



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologie
Filière: Télécommunication
Spécialité: Systèmes de Télécommunication

Thème

Etude et simulation du Beamforming
Hybride

Réalisé par:

 **DOUIS Habiba**

 **FEDEL Chourouk**

 **MERZOUGUI Oumaima**

Encadré par:

 **AJGOU Riadh**

Année Universitaire: 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

*Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du
Faculté de Technologie de L'Université Echahid Hamma Lakhdar. El
Oued.*

*Avant tout, remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le
courage et la volonté pour accomplir ce travail*

*Je remercie mon encadreur Mr. AJGOU Riadh, pour avoir dirigé ce
travail, pour son aide immense, pour sa simplicité et ses valeurs uniques
qui m'ont toujours soutenue dans les moments les plus difficiles, il m'a
toujours reçu avec sympathie et il a mis son temps et ses connaissances à
ma disposition, il a suivi et encouragé les nombreuses corrections
jusqu'à l'achèvement de ce travail veuillez trouver ici l'expression de ma
reconnaissance.*

*Et je lui exprime particulièrement tout ma reconnaissance pour
m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités
humaines et sa constante disponibilité*

Toutes nos gratitudes à nos enseignants.

Et nos amis.

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce
travail.*

إهداء

أحمد الله عز وجل على مننه وعونه لإتمام هذه المدكرة .

إلى الذي وهبني كل ما يملك حتى أحقق له أماله، إلى من كان يدفعني قدماً نحو الأمام لنيل المبتغى، إلى الإنسان الذي امتلك الانسانية بكل

قوة، إلى الذي سهر على تعليمي بتضحيات جسام مترجمة في تقديسه للعلم، إلى مدرستي الأولى في الحياة

أبي الغالي على قلبي أطل الله في عمره،

إلى التي وهبت فلة كبدها كل العطاء والحنان، إلى التي صبرت على كل شيء، التي مرعنتني حق الرعاية وكانت سندي في الشدائد،

وكانت دعواها لي بالتوفيق، تتبني خطوة خطوة في علمي إلى من امرتني كلما تذكرت ابتسامتها في وجهي نبع الحنان أُمِّي اعز ملاك

على القلب والعين جنراها الله عني خير الجزاء في الدارين،

إليهما أسدي هذا العمل المتواضع لكي ادخل على قلوبهما شيئاً من السعادة إلى اخوتي واخواتي الذين تقاسموا معي عبء الحياة،

إلى روح جدي الراحل الذي ساندني منذ صغري مرحمك الله ومرعاك .

وإلى كل أحبتي ومن ساندني في مشواري الجامعي

وإلى كل من يؤمن بأن بدور نجاح التغيير هي في ذاتنا وفي أنفسنا قبل ان تكون في أشياء أخرى . . .

قال الله تعالى ﴿لَا يَغْيِرُ مَا يُقَوْمُ حَتَّى يَغْيِرُ أُمَّا بِأَنْفُسِهِمْ﴾

الآية 11 من سورة الرعد

إهداء:

بعد مسيرة دراسية حملت في طياتها الكثير من الصعوبات والمشقة والتعب

اليوم تقطف ثمرها والحمد لله

اهدي ثمرة هذا العمل المتواضع أولاً الى مروح ابي الراحل فلقد كان لي السراج الذي أنا مدرّس حياتي وألهمني الصمود والتحدي بلوغ

مقاصدي برحمة الله عليك أبي

إلى أُملي في الحياة وقرّة عيني وسرّ نجاحي أُمي الغالية ادامها الله وأطال في عمرها

وإلى كل من ساندني اخوتي وإخوتي الذين وقفوا بجاني

شكري وثنائي لأساتذتي وجميع من ساندني طيلة هذه السنوات .

سروح

Dédicace

*Je voudrais tout d'abord remercier mon dieu ; je souhaiterais exprimer ma gratitude envers le docteur **AJGOU Riadh**. Le mémoire n'aurait pas été possible donc je remercie lui pour son grande qualité d'écoute et pour sa patience et ses conseils Un grand merci à mes parents qui sont toujours présents tout au long de mes études Je remercie aussi ma belle sœurichrak et mes frères Sami HatemeAbdelmoaze Je ne saurais trouver les mots appropriés pour remercier mon proche ami Ma mère pour leur support et leur soutien.*

Oumaima

Résumé:

Les systèmes de communication mobile 5G modernes utilisent le multiplexage spatial qui est une formation de faisceau hybride pour améliorer le débit de données. Afin d'envoyer plusieurs flux de données à travers le canal, un ensemble de poids de précodage et de combinaison est dérivé de la matrice de canal. En outre, chaque flux de données peut être récupéré indépendamment. Ces poids contiennent à la fois des termes d'amplitude et de phase. Étude et simulation d'un système de communication équipé d'une formation de faisceau hybride à évaluer en introduisant les concepts de base à savoir le calcul des poids le diagramme de rayonnement ainsi l'évaluation en termes d' SNR et efficacité spectrale en utilisant un réseaux d'antennes MIMO (Multi input Multi output).

Mots clés : formation de faisceaux hybride, MIMO, poids, ULA/URA

ملخص:

تستخدم أنظمة الاتصالات المتنقلة الحديثة من الجيل الخامس تعدد الإرسال المكاني وهو عبارة عن تشكيل حزم هجين لتحسين إنتاجية البيانات. من أجل إرسال تدفقات بيانات متعددة عبر القناة ، يتم اشتقاق مجموعة من الترجيح المسبق والجمع من مصفوفة القناة. بالإضافة إلى ذلك ، يمكن استرداد كل دفق بيانات بشكل مستقل. تحتوي هذه الأوزان على شروط السعة والطور. دراسة ومحاكاة لنظام اتصالات مجهز بتشكيل حزم هجين ليتم تقييمه من خلال إدخال المفاهيم الأساسية وهي حساب أوزان مخطط الإشعاع وكذلك التقييم من حيث نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) والكفاءة الطيفية باستخدام مصفوفة الهوائي MIMO (متعدد المدخلات ومخرجات).

الكلمات المفتاحية: تشكيل الحزمة الهجينة, MIMO, الأوزان, ULA/URA

Abstract:

Modern 5G mobile communication systems use spatial multiplexing which is hybrid beamforming to improve data throughput. In order to send multiple data streams through the channel, a set of precoding and combining weights are derived from the channel matrix. In addition, each data stream can be recovered independently. These weights contain both amplitude and phase. A study and simulation of a communication system equipped with hybrid beamforming to be evaluated by introducing the basic concepts namely the calculation of weights the radiation pattern as well as the evaluation in terms of SNR and spectral efficiency using an antenna array MIMO (Multi input Multi output).

Key words: hybrid beamforming, MIMO, weights, ULA/URA

Listes des acronymes

Wi-Fi	Fidélité sans fil
5G	Cinquième génération
MIMO	Entrée multiple Sortie multiple
mm Wave	Ondes Millimétriques
MU-MIMO	MIMO multi-utilisateurs
FF	Formateur de Faisceaux
RF	Fréquence radio
SNR	Rapport signal sur bruit
CNA	Convertisseur numérique analogique
CAN	Convertisseur analogique-numérique
MUSIC	Classification de signaux multiples
SAMV	Variance minimale asymptotique creuse itérative
AOA	Angle d'arrivée
DAO	Angle de départ
BS	Station de base
HBF	Formation de faisceaux hybride
TR	Transmission et réception
SE	Efficacité spectrale
UE	Équipement de l'utilisateur
URA	Matrice rectangulaire uniforme
ULA	Réseau linéaire uniforme
UCA	Réseau circulaire uniforme

Symboles	Signification
$\mathbf{A}(\theta_0, \phi_0)$	Vecteur constitue la réponse au niveau de chaque élément d'antenne.
θ_0	Angles d'élévation
ϕ_0	Angles d'azimut
W^H	représente l'Hermitien
W_k	représente le poids complexe de la k-ème antenne du réseau
a_k	L'amplitude du poids
θ_k	Le déphasage du poids

Liste des figures

Figure I.1 Technique de réseaux 5G.....	5
Figure I.2 Présentation des différentes figures de répartition.....	6
Figure I.3 Système Massive MIMO en transmission multiutilisateurs.....	8
Figure I.4 Principe de la formation de faisceaux.....	9
Figure I.5 Principe de la formation de faisceau.....	11
Figure I.6 formation de faisceaux analogique.....	13
Figure I.7 formation de faisceaux analogique en émission.....	14
Figure I.8 formation de faisceaux analogique en réception.....	15
Figure I.9 Formation de faisceaux numérique.....	16
Figure I.10 Formation de faisceaux numérique.....	17
Figure I.11 (a) formation de faisceaux adaptative (b) formation de faisceau commutée.....	18
Figure I.12 (a)matrice de Butler 4x4 (b)modèle de faisceau produit par la matrice de Butler 4x4.....	19
Figure I.13 Algorithme de formation de faisceaux Classification.....	20
Figure II.1 formation de faisceaux hybride.....	24
Figure II.2 Architecture d'un système de formation de faisceaux hybrides.....	25
Figure II.3 Précodage hybride.....	26
Figure II.4 Schéma de principe des étapes de précodage au niveau de l'émetteur en ondes millimétriques. Système de formation de faisceau hybride MU-MIMO.....	26

Figure II.5 Schéma de principe des étapes de précodage au niveau du récepteur en ondes millimétriques. Système de formation de faisceau hybride MU-MIMO.....	27
Figure II.6 l'architecture des formateurs de faisceaux analogiques : (a) structure entièrement connectée, (b) structure partiellement connectée.....	28
Figure III.1 Architecture HBR simplifiée selon les auteurs dans [34].....	34
Figure III.2 Géométrie différente du réseau.....	35
Figure III.3 le modèle de faisceau obtenu en utilisant les poids optimaux.....	39
Figure III.4 le modèle de faisceau obtenu en utilisant les poids hybride.....	40
Figure III.5 compare l'efficacité spectrale obtenue en utilisant les poids optimaux avec celle des poids de formation de faisceau hybride proposés.....	42
Figure III.6 compare l'efficacité spectrale obtenue en utilisant les poids optimaux avec celle des poids de formation de faisceau hybride proposé.....	43

Liste des tableaux

Tableau I.1 Caractéristique des différents types de cellules.....	7
Tableau II.1 Comparaison des technique de précodage.....	29
Tableau III.1 L'effet du bruit sur le système de (HBF).....	44
Tableau III.2 La relation entre l'efficacité spectrale et le rapport signal sur bruit.....	44

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé	i
Listes des acronymes	ii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Sommaire	vii
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Techniques de formation de faisceaux

I.1 Introduction.....	4
I.2 Les Techniques de réseaux 5G	4
I.2.1. ondes millimétriques.....	5
I.2.2 Full-Duplex.....	5
I.2.3 petites cellules.....	6
I.2.4 MIMO massif	7
I.2.5 Formation de faisceaux.....	8
I.3 formation de faisceaux.....	8
I.3.1. Définition de formation de faisceaux	8
I.3.2 principe de la formation de faisceaux.....	9
I.3.1. Avantages et limites de techniques de formation de faisceaux	11
I.4 Techniques de formation de faisceaux.....	12
I.3.1. Technique de formation de faisceaux analogique	13
I.4.1.1 Formation de faisceaux analogique en émission	14
I.4.1.2 Formation de faisceaux analogique en réception	14
I.4.2 Technique de formation de faisceaux numérique.....	15
I.5 Avantages et inconvénients de la formation de faisceaux analogique et Numérique.....	17
I.6 Classification des techniques de formation de faisceaux.....	17
I.6.1 Formation de faisceau conventionnelle (commutée).....	17
I.6.2 Formation de faisceau adaptative	17
I.7 conclusion	21

Chapitre II: Techniques de formation de faisceaux hybride

II.1 Introduction	23
II.2 Définition de formation de faisceaux hybride	23
II.3 Architecture générale de la formation de faisceaux hybride	24
II.4 Précodage hybride	25
II.5 La méthodologie proposé	26
II.6 structure de formation de faisceau hybride.....	27
II.6.1 structure entièrement connectée	28

II.6.1 structure partiellement connectée.....	28
II.7 Avantages et inconvénients des deux structures (HBF)	28
II.8 Comparaison des architectures (HBF) entièrement connectées et partiellement connectées.....	29
II.9 Les avantages fondamentaux de (HBF).....	30
II.10 Conclusion	31

Chapitre III: Résultats de simulations

III.1 Introduction	33
III.2 Architecteur de formation de faisceaux hybride	34
III.3 Installation du système (HBF).....	35
III.4 Calcul des poids hybrides.....	37
III.5 Comparaison de l'efficacité spectrale.....	40
III.7 Conclusion.....	44
Conclusion Générale	46
Bibliographie.....	48

Introduction général

Introduction générale

Dans cette ère moderne la technologie de Télécommunication très importante donc les télécommunications sont définies comme la transmission d'informations sur une longue distance à l'aide de technologies électroniques, informatiques, filaires, optiques ou électromagnétiques.

La technologie de formation du faisceau semble pour être une simple amélioration sur traditionnelle Wi-Fi omnidirectionnel technologie. Mais elle nécessite le respect par les équipements opérant en Wi-Fi de spécifications normalisées afin de fonctionner convenablement, Jusque-là, la meilleure chance de rencontrer une formation de faisceau était sur les réseaux WiFi locaux. Cependant, avec le déploiement des réseaux 5G, cette situation est sur le point de changer. Radiofréquences dans la 30 à 300 GHz gamme sont utilisées dans 5G. Bien que ces fréquences puissent transmettre des données beaucoup plus rapidement, elles sont également beaucoup plus sensibles aux signaux parasites et ont plus de difficulté à traverser des objets physiques. Pour résoudre ces problèmes, une variété de solutions sont nécessaires, y compris rétrécissement cellulaires tailles et massivement augmenter MIMO couverture, tels que par la multiplication du nombre d'antennes sur 5G stations .Et, de bien sûr, avec formation de faisceau (beamforming).

Ce travail s'intéresse à l'étude de la formation de faisceaux hybride dans le réseau mobile de cinquième génération (5G).

Problématique et motivation

La formation de faisceaux est une technique importante de cinquième génération utilisée dans les réseaux d'antennes pour diriger le signal vers un utilisateur spécifique. Il existe deux techniques de formation de faisceau (formation de faisceau analogique et numérique). Les deux techniques ont des problèmes lors de la génération de faisceau, je suggère donc la formation de faisceau hybride afin d'équilibrer entre Légalisation et se débarrasser des ces problèmes.

Organisation de mémoire

Ce travail est organisé en trois chapitres dont:

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les technologies de cinquième génération en général, parmi ces technologies se trouve les techniques de formation de faisceaux, qui fait l'objet de notre étude dans ce chapitre (formation de faisceaux analogique et numérique et hybride).

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié la technique de formation hybride avec différentes architectures, qui a été proposée afin d'atteindre un équilibre entre les deux techniques numérique/analogique en explorant la motivation d'utiliser la formation de faisceaux hybride.

Dans le troisième chapitre, nous avons simulé une architecture de formation de faisceau hybride et la comparer avec la technique numérique à l'aide du logiciel Matlab.

Chapitre I

*Techniques de formation
de faisceaux*

Chapitre I:

Techniques de formation de faisceaux

I. Généralité

I.1. Introduction

La formation de faisceaux est très importante pour les réseaux 5G, où les débits de données sont très élevés, elle permet de prendre en charge et de maximiser l'efficacité de transmission et de réception à l'aide de la technique de formation de faisceaux.

C'est une technique qui concentre le signal sans fil sur un récepteur spécifique au lieu de diffuser le signal dans toutes les directions. Question : Comment composez-vous ce package?, la réponse est à travers des techniques appelées techniques de formation de faisceaux qui sont au centre de notre étude dans ce chapitre.

I.2 Les Techniques de réseaux 5G

À l'heure actuelle, quelles technologies qui vont faire le plus pour la 5G à long terme ne sont pas encore claires, mais quelques favoris ont vu le jour. Les front-coureurs comprennent des ondes millimétriques, des petites cellules, des MIMO massifs, un full duplex et une formation de faisceaux...et [1]. La figure I.1 montre les différentes technologies que nécessite la 5G, parmi ces techniques on trouve la formation de faisceau (Beamforming- en anglais).

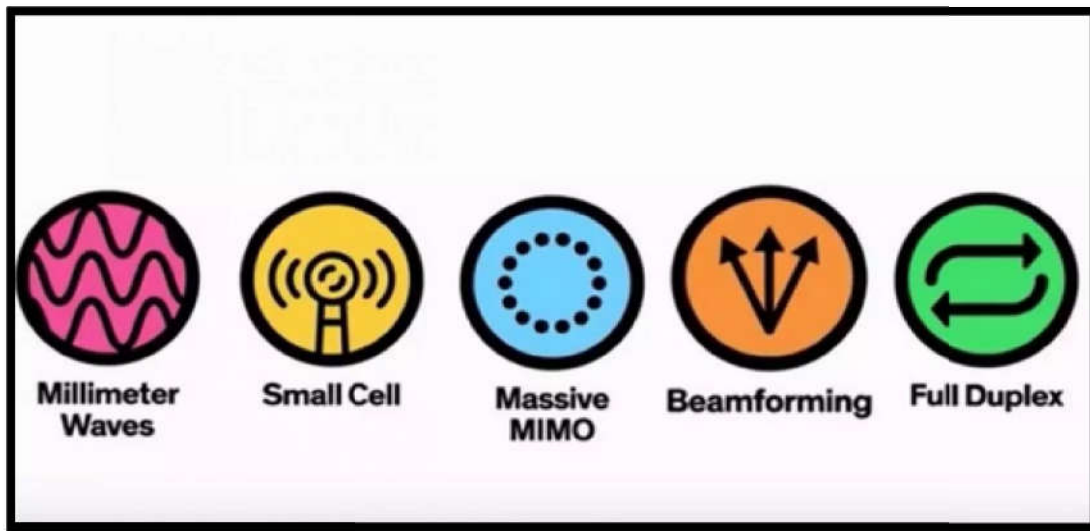


Figure I.1 Technique de réseaux 5G [2].

I.2.1 Ondes millimétriques

Les ondes millimétriques (mm-Wave) sont les ondes radioélectriques couvrant les fréquences de [30 à 300 GHz] [3].

Les ondes millimétriques peuvent être utilisées pour la couverture externe de réseaux à haute densité tels que la portée jusqu'à [200 à 300 mètres]. Chaque cellule aura une mauvaise couverture, ce qui nécessitera la mise en œuvre de la technique de formation de faisceaux [4].

I.2.2 Full-Duplex

Cette technique permet une transmission et une réception simultanées dans le temps et sur la même bande de fréquences, ce qui peut théoriquement doubler le débit du système par rapport aux systèmes semi-duplex conventionnels. La figure I.2 illustre les distributions de temps et de fréquence dans une transmission unicast duplex ainsi que dans une transmission duplex intégrale. Sur cette figure, nous voyons que toutes les ressources de temps et de fréquence sont utilisées en duplex intégral dans les deux sens des connexions [5].

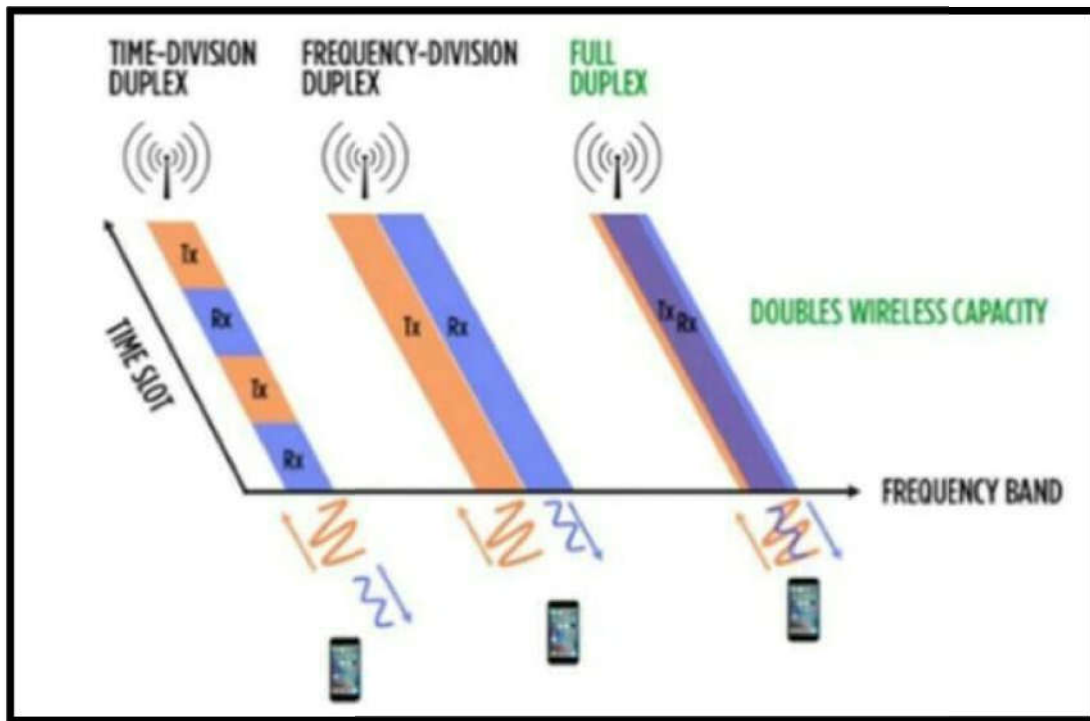


Figure I.2 Présentation des différentes figures de répartition[5].

La technique Full duplex a été considérée comme **irréalisable** dans les systèmes de communication sans fil en raison d'un très haut niveau d'interférence qui peut être créé par l'émetteur-récepteur en essayant d'envoyer et de recevoir un signal en même temps, et dans la même de fréquence (connu sous le nom d'auto-interférence) [5].

I.2.3 Petites cellules

La norme 5G devrait fournir une couverture haut débit dans le pays et à l'étranger. Cette gestion de la couverture avec une qualité de service a poussé la communauté scientifique vers de nouvelles solutions. L'idée de rapprocher le réseau pour réduire la distance entre les derniers points d'accès au réseau et les utilisateurs est la seule solution pour répondre aux besoins de couverture. La capacité par utilisateur est réduite dans le cas de grandes cellules, en raison du grand nombre d'utilisateurs. La solution à ce type de problème est de créer de petites cellules dans ces grandes cellules, car des équipements de communication sans fil 5G seront déployés. Ces cellules sont appelées «petites cellules». Il existe trois principaux types de petites cellules en fonction de leur capacité d'émissivité et de leur zone de couverture.

Femto cellules: Ce type de cellule peut transmettre une force maximale de 24 dB afin d'obtenir une couverture maximale de 100 mètres. Femtocells est principalement déployé pour fournir une couverture à un nombre limité d'utilisateurs au sein d'une communauté résidentielle.

Pico cellules : dans ce genre de cellule, la puissance de transmission varie entre 24 et 30dBm, son rayon de couverture est compris entre (200 et 300m). Les picocellules peuvent être utilisées pour améliorer une couverture à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments, par exemple dans les hôtels, les entreprises etc.

Microcellules : cette catégorie de cellule permet d'obtenir une couverture un peu plus large qui peut aller jusqu'à deux kilomètres de rayon avec une puissance maximale d'émission de 40dBm. Comme les cellules précédentes, ce type de cellule peut être également utilisé dans le but d'assurer une couverture intérieure et / ou extérieure avec un nombre d'utilisateurs simultanés qui peut aller jusqu'à 2000.

Le **Tableau I.1** présente un résumé des différentes cellules en fonction des spécificités utilisées dans les systèmes de communications radio [5].

Type de cellule	Puissance (W)	Rayon de couverture(km)	Nombre d'utilisateurs	Zone
Femtocellue	0,001 à 0,25	0.01 à 0.1	1 à 30	Intérieur
Picocellule	0.25 à 1	0.1 à 0.2	30 à 100	Intérieur/Extérieur
Microcellule	1 à 10	0.2 à 2	100 à 2000	Intérieur/Extérieur
Microcellule	10 à > 50	8 à 30	>2000	Extérieur

Tableau I. 1 Caractéristiques des différents types de cellules[5].

L'utilisation des bandes millimétriques dans ces petites cellules sera également l'une des technologies les plus importantes pour fournir des services à haut débit de données pour la prochaine génération.

I.2.4 MIMO massif

Cette technique se caractérise par l'utilisation d'un grand nombre de micro-antennes sur la même carte (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences

supérieures à 6 GHz) Cette technique permet d'augmenter la vitesse et la mise au point énergie sur la station [6]. La figure I.3 illustre un système de MU-MIMO (MIMO massif de multi utilisateur).

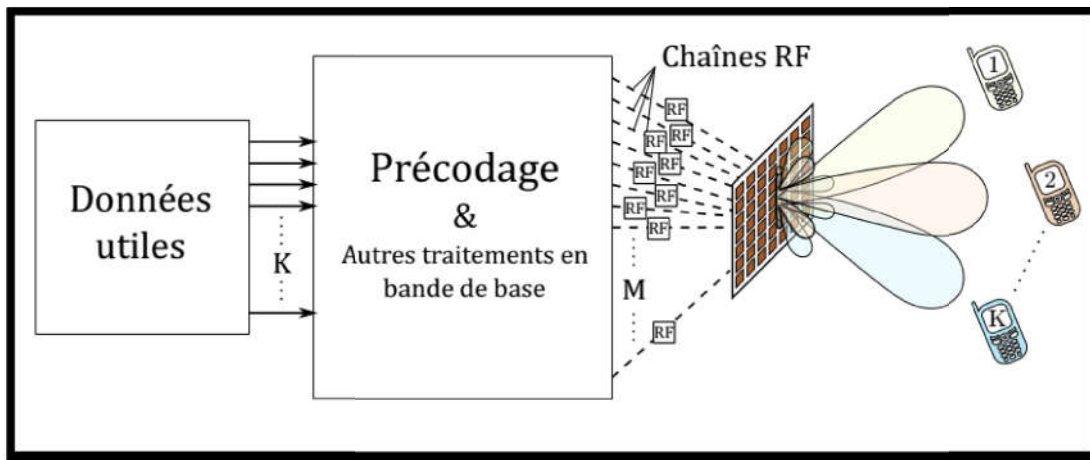


Figure I.3 Système Massive MIMO en transmission multiutilisateurs [7].

I.2.5 Formation de faisceaux

En général, un réseau capte des signaux se propageant dans l'espace et provenant d'une certaine direction et les traite pour obtenir des informations utiles. À cette fin, nous avons l'intention de combiner linéairement les signaux de tous les capteurs avec des coefficients d'une certaine manière, afin d'estimer les données transmises qui rayonnent depuis une direction spécifique. Cette opération est connue sous le nom de formation de faisceau (beamforming)[8].

I.3 Formation de faisceaux

I.3.1 Définition de formation de faisceaux

La formation de faisceaux (ou beamforming en anglais) est une technique de traitement des signaux utilisée pour les systèmes de transmission sans fil haut débit, La technique de formation de faisceau peut être considérée comme un filtre spatial pour chaque direction d'intérêt. Ce filtre va permettre de récupérer ou d'émettre des signaux dans des directions particulières avec un gain maximum, c'est-à-dire de favoriser le gain pour la direction d'intérêt et d'atténuer les signaux émis dans les directions non souhaitées (interférences). A la sortie de ce filtre, nous n'aurons que les signaux dans le sens souhaité sur la figure I.4.

La technique de formation de faisceaux est utilisée dans les antennes intelligentes pour permettre la récupération ou la transmission de signaux dans certaines directions avec un gain maximal[9].

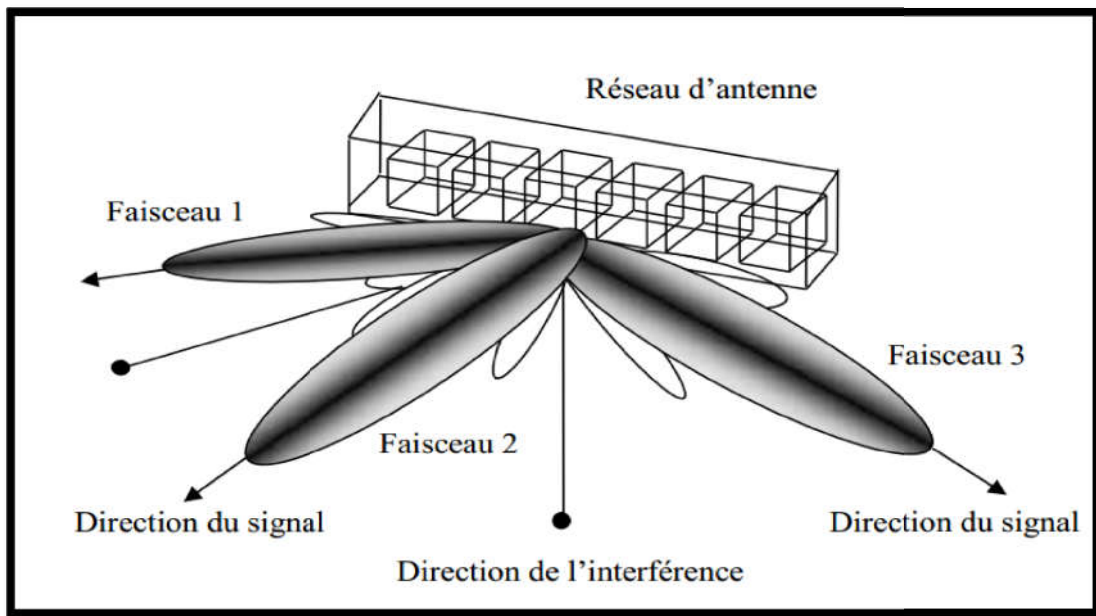


Figure I.4 Principe de la formation de faisceaux [9].

I.3.2 Principe de la formation de faisceaux

Le principe de la formation de faisceaux consiste à synthétiser un champ électrique contrôlé en phase et en amplitude grâce à un réseau d'antennes [10].

Afin de détailler le principe de la formation de faisceaux, nous nous plaçons dans le cas d'une bande-étroite, c'est à dire que la fréquence est restreinte à un domaine très étroit du spectre de fréquences.

Soit $s(t)$ un signal émis dans la direction (θ_0, ϕ_0) représentant les angles d'élévation et d'azimut respectivement d'un émetteur ayant une antenne réseau à K éléments rayonnants. En supposant une propagation en milieu homogène, le signal subit, sur chaque élément d'antenne, un déphasage et une atténuation modélisés par le vecteur à K composantes $\mathbf{A}(\theta_0, \phi_0)$. Ce vecteur constitue la réponse au niveau de chaque élément d'antenne pour la direction considérée et est appelé vecteur directionnel suivant (θ_0, ϕ_0) . Il est donné par :

$$\mathbf{A}(\theta_0, \phi_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1(\theta_0, \phi_0) e^{j\psi_1(\theta_0, \phi_0)} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_k(\theta_0, \phi_0) e^{j\psi_k(\theta_0, \phi_0)} \end{bmatrix} \quad (\text{I.1})$$

Le vecteur des signaux reçus au niveau des différents capteurs des antennes s'écrit:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta_0, \phi_0) * s(t) + \mathbf{b}(t) \quad (\text{I.2})$$

Avec

$$\mathbf{X}(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_k(t) \end{pmatrix} \quad (\text{I.3})$$

$x(t)$ représente le signal reçu par l'élément k , $s(t)$ est le signal émis dans la direction et (θ_0, ϕ_0) $\mathbf{b}(t)$ désigne le vecteur bruit additif.

La formation de faisceaux consiste à focaliser le faisceau de l'antenne (à l'émission et/ou à la réception) dans des directions privilégiées prédéfinies. Cela se traduit par la multiplication par des coefficients complexes, appelés poids ou pondération, des signaux reçus sur chaque élément du réseau d'antennes. Les signaux pondérés sont ensuite additionnés pour réaliser un filtre spatial qui permet de privilégier ou d'éliminer certaines composantes spatiales du signal étudié et pour former à la sortie du réseau (FF) un signal donné par :

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}^H * \mathbf{x}(t) \quad (\text{I.4})$$

$$\mathbf{Y}(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{W}_k^* x_k(t) \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$$\mathbf{W}^H = [\mathbf{w}_k^*, \dots, \mathbf{w}_k^*, \dots, \mathbf{w}_K^*] \quad (\text{I.6})$$

ou le vecteur $\mathbf{W}^H$ représente l'Hermitien (transposé conjugué) du vecteur des poids complexes [11].

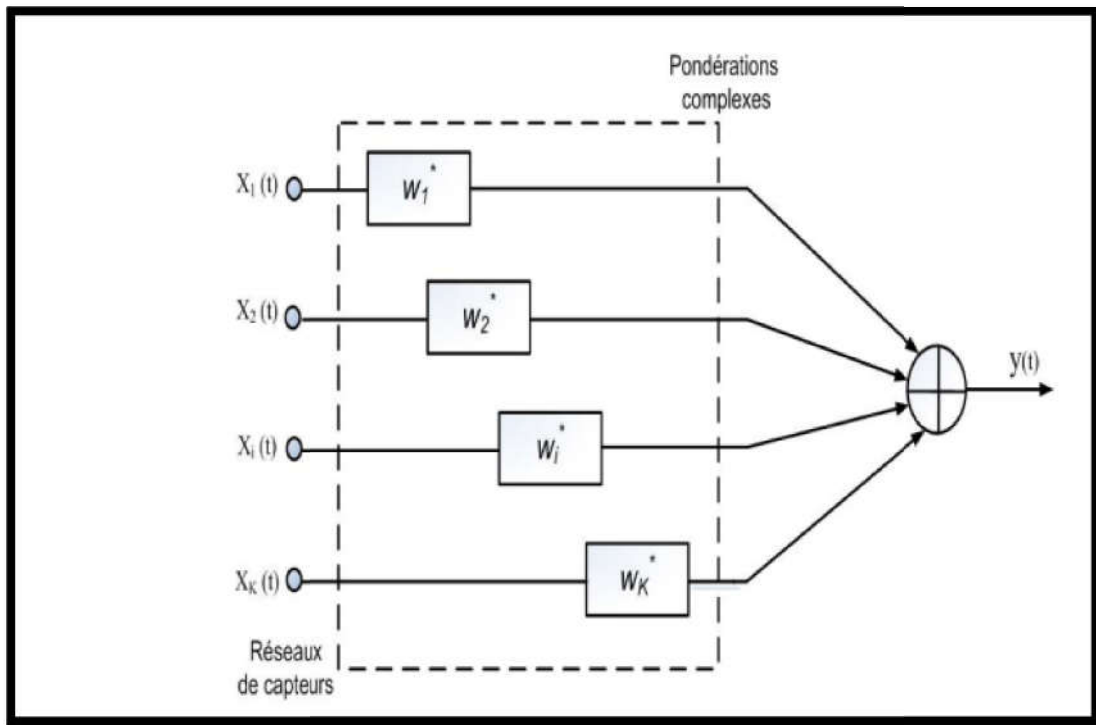


Figure I.5 Principe de la formation de faisceaux[11].

La figure I.5 montre la structure d'un formateur de faisceaux bande étroite. Dans ce cas, la formation de faisceaux se fait en appliquant un coefficient complexe par voie. Elle consiste à choisir judicieusement les poids complexes de façon à satisfaire un critère donné (minimiser les interférences, maximiser le gain, ...)

I.3.3 Avantages et limites de techniques de formation de faisceaux

En concentrant un signal dans une direction spécifique, la formation de faisceaux permet d'envoyer un signal de meilleure qualité au récepteur. Cela signifie en pratique que le transfert d'information sera plus rapide et moins sujet aux erreurs, et ce, sans avoir besoin d'augmenter la puissance de diffusion. La formation de faisceaux est en quelque sorte le Graal des réseaux sans fil et l'objectif qu'ambitionnent la plupart des techniques visant à améliorer les communications sans fil. De plus, étant donné que l'on ne diffuse le signal que dans les directions où l'on a besoin de le diffuser, la formation de faisceaux peut réduire les interférences subies par les personnes qui essaient de capter d'autres signaux.

Les limites de la formation de faisceaux concernent principalement les ressources de calcul dont il a besoin. Il y a beaucoup de situations où le temps et les ressources de puissance requis par les calculs de formation de faisceau finissent par rendre ses avantages nuls. Mais l'amélioration continue de la puissance et de l'efficacité des processeurs fait que les techniques de formation de faisceaux sont devenues suffisamment abordables pour être intégrées dans les équipements de réseaux grand public [12].

I.4 Techniques de formation de faisceaux

Nous allons décrire les différentes techniques utilisées à l'heure actuelle pour fabriquer des faisceaux dans les antennes dites intelligentes. Ces faisceaux doivent avoir pour caractéristique de posséder des lobes principaux dirigés vers les sources désirées et des nuls vers les interférences pour les plus sophistiqués. Nous présenterons dans l'ordre les techniques dites analogiques, puis les techniques numériques [13].

✓ Qu'est-ce qu'une antenne intelligente

Une antenne intelligente est un système antennaire de communication numérique sans fil profitant de l'avantage de l'effet de la diversité au niveau de la source (émetteur), au niveau de la destination (récepteur), ou aux deux niveaux. L'effet de diversité implique la transmission et / ou la réception des multiples ondes radio fréquence (RF) pour augmenter la vitesse de données et réduire le taux d'erreur. Le résultat est un signal de mauvaise qualité au niveau du récepteur en raison du décalage de la phase.

L'interférence du Co-canal est une interférence entre deux signaux qui fonctionnent à la même fréquence. Une antenne intelligente permet d'assurer une plus grande capacité dans les réseaux sans fil en réduisant efficacement les multi-trajets et les interférences du Co-canal. Ceci est obtenu en concentrant le rayonnement uniquement dans la direction souhaitée et en s'ajustant selon l'évolution des conditions de transmission ou l'environnement des signaux .

✓ avantages de l'antenne intelligente

La caractéristique principale des antennes intelligentes est le pouvoir d'élimination des interférences pour les applications radio-mobiles ce qui donne un meilleur rapport signal sur bruit (SNR), donc une augmentation de la capacité en nombre d'utilisateurs [14].

I.4.1 Technique de formation de faisceaux analogique

Les premières antennes analogiques pratiques de formation de faisceau remontent à 1961. La direction était réalisée à l'aide d'un commutateur RF sélectif et de déphaseurs fixes. Les principes de base de cette méthode sont toujours utilisés à ce jour, mais avec du matériel avancé et des algorithmes de précodage améliorés. Ces améliorations permettent un contrôle séparé de la phase de chaque élément [15].

La formation de faisceau analogique est utilisée pour contrôler les phases des signaux originaux afin d'obtenir le gain maximal du réseau d'antennes et le rapport signal/bruit effectif. La formation de faisceau analogique a une structure matérielle de base qui est plus facile à mettre en œuvre. Cependant, cette formation de faisceau a un faible gain d'antenne et souffre d'une sérieuse perte de performance, puisque seules les phases des signaux de transmission peuvent être contrôlées, mais pas leurs amplitudes. Il n'est donc pas utilisé dans la pratique dans les systèmes de communication MIMO massifs et à ondes millimétriques [16].

La figure I.6 illustre l'architecture de la formation de faisceau analogique. La formation de faisceau analogique est mise en œuvre par un réseau phase dont la seule chaîne RF est pilotée par un convertisseur numérique-analogique (CNA) dans l'émetteur ou un convertisseur analogique-numérique (CAN) dans le récepteur. La chaîne RF d'un émetteur se compose d'un convertisseur élévateur de fréquence, d'un amplificateur de puissance, la chaîne RF d'un récepteur se compose d'un amplificateur à faible bruit, d'un convertisseur abaisseur de fréquence [17].

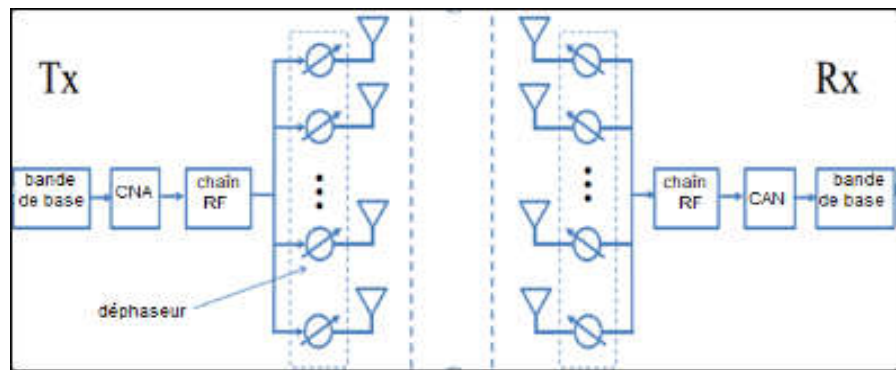


Figure I.6 formation de faisceaux analogique [17].

I.4.1.1 Formation de faisceaux analogique en émission

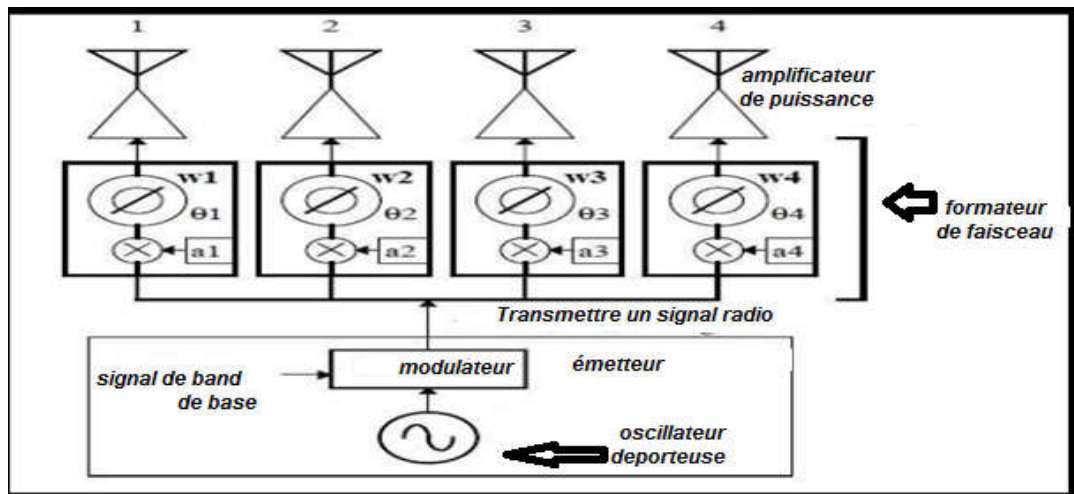


Figure I.7 Formation de faisceaux analogique en émission[18].

La figure I.7 illustre un émetteur de formation de faisceau analogique. Comme indiqué, le signal en bande de base à transmettre est modulé en premier.

Ce signal radio est divisé en utilisant un diviseur de puissance et passe à travers le formateur de faisceau qui a la possibilité de changer l'amplitude (a_k) et la phase (θ_k) des signaux dans chacun des chemins menant vers une pile d'antennes. Le diviseur de puissance dépend du nombre d'antennes utilisées dans le réseau d'antennes.

I.4.1.2 Formation de faisceaux analogique en réception

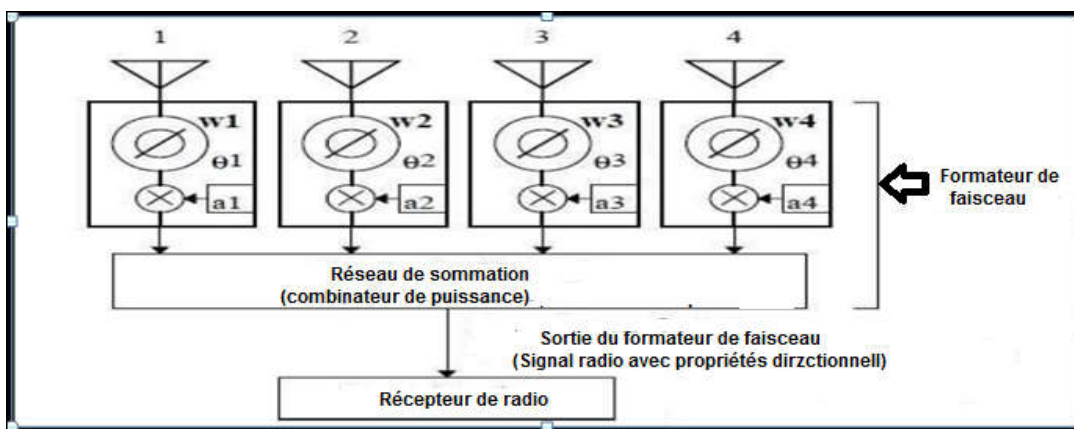


Figure I.8 Formation de faisceaux analogique en réception [18].

La figure I.8 illustre un récepteur de formation de faisceau analogique. Comme indiqué dans le schéma synoptique du récepteur, un poids complexe est appliqué au signal provenant de chaque antenne du réseau. Le poids complexe comprend à la fois l'amplitude et la phase.

Ensuite, les signaux sont combinés en une sortie. Ceci fournit le motif directionnel souhaité à partir d'un réseau d'antennes.

$$W_k = a_k e^{j \sin(\theta k)} \quad (\text{I.7})$$

$$W_k = a_k \cos(\theta k) + j \sin(\theta k) \quad (\text{I.8})$$

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

a_k : L'amplitude du poids.

θk : Le déphasage du poids

I.4.2 Technique de formation de faisceaux numérique

Alors que la formation de faisceau analogique est généralement limitée à une seule chaîne RF, même en cas d'utilisation d'un grand nombre de réseaux d'antennes, la formation de faisceau numérique prend théoriquement en charge autant de chaînes RF que d'éléments d'antenne. Si un précodage adéquat est effectué dans la bande de base numérique, ceci permet une plus grande flexibilité en ce qui concerne l'émission et la réception le figure I.9 [19].

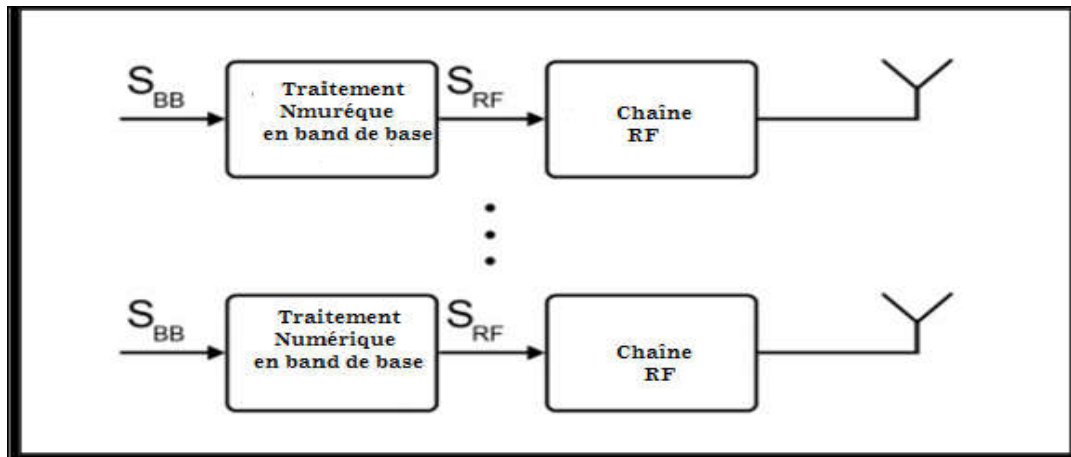


Figure I.9 Formation de faisceaux numérique[19].

Le contrôle numérique de la chaîne RF permet d'optimiser les phases en fonction de la fréquence sur une large bande. Néanmoins, la formation de faisceau numérique n'est pas toujours idéale pour les mises en œuvre pratiques concernant les applications 5G. La complexité et les exigences très élevées en matière de matériel peuvent augmenter considérablement le coût et la consommation d'énergie et compliquer l'intégration dans les appareils mobiles. La formation de faisceau numérique est mieux adaptée à une utilisation dans les stations de base, car les performances l'emportent sur la mobilité dans ce cas. La formation de faisceaux numériques peut permettre la transmission de plusieurs flux et desservir plusieurs utilisateurs simultanément, ce qui est un facteur clé de la réussite. Utilisateurs simultanément, ce qui est un élément clé de cette technologie [19].

La formation de faisceaux numériques, illustré sur la Figure 10, ne dirige pas un faisceau mais le crée. En effet, le fait de disposer d'autant de chaînes RF qu'il y a d'antennes permet au système de contrôler avec précision l'amplitude et la phase que le signal entrant aura à chaque antenne, ce qui permet de façonner des diagrammes de rayonnement complexes [20].

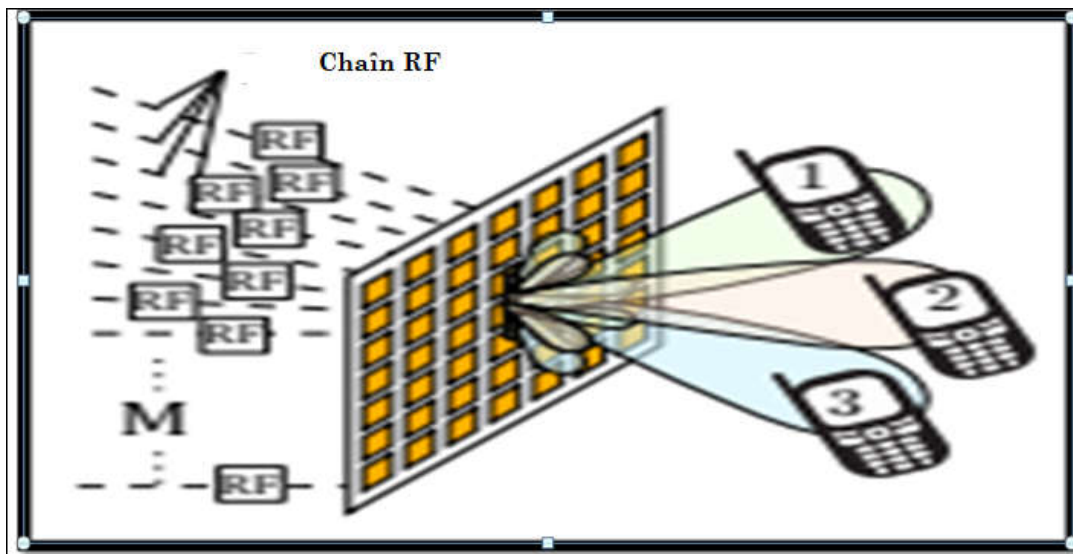


Figure I.10 Formation de faisceaux numériques[20].

I.5 Avantages et inconvénients de la formation de faisceaux analogique et numérique

La formation de faisceau numérique présente de nombreux avantages, En particulier, sa flexibilité totale. Le principal inconvénient de la formation de faisceau numérique est que sa

consommation d'énergie et son coût (c'est-à-dire que chaque élément d'antenne a besoin d'un CNA et d'une chaîne RF) sont très élevés lorsque le nombre d'éléments d'antenne est important.

L'un des principaux avantages de la formation de faisceau analogique est qu'elle ne nécessite qu'un seul CNA et une seule chaîne RF, ce qui réduit considérablement le coût du frontal. Inconvénient la formation de faisceau analogique cette conception manque de flexibilité.

I.6 Classification des techniques de formation de faisceaux

Les techniques de formation de faisceaux peuvent être généralement classées en deux catégories:

I.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 diriger le faisceau vers la direction souhaitée. L'emplacement des éléments d'antenne dans le réseau et la direction souhaitée de l'angle est suffisante pour le calcul. Un exemple populaire peut être énoncé comme suit Matrice de Butler [21].

I.6.2 Formation de faisceau adaptative

La formation de faisceau adaptative utilise différentes informations pour mettre à jour son poids de formation de faisceau afin de s'adapter à la situation et d'agir en conséquence. La classification de signaux multiples (MUSIC), la variance minimale asymptotique clairsemée itérative (SAMV) sont quelques exemples de formation de faisceau adaptative.

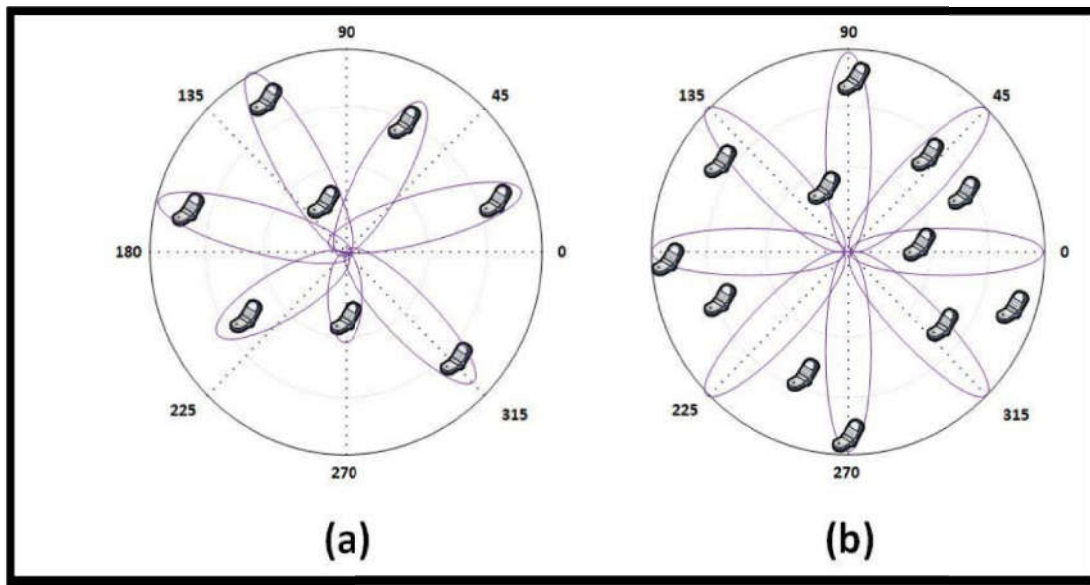


Figure I.11 (a) Formation de faisceaux adaptative (b) Formation de faisceau commutée [21].

La figure I.11 illustre une différence entre la formation de faisceau commutée et adaptative. Un conformateur de faisceau commuté est généralement composé de déphaseurs, d'un coupleur hybride et de croisements. Un algorithme populaire de formation de faisceau commuté est la matrice de Butler. L'objectif de l'algorithme de la matrice de Butler est de choisir un faisceau approprié pour obtenir le signal souhaité.

Dans une matrice de Butler, la majorité des faisceaux peuvent ne pas pointer dans la direction souhaitée, ce qui entraîne un gaspillage d'énergie. Une matrice de Butler classique peut être port d'entrée-sortie $N \times N$ où N est une puissance de 2. Ainsi, une matrice Butler peut être d'ordre 2×2 , 4×4 ou 8×8 .

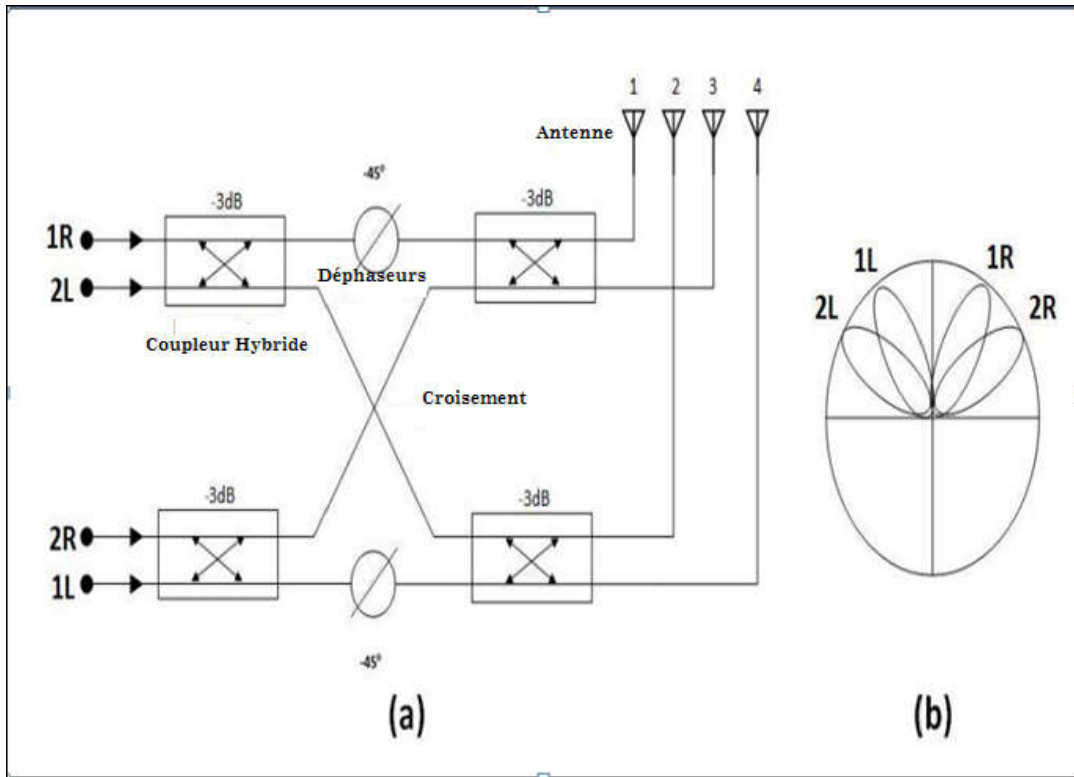


Figure I.12 (a)matrice de Butler 4x4 (b)modèle de faisceau produit par la matrice de Butler 4x4 [21].

La Figure I.12 (a) montre une matrice Butler d'ordre 4×4 et la Figure I.12(b) montre les 4 faisceaux symétriques produits. L'excitation d'un port peut donner lieu à 4 faisceaux symétriques à direction fixe en utilisant des déphaseurs et des coupleurs.

Le degré de liberté est très limité dans une matrice Butler classique.

Les algorithmes de formation de faisceau adaptatif peuvent être classés en deux catégories : **les algorithmes aveugles et les algorithmes non aveugles.**

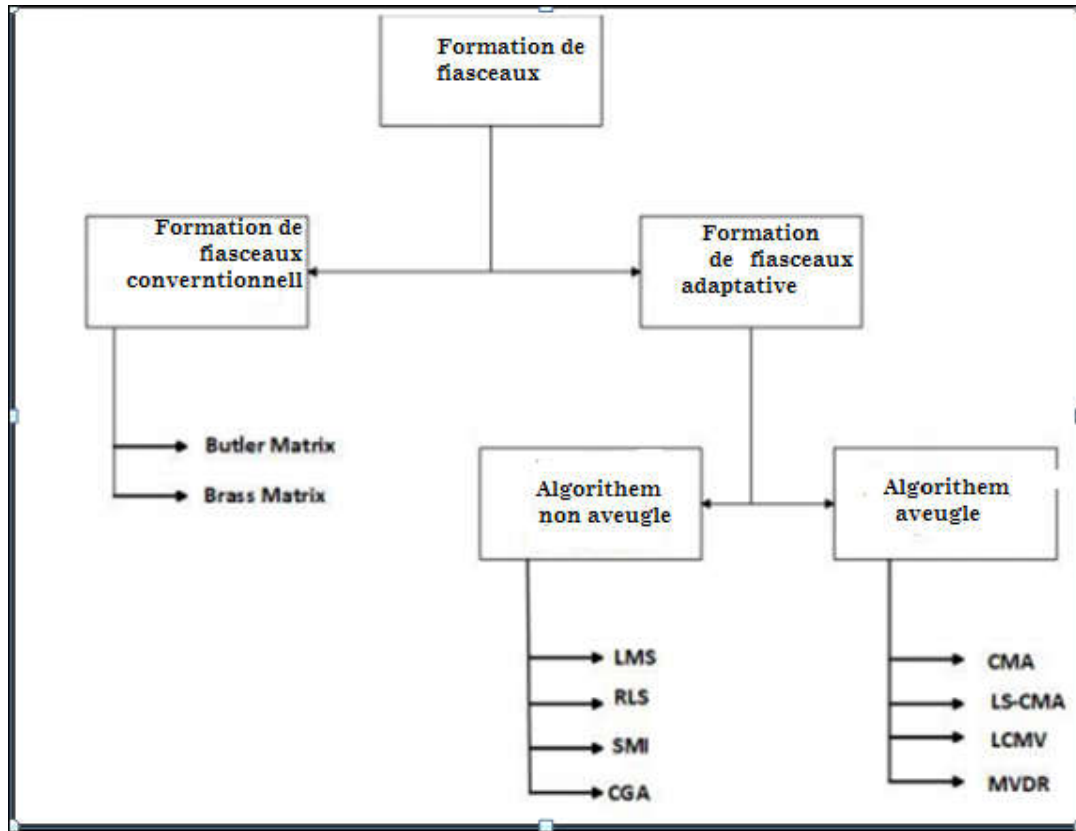


Figure I.13 Algorithme de formation de faisceaux Classification [21].

La Figure I.13 présente une classification détaillée des algorithmes de formation de faisceau de formation de faisceaux. Les algorithmes non aveugles nécessitent de connaître les statistiques du signal transmis ou une référence quelconque afin de calculer le vecteur de pondération. Cette référence peut être classée en deux catégorie.

- ✓ Référence spatiale telle que (AOA) ou (DAO).
- ✓ Référence temporelle telle que le signal d'entraînement.

Un signal d'entraînement est utilisé le long de la liaison de communication pour détecter l'utilisateur. L'objectif est de maximiser le signal souhaité et de minimiser les interférences indésirables entre l'émetteur et le récepteur. Si $\mathbf{x}(t)$ est le signal désiré et $\mathbf{W}^H$ est la transposition conjuguée complexe du vecteur de pondération, alors le signal de sortie est donné par :

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t)\mathbf{W}^H \quad (\text{I.9})$$

Dans l'algorithme non aveugle, un signal de référence est utilisé pour mettre à jour le vecteur de pondération après chaque itération afin de minimiser l'erreur et de se rapprocher le plus possible du signal désiré. Si $\mathbf{d}(\mathbf{t})$ est le signal de référence, alors le signal d'erreur est décrit comme suit

$$\mathbf{e}(\mathbf{t}) = \mathbf{d}(\mathbf{t}) - \mathbf{x}(\mathbf{t})\mathbf{W}^H \quad (\text{I.10})$$

L'objectif principal des algorithmes aveugles est de rétablir la caractéristique physique du signal descendant. L'algorithme aveugle utilise certaines propriétés connues d'un signal telles que la modularité constante.

I.7 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné diverses techniques de formation de faisceaux nécessaires pour augmenter l'efficacité spectrale et réduire les interférences ainsi fournir une couverture élevée et une meilleure connectivité. Nous avons conclu que ces techniques présentent des avantages et des inconvénients. L'un des avantages de la formation de faisceaux analogiques est qu'elle est moins coûteuse, mais manque de flexibilité. Quant à la formation de faisceaux numériques, elle offre une flexibilité totale mais consomme de l'énergie (c'est-à-dire un coût élevé).

Chapitre II

*Techniques de formation
de faisceaux
hybride*

Chapitre II:

Techniques de formation de faisceaux hybride

II.1 Introduction

MIMO (Multiple Input and Output) est une technologie bien connue qui permet d'améliorer la capacité de liaison radio en utilisant plusieurs antennes d'émission et de réception. Dans les futurs systèmes de communication, la station de base (BS) sera équipée de centaines voire de milliers d'antennes, une idée connue sous le nom de MIMO massif.

La technologie MIMO massive peut augmenter considérablement la capacité du système en raison de sa capacité à obtenir un gain de réseau plus important et un multiplexage spatial plus agressif que MIMO. Cependant, dans les systèmes MIMO traditionnels, la formation de faisceau entièrement numérique nécessite que chaque antenne soit alimentée par sa propre chaîne radiofréquence (RF), ce qui ne convient pas aux grands systèmes MIMO [22].

Dans ce chapitre, nous étudierons la technique de formation de faisceau hybride (HBF) par laquelle nous pouvons surmonter ce problème. C'est une technique qui combine les deux techniques abordées dans le premier chapitre (formation de faisceaux analogique et numérique) et sert à atteindre d'atteindre un équilibre en termes de coût et de flexibilité

II.2 Définition de formation de faisceaux hybride

La formation de faisceaux hybride a été adoptée depuis 1970 [23]. La formation de faisceaux hybride (HBF). Sa architecture à deux étages dans laquelle la formation de faisceaux est construite par concaténation d'un précodeur de faible dimension (formation de faisceaux numérique) et d'une formation de faisceaux analogique avec le nombre de chaînes RF inférieur au nombre d'antennes [24]. La formation de faisceau hybride combine la formation de faisceau analogique avec la formation de faisceaux numérique pour former intelligemment les motifs transmis par un grand réseau d'antennes (figure II.1) [25].

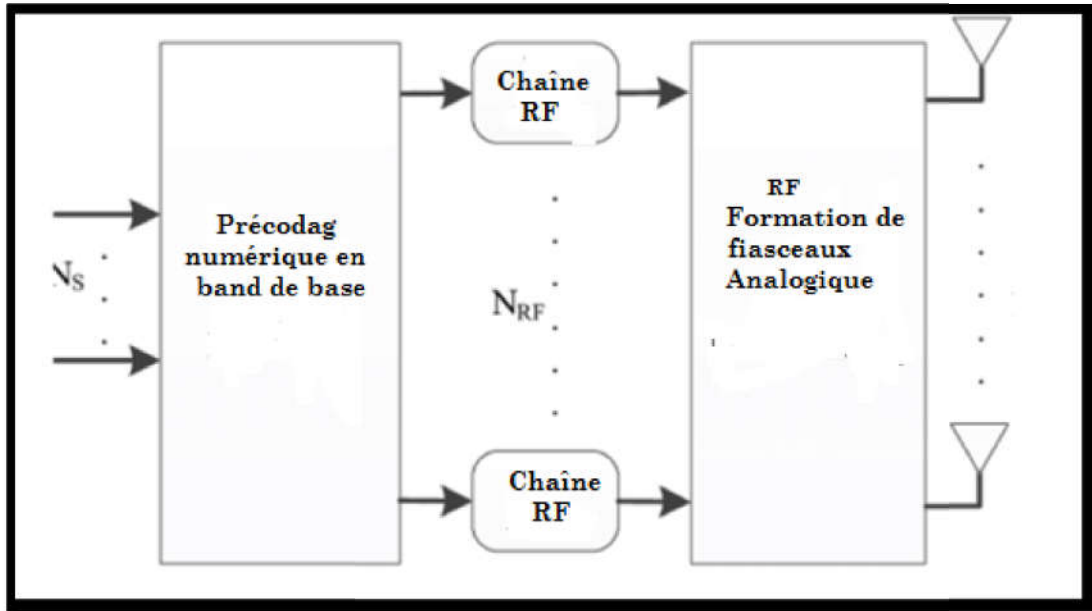


Figure II.1 Formation de faisceaux hybride[25].

II.3 Architecture générale de la formation de faisceaux hybride

La formation de faisceaux hybride (HBF) ne met pas un commutateur TX / RX (d'émission et de réception (TR)) derrière chaque élément. Au lieu de cela, il regroupe les éléments d'un réseau dans des sous-réseaux. Il y a un commutateur TX / RX derrière chaque sous-réseau, mais dans chaque sous-réseau, il n'y a qu'un déphaseur derrière chaque élément. Cela signifie que l'on peut contrôler le signal à la fois en amplitude et en phase au niveau des sous-réseaux, mais seulement en phase au niveau de l'élément. Le déphaseur est en général réalisé avec des composants analogiques et les poids des sous-réseaux peuvent être appliqués numériquement, ce qui entraîne le nom la formation de faisceaux hybride. Le schéma bloc suivant montre une configuration typique d'un système formation de faisceaux hybride (figure II.2) [26].

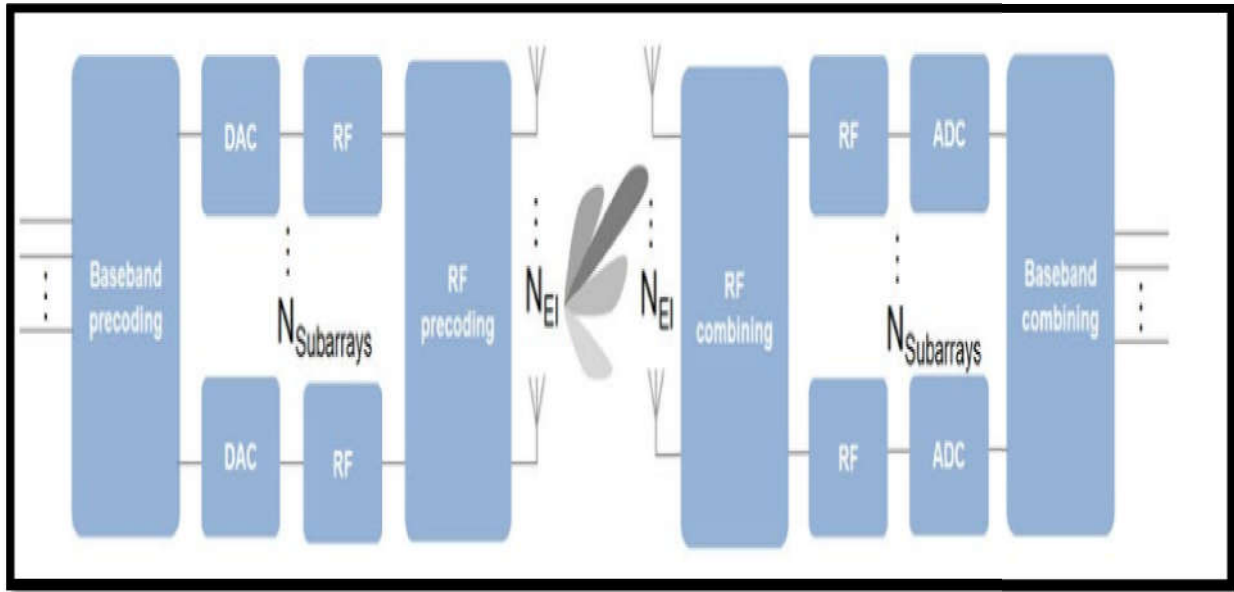


Figure II.2 Architecture d'un système de formation de faisceaux hybrides[26].

II.4Précodage hybride

Les systèmes MIMO massifs font partie des solutions pertinentes pour l'exploitation des transmissions onde millimétrique dans le but de répondre à la forte demande en terme de débit très élevé. Cependant, malgré tous les avantages des systèmes MIMO massifs, ces derniers possèdent des inconvénients. En effet, les systèmes MIMO traditionnels possèdent un nombre réduit d'antennes implémentées à la station de base (entre 1et 70).dans ce cas le nombre de chaine radio fréquence (RF) des convertisseur (CNA) et des convertisseur (CAN) qui sont les plus couteux et les plus consommateurs en énergie du module émetteur-récepteur sans fil peut être au nombre d'antennes.

Cependant dans un système MIMO massif avec plus que 100 antennes implémentées à la station de base, il est pratiquement impossible d'avoir ce nombre de chaînes RF en raison du coût élevé et leur consommation excessive d'énergie. Plus précisément, lorsque la largeur de bande de transmission est très grande, la consommation d'énergie des convertisseurs CAN serait trop élevée. Ainsi, l'utilisation d'un nombre élevé de chaînes RF en parallèle semble plus compliquée. Pour remédier à ce problème, des systèmes dits hybrides ont vu le jour et ils sont identifiés comme des solutions pertinentes afin de contourner ces difficultés. Les techniques hybrides visent à diminuer le nombre de chaînes RF, minimisant ainsi la complexité de conception, tout en conservant le même nombre élevé d'antennes nécessaire à l'obtention d'un gain de formation de faisceaux élevé [27].

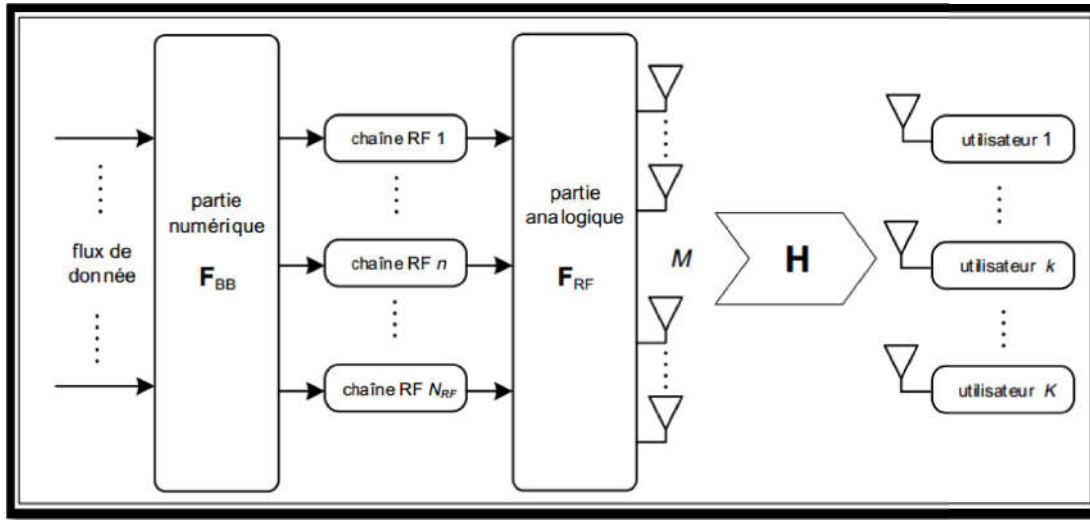


Figure II.3 Précodage hybride[27].

La figure II.3 montre que le processus de précodage est composé en deux parties une partie numérique et une partie analogique.

II.5 La méthodologie proposée de (HBF)

Dans les systèmes hybrides de formation de faisceaux MU-MIMO, les opérations de formation de faisceaux, de précodage et de sommation correspondantes sont effectuées en partie dans le domaine de la bande de base numérique et en partie dans le domaine RF analogique, comme le montrent les figures II.4 et II.5[28].

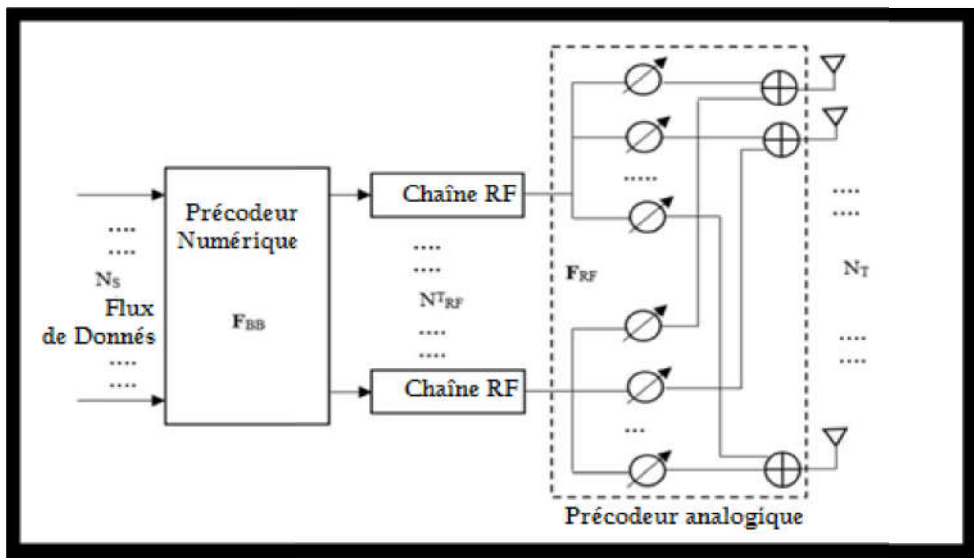


Figure II.4 Schéma de principe des étapes de précodage au niveau de l'émetteur en ondes millimétriques. Système de formation de faisceau hybride MU-MIMO[28].

Pondérations en bande de base et pondérations analogiques dans le domaine RF . Les poids numériques du domaine de la bande de base convertissent les flux de données entrants en signaux d'entrée pour chaque chaîne RF. Ensuite, les poids analogiques dans le domaine RF convertissent le signal en signaux d'entrée. Dans le domaine des radiofréquences, nous convertissons le signal de sortie de chaque canal RF en un signal rayonné par chaque élément d'antenne. Les flux de données sont modulés à l'aide de poids pré-codés et transmis sur un canal, comme illustré à la Figure II.4.

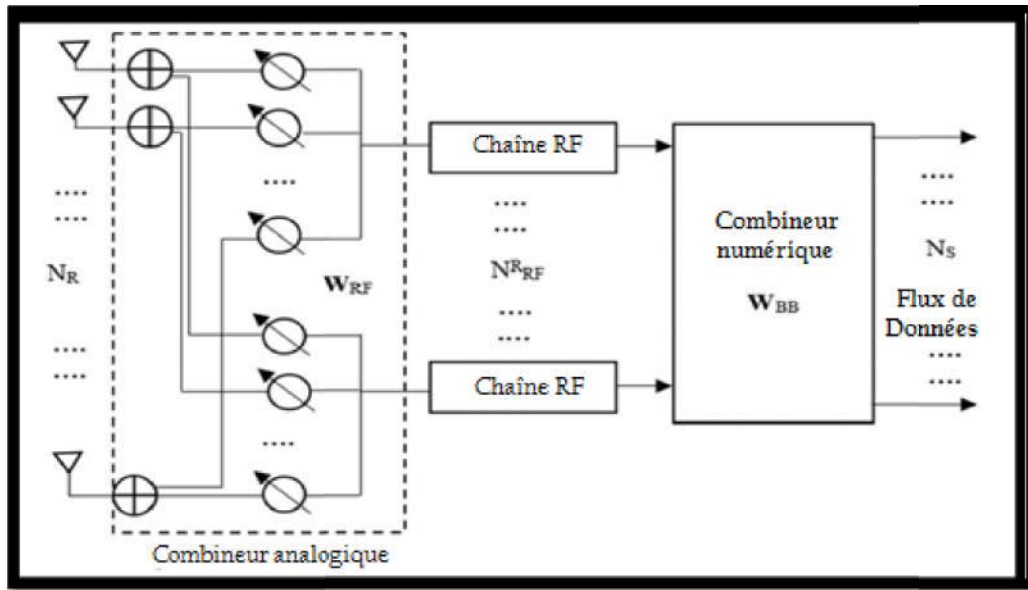


Figure II. 5 Schéma de principe des étapes de précodage au niveau du récepteur en ondes millimétriques.
Système de formation de faisceau hybride MU-MIMO[28].

À la réception, les flux de données sont récupérés à l'aide de poids composites W comme illustré à la Figure II.5.

II.6 structure de formation de faisceau hybride

les architectures hybrides de formation de faisceaux peuvent être classées en structures entièrement connectées et partiellement connectées[29].

Il existe deux architectures RF principales dans la procédure de formation de faisceau hybride, La première est une structure entièrement connectée dans laquelle chaque chaîne RF est connectée à tous les éléments d'antenne L'autre est une structure partiellement connectée dans laquelle chaque chaîne RF est connectée uniquement à un sous-réseau d'antennes .[30]

Deux architectures de formateur de faisceau analogique largement utilisées pour la formation de faisceau hybride sont présentées à la figure II.6 [31].

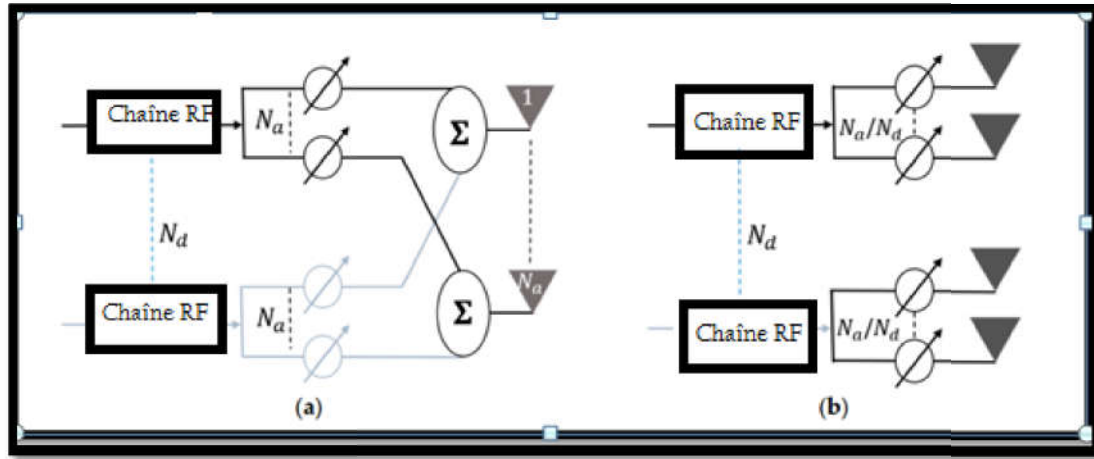


Figure II.6 Architecture des formateurs de faisceaux analogiques: (a) structure entièrement connectée, (b) structure partiellement connectée[31].

II.6.1 structure entièrement connectée

La structure de formation de faisceau hybride entièrement connectée de la figure II.6(a) fournit un gain de formation de faisceau complet par émetteur-récepteur, mais avec une complexité élevée, en connectant chaque chaîne RF à toutes les antennes en reliant chaque chaîne RF à toutes les antennes par un réseau de déphaseurs ($N_d \times N_a$).

II.6.2 structure partiellement connectée

La figure II.6(b), montre une structure partiellement connectée, où chaque chaîne RF est connectée à un nombre (N_a / N_d) de sous-réseaux. Une telle structure présente une complexité matérielle moindre au prix d'un gain de formation de faisceau réduit.

II.7 Avantages et inconvénients des deux structures hybrides de formation de faisceaux

Le principal avantage d'une architecture entièrement connectée est qu'elle fournit un gain de formation de faisceau complet pour chaque émetteur et récepteur, mais avec un degré élevé de complexité. En revanche, une architecture hybride partiellement connectée présente l'avantage d'une complexité matérielle inférieure au prix d'un gain de formation de faisceau inférieur.

➤ Les architectures de formation de faisceau hybride combinent les avantages de la formation de faisceau analogique et numérique. C'est pourquoi, une architecture de formation de faisceau hybride avec des déphaseurs analogiques est apparue comme une opportunité intéressante pour les systèmes MIMO massifs en ondes millimétriques. Les éléments d'antenne sont regroupés en sous-réseaux analogiques dans l'architecture de réseau hybride massif. Seul un déphaseur est attribué à un élément

d'antenne unique, tandis que les autres composants sont partagés par tous les éléments d'antenne de chaque sous- réseau.

Chaque sous-réseau n'est alimenté que par une seule entrée numérique (dans l'émetteur). Par conséquent, il ne produit qu'un seul signal numérique (au niveau du récepteur). Tous les signaux numériques de tous les sous-réseaux sont traités conjointement dans un processeur numérique. Par conséquent, le formateur de faisceau hybride est viable pour le MIMO massif en ondes millimétriques, avec moins de chaîne RF que le nombre d'antennes. Par rapport au formateur de faisceau numérique, la perte de performance est négligeable. La comparaison entre les précodeurs analogiques, numériques et hybrides est présentée dans le tableau II.1[32].

Caractéristiques	Formation de faisceaux analogique	Précodage numérique	Précodage hybride
Nombre de flux	Flux unique	Multi-flux	Multi-flux
Nombre d'utilisateurs	Utilisateur unique	Multi-utilisateur	Multi-utilisateur
Capacité de contrôle des signaux	Contrôle de phase uniquement	Contrôle de phase et d'amplitude	Contrôle de la phase et de l'amplitude
Degré de liberté	Le plus faible	Plus élevé	Intermédiaire
Mise en œuvre	Déphaseurs	CAN/CNA, mélangeur	Déphaseurs, CAN/CNA et mélangeur
Exigences matérielles	Le moins élevé	La plus élevée	Intermédiaire
Consommation d'énergie	Le plus faible	La plus élevée	Intermédiaire
Coût	Le plus faible	La plus élevée	Intermédiaire
Complexité	Le plus faible	La plus élevée	Intermédiaire
Performance	Le plus faible	Optimal	Quasi-optimal
Adéquation avec les ondes millimétriques MIMO massif	Inadapté	Impraticable	est réaliste

Tableau II.1 : Comparaison des techniques de précodage[32].

II.8 Comparaison des architectures de formation de faisceaux hybrides entièrement connectées et partiellement connectées

La perte de performance induite par l'architecture partiellement connectée peut être compensée par l'augmentation du nombre d'antennes. Ceci constitue un compromis réaliste entre la perte de performance et le nombre de déphaseurs par rapport à l'architecture entièrement connectée.

La structure entièrement connectée, plus complexe, ne peut pas approcher les performances du précodeur entièrement numérique, sauf si le nombre de chaînes RF est légèrement supérieur au nombre de flux de données. La structure partiellement connectée a de meilleures performances en termes de SE et offre des gains substantiels. Proposent un précodage hybride successif basé sur l'annulation des interférences avec des performances quasi optimales et une faible complexité. Il est à noter que l'architecture partiellement connectée nécessite moins de déphaseurs que l'architecture entièrement connectée et donc plus économe en énergie [33].

II.9 Avantages fondamentaux des technique HBF

Les avantages fondamentaux offerts par les caractéristiques du traitement du signal par formation de faisceau hybride peuvent être résumés comme suit :

- ✓ Un catalyseur pour les communications MIMO massives en ondes millimétriques:

Le MIMO massif en ondes millimétriques étant un facteur déterminant des réseaux sans fil 5G avec une augmentation de la capacité de 1000×, les techniques HBF est un atout pour les communications MIMO à ondes millimétriques. Sans la HBF, les communications MIMO massives à ondes millimétriques sont soit coûteuses et complexes (formation de faisceaux numériques), soit difficiles à réaliser, soit sujet à des inexactitudes et aux interférences entre utilisateurs (formation de faisceau analogique).

- ✓ Réduction du coût du matériel d'investissement:

La formation de faisceau hybride réduit le coût d'investissement en diminuant le nombre requis des chaînes RF aux côtés TX et RX par rapport au système de formation de faisceau numérique avec le même nombre d'antennes.

- ✓ Efficacité énergétique:

Par rapport aux systèmes MIMO sous 6 GHz, dans les systèmes MIMO massifs à ondes millimétriques, les grands réseaux d'antennes sont réalisés par formation de faisceau hybride, ce qui réduit potentiellement la puissance d'émission en liaison descendante et en liaison montante grâce à une combinaison cohérente et à une ouverture d'antenne accrue. Elle peut augmenter l'efficacité énergétique sur la liaison montante en réduisant la puissance d'émission requise de chaque équipement utilisateur (UE), qui est inversement proportionnelle au nombre d'antennes de la station de base, sans réduction des performances[33].

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les techniques de formation de faisceau hybride (HBF). L' HBF est une aubaine dans les communications MIMO à ondes millimétriques, car sans formation de faisceau hybride, les communications à ondes millimétriques sont très coûteuses complexes ou sujettes aux inexactitudes et aux interférences.

Nous avons constaté qu'il existe deux architectures essentielles de formation de faisceaux hybrides qui contiennent moins de chaînes RF par rapport à la formation de faisceaux numérique et c'est l'approche de formation de faisceaux hybride qui contient moins de chaînes RF pour réduire les coûts et la consommation d'énergie.

Chapitre III

Résultats de simulations

Chapitre III:

Résultats de simulations

III.1 Introduction

L'objectif principal des communications sans fil 5G est d'atteindre des fréquences plus élevées dans le spectre des ondes millimétriques et l'utilisation de nombreuses antennes. que la perte en liaison dans la bande d'onde millimétrique est significative, un réseau plus large est nécessaire pour générer plus de gain de formation de faisceaux pour surmonter la perte en liaison.

Ayant un commutateur (TR) derrière chaque élément d'antenne pour contrôler chaque élément du réseau indépendamment pour obtenir une flexibilité maximale dans la formation de faisceaux mais à un coût élevé, la formation de faisceaux hybride proposée pour atteindre les performances souhaitées.

Dans ce chapitre, nous allons simuler un système de formation de faisceaux hybride pour le cas d'un réseaux d'antenne en utilisant un système MIMO et explorant les concepts de base avec un exemple d'une méthode recommandé pour le calcul de poids suivant un algorithme de poursuite d'appariement orthogonal proposée par les auteurs dans [34]. Dont, on va analyser avec plus de détails cet exemple en variant notamment le nombre des données transmis.

III.2 Architecteur de formation de faisceaux hybride

Par rapport aux systèmes sans fil actuels, la longueur d'onde dans la bande onde millimétrique est beaucoup plus petite. Bien que cela permette à un réseau de contenir plus d'éléments avec la même dimension physique, il devient beaucoup plus coûteux de fournir un module TX/RX pour chaque élément d'antenne. Par conséquent, en guise de compromis, un commutateur TR est souvent utilisé pour alimenter plusieurs éléments d'antenne. Une telle configuration est illustrée dans la figure III.1 suivante:

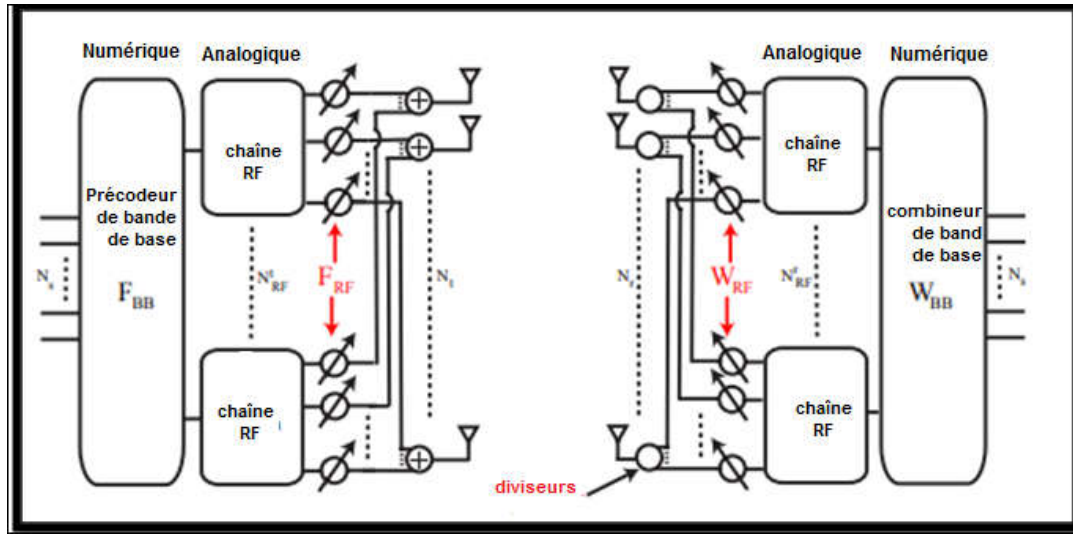


Figure III.1 Architecture HBR simplifiée selon les auteurs dans [34].

La figure ci-dessus montre que du côté émission, le nombre de commutateurs (TX/RX), N_{TRF} est inférieur au nombre d'éléments d'antenne N_t . Pour offrir plus de flexibilité, chaque élément d'antenne peut être connecté à un ou plusieurs modules T/R. De plus, des déphaseurs analogiques peuvent être insérés entre chaque module T/R et antenne afin de fournir une certaine capacité d'orientation limitée.

La configuration du côté du récepteur est similaire, comme le montre la figure. Le nombre maximum de flux de données N_s , qui peut être pris en charge par ce système est le plus petit de N_{tRF} et N_{rRF} .

III.3 Installation du système (HBF)

Cette partie simule un système de formation de faisceau hybride MIMO 64 x 16, avec un réseau carré(URA)de 64 éléments avec deux chaînes RF du côté de l'émetteur et un réseau carré de 16 éléments avec deux chaînes RF du côté du récepteur. Nous avons utilisé une fréquence de 30 GHz.

Suivant la figure III.1 les paramètres de simulation adoptée sont :

$$N_t = 64;$$

$$N_{tRF} = 2;$$

$$N_r = 16;$$

$$N_{rRF} = 2;$$

Avec:

N_t	Le nombre d'antennes dans l'émetteur
N_r	Le nombre d'antennes en réception
N_{tRF}	Le nombre de Nombre de chaînes RF dans l'émetteur
N_{rRF}	Le nombre de Nombre de chaînes RF en réception

➤ Différents types de réseaux sont utilisés pour exploiter la meilleure géométrie d'antenne. Les réseaux les plus utilisés sont réseau linéaire uniforme (ULA), réseau rectangulaire uniforme (URA) et réseau circulaire uniforme (UCA). Le nombre d'éléments d'antenne utilisés dans le réseau définit le gain du réseau. De la référence précédente[21]. Dans cette simulation, nous utilisons la réseau rectangulaire uniforme (URA). la figure III.2 suivant représenté Géométrie différente du réseau

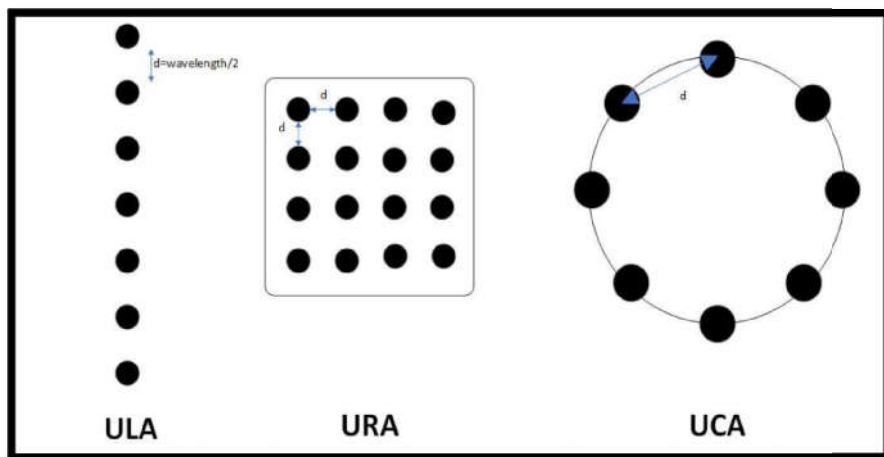


Figure III.2 Géométrie différente du réseau

Chaque antenne est supposée être connectée à toutes les chaînes RF dans cette simulation. En conséquence, chaque antenne est liée à deux déphaseurs. L'ouverture du réseau peut être divisée en deux sous-réseaux entièrement connectés pour modéliser un tel réseau.

Ensuite, nous supposons un environnement de diffusion avec 4 groupes de diffusion répartis aléatoirement dans l'espace. Au sein de chaque groupe, il y a 6 diffuseurs à proximité avec un angle de diffusion de 8° , pour un total de 24 diffuseurs. Le gain de chemin pour chaque émetteur est obtenu à partir d'une distribution gaussienne symétrique circulaire complexe.

III.4 Calcul des poids hybrides

Le signal est modulé par un ensemble de poids de précodage, transporté sur le canal et récupéré par un ensemble de poids de combinaison dans un système de multiplexage spatial avec formation de faisceau entièrement numérique. En mathématiques[34]:

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{X} * \mathbf{F} * \mathbf{H} + \mathbf{N}) * \mathbf{W} \text{ Où :}$$

$\mathbf{X}$ est une matrice à N_s colonnes dont les colonnes sont des flux de donnée.

$\mathbf{F}$ est une matrice $N_r \times N_t$ représentant les poids de précodage.

$\mathbf{W}$ est une matrice $N_r \times N_s$ représentant les poids de combinaison.

$\mathbf{N}$ est une matrice à N_r colonnes dont les colonnes sont le bruit du récepteur à chaque élément.

$\mathbf{Y}$ est une matrice à N_s colonnes dont les colonnes sont des flux de données récupérés.

Où N_s est nombre flux de données.

L'objectif du système étant d'améliorer l'efficacité spectrale, la détermination des poids de précodage et de combinaison peut être considérée comme un problème d'optimisation, les meilleurs poids de précodage et de combinaison faisant en sorte que le produit de $\mathbf{F} * \mathbf{H} * \mathbf{W}'$ soit une matrice diagonale, ce qui permet de récupérer chaque flux de données indépendamment.

Dans un système de formation de faisceau hybride, le flux de signaux est similaire. Les poids de précodage et les poids de combinaison sont des combinaisons de poids numériques en bande de base et de poids analogiques en bande RF. Les pondérations numériques en bande de base convertissent les flux de données entrants en signaux d'entrée à chaque chaîne RF et les pondérations analogiques convertissent ensuite le signal à chaque chaîne RF en signal rayonné ou collecté à chaque élément d'antenne. Notez que les pondérations analogiques ne peuvent contenir que des déphasages.

En mathématiques: on peut l'écrire comme suit

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{bb} * \mathbf{F}_{rf} \text{ et } \mathbf{W} = \mathbf{W}_{bb} * \mathbf{W}_{rf} \text{ Où :}$$

$\mathbf{F}_{bb}$ une matrice $N_s \times N_{tRF}$

$\mathbf{F}_{rf}$ une matrice $N_{tRF} \times N_t$

W_{bb} une matrice $N_{\text{rRF}} \times N_s$

W_{rf} une matrice $N_r \times N_{\text{rRF}}$.

Comme F_{rf} et W_{rf} ne peuvent être utilisés que pour modifier la phase du signal, il y a des contraintes supplémentaires dans le processus d'optimisation pour identifier les poids de précodage et de combinaison optimaux. Idéalement, la combinaison résultante de $F_{bb}^* F_{rf}$ et $W_{bb}^* W_{rf}$ sont des approximations proches de F et W qui sont obtenues sans ces contraintes.

Malheureusement, l'optimisation simultanée des quatre variables de la matrice est assez difficile. Par conséquent, de nombreux algorithmes sont proposés pour obtenir des poids sous-optimaux avec une charge de calcul raisonnable. Cet exemple utilise l'approche proposée dans [34] qui découple les optimisations pour les poids de précodage et de combinaison. Il utilise d'abord l'algorithme de recherche de correspondance orthogonale pour dériver les poids de précodage. Une fois les poids de précodage calculés, le résultat est ensuite utilisé pour obtenir les poids de combinaison correspondants.

En supposant que le canal est connu, les poids de précodage optimaux sans contrainte peuvent être obtenus en diagonalisant la matrice du canal et en extrayant les premiers modes dominants N_{tRF} . Le diagramme du faisceau d'émission peut être tracé comme suit.

```
F = diagbweights(H);
F = F(1:NtRF,:);
pattern(txarray,fc,-90:90,-90:90,'Type','efield',...
'ElementWeights',F,'PropagationSpeed',c);
```

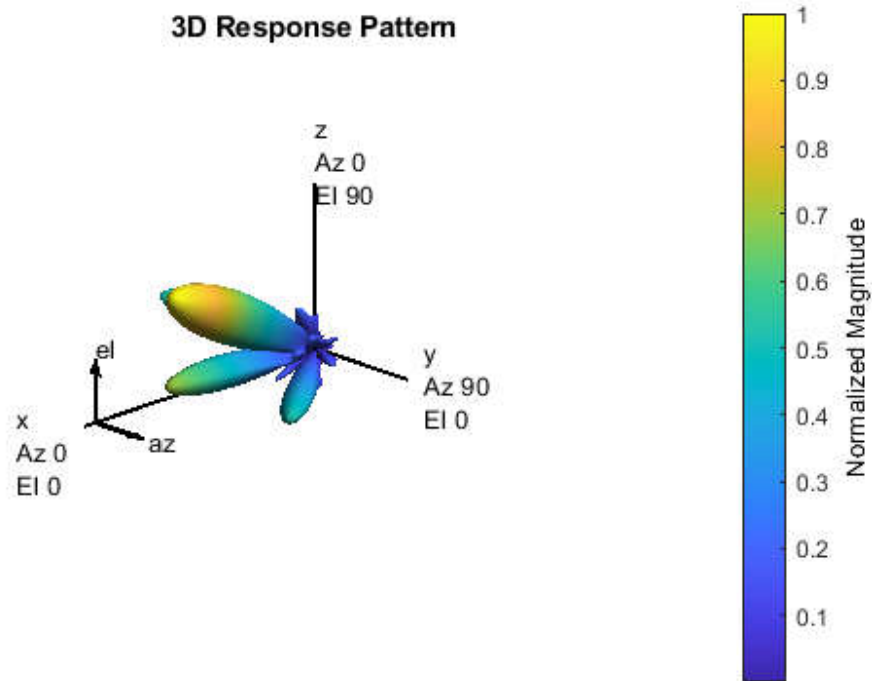


Figure III.3 Le modèle de faisceau obtenu en utilisant les poids optimaux.

➤ Les pondérations hybrides, quant à elles, peuvent être calculées comme suit

```
At = steervec(txpos,txang);
```

```
Ar = steervec(rxpos,rxang);
```

```
Ns = NtRF;
```

```
[Fbb,Fr] = omphybweights(H,Ns,NtRF,At);
```

➤ Le diagramme de rayonnement des poids hybrides est présenté ci-dessous.

```
pattern(txarray,fc,-90:90,-90:90,'Type','efield',...
```

```
'ElementWeights',Fr*Fbb,'PropagationSpeed',c);
```

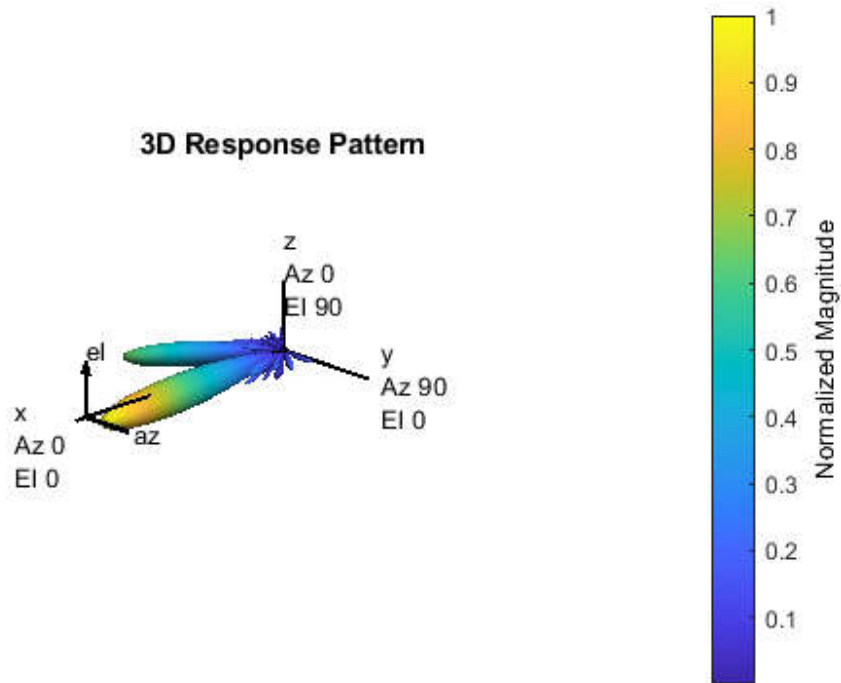


Figure III.4 Le modèle de faisceau obtenu en utilisant les poids hybride.

➤ Comparaison des deux diagrammes

Le diagramme de faisceau obtenu à l'aide des poids hybrides est comparable au diagramme de faisceau obtenu à l'aide des poids idéaux, en particulier pour les faisceaux dominants. Cela signifie qu'en utilisant des poids hybrides, les flux de données peuvent être transférés avec succès à travers ces faisceaux principal.

III.5 Comparaison de l'efficacité spectrale

L'efficacité spectrale est l'une des mesures de la performance d'un système 5G. La section suivante compare l'efficacité spectrale obtenue en utilisant les poids optimaux avec celle des poids de formation de faisceau hybride proposés. On suppose que le réseau d'antennes d'émission se trouve dans une station de base, avec une largeur de faisceau focalisé de 90 degrés en azimut et de 50 degrés en élévation. Le signal peut arriver au réseau de réception depuis n'importe quelle direction. La courbe d'efficacité spectrale résultante est obtenue à partir de 80 essais de Monte-Carlo pour chaque SNR.

Snr	Rapport signal sur bruit
Nsnr	Nombre de Rapport signal sur bruit
Ns	flux de données.
NNs	est nombre flux de données.

```

snr_param = -40:8:40;
Nsnr = numel(snr_param);
Ns_param = [1 2];
NNs = numel(Ns_param);

NtRF = 2;
NrRF = 2;

Ropt = zeros(Nsnr, NNs);
Rhyb = zeros(Nsnr, NNs);
Niter = 80;

for m = 1:Nsnr
    snr = db2pow(snr_param(m));
    for n = 1:Niter
        % Channel realization
        txang = [rand(1, Nscatter)*90-45; rand(1, Nscatter)*50-25];
        rxang = [rand(1, Nscatter)*180-90; rand(1, Nscatter)*90-45];
        At = steervec(txpos, txang);
        Ar = steervec(rxpos, rxang);
        g = (randn(1, Nscatter) + 1i*randn(1, Nscatter))/sqrt(Nscatter);
        H = scatteringchanmtx(txpos, rxpos, txang, rxang, g);

    for k = 1:NNs
        Ns = Ns_param(k);
        % Compute optimal weights and its spectral efficiency
        [Fopt, Wopt] = helperOptimalHybridWeights(H, Ns, 1/snr);
        Ropt(m, k) = Ropt(m, k) + helperComputeSpectralEfficiency(H, Fopt, Wopt, Ns, snr);

        % Compute hybrid weights and its spectral efficiency
        [Fbb, Frf, Wbb, Wrf] = omphybweights(H, Ns, NtRF, At, NrRF, Ar, 1/snr);
        Rhyb(m, k) = Rhyb(m, k) + helperComputeSpectralEfficiency(H, Fbb*Frf, Wrf*Wbb, Ns, snr);
    end
end
end
Ropt = Ropt/Niter;
Rhyb = Rhyb/Niter;

plot(snr_param, Ropt(:, 1), '--sr', ...
     snr_param, Ropt(:, 2), '--b', ...
     snr_param, Rhyb(:, 1), '-sr', ...
     snr_param, Rhyb(:, 2), '-b');
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('Spectral Efficiency (bits/s/Hz)');
legend('Ns=1 optimal', 'Ns=2 optimal', 'Ns=1 hybrid', 'Ns=2 hybrid', ...
       'Location', 'best');
grid on;

```

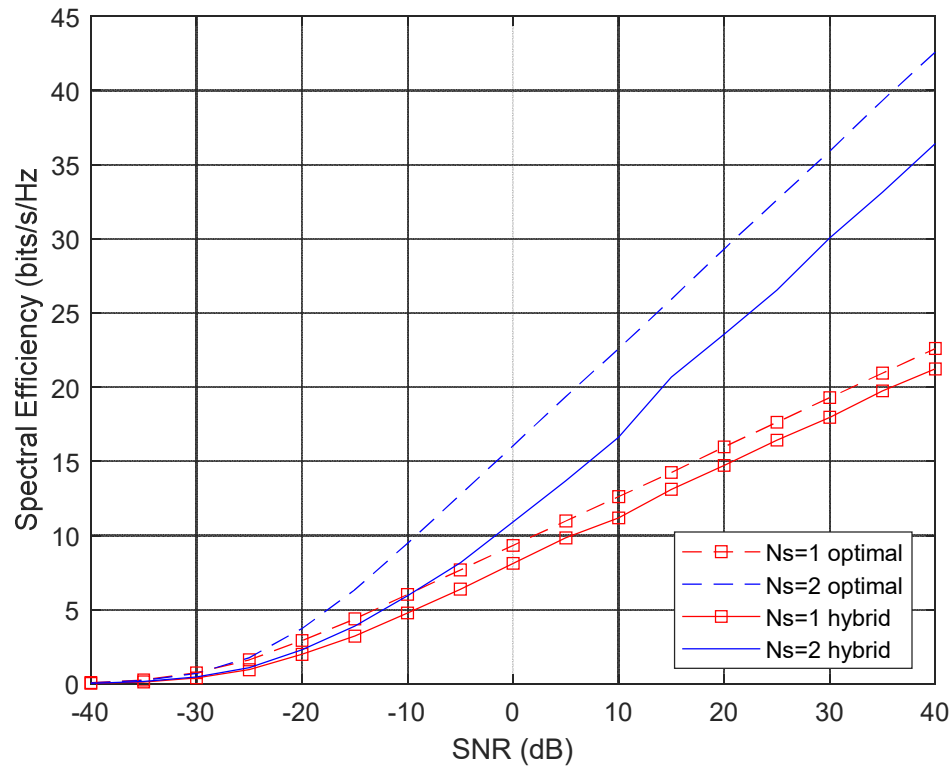


Figure III.5 Compare l'efficacité spectrale obtenue en utilisant les poids optimaux avec celle des poids de formation de faisceau hybride proposés.

Nous concluons de la figure(III.5) que l'efficacité spectrale (ES) s'améliore de manière significative lorsque nous augmentons le nombre de flux de données. Nous disons également que la formation de faisceaux mixte peut offrir des performances proches des poids optimaux qu'il peut offrir avec moins de matériel.

➤ En changeant le champ du signal par rapport au bruit (on prend un champ plus grand(-40:8:80)), on remarque un grand changement au niveau des courbes dans la figure III.6.

```
snr_param = -40:8:80;
Nsnr = numel(snr_param);
Ns_param = [1 2];
NNs = numel(Ns_param);

NtRF = 2;
NrRF = 2;

Ropt = zeros(Nsnr,NNs);
Rhyb = zeros(Nsnr,NNs);
Niter = 80;

for m = 1:Nsnr
    snr = db2pow(snr_param(m));
    for n = 1:Niter
```

```

% Channel realization
txang = [rand(1,Nscatter)*90-45;rand(1,Nscatter)*50-25];
rxang = [rand(1,Nscatter)*180-90;rand(1,Nscatter)*90-45];
    At = steervec(txpos,txang);
Ar = steervec(rxpos,rxang);
    g = (randn(1,Nscatter)+1i*randn(1,Nscatter))/sqrt(Nscatter);
    H = scatteringchanmtx(txpos,rxpos,txang,rxang,g);

for k = 1:Nns
    Ns = Ns_param(k);
% Compute optimal weights and its spectral efficiency
    [Fopt,Wopt] = helperOptimalHybridWeights(H,Ns,1/snr);
    Ropt(m,k) = Ropt(m,k)+helperComputeSpectralEfficiency(H,Fopt,Wopt,Ns,snr);

% Compute hybrid weights and its spectral efficiency
    [Fbb,Frff,Wbb,Wrf] = omphybweights(H,Ns,NtRF,At,NrRF,Ar,1/snr);
    Rhyb(m,k) = Rhyb(m,k)+helperComputeSpectralEfficiency(H,Fbb*Frff,Wrf*Wbb,Ns,snr);
end
end
end
Ropt = Ropt/Niter;
Rhyb = Rhyb/Niter;

plot(snr_param,Ropt(:,1),'--sr',...
snr_param,Ropt(:,2),'--b',...
snr_param,Rhyb(:,1),'-sr',...
snr_param,Rhyb(:,2),'-b');
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('Spectral Efficiency (bits/s/Hz)');
legend('Ns=1 optimal','Ns=2 optimal','Ns=1 hybrid', 'Ns=2 hybrid',...
'Location','best');
grid on;

```

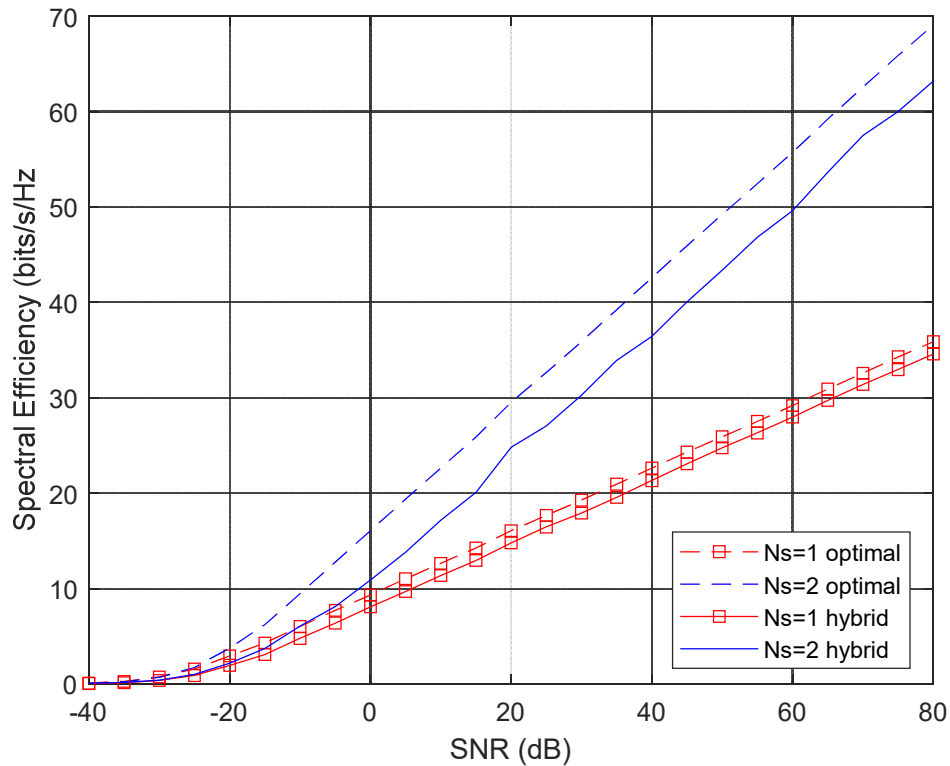


Figure III.6 Compare l'efficacité spectrale obtenue en utilisant les poids optimaux avec celle des poids de formation de faisceau hybride proposé.

A partir de la figure III.6, nous pouvons connaître les zones d'influence du bruit sur la formation du faisceau hybride, c'est-à-dire que chaque fois que le rapport signal sur bruit est faible, il y a des interférences qui affectent le système de formation du faisceau hybride. Comme dans le tableau III.1 suivant :

SNR	[-40 , -20]	[-20 , 0]
Formation de faisceau hybride (Ns=2).	Il y a beaucoup de bruit qui a un grand effet sur le système de formation de faisceau et la présence d'interférences.	Le taux d'interférence diminue lorsque la valeur SNR augmente .

Tableau III.1 : L'effet du bruit sur le système de (HBF).

De la figure III.6, nous pouvons également déduire la relation entre l'efficacité spectrale et le rapport signal sur bruit dans ce tableau III.2 suivant :

SNR	ES (hybrid)	ES(Optimal)	ES(hybrid)	ES(Optimal)
[-40 ,-20]	2.278	2.278	3.748	3.748
[-20,0]	8.113	9.833	10.95	16.05
[0,80]	34.6	35.94	63.65	69.21

Tableau III.2 La relation entre l'efficacité spectrale et le rapport signal sur bruit.

Résultat du tableau:

Après avoir observé les résultats du tableau, nous concluons que plus le rapport signal sur bruit est élevé, meilleure est l'efficacité spectrale, ce qui est le but de l'étude de la formation du faisceau hybride, nous essayons d'obtenir le rapport le plus élevé (SNR) pour améliorer l'efficacité spectrale.

III.6 Conclusion

Dans cette simulation, nous commençons par le concept de base de la formation de faisceaux hybride et montrons comment diviser le pré-code et combiner les poids à l'aide d'un algorithme d'appariement orthogonal. Comparez également l'efficacité spectrale dans le cas des poids optimaux et des poids hybrides.

Lorsque le nombre de flux de données augmente, l'efficacité spectrale est meilleure. De plus, pour le SNR, plus la valeur est grande, meilleure est l'efficacité spectrale.

Conclusion général

Conclusion Générale

Dans ce travail scientifique, nous avons étudié les techniques de formation de faisceau analogique et numérique et les principes de leur fonctionnement, La formation de faisceau analogique est plus facile à mettre en œuvre et à utiliser, cependant, cette technologie manque de flexibilité contrairement à la formation de faisceau numérique, La formation de faisceau numérique offre plus de flexibilité et de contrôle sur plusieurs faisceaux indépendants et permet d'atteindre une grande précision de faisceau, mais nécessite un émetteur et un récepteur derrière chaque antenne. Cela entraîne bien sûr une consommation d'énergie et une augmentation du coût des systèmes MIMO5G massifs.

La formation de faisceau hybride (HBF) a été proposée pour éliminer ces problèmes. La technique de formation de faisceau hybride utilise un mélange de déphaseurs RF dans le domaine analogique et de formation de faisceau numérique dans le domaine de la bande de base. Au lieu d'obtenir des chaînes RF égales au nombre d'éléments comme dans le cas de la formation de faisceau numérique, la formation de faisceau hybride comporte moins de chaînes RF que le nombre de paquets à générer. Notre concept derrière la formation de faisceaux hybride est que le nombre de chaînes d'émetteur et de récepteur est moins restreint par le nombre de flux de données.

À la fin de ce travail, nous avons utilisé un programme de simulation pour démontrer comment simuler un tel système (HBF).

Bibliographie

Bibliographie

[1] Asma, B. O. U. A. K. A., Louiza, T. E. M. M. A. R., & Naceur, A. O. U. N. A. L. L. A. H. Simulation d'un réseau d'antennes pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studio.

[2] <https://www.universfreebox.com/article/50589/5G-les-technologies-mises-en-oeu> (Mai 2021).

[3] DEHEMCHI MARWA, B. A. (2019). Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G.

[4] Sadou, B., Alqudami, D. A., & Zaaimia, M. Z. E. (2020). *Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G de nouvelle génération* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).

[5] Ngom, A. (2019). *Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou "Small Cells" pour le standard 5G* (Doctoral dissertation, Côte d'Azur).

[6] MOKHEFI, A., & METAHRI, I. *Etude et simulation de méthode de Beamforming pour des systèmes de Modulation multi-porteuse pour la 5 G* (Doctoral dissertation).

[7] Rozé, A. (2016). *Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques* (Doctoral dissertation, INSA de Rennes).

[8] Wang, L. (2009). *Array signal processing algorithms for beamforming and direction finding* (Doctoral dissertation, University of York).

[9] Mabrouk, K. (2008). Conception et réalisation d'un système de Télécommunications MIMO avec Formation Numérique de Faisceaux en réception; Calibrage aveugle du Démodulateur triphasé Zéro-IF et comparaison au démodulateur classique à 2 voies I et Q (Doctoral dissertation, Télécom ParisTech).

[10] Forest, J. (2020). Architecture robuste avec ajustement de fréquence centrale et détection de phase et de tension pour des amplificateurs autonomes de puissance à base de coupleur hybride aux fréquences millimétriques (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).

- [11] Chahbi, I. (2011). Exploitation des antennes multiples pour l'optimisation dans les réseaux sans fil (Doctoral dissertation, Institut National des Télécommunications).
- [12] Roumair, I. (2020). Synthèse d'un réseau d'antennes adaptatif pour une topologie circulaire (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [13] Meriem BENAZZOZ, "comparaison des performances des algorithmes de formation adaptatifs aveugles (lms, rls) et non-aveugles (cma, ls-cma, rls-cma) dans les antennes intelligentes", thèse de master, université Saad dahlab de Blida, 2010-2011
- [14] AOUNALLAH, N. (2015). Utilisation des antennes intelligentes dans les systèmes de communications sans fil (Doctoral dissertation).
- [15] BENYAROU, M. (2009). Détection Multi-Utilisateurs par réseau d'antennes appliquée à un signal CDMA à porteuses multiples (Doctoral dissertation).
- [16] Engda, T. K., Wondie, Y., & Steinbrunn, J. (2020). Massive MIMO, mmWave and mmWave-Massive MIMO Communications: Performance Assessment with Beamforming Techniques.
- [17] Cai, M. (2018). Modeling and mitigating beam squint in millimeter wave wireless communication (Doctoral dissertation, university of Notre Dame).
- [18] M. RATSIMBAZAFY Andriamanga, "études de performances des techniques de beamforming dans un système massive mimo", thèse de master, université d'Antananarivo, (2017/2018).
- [19] White, P., & Reil, G. L. (2016). Millimeter-wave beamforming: antenna array design choices & characterization white paper. *Rohde-Schwarz-Ad. Com.*
- [20] Roze, A., Héliard, M., Crussière, M., & Langlais, C. (2015, October). Millimeter-wave digital beamsteering in highly line-of-sight environments for massive MIMO systems. In *Wireless World Research Forum Meeting* (Vol. 35).
- [21] Ahmed, S. (2019). Beamforming management and beam training in 5G system (Master's thesis).

- [22] Du, J., Xu, W., Zhao, C., & Vandendorpe, L. (2018, August). Hybrid beamforming design for multiuser massive MIMO-OFDM systems. In 2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) (pp. 1-6). IEEE.
- [23] Lialios, D. I., Ntetsikas, N., Paschaloudis, K. D., Zekios, C. L., Georgakopoulos, S. V., & Kyriacou, G. A. (2020). Design of True Time Delay Millimeter Wave Beamformers for 5G Multibeam Phased Arrays. *Electronics*, 9(8), 1331.
- [24] Thomas, C. K., & Slock, D. (2018, August). Hybrid beamforming design in multi-cell mm-mimo systems with per-rf or per-antenna power constraints. In 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) (pp. 1-6). IEEE.
- [25] <https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/the-case-for-hybrid-beamforming-in-5g-mmwave-prototypes> (Mai 2021)
- [26] RAMANANTSO Anantenana Cesar, etude d'un système hybrid beamforming MIMO pour les communications modernes sans fil en ondes millimétriques, thèse de master, université d'Antananarivo, (2017).
- [27] Chouk, M. (2019). Annulation des interférences inter-cellulaires pour les systèmes MIMO massif dans les réseaux hétérogènes 5G.
- [28] Dilli, R. (2021). Performance analysis of multi user massive MIMO hybrid beamforming systems at millimeter wave frequency bands. *Wireless Networks*, 27(3), 1925-1939.
- [29] Jung, J. S., Lee, W. S., Lee, Y. R., Kim, J., & Song, H. K. (2021). Improved Hybrid Beamforming for mmWave Multi-User Massive MIMO. *CMC-COMPUTERS MATERIALS & CONTINUA*, 67(3), 3057-3070.
- [30] Majidzadeh, M., Moilanen, A., Tervo, N., Pennanen, H., Tolli, A., & Latva-aho, M. (2017, October). Partially connected hybrid beamforming for large antenna arrays in multi-user MISO systems. In 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) (pp. 1-6). IEEE.
- [31] Hefnawi, M. (2019). Hybrid beamforming for millimeter-wave heterogeneous networks. *Electronics*, 8(2), 133.

- [32] Engda, T. K., Wondie, Y., & Steinbrunn, J. (2020). Massive MIMO, mmWave and mmWave-Massive MIMO Communications: Performance Assessment with Beamforming Techniques.
- [33] Ahmed, I., Khammari, H., Shahid, A., Musa, A., Kim, K. S., De Poorter, E., & Moerman, I. (2018). A survey on hybrid beamforming techniques in 5G: Architecture and system model perspectives. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 3060-3097.
- [34] El Ayach, O., Rajagopal, S., Abu-Surra, S., Pi, Z., & Heath, R. W. (2014). Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems. *IEEE transactions on wireless communications*, 13(3), 1499-1513.