0,1)$, $\theta_{c,l}^r$ et $\theta_{c,l}^t$ représentent respectivement le gain de trajet, les angles d'arrivée et de départ du l-ième chemin dans le c-ième cluster.

De plus, $\theta_{c,l}^r$ et $\theta_{c,l}^t$ suivent une distribution l'aplacienne, avec des angles moyens, θ_c^r et θ_c^t uniformément répartis sur $(0, 2\pi)$, et une propagation angulaire caractérisée par les écarts types σ_r et σ_t [47] les vecteurs $\alpha_r(\cdot)$ et $\alpha_t(\cdot)$ Correspondant aux réponses du réseau au niveau du récepteur et de l'émetteur respectivement.

Par souci de simplicité, nous supposons que le nombre de clusters de diffusion et de propagation, les chemins et les écarts angulaires restent identiques pour toutes les sous-porteuses. De plus, nous considérons l'utilisation d'un réseau linéaire uniforme (ULA).

Le vecteur de direction de L'ULA, comportant N antennes et une distance d'espacement entre antennes adjacentes, est modélisé comme suit [48]

$$\alpha(\theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} [1, e^{-\frac{j2\pi}{\lambda}d \sin(\theta)}, \dots, e^{-\frac{j2\pi}{\lambda}(N-1)d \sin(\theta)}]^T \quad (\text{III.4})$$

Où λ représente la longueur d'onde du signal. Il est important de souligner que, dans ce modèle, la fréquence de fonctionnement est considérablement plus élevée que la bande passante totale du système OFDM. Par conséquent, la longueur d'onde λ reste approximativement constante sur l'ensemble des sous-porteuses.

Si l'on considère une signalisation gaussienne, l'efficacité spectral pour la $k^{\text{ième}}$ sous porteuse est donnée par :

$$R_k = \log_2(I_M + \frac{1}{\sigma^2} W_{tk} (W_{tk}^H W_{tk})^{-1} W_{tk}^H h_k V_{tk} V_{tk}^H H_K^H) \quad (\text{III.5})$$

Où

$$V_{tk} = V_{RF} V_{D,k}$$

$$W_{tk} = W_{RF} W_{D,k}$$

B. Formulation du problème

Le sujet abordé dans ce chapitre consiste à maximiser l'efficacité spectrale globale tout en respectant la contrainte de la puissance d'émission totale. Dans ce contexte, nous supposons que la connaissance de H_k est parfaite. Autrement dit, nous cherchons à résoudre le problème suivant en trouvant les précodeurs hybrides optimaux à la station de base BS ainsi que les combineurs hybrides optimaux pour chaque utilisateur:

$$\begin{aligned} & \underset{V_{RF}, V_{D,k}, W_{RF}, W_{D,k}}{\text{Maximiser}} R_K \\ & \text{Tr}(V_{RF} V_{D,k} V_{D,k}^H V_{RF}^H) \leq P \quad (H_K^H) \quad (\text{III.6}) \\ & |V_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j \\ & |W_{RFk}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j, k \end{aligned}$$

Où P est la puissance totale de la station de base.

3.3 Conception de la formation de faisceaux hybride pour les systèmes MIMO à grande échelle a utilisateur unique :

Dans cette section, nous nous concentrons sur la conception du beamforming hybride dans le cas où le nombre de chaînes RF est égal au nombre de flux de données, c'est-à-dire $N_{RF} = N_s$. Pour ce scénario, nous proposons un algorithme heuristique capable d'atteindre un débit proche de la capacité optimale. Enfin de section, nous montrerons que, moyennant

certaines approximations, cet algorithme peut également s'appliquer au cas $N_s < N_{RF} < 2N_s$.

Le problème de maximisation du débit implique une optimisation conjointe des précodages (émission) et de combineurs (réception) hybrides. Toutefois, concevoir de manière conjointe les matrices d'émission et de réception dans un problème d'optimisation contraint similaire est généralement difficile [40]. En outre, les contraintes non convexes sur les éléments des formateurs analogiques rendent peu probable la mise au point d'un algorithme de faible complexité permettant d'obtenir une solution exacte optimale [49].

Par conséquent, ce chapitre envisage plutôt la stratégie suivante. Tout d'abord, nous cherchons à concevoir les précodeurs hybrides, en supposant que le récepteur optimal est utilisé. Ensuite, pour l'émetteur déjà conçu, nous cherchons à concevoir le combineur hybride.

Le problème de conception des précodeurs hybrides peut être divisé en deux étapes comme suit :

$$\max_{V_{RF}, V_D} \log_2 \left(+ \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}_k \mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_{D,k} \mathbf{V}_{D,k}^H \mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{H}_k^H \right) \quad (\text{III.7-A})$$

$$\text{St. } T_r(\mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_{D,k} \mathbf{V}_{D,k}^H \mathbf{V}_{RF}^H) \leq P \quad (\text{III.7-B})$$

$$\mathbf{V}_{RF}(i,j)^2 = 1, \forall i,j \quad (\text{III.7-C})$$

Ce problème est non convexe. Nous proposons un algorithme heuristique pour obtenir une bonne solution au problème (III.7-A).

Tout d'abord, nous dérivons la solution en forme fermée du précodeur numérique dans le problème (III.7-A), en supposant que le précodeur numérique $\mathbf{RF}, \mathbf{V}_{RF}$ est fixé.

Ensuite, en supposant un tel précodeur numérique, nous proposons un algorithme itératif pour trouver un précodeur RF localement optimal.

A. Conception du pré-codeur numérique pour $N_{RF} = N_s$:

La première partie de l'algorithme concerne la conception de $V_{D,k}$, en supposant que V_{RF} est fixé.

Pour un précodeur RF fixé, on peut considérer $\mathbf{H}_{eff,k} = \mathbf{H}_k \mathbf{V}_{RF}$ comme un canal seffectif, et le problème de conception du précodeur numérique peut être formulé comme suit :

$$\max_{V_D} \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}_{eff,k} \mathbf{V}_{D,k} \mathbf{V}_{D,k}^H \mathbf{H}_{eff,k}^H \right| \quad (\text{III.8-A})$$

$$\text{St. } T_r(\mathbf{Q} \mathbf{V}_{D,k} \mathbf{V}_{D,k}^H) \leq P \quad (\text{III.8-B})$$

Sous la contrainte :

$$\mathbf{Q} = \mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{V}_{RF}$$

Où Ce problème admet une solution bien connue dite ‘‘water-filling’’, donnée par :

$$\mathbf{V}_{D,k} = \mathbf{Q}^{-1/2} \mathbf{U}_{e,k} \Gamma_e \quad (\text{III.9})$$

Où $\mathbf{U}_{e,k}$ Est l’ensemble des vecteurs singuliers droits associés aux N_s plus grandes valeurs singulières de $\mathbf{H}_{eff,k} \mathbf{Q}^{-1/2}$, Γ_e Est une matrice diagonale contenant la puissance allouée à chaque flux.

Γ_e peut être approximer comme suit : $\Gamma_e \approx \sqrt{P/N^{RF}} \mathbf{I}$

Ainsi, le précodeur numérique optimal devient : $\mathbf{V}_{D,k} \approx \gamma \mathbf{U}_{e,k}$ avec $\gamma^2 = p/(N^{RF})$

B. Conception du précodeur RF $N_{RF} = N_s$:

Nous cherchons maintenant à concevoir le précodeur RF en supposant que :

$\mathbf{V}_{D,k} \mathbf{V}_{D,k}^H \approx \gamma^2 \mathbf{I}$. Sous cette supposition, la contrainte de puissance de transmission est automatiquement satisfaite pour n’importe quelle conception de \mathbf{V}_{RF} . Par conséquent, le précodeur RF peut être obtenu en résolvant le problème suivant :

$$\max_{\mathbf{V}_{RF}} \log_2 \left| I_M + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{F}_l \mathbf{V}_{RF} \right| \quad (\text{III.10})$$

$$|\mathbf{V}_{RF}(i,j)|^2 = 1 \quad \forall_{i,j} \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Ou} \quad \mathbf{F}_l = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k,$$

Afin d’extraire la contribution de l’élément $\mathbf{V}_{RF}(i,j)$ à la fonction objectif, il est montré dans [34],[41] que cette fonction peut être réécrite comme :

$$\log_2 |C_j| + \log_2 (2 \text{Re}\{\mathbf{V}_{RF}^*(i,j) \eta_{i,j}\} + \zeta_{i,j} + 1) \quad (\text{III.12})$$

Où

$$C_j = I + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} (\mathbf{V}_{RF}^j)^H \mathbf{F}_l \mathbf{V}_{RF}^j$$

Et \mathbf{V}_{RF}^j et le sup de matrice de \mathbf{V}_{RF} avec j^{th}

$$\eta_{i,j} = \sum_{l \neq 1} G_j(i,l) \mathbf{V}_{RF}(l,j)$$

$$\zeta_{i,j} = G_j(i, i) + 2R_e\{\sum_{m \neq i, n \neq i} V_{RF}^*(m, j) G_j(m, n) V_{RF}(n, j)\}$$

Et $G_j = \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \mathbf{F}_l - \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \mathbf{F}_l \mathbf{V}_{RF}^{-j} \mathbf{C}_j^{-1} (\mathbf{V}_{RF}^{-j})^H \mathbf{F}_l$ telle que $G_j, \zeta_{i,j}$ et $\eta_{i,j}$ sont indépendants de $V_{RF}(i, j)$ si nous supposons que tous les éléments du précodeur RF sont fixes sauf $V_{RF}(i, j)$, la valeur optimale pour l'élément du RF à la ligne et à la colonne donnée par i^{th} et j^{th} donnée par

$$V_{RF}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } \eta_{i,j} = 0 \\ \frac{\eta_{i,j}}{|\eta_{i,j}|} & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Cela nous permet de proposer un algorithme itératif qui commence avec un précodeur RF initial réalisable satisfaisant la contrainte (III.11), c'est-à-dire : $V_{RF}^0 = \mathbf{1}_{N \times N_s}$. Ensuite, l'algorithme met à jour séquentiellement chaque élément du précodeur RF la règle donnée par l'équation (III.13), jusqu'à ce qu'il converge vers une solution locale optimale de V_{RF} pour le problème (III.10). L'algorithme proposé pour concevoir le beamformer RF dans le cadre du problème (III.10) est résumé dans l'Algorithme 1.

Algorithm 1: Design of V_{RF} by solving (12)

Require: F_1, γ^2, σ^2

1. Initialize

$$V_{RF} = \mathbf{1}_{\{N \times N_{RF}\}}$$

2. for $j = 1$ to N_{RF}

3. Calculate

$$C_j = I + (\gamma^2/\sigma^2)(\nabla^j_{RF})^H F_1 \nabla^j_{RF}$$

4. Calculate

$$G_j = (\gamma^2/\sigma^2)F_1 - (\gamma^4/\sigma^4)F_1 \nabla^j_{RF} C_j^{-1} (\nabla^j_{RF})^H F_1$$

5. for $i = 1$ to N

6. Find

$$\eta_{ij} = \sum_{\ell \neq i} G_j(i, \ell) V_{RF}(\ell, j)$$

7. $V_{RF}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } \eta_{i,j} = 0 \\ \frac{\eta_{i,j}}{|\eta_{i,j}|} & \text{otherwise} \end{cases}$

8. end for

9. end for

B. Conception du combineur hybride pour $N_{RF} = N_S$

Enfin, nous cherchons à concevoir les combineurs hybrides de manière à maximiser l'efficacité spectrale globale donnée par l'équation (III.5), en supposant que les précodeurs hybrides ont déjà été conçus. Dans le cas où $N^{RF} = N_S$, le combineur numérique est une matrice carrée sans aucune contrainte sur ses entrées. Par conséquent, sans perte d'optimalité, la conception de W_{RF} et $W_{D,k}$ peut-être découplée en commençant par la conception du combineur RF, en supposant un combineur numérique optimal.

Et ensuite trouver le combineur numérique optimal pour ce combineur RF .par conséquent, le problème de conception du combineur RF peut s'écrire ainsi :

$$\max_{W_{RF}} \log_2 \left| I + \frac{1}{\sigma^2} (W_{RF}^H W_{RF})^{-1} W_{RF}^H F_2 W_{RF} \right| \quad (\text{III.14})$$

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

$$\text{Soit} \quad F_{k2} = H_k V_{t,k} V_{t,k}^H H_k^H$$

Ce problème est très similaire à celui la conception du précodeur RF dans l'équation (III.10), à la différence près de la présence du terme supplémentaire $(W_{RF}^H W_{RF})^{-1}$. Par conséquent, le problème (III.10) peut être approximé sous la même forme que celui de la conception du précodeur RF (III.10) ,et l'algorithme 1 peut être utilisé pour concevoir W_{RF} , en remplaçant F_2 par $\frac{1}{M}$, et F_1 par γ^2 , ce qui donne :

$$\max_{W_{RF}} \log_2 \left| I + \frac{1}{M\sigma^2} W_{RF}^H F_2 W_{RF} \right| \quad (\text{III.16})$$

$$|W_{RF}(i, j)|^2 = 1, \forall_{i,j} . \quad (\text{III.17})$$

Enfin, en supposant que tous les autres faisceaux (beamformers) sont fixés, le combineur numérique optimal est donné par la solution MMSE suivante :

$$W_{D,k} = j_k^{-1} W_{RF}^H H_k V_{t,k} \quad (\text{III.18})$$

$$\text{Où : } J_K = W_{RF}^H H_k V_{t,k} V_{t,k}^H H_k^H W_{RF} + \sigma^2 W_{RF}^H W_{RF} \quad (\text{III.19})$$

Algorithm 2 Design of Hybrid Beamformers for Point-to-Point MIMO systems

Require: σ^2, P

1. supposant que $\mathbf{V}_{D,k} \mathbf{V}_{D,k}^H = \gamma I$ ou $\gamma = \sqrt{P/(N_{RF})}$, trouver \mathbf{V}_{RF} en résolvant le problème (12) utilisant l'algorithme [I]
2. Calculer $\mathbf{V}_{D,k} = (\mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{V}_{RF})^{(-1/2)} \mathbf{U}_e \Gamma_e$ ou \mathbf{U}_e and Γ_e sont définis comme suit (11).
3. trouver \mathbf{W}_{RF} en résolvant le problème utilisant l'algorithme [I]
4. Calculer $\mathbf{W}_{D[k]} = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H}_{[k]} \mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_{D,k}$ ou $\mathbf{J} = \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H} \mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_{D,k} \mathbf{V}_{D,k}^H \mathbf{V}_{RF} \mathbf{H}^H \mathbf{W}_{RF} + \sigma^2 \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{W}_{RF}$

C. Conception de la formation de faisceaux hybride pour $N_S < N_{RF} < 2N_S$

Dans cette section, nous montrons comment concevoir les formateurs de faisceaux hybrides pour le cas où $N_{RF} \geq 2N_S$, pour lequel la structure hybride peut atteindre le même débit que celui obtenu par une formation de faisceaux entièrement numérique optimale.

Pour $N_S < N_{RF} < 2N_S$, le problème de conception coté émetteur peut encore être formulé comme dans l'équation (9). la fonction objectif (9) peut être réécrite comme suit :

$$\log_2 \prod_{i=1}^{N_S} (1 + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \lambda_i) \quad (\text{III.19})$$

Où λ_i est la i -ième plus grande valeur propre de la matrice $\mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{H}_K^H \mathbf{H}_K \mathbf{V}_{RF}$.

Ou, de manière équivalente :

$$\log_2 \left| \mathbf{I}_{N_{RF}} + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{H}_K^H \mathbf{H}_K \mathbf{V}_{RF} \right| \quad (\text{III.20})$$

En outre, grâce à cette approximation, le problème de conception du précodage RF prend maintenant la forme de (III.11). Par conséquent, l'Algorithme 1 peut être utilisé pour obtenir le précodage RF.

3.4 Notion de base sur langage utilisé (Matlab) :

Le choix de Matlab pour la conduite de nos simulations repose sur ses nombreuses fonctionnalités, particulièrement adaptées aux besoins de l'ingénierie et de la recherche scientifique. Ce langage de programmation se distingue par sa syntaxe intuitive et sa simplicité d'utilisation, facilitant ainsi la mise en œuvre et efficace d'algorithmes complexes.

MATLAB excelle dans la manipulation des matrices et des vecteurs, éléments fondamentaux dans les systèmes de communication multi-antenne tels que les systèmes

MIMO-OFDM. Par ailleurs, ses outils de visualisation avancés permettent une représentation graphique claire des résultats, contribuant ainsi à une analyse et une interprétation plus approfondie des données simulées.

Enfin, l'existence d'une large communauté d'utilisateurs ainsi que la disponibilité de nombreuses ressources documentaires en ligne offrent un soutien non négligeable, tant pour la correction que pour l'optimisation des performances du code développé.

3.5 Simulation et discussion des résultats :

Dans cette section, nous analysons les performances d'un système MIMO-OFDM intégrant une technique de beamforming hybride. Deux principaux indicateurs de performance sont étudiés : l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire (BER), en fonction du rapport signal sur bruit (SNR).

L'évaluation est réalisée à travers différentes configurations, obtenues en faisant varier le nombre d'antennes, le nombre de canaux RF, ainsi que le nombre de flux de données. Ces variations permettent de mettre en évidence l'impact de chaque paramètre sur les performances globales du système.

3.5.1 Impact de la variation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception :

L'étude porte sur une station de base exploitant un système MIMO-OFDM avec beamforming hybride. Dans le scénario de référence, le système est configuré avec deux canaux RF ($N_{RF} = 2$) tant à l'émission qu'à la réception, et transmet deux flux de données ($N_s = 2$). Le canal de propagation est modélisé comme un canal MIMO à trajets multiples, tandis que la modulation utilisée repose sur une structure OFDM à 64 sous-porteuses.

L'optimisation des matrices de précodage et de combinaison est assurée par l'algorithme heuristique. Celui-ci permet de rechercher des solutions optimales en ajustant automatiquement les paramètres selon la nature du canal et la configuration du système

3.5.1.1 L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_t et N_r :

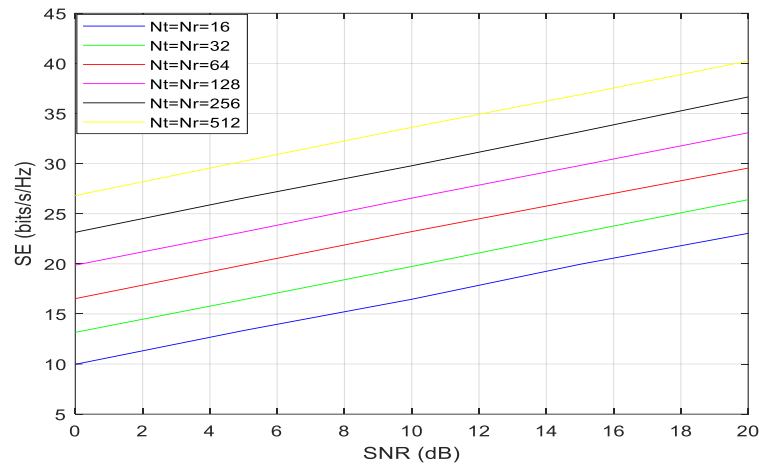


Figure3. 2: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_t et N_r

D'après les résultats de la figure (3.2), on observe que l'efficacité spectrale (SE) augmente de manière monotone avec le rapport signal sur bruit (SNR). En outre, pour un même SNR, l'augmentation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception améliore significativement la performance en efficacité spectrale. Par exemple, pour un SNR de 20 dB, un système MIMO massif avec 512 antennes (512×512) atteint une SE d'environ 40 bits/s/Hz, contre environ 22 bits/s/Hz pour un système avec seulement 16 antennes (16×16), soit un gain notable d'antennes dans les systèmes MIMO massifs avec beamforming hybride, en particulier dans les environnements à fort SNR.

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

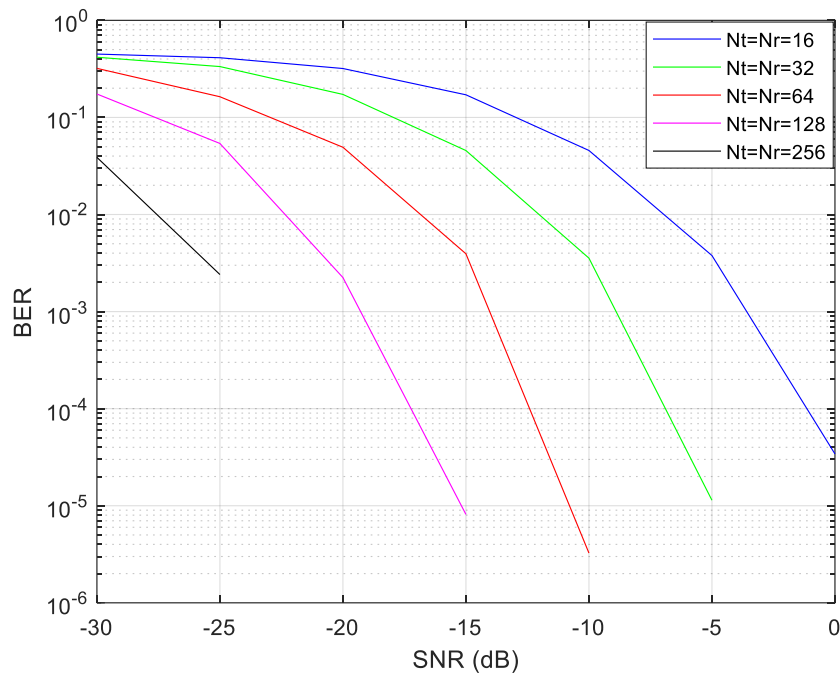


Figure3. 3: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_t et N_r .

D'après les résultats de la figure (3.3), on observe que le taux d'erreur binaire (BER) diminue de façon significative avec l'augmentation du rapport signal sur bruit (SNR). De plus, on constate que l'augmentation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception ($N_t = N_r$) permet également d'améliorer considérablement les performances en termes de BER. Par exemple, pour un taux d'erreur binaire de 10^{-4} , le SNR s'améliore de 16 dB en passant d'un système MIMO (16x16) à un système MIMO (128x128). Cela met en évidence l'apport d'une ordre de diversité élevé permis par un grand nombre d'antennes, ce qui renforce la robustesse du système face aux interférences et aux effets de dégradation du canal, tout en améliorant la fiabilité de la transmission.

3.5.2 L'impact de la variation du nombre de chaînes RF a l'émission et à la réception :

Dans cette partie de la simulation, nous analysons l'efficacité spectrale d'un système MIMO-OFDM (64x64) utilisant la formation hybride de faisceaux, avec une configuration comportant deux flux de données ($N_s = 2$). L'étude se focalise sur l'effet du rapport signal sur bruit (SNR).

Nous évaluons l'impact du nombre de chaînes RF disponibles à l'émetteur et au récepteur pour différentes configurations.

3.5.2.1 L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_{RF} :

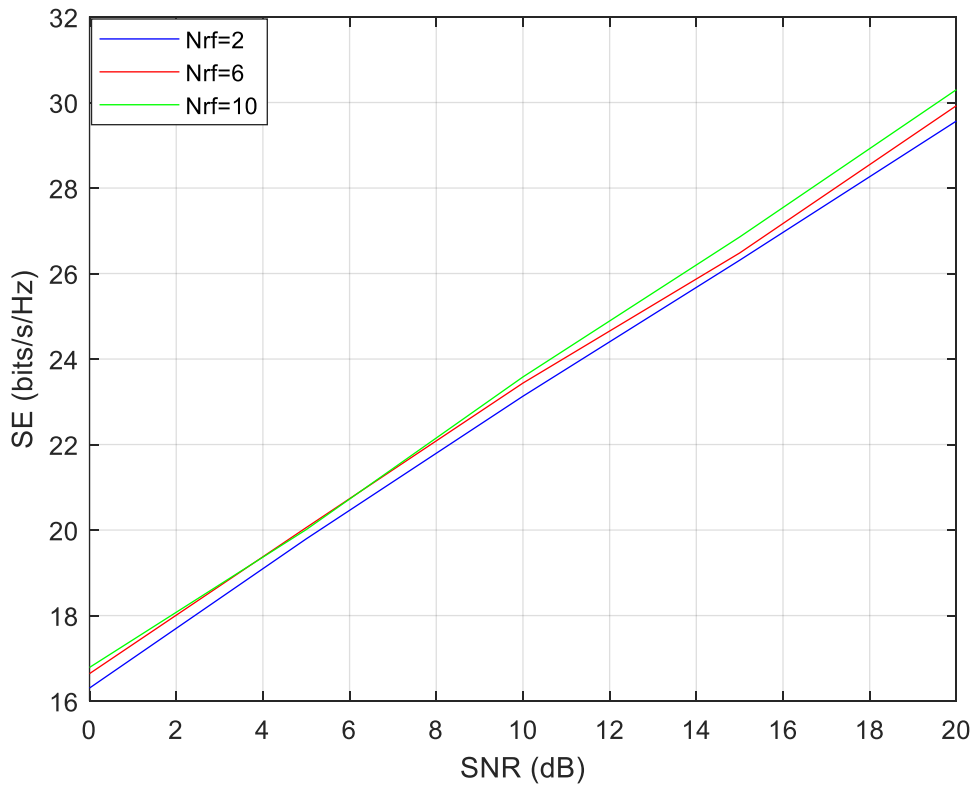


Figure3. 4: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_{RF}

Une légère augmentation de l'efficacité spectrale est observée lorsque le nombre de canaux RF utilisés à la fois pour l'émission et la réception passe de 2 à 10.

- D'après les résultats de la figure 4, l'efficacité spectrale augmente avec le SNR de manière quasi linéaire, quelle que soit la valeur de N_{RF} . Toutefois, on observe que l'efficacité spectrale s'améliore légèrement lorsque le nombre de canaux RF utilisés à la fois pour l'émission et la réception augmente. Cependant, le nombre de canaux RF n'a pas d'impact remarquable sur l'efficacité spectrale, mais il permet de minimiser les coûts de réalisation du système.

3.5.2.2: Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_{RF} :

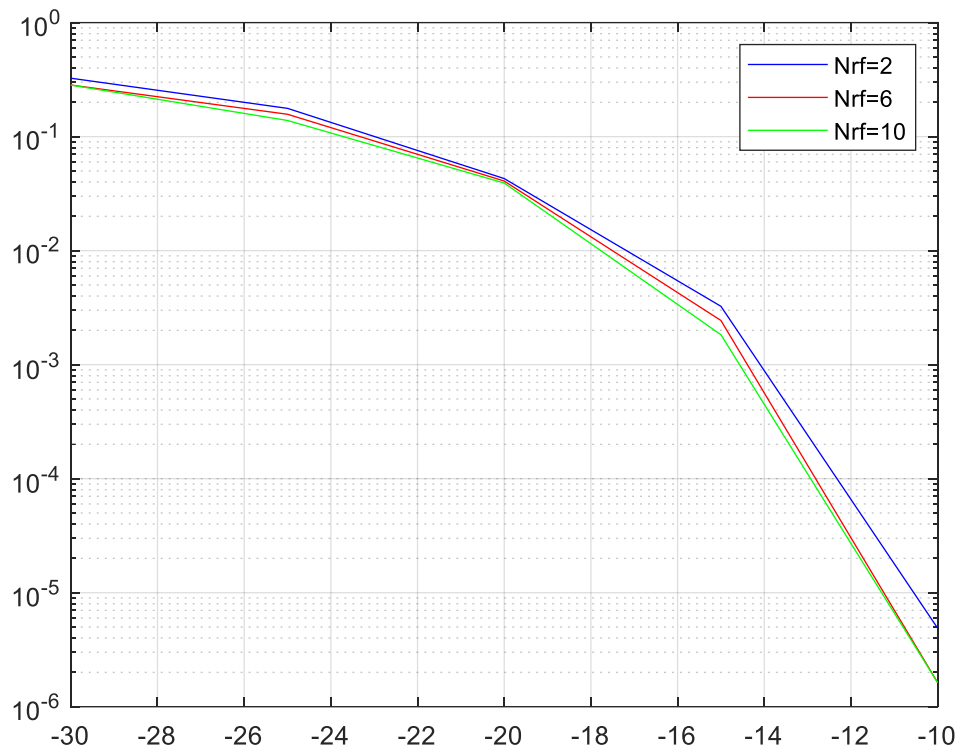


Figure3. 5: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_{RF}

Selon les résultats présentés dans la figure (3.5), les constats suivants peuvent être établis :

Le taux d'erreur binaire (BER) diminue à mesure que le rapport signal sur bruit (SNR) augmente.

L'augmentation du nombre de canaux RF, tant à l'émission qu'à la réception, contribue à une légère réduction du BER. Par exemple, pour un BER de 10^{-5} , le SNR s'améliore d'environ moins de 1dB lorsque le nombre de canaux RF passe de 2 à 10. Toutefois, cette amélioration reste modeste, ce qui suggère que l'impact des canaux RF sur les performances globales du système est limité. Ainsi, il est envisageable de réduire le nombre de canaux RF afin de diminuer les coûts sans compromettre significativement les performances.

3.5.2.3: L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_s :

Dans cette section, nous analysons la variation de l'efficacité spectrale et du taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) pour un système MIMO beamforming hybride 64×64 avec $N_{RF}=10$. Le nombre de flux de données en entrée (NS) est également ajusté à chaque simulation.

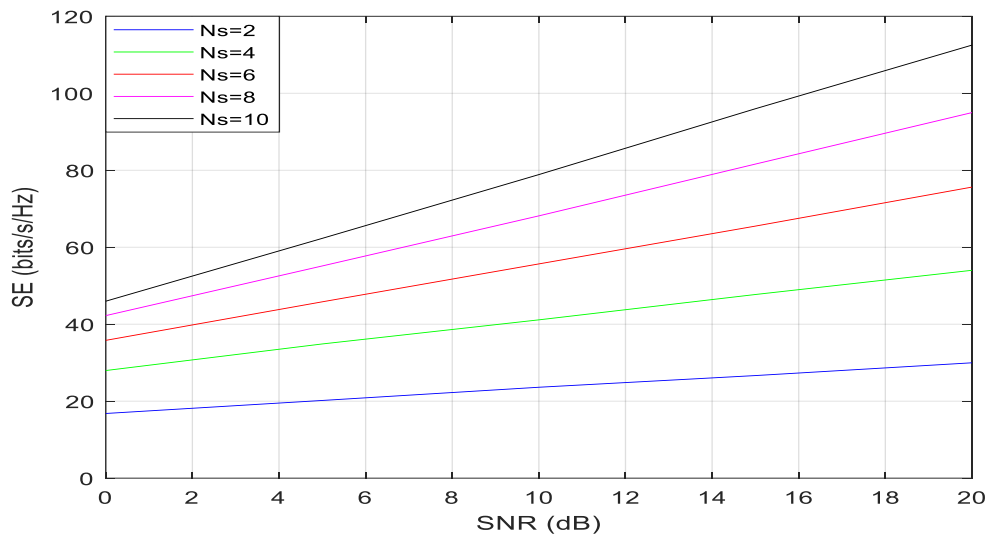


Figure3. 6: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_s

On observe, d'après les résultats de la figure (3.6), que pour toutes les valeurs de N_s , l'efficacité spectrale augmente de manière quasi linéaire avec le SNR. Cette croissance est attendue, car un SNR plus élevé améliore la qualité de transmission. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de flux de données entraîne une amélioration significative de l'efficacité spectrale. À titre d'exemple, pour un SNR de 20 dB, la SE passe d'environ 25 bits/s/Hz pour $N_s=2$ à plus de 110 bits/s/Hz pour $N_s=10$. Ce gain met en évidence l'apport du multiplexage spatial dans l'optimisation de la capacité du système. Toutefois, cette amélioration s'accompagne d'une complexité accrue en termes de traitement du signal et de consommation de ressources, ce qui souligne la nécessité de trouver un compromis entre performance et contraintes matérielles lors du dimensionnement du système.

3.5.2.4 Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_{RF} et N_s :

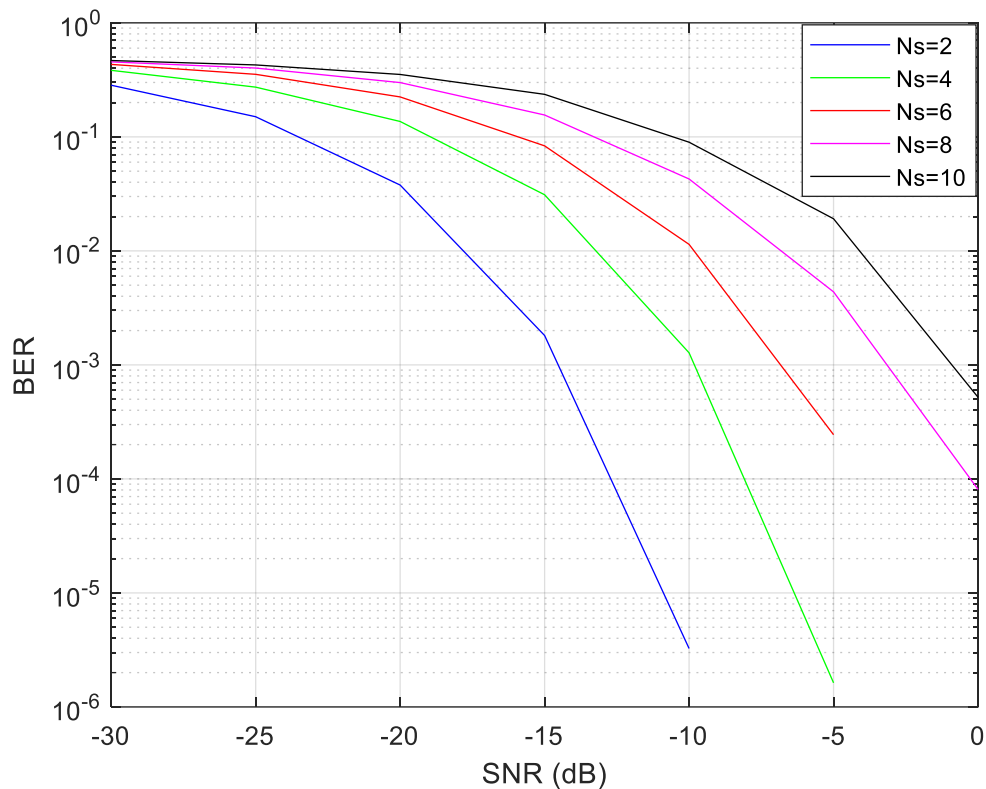


Figure3. 7: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de Ns

Les résultats de la figure (3.7) montrent que :

Le taux d'erreur binaire (BER) diminue à mesure que le rapport signal sur bruit (SNR) augmente.

Le BER diminue également lorsque le nombre de flux de données NS est réduit.

3.6 Conclusion :

En résumé, ce chapitre a présenté l'application de l'algorithme heuristique à la conception d'un système de formation de faisceaux hybride (HBF) dans un environnement MIMO-OFDM à ondes millimétriques. Grâce à cet algorithme, nous avons pu déterminer de manière explicite les matrices de formation analogique et numérique, permettant ainsi de maximiser la borne supérieure de l'efficacité spectrale (SE) et d'améliorer le taux d'erreur binaire (BER).

L'étude a porté sur l'influence du nombre d'antennes, tant à l'émission qu'à la réception, sur les performances globales du système. Nous avons également analysé l'impact

de la variation du nombre de chaînes RF des deux cotés (émetteur et récepteur) sur la SE et le BER. Par ailleurs, l'effet du nombre de flux de données transmis a été examiné.

Les résultats obtenus montrent que la réduction du nombre de chaînes RF n'altère que faiblement la qualité et la capacité du système, validant ainsi l'intérêt de la formation de faisceaux hybride comme solution économique et efficace, qui réduit la complexité matérielle sans compromettre les performances du système MIMO-OFDM.

Conclusion générale :

À travers ce mémoire, nous avons étudié les techniques de formation de faisceaux appliquées aux systèmes MIMO massifs-OFDM, une technologie clé des réseaux 5G. Notre objectif principal était de comprendre, modéliser et simuler le beamforming hybride associé à la modulation OFDM, en utilisant un algorithme heuristique et la méthode MMSE, afin d'optimiser les performances des transmissions sans fil tout en tenant compte des contraintes de complexité et de consommation énergétique.

Dans un premier temps, nous avons présenté les différentes approches de formation de faisceaux, en mettant en évidence les compromis entre la simplicité de l'analogique, la performance du numérique et l'équilibre offert par l'approche hybride. Cette dernière apparaît comme une solution particulièrement adaptée aux exigences des réseaux 5G et au-delà, grâce à sa capacité à allier flexibilité, efficacité et maîtrise des coûts.

Nous avons ensuite porté notre attention sur l'architecture du beamforming hybride et sur l'application de l'algorithme heuristique ainsi que de la méthode MMSE, qui permettent une réduction significative des interférences et une amélioration notable de la qualité du signal reçu. En exploitant une structure entièrement connectée, cette approche favorise une gestion optimisée des ressources tout en garantissant une transmission fiable, même dans des environnements complexes à forte densité d'utilisateurs.

Enfin, les simulations réalisées sous MATLAB ont permis de valider les performances de l'approche étudiée. Les résultats ont mis en évidence l'impact de différents paramètres du système (nombre d'antennes, de chaînes RF, flux de données) sur l'efficacité globale du réseau et le taux d'erreurs binaire du système. Ces analyses confirment le potentiel du beamforming hybride, basé sur un algorithme heuristique et le MMSE, pour répondre aux besoins croissants en débit, fiabilité et efficacité spectrale des futurs réseaux mobiles.

Ce travail ouvre également la voie à plusieurs perspectives prometteuses. Des améliorations peuvent être envisagées, notamment par l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pour un beamforming adaptatif, ou par l'application à des systèmes de communication 6G encore plus exigeants. L'optimisation conjointe du matériel et des algorithmes de traitement du signal demeure un enjeu clé pour exploiter pleinement les architectures MIMO massives dans les prochaines générations de réseaux.

Bibliographie

- [1] ZAOUI Imene, LADRAA Bouchra, *La formation de faisceaux dans les systèmes de communication de MIMO massif*, Mémoire Master, Université Saad Dahlab, Blida, 2019-2020.
- [2] E. Dahlam, S. Parkvall, J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, Elsevier Academic Press, 2018.
- [3] P. Collet, *La 5G et les ondes millimétriques*, École Polytechnique, France, 2020.
- [4] A. Basu, T. Itoh, *Millimeter-Wave Antennas*, Télécommunications, Vol. 52, pp. 178-187, 1997.
- [5] NGOM A., *Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou "small cells" pour le standard 5G*, Doctorat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 2019.
- [6] ZERRADI Fares, TIGHEZZA Salah Mohammed, *Étude et simulation d'un système MIMO-massif pour 5G*, Mémoire Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2019-2020.
- [7] S. Beddiaf, S. Yahia, *Technologie radio sur fibre pour les applications sans fil 5G*, Mémoire Master, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2019.
- [8] Amar Cheine Mariem, Mohamed Vall Nebghouha, *Simulation d'un système MIMO-OFDM pour les transmissions sans fil*, Mémoire Master.
- [9] LADRAA Bouchra, ZAOUI Imene, *Formation de faisceaux dans un système de communication MIMO massif*, Université Saad Dahlab, Blida.
- [10] MABROUK K., *Conception et réalisation d'un système de télécommunications MIMO avec formation numérique de faisceaux...*, Doctorat, Télécom ParisTech, 2008.
- [11] CAI M., *Modeling and Mitigating Beam Squint in Millimeter Wave Wireless Communication*, Doctorat, University of Notre Dame, 2018.
- [12-13] WHITE P., REIL G. L., *Millimeter-Wave Beamforming: Antenna Array Design Choices & Characterization*, Rohde & Schwarz, 2016.
- [14-15] AHMED S., *Beamforming Management and Beam Training in 5G System*, Master's Thesis, 2019.
- [16] *Advances in Mobile Communication by Implementation of Smart Antennas*, ResearchGate.net.
- [17] IOUSHUA S., ELDAR Y., *A Family of Hybrid Analog-Digital Beamforming Methods for Massive MIMO Systems*, IEEE Trans. Signal Processing, 67, pp. 3243–3257, 2019.
- [18] *Design of True Time Delay Millimeter Wave Beamformers for 5G Multibeam Phased Arrays*, ResearchGate, consulté le 15 avril 2024.
- [19] DILLI R., *Performance Analysis of Multi-User Massive MIMO Hybrid Beamforming Systems at Millimeter Wave Frequency Bands*, Wireless Networks, vol. 27(3), pp. 1925–1939, 2021.

- [20] JUNG J.S. et al., *Improved Hybrid Beamforming for mmWave Multi-User Massive MIMO*, CMC-Computers, Materials & Continua, vol. 67(3), pp. 3057–3070, 2021.
- [21] HANAFI Ahlam, MADANI Radjaa, *Formation de faisceaux hybride pour les réseaux d'antennes destinés au Massive MIMO*, Master, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2022/2023.
- [22] BOGALE T.E., L.B., HAGHIGHAT A., *Hybrid Analog-Digital Beamforming: How Many RF Chains and Phase Shifters Do We Need?*, IEEE Commun., vol. 1, pp. 26–09, 2014.
- [23] GOLDSMITH A. et al., *Capacity Limits of MIMO Channels*, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, no. 5, pp. 684–702, 2003.
- [24] *MMSE Partially Connected Hybrid Beam Forming in MIMO-OFDM Systems*.
- [25] MA M., NGUYEN N.T., JUNTTI M., *Solution en forme fermée...*, Centre for Wireless Communications, Université d'Oulu.
- [26] RAPPAPORT T.S. et al., *Millimeter Wave Wireless Communications*, Pearson Education, 2015.
- [27] SOHRABI S., YU W., *Hybrid Analog and Digital Beamforming for mmWave Massive MIMO With OFDM*, IEEE JSAC, vol. 35, no. 7, pp. 1432–1443, 2017.
- [28] ZILLI G.M., ZHU W.-P., *Beamforming hybride basé sur la décomposition tensorielle*, IEEE Trans. Vehicular Tech., 2021.
- [29] EL AYACH O. et al., *Spatially Sparse Precoding in mmWave MIMO*, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, 2014.
- [30] SAYYED A.M., *Deconstructing Multiantenna Fading Channels*, IEEE Trans. Signal Process., vol. 50, no. 10, pp. 2563–2579, 2002.
- [31] YU X. et al., *Alternating Minimization Algorithms for Hybrid Precoding in mmWave MIMO*, IEEE JSTSP, vol. 10, no. 3, pp. 485–500, 2016.
- [32] KU H.-W. et al., *Low-Complexity Wideband Hybrid Precoding*, IEEE ISCAS, 2021, pp. 1–5.
- [33] YONG S.K., CHONG C.-C., *Multigigabit Wireless via mmWave: Potentials and Challenges*, EURASIP J. Wireless Commun. Netw., 2007.
- [34] RAPPAPORT T.S. et al., *Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!*, IEEE Access, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [35] HAIDER F. et al., *Cellular Architecture and Key Technologies for 5G*, IEEE Commun. Mag., vol. 52, pp. 122–130, 2014.
- [36] TELATAR E., *Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels*, Eur. Trans. Telecommun., vol. 10, no. 6, pp. 585–595, 1999.

- [37] SHI Q. et al., *Iteratively Weighted MMSE Approach to Utility Maximization*, IEEE Trans. Signal Process., vol. 59, no. 9, pp. 4331–4340, 2011.
- [38] DOAN C.H. et al., *Design Considerations for 60 GHz CMOS Radios*, IEEE Commun. Mag., vol. 42, no. 12, pp. 132–140, 2004.
- [39] SHENOUDA M.B., DAVIDSON T.N., *Convex Conic Formulations for Robust Downlink Precoder Design*, IEEE JSTSP, vol. 1, no. 4, pp. 714–724, 2007.
- [49] WANG K.-Y. et al., *Outage-Constrained Robust Transmit Optimization*, IEEE Trans. Signal Process., vol. 62, no. 21, pp. 5690–5705, 2014.
- [40] VENKATESWARAN V., VAN DER VEEN A.J., *Analog Beamforming with Phase Shift Networks*, IEEE Trans. Signal Process., vol. 58, no. 8, pp. 4131–4143, 2010.
- [41] HUR S. et al., *Millimeter Wave Beamforming for Wireless Backhaul in Small Cell Networks*, IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 10, 2013.
- [42] SANAYEI S., NOSRATINIA A., *Antenna Selection in MIMO Systems*, IEEE Commun. Mag., vol. 42, no. 10, pp. 68–73, 2004.
- [43] MOLISCH A.F., ZHANG X., *FFT-Based Hybrid Antenna Selection*, IEEE Commun. Lett., vol. 8, no. 1, pp. 36–38, 2004.
- [44] ZHANG X. et al., *Variable-Phase-Shift RF-Baseband Codesign*, IEEE Trans. Signal Process., vol. 53, no. 11, pp. 4091–4103, 2005.
- [45] BOGALE T.E., LE L.B., HAGHIGHAT A., *Hybrid Analog-Digital Beamforming* (arXiv: <http://arxiv.org/abs/1410.2609>), 2014.
- [46] RUSEK F. et al., *Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges*, IEEE Signal Process. Mag., vol. 30, no. 1, pp. 40–60, 2013.
- [47] KRIEGER J.D. et al., *Dense Delta-Sigma Phased Arrays*, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 4, pp. 1825–1837, 2013.
- [48] EL AYACH O. et al., *Spatially Sparse Precoding in mmWave MIMO*, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 13, no. 3, 2014.
- [49] PI Z., *Optimal Transmitter Beamforming with Per-Antenna Constraints*, IEEE ICC, Ottawa, 2012, pp. 3779–3784.