

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunication.

Spécialité : Réseaux et télécommunications.

Présenter Par :

BOUANANE Nor El Houda Amal

GHERMAOUI Sanaa

Sujet :

*Optimisation du pré codeur et du combineur dans les systèmes
de formation des faisceaux hybrides*

Soutenu publiquement, le 30/ 06 /2022, devant le jury composé de :

Mr MALIKI Youcef

MCA

Université de Tlemcen

Président

Mme BENLALDJ Lamia

MAA

Université de Tlemcen

Examineur

Mr. BAHRI Sidi Mohamed

MCB

Université de Tlemcen

Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciements

Nous tenons avant tous à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour achever ce modeste travail.

Nous tenons à remercier particulièrement nos parents, nos succès demeurés loin le fruit de leurs sacrifices et de patience.

*Nous exprimons nos sincères gratitudees à **Mr S.M. BAHRI** qui a bien voulu nous encadrer ; nous tenons à leur adresser nos vifs remerciements et profondes reconnaissances pour leur disponibilité, leur gentillesse, leurs conseils et leur aimable assistance dont le mérite nous a été utile.*

*Nos sincères remerciements vont également à **Mr MALIKI Youcef** pour l'intérêt qui a bien voulu soutenir notre travail en acceptant de présider le jury.*

*Nous adressons nos remerciements à **M^{me} BENLALDJ Lamia** d'avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation de notre travail de fin d'étude.*

Enfin, à tous ceux qui nous ont encouragé de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Merci.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mon père, ma première école dans la vie, mon exemple de courage et de sacrifice continue.

A ma mère, qui m'a toujours poussé d'aller de l'avant avec ses prières.

Aucune dédicace ne pourra compenser les sacrifices de mes parents.

*A ma chère sœurs **ILHAM** et mes frères **Med Mehdi** et **Nadir**, pour leurs amours.*

*A mon beaux-frères **DJELLOL SMIR Sofiane** qui ma soutenue durant tous ma carrière.*

*A mes chères nièces **NERMINE** et **NORHANE**.*

*A Mon binôme **GHERMAOUI Sanaa**, avec qui j'ai pu réaliser ce modeste travail et aux bons moments que nous avons passé ensemble et à tout sa famille.*

*A toutes les familles '**BOUANANE** et **KAZI TANI** '.*

*A mes amies de toujours **BOUTCHICHE ECHAIMAA** et **DJERDOUBI Hafsa**.*

A tous mes amis qui me donne l'envie d'aller plus loin.

Pour avoir rempli ces années d'études de souvenirs en tous genres

Pour avoir toujours été là, dans les bons comme dans les mauvais moments

« Je n'oublierais jamais les moments que nous avons passés ensemble » et

Tous mes collègues de l'étude sans exception.

A tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation.

Et à tous ceux qui veulent partager cette joie avec moi.

BOUANANE NOR EL HOUDA AMAL.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, en première lieu, aux êtres qui me sont les plus chers ;

Mes parents qu'ont toujours aimé me voir réussir

A mon cher père,

La source de mon inspiration, la personne qui a su m'inculquer la bonne éducation, le sens de la responsabilité, la forte personnalité, l'optimisme et la confiance en soi face aux difficultés de la vie.

A ma très chère maman, qui m'a décimé sa santé et sa vie pour mon succès

Ange de l'âme, source de l'espoir et de la tendresse, pour ton amour, pour tous ce que tu as sacrifié pour moi, Tu es maman idéale.

« Je vous aime »

A mon frères ABDELMOUNAIM, et mes sœurs Rabiaa et Soulef qui ont toujours été présent pour moi et sans oublier mes beaux frères DJEBBAR Mohamed et ICHOU Hamza.

A mes chères nièces RITEGE et IBTIHEL, « Je vous adore ».

Pour tous les bons moments passés avec vous

A mes chers grand père, HADJ MOUSSA « Repose en paix » et HADJ MOHAMED «HBIBI ».

A Mon binôme BOUANANE Nor El Houda Amal, avec qui j'ai pu réaliser ce modeste travail et aux bons moments que nous avons passé ensemble et à tout sa famille.

A toutes les familles 'GHERMAOUI et BEKKOUCHE '.

A toutes mes amies, surtout à ma très chère amie DJERDOUBI Hafsa.

Tous mes collègues de l'étude sans exception.

A tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation.

Et à tous ceux qui veulent partager cette joie avec moi.

GHERMAOUI SANAA.

Résumé

Le but de ce travail est l'étude et la simulation à l'aide de logiciel MATLAB le système MIMO massive hybride beamforming avec l'objectif d'obtenir une efficacité spectrale plus fiable pour la 5G et d'améliorer le rapport signal/bruit de communication sans fil en utilisant des réseaux d'antennes.

Nous avons étudié le système MIMO massive hybride beamforming dans le but de simplifier et minimiser le cout de réalisation du système en optimisant le nombre d'antennes, le nombre des chaines RF et le nombre de flux de données.

Mots-clé : 5G, Beamforming, Précodage hybrid, mm wave, Massive MIMO.

Abstract

The aim of this work is the study and simulation using MATLAB software of massive MIMO beamforming systems with the objective of obtaining a more reliable spectral efficiency for 5G and improving the signal-to-noise ratio of wireless communication using antenna arrays.

The goal of the hybrid architecture is to simplify and minimize the cost of system realization by optimizing the number of antennas, the number of RF chains and the number of streams.

Keywords: 5G, Beamforming, Hybrid precoding, mm wave, Massive MIMO.

ملخص

الغرض من هذا العمل هو الدراسة و المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB لأنظمة تشكيل شعاع تقنية متعدد المداخل متعدد المخارج الضخمة بهدف تحقيق كفاءة طيفية أكثر موثوقية لشبكة الجيل الخامس و تحسين نسبة الإشارة /الضوضاء للاتصالات اللاسلكية باستخدام مصفوفات الهوائي. لقد درسنا نظام متعدد المداخل متعدد المخارج الهجين الضخم الهدف من البنية الهجينة هو تبسيط و تقليل تكلفة تنفيذ النظام من خلال تحسين عدد الهوائيات و عدد سلاسل التردد اللاسلكي و عدد التيارات

الكلمات الرئيسية: متعددة المداخل ومخارج متعددة، تشكيل الحزم، الجيل الخامس، موجات ملليمترية

Tables des matières

Remerciements	I
Dédicace.....	II
Résumé	IV
LISTE DES FIGURES.....	VII
Liste des abréviations.....	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre I : La technologie MIMO massif

I. 1 introduction :	3
I. 2 Système MIMO (Multiple Entrée Multiple Sortie)	3
I. 3 Principe de MIMO	4
I. 4 Type de MIMO	4
I.4.1. System SISO (Entrée Unique Sortie Unique)	6
I.4.2 Système SIMO (Entrée Unique Sortie Multiple)	7
I.4.3 Système MISO (Entrées Multiples Sortie Unique)	8
I.4.4 Système MIMO (Entrée Multiple Sortie Multiple)	8
I. 5 MIMO Massif	8
I.5.1 Beamforming (Formation de faisceau).....	9
I.5.2 Multi-utilisateur MIMO (MU-MIMO).....	9
I. 6 Caractéristique de MIMO massif	10
I.6.1 TDD vs FDD pour le MIMO massif	11
I.6.2 Évolutivité	12
I.6.3 Propagation favorable	13
I. 7 Avantage du MIMO Massif	13
I. 8 Types de MIMO massif	13
I.8.1 Système MIMO mono-utilisateur	13
I.8.2 MIMO massif multiutilisateur	14
I.8.3 Multi-User Massive MIMO avec Multi-Cell scenario :	15
I.8.4 MIMO massif distribuée	17
I. 9 Comparaison entre MIMO et MIMO massif	17
I. 10 Défis des systèmes MIMO Massifs	17
I.10.1 La contamination des séquences pilotes.....	17
I.10.2 Propagation Défavorable.....	18

I. 11 Conclusion	19
-------------------------------	-----------

Chapitre II :Antennes MIMO Massive Beamforming.

II. 1 Introduction	21
II. 2 Définition d'antenne.....	21
II.3 Antennes Réseaux.....	22
II.4 Antennes intelligentes	23
II. 4. 1. Concept d'antennes intelligentes	24
II. 4. 2. Structure d'une antenne intelligente	24
II. 5. Avantages des antennes intelligentes.....	26
II. 6. Types des antennes intelligentes	27
II. 6. 1. Systèmes d'antennes à faisceaux commutés SBA	27
II. 6. 2. Antennes adaptatives	28
II. 7. Les algorithmes adaptatifs	29
II. 8. Antennes MIMO beamforming	30
II. 8. 1. Concept de base	30
II. 9. Antennes MIMO massives beamforming.....	31
II.9.1 MIMO massives Beamforming Numérique.....	33
II.9.2 MIMO massives Beamforming analogique	33
II.9.3 Beamforming hybride.....	34
II. 10. Conclusion.....	37

Chapitre III : résultat et simulation

III. 1. Introduction :	39
III. 2. Système MIMO massive beamforming hybride.....	39
III. 3 Modèle de Système.....	40
III.3.1. Conception de formateur de faisceaux hybride pour les système MIMO à grande échelle et à utilisateur unique	42
III. 4 Notion de base sur langage utilisé (Matlab)	48
III. 5 Principe de simulation.....	49
III. 6 Simulations et discussions des résultats :	50
III. 6. 1. Impact de la variation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception :	50
III. 6. 2. Impact de la variation du nombre de chaines RF à l'émission et à la réception	52
III. 6. 3. Impact de la variation du nombre de flux (Ns) :	54
III. 6 Conclusion :	56

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : La technologie MIMO massif.

Figure I. 1: Système MIMO.	5
Figure I. 2: Principe de la technologie MIMO.	6
Figure I. 3: Système SISO– Entrée Unique Sortie Unique.	7
Figure I. 4: Système SIMO– Entrée Unique Sortie Multiple.	7
Figure I. 5: Système MISO– Sortie Unique à Entrées Multiples.	8
Figure I. 6: Système MIMO Entrée Multiple Sortie Multiple.	9
Figure I. 7: Modèle MIMO massif - M antennes et K utilisateurs.	9
Figure I. 8: Système MMIMO en transmission multi-utilisateurs.	10
Figure I. 9: Types de configurations et déploiement d'une station de base pour le MIMO massif.	11
Figure I. 10: Le gain écrasant de TDD sur FDD pour les UT.	12
Figure I. 11: Single-User Massive MIMO.	14
Figure I. 12: Système MU-MIMO massif. M-antennes de BS dessert K simple antenne UT.	15
Figure I. 13: La BS dans la l-ième cellule et le k-ième UT dans la j-ième cellule.	16
Figure I. 14: Illustration du concept de pilote contamination. (a) liaison montante (b) liaison descendantes.	18

Chapitre II : Antennes MIMO Massive Beamforming.

Figure II. 1: Schéma général d'une antenne en mode transmission.	21
Figure II. 2: L'antenne en mode d'émission(a) et réception (b).	22
Figure II. 3: Différentes géométries de réseaux pour les antennes intelligentes.	23
Figure II. 4: Le principe de base d'une antenne intelligente.	24
Figure II. 5: Schéma représentatif d'une antenne adaptative.	25
Figure II. 6: Structure d'un système à faisceaux commutés SBA.	27
Figure II. 7: Réseau adaptatif à 4 éléments.	28
Figure II. 8: différence entre un système à commutation de faisceaux et un système adaptative.	29

Figure II. 9: Classification des algorithmes adaptatifs.....	30
Figure II. 10: Configuration de canal MIMO à bande étroite avec Beamforming.....	31
Figure II. 11: MIMO Beamforming Numérique	33
Figure II. 12: MIMO Beamforming Analogique.....	34
Figure II. 13: Schéma bloc du Système MIMO Beamforming hybride analogique-numérique	35

Chapitre III : Résultats et simulations

Figure III. 1: L'architecture de MIMO massive beamforming hybride a multi-utilisateur.....	39
Figure III. 2: Schéma fonctionnel simplifié d'un système monoposte à ondes millimétriques.	49
Figure III. 3: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_t et N_r pour la technique beamforming hybride.....	51
Figure III. 4: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_t et N_r pour la technique beamforming hybride.....	52
Figure III. 5: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_{rf} pour la technique beamforming hybride.....	53
Figure III. 6: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_{rf} pour la technique beamforming hybride.....	54
Figure III. 7: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_s pour la technique beamforming hybride.....	55
Figure III. 8: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_s pour la technique beamforming hybride.....	56

Liste des abréviations

4G : Quatrième Génération

5G : Cinquième Génération

IOT: Internet of Things

MIMO: Multiple Input Multiple Output.

MMIMO: Massive- Multiple Input Multiple Output.

LTE: Long Term Evolution.

MISO: Multiple Input Single Output

SISO: Single Input Single Output

SIMO: Single Input Multiple Output

BS: Base Station.

UT: User Terminal.

TDD: Time-Division Duplex.

FDD: Frequency Division Duplex.

RF: Radio Frequency.

SNR: Signal-to-Noise Ratio.

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

MU-Massive MIMO :Multi User massive MIMO.

LTE: Long Term Evolution.

SDMA: Spatial Division Multiple Access.

CDMA : Code Division Multiple Access.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

TDMA: Time Division Multiple Access.

SBA: Switching Beam Antenna.

LMS: Lest Mean Square.

DMI : Direct Matrix Inverse.

RLS : Récursive least Squares algorithm.

CMA : Constant Modulus Algorithm.

CAN : Convertisseur Analogique Numérique.

CNA : Convertisseur Numérique Analogique.

MmWave: Millimètre Wave.

BER: Bit Error Rate.

MATLAB: MATrix LABoratory.

Introduction générale

Le domaine de télécommunication a été marqué par son évolution depuis une communication par téléphonie à travers un support de transmission filaire à un support de transmissions radio. La demande des données d'utilisateurs et la faible capacité des canaux ont encouragé les chercheurs à employer une technique qui sera plus différente que celle d'aujourd'hui, en améliorant l'efficacité et la capacité des réseaux.

La 5G est une révolution dans le monde de l'Internet des objets, parmi ces objectifs principaux, est l'utilisation des nouvelles bandes de fréquences dites millimétriques qui offrent une opportunité en matière de disponibilité spectrale qui apparaissent comme le principal moteur des futurs réseaux 5G.

La transmission des données à des ondes millimétriques permet d'offrir un débit élevé en raison d'énorme bande passante, cependant elle souffre d'une forte atténuation de signal. Pour surmonter ce problème et améliorer la puissance de signal, la petite longueur d'onde nous permet d'intégrer des dizaines et des centaines d'antennes sur la station de base et sur un terminal mobile. Un réseau d'antenne avec un nombre élevé d'antennes est utilisé pour exploiter la technique de formation de faisceau pour augmenter la directivité de l'antenne, la notion de MIMO massif, qui connaît une forte augmentation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception, pour réduire les interférences et améliorer considérablement la qualité de transmission et le gain de liaison, donc c'est l'une des clés pour une meilleure efficacité spectrale et robustesse de transmission.

L'augmentation du nombre d'antennes rend le système coûteux et une infrastructure plus complexe, pour cela l'architecture hybride sera une solution pour réduire la consommation d'énergie en optimisant le nombre d'antennes et les chaînes RF, pour former un faisceau adapté et acheminer le maximum d'énergie utile à l'utilisateur. Pour évaluer ces performances, nous présentons la technique de formation de faisceau (hybride beamforming).

L'objectif de notre travail est l'étude de la combinaison du MIMO massif et du beamforming qui permet d'obtenir à la fois une efficacité spectrale élevée, une meilleure qualité et un débit important. Le mémoire est constitué de trois chapitres :

Le premier chapitre présente d'abord la technique MIMO et ses types (SISO-MISO-SIMO). Nous évoquons par la suite la technique MIMO massive et ses types, ses caractéristiques et ses avantages à la fin.

Dans le deuxième chapitre, on se concentrera sur l'étude des antennes intelligentes et ses avantages. Nous proposons ensuite une étude sur les antennes MIMO Beamforming et MIMO Massive Beamforming, passant par les algorithmes adaptatifs.

Le dernier chapitre est consacré aux simulations et résultats. Nous commençons par une présentation de la plateforme choisie pour les différentes simulations.

Nous étudierons dans un premier temps l'impact du nombre d'antennes à l'émission et à la réception sur les performances du système. Ensuite nous examinerons l'effet de la variation du nombre de chaînes RF à l'émission et à la réception sur l'efficacité spectrale du système et finalement nous étudierons l'impact du nombre de flux de données sur ces performances.

Nous clôturons ce mémoire par une conclusion.

Chapitre I :

La technologie MIMO massif

I.1 introduction :

Avec la croissance rapide de l'utilisation des systèmes de communication sans fil, la plupart des recherches dans ce domaine se sont concentrées sur le déploiement de nouvelles technologies pour rendre les réseaux sans fil plus efficaces. La conception de nouvelles générations de réseaux sans fil se heurte toujours au problème de limiter la capacité imposée par une bande passante étroite et une capacité de transmission souvent limitée. Afin de surmonter ces obstacles, une nouvelle technologie appelée MIMO (Multiple-Input Multiple Output) tente de tirer parti de la dimension spatiale, en installant plusieurs antennes au niveau des émetteurs et/ou récepteurs. Ainsi, l'utilisation de cette technologie permet une augmentation significative des vitesses de liaison de transmission (tout en conservant la même bande passante et la même capacité). La technologie MIMO et Massive MIMO est l'une des nouvelles technologies les plus innovantes du monde sans fil.

Aussi MIMO massive, cette technologie se présente comme l'une des méthodes les plus prometteuses pour les systèmes 5G révolutionnaires pour les réseaux mobiles et l'Internet des objets (IoT, de Internet of Things).

Dans ce chapitre, nous présentons une description de la technologie MIMO et son évolution Massive MIMO ; ainsi que les différentes catégories des deux systèmes.

I.2. Système MIMO (Multiple Entrée Multiple Sortie)

La technologie MIMO permet d'augmenter le débit linéairement avec le nombre d'antennes à la réception et de contrer l'évanouissement du canal. Ainsi, elle permet de minimiser la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal. La différence entre un système MISO et un système MIMO est que ; le MISO envoie les mêmes paquets aux antennes qui émettent à la même fréquence. Tandis que, le MIMO envoie des paquets différents aux antennes qui émettent à la même fréquence (Figure I.1). [1-2]

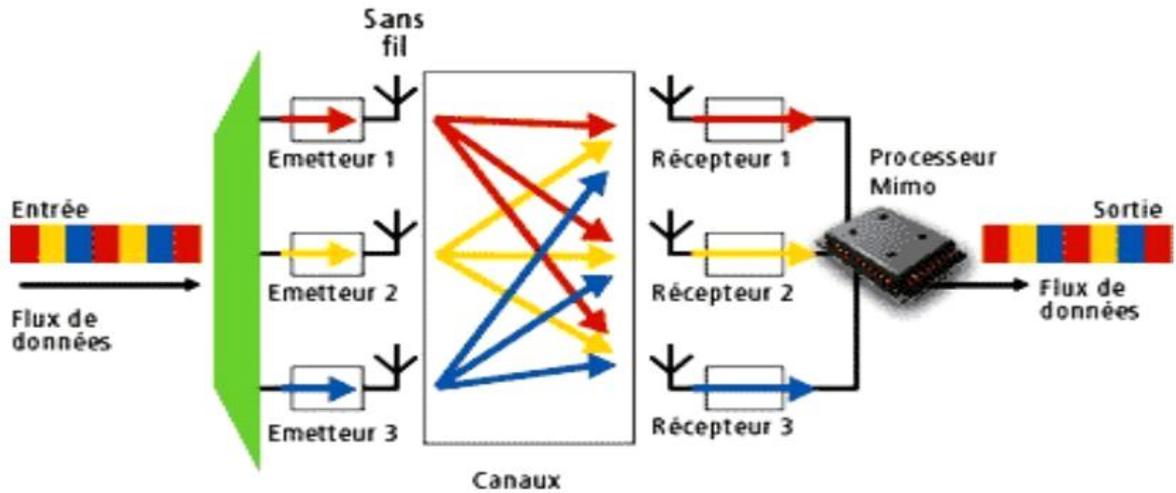


Figure I. 1: Système MIMO

I.3 Principe de MIMO

Dans les systèmes de communications traditionnels SISO (Single Input Single Output), il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception. Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées.

Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (voir Figure I.2). Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes.

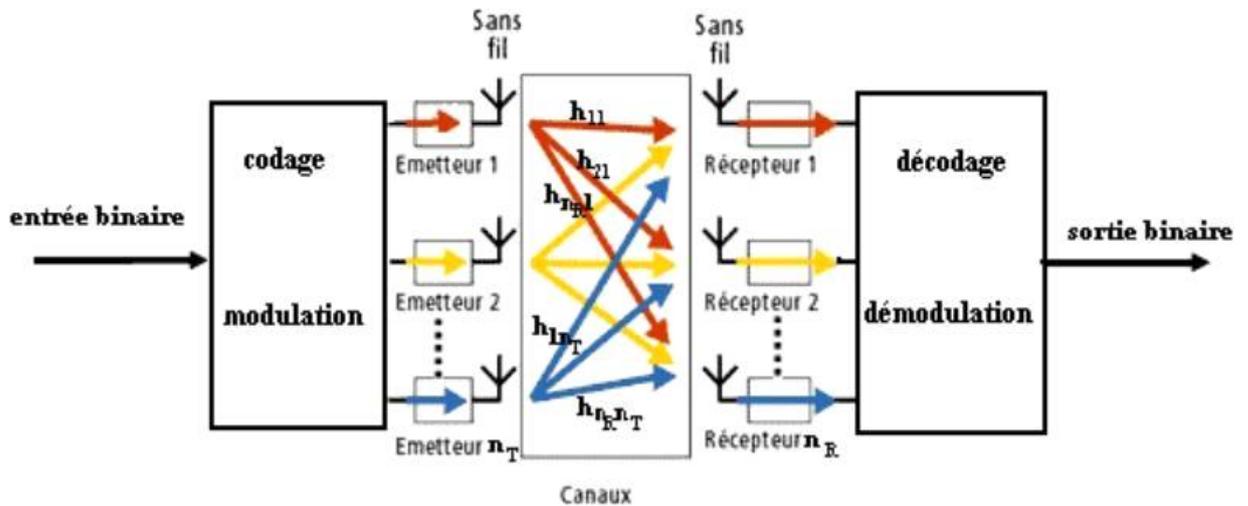


Figure I. 2: Principe de la technologie MIMO.

I.4 Type de MIMO

Nous pouvons distinguer quatre configurations :

SISO –Entrée unique Sortie unique

SIMO - Entrée unique Sortie multiple

MISO - Entrées multiples Sortie unique

MIMO - Entrée multiple Sortie multiple

I.4.1. System SISO (Entrée Unique Sortie Unique)

Le SISO (Single Input Single Output) est le système le plus simple voir figure I.3, il ressemble à un canal radio standard qui fonctionne avec une antenne du côté de l'émetteur et du récepteur ($N_t=N_r=1$) et il n'y a aucun traitement en fonction de diversité, et sa capacité du canal est donnée par :

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

Avec :

P : la puissance du signal utile en Watt.

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

W : la bande passante donnée en Hz.

La capacité normalisée par la bande utile W, On obtient

$$C_{SISO} = \log_2(1 + \rho) \quad (I.2)$$

Avec ρ est le rapport signal sur bruit(P/N0).

La capacité du canal sera moindre par rapport aux autres mais le modèle de conception est simple [8].

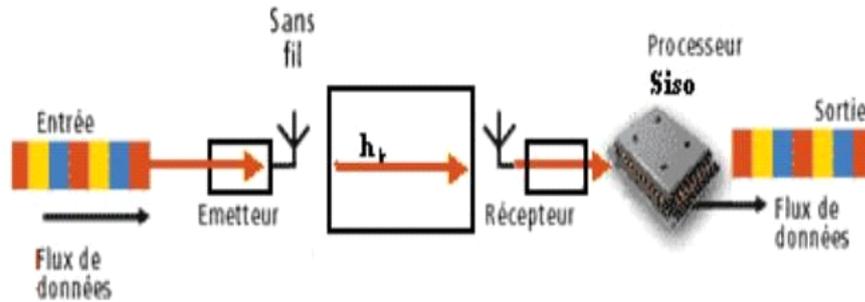


Figure I.3: Système SISO– Entrée Unique Sortie Unique.

I.4.2 Système SIMO (Entrée Unique Sortie Multiple)

Le système SIMO (Single Input Multiple Output) utilise à l'émission une seule antenne par contre à la réception ($N_r \geq 2$) [8] voir figure I. 4.

La capacité du canal SIMO est donnée par :

$$C_{SIMO} = N_r W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (I.3)$$

N_r : le nombre d'antenne réceptrice.

Avec S/N est le rapport signal sur bruit.

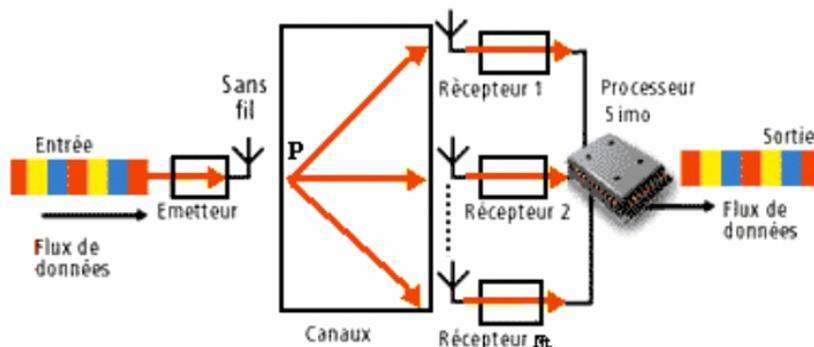


Figure I. 4: Système SIMO– Entrée Unique Sortie Multiple

I.4.3 Système MISO (Entrées Multiples Sortie Unique)

Le système MISO (multiples input single output) utilise plusieurs antennes à l'émission ($N_t \geq 2$) d'où le terme diversité d'émission figure I.5, les données sont donc transmises en redondance à partir des antennes émettrices.

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

La capacité d'un canal MISO est donnée par :

$$C_{MISO} = N_t W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (I.4)$$

N_t : le nombre d'antenne émettrice.

Avec S/N est le rapport signal sur bruit.

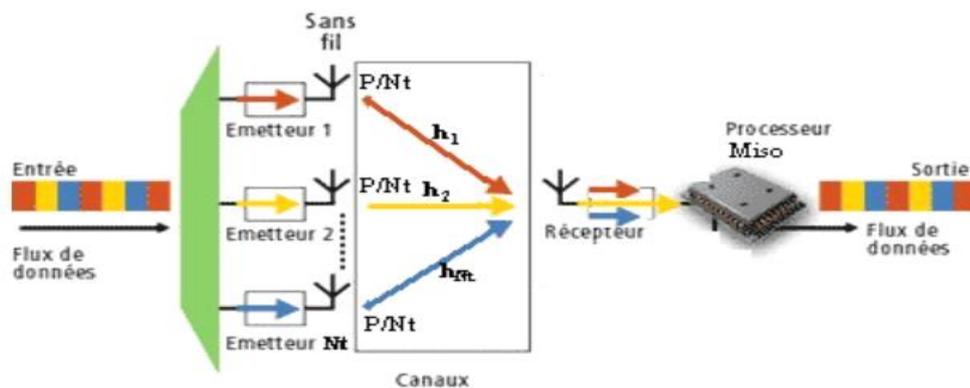


Figure I.5: Système MISO– Entrées Multiples Sortie Unique.

I.4.4 Système MIMO (Entrée Multiple Sortie Multiple)

La technologie MIMO (Multiple input Multiple output) utilise N_t antennes de transmission et N_r antennes de réception figure I. 6.

Ce système améliore le débit ainsi que la capacité des canaux [8].

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

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \cdots & h_{N_R N_T} \end{pmatrix} \quad (I.5)$$

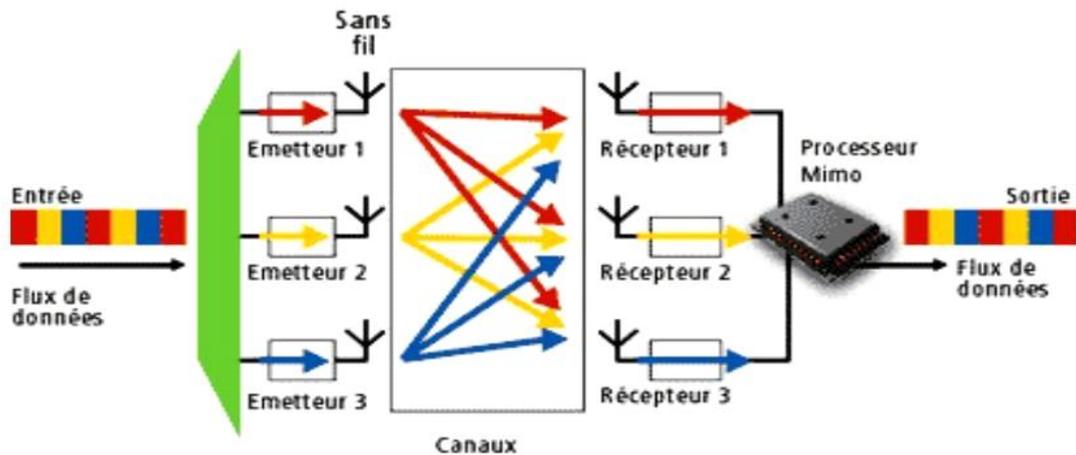


Figure I. 6: Système MIMO Entrée Multiple Sortie Multiple.

I.5 MIMO Massif

Le MIMO massif est une technologie récente qui dépend de l'exploitation de la dimension spatiale, créant ainsi plusieurs degrés de liberté et stimulant le principe de la transmission simultanée par multiplexage spatial. Servir différents utilisateurs dans la même ressource temps-fréquence peut être considéré comme un élément-clé pour la 5G de réseaux mobiles en raison de l'épuisement du spectre de fréquence et pour répondre aux contraintes d'efficacité spectrale.

Le MIMO massif a été initialement envisagé pour un fonctionnement en duplex à répartition dans le temps (TDD), mais peut potentiellement être appliqué également au fonctionnement en duplex à division de fréquence (FDD) [3]. Cette technologie consiste à équiper une station de base par un nombre élevé M d'antennes pour servir un nombre d'utilisateurs K sous la supposition $M \gg K$. Le modèle du système MIMO massif est illustré à la Figure I.7.

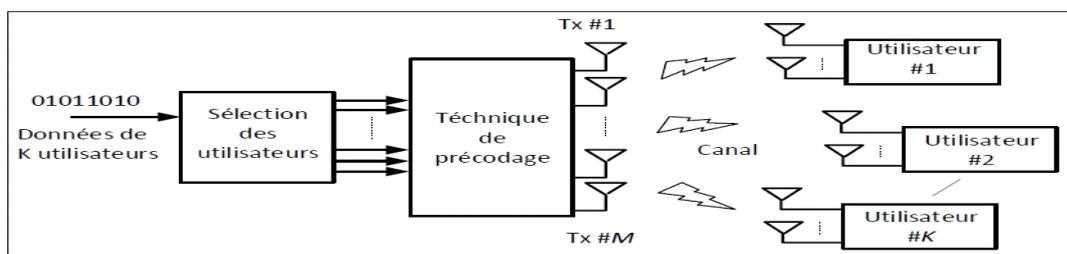


Figure I.7: Modèle MIMO massif - M antennes et K utilisateurs.

MIMO massif propose deux innovations majeures :

I.5.1 Beamforming (Formation de faisceau)

La formation de faisceaux ou le beamforming est une technique de traitement des signaux utilisée avec un réseau de capteurs à l'émission ou/et à la réception qui commande la forme du diagramme de rayonnement. L'utilisation de la formation de faisceau du côté de la transmission peut augmenter la puissance dans une direction précise.

En commandant la phase et l'amplitude du signal sur chaque émetteur, on crée des interférences constructives ou destructives dans le front d'ondes.

Du côté de la réception, la formation de faisceaux peut également être considérée comme un filtre spatial pour la direction d'intérêt parce qu'il augmente la sensibilité du récepteur dans la direction du signal désiré et la diminue dans la direction de l'interférence et du bruit. Ceci est équivalent à combiner d'une façon optimale les données reçues venant de différentes sources (antennes) avec les bons coefficients du filtre spatial.[4]

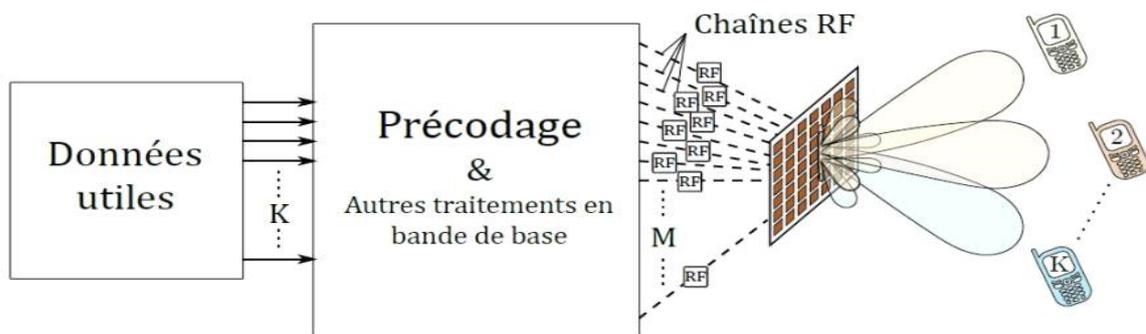


Figure I.8: Système MMIMO en transmission multi-utilisateurs

I.5.2 Multi-utilisateur MIMO (MU-MIMO)

Ce système augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant ainsi un côté périphérique pratiquement unifié. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grande échelle. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter la vitesse de transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de la station de base sans consommer plus de bande passante ni augmenter les valeurs de modulation [5]

I.6 Caractéristique de MIMO massif

MIMO est une forme du système, MU MIMO (multi utilisateurs) où les stations de bases et le nombre d'utilisateurs sont très nombreux. En MIMO massif, une centaine voire une millièrme d'antenne à la station de bases serve un très grand nombre d'utilisateurs (dix à cent utilisateurs) simultanément et dans la même fréquence. MIMO Massif est une technologie du futur qui fournira des réseaux large bande plus sécurisé, robuste, efficace (en termes d'énergie et d'utilisation de spectre). Différents types de déploiement et de configuration pour le MIMO massif peuvent être envisagés dans La figure I.9 .[6]

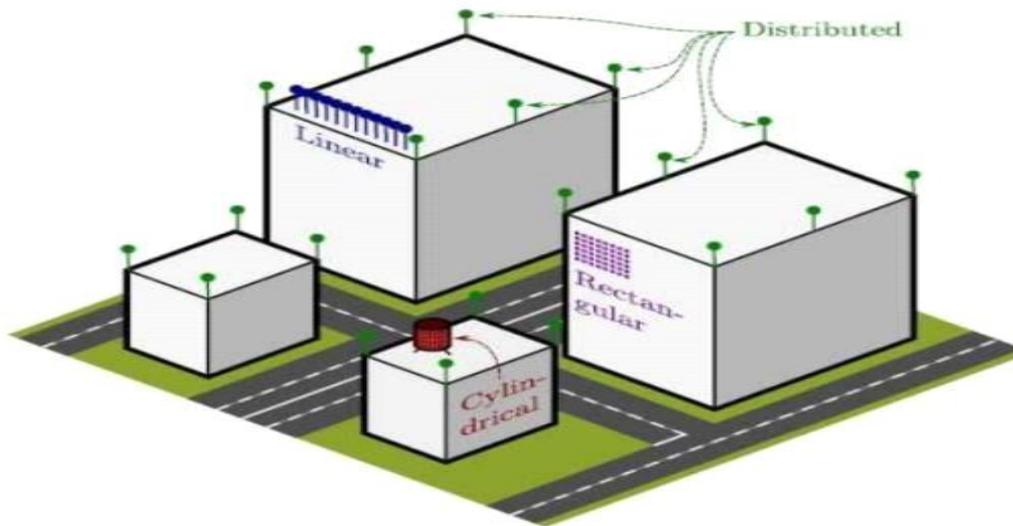


Figure I.9: Types de configurations et déploiement d'une station de base pour le MIMO massif.

On peut donner quel que point important dans les systèmes MIMO massif :

I.6.1 TDD vs FDD pour le MIMO massif

Vu que le système MIMO Massif utilise un multiplexage spatial, il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance du canal, au niveau de la liaison montante et descendante. Au niveau de la liaison montante, il est plus facile d'estimer le canal quand les terminaux envoient des signaux à la station de base, tandis qu'il est plus complexe au niveau de la liaison descendante. Tout d'abord la station de base envoi des signaux aux terminaux, puis estime le canal pour pouvoir le quantifier. Enfin, l'estimation obtenue est renvoyée à la station de base.

Cette technique est impossible pour le MIMO massif pour deux raisons. Premièrement, le signal au niveau de la liaison descendante doit être orthogonal c'est-à-dire tant que le

nombre d'antennes augmente, plus de fréquence et de temps sont utilisés par rapport au MIMO classique. Deuxièmement, vu que chaque terminal accepte plusieurs signaux, l'estimation de canal augmente alors par rapport aux nombres d'antennes à l'émission.

La solution à ce problème est donc d'utiliser la technique Duplex par séparation temporelle (ou Time-Division Duplex, TDD) et de dépendre à la réciprocité des liaisons montantes et descendantes du canal.

Utilisation de la technique Duplex par séparation temporelle (ou Time-Division Duplex, TDD) : comme vu précédemment, en utilisant la technique Frequency Division Duplexing ou FDD, l'estimation de canal dépend du nombre d'antenne M à la station de base. Par contre, avec TDD, l'estimation de canal est indépendante de M . En MIMO massif, le nombre d'antenne M est très nombreux, par conséquent, l'utilisation de la technique TDD est préférable. Par exemple, si l'intervalle de cohérence est $T = 200$ symboles

(Correspondant à la bande passante de cohérence de 200 kHz et de temps de cohérence de 1 ms). Alors, en utilisant le système FDD, le nombre d'antenne à la station de base et le nombre d'utilisateur sont limités par $M+K < 200$ la figure montre Les régions possible (M, K) dans les systèmes TDD et FDD. [6]

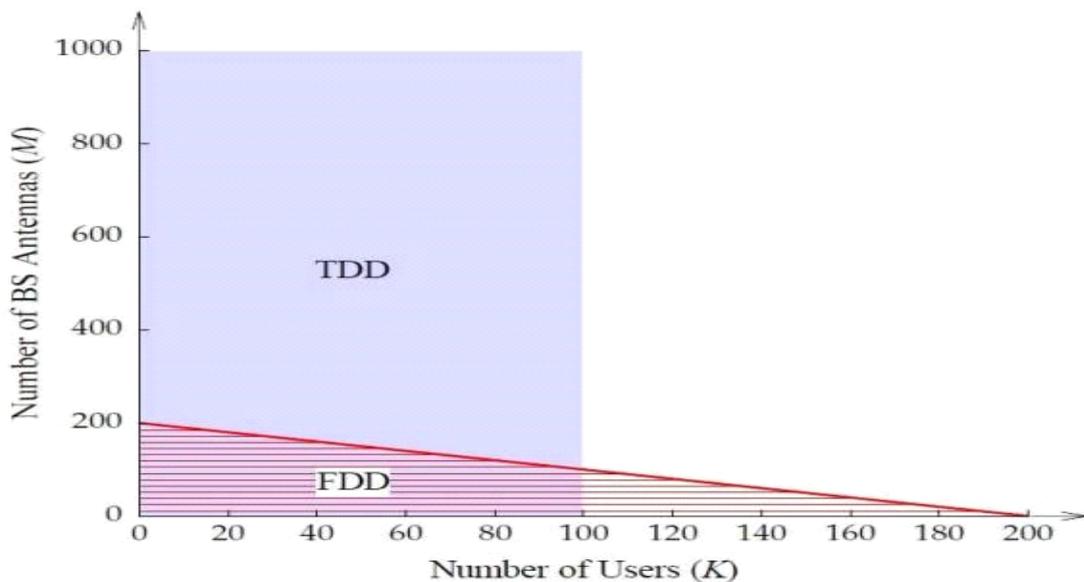


Figure I.10: Le gain écrasant de TDD sur FDD pour les UT.

I.6.2 Évolutivité

Dans le système MIMO la station de base apprend les canaux par un apprentissage de liaison montante, avec opération TDD. Le temps requis pour l'estimation du canal est indépendant du

nombre d'antennes BS. Par conséquent, la large gamme d'antennes BS peut être aussi large que souhaité sans extension de la surcharge d'estimation du canal. De plus, le traitement du signal à chaque UT est essentiel et ne dépend pas de l'existence d'autres UT, le traitement du signal par démultiplexage est effectué au niveau des UT. L'ajout ou la perte de certains UT du service n'a plus d'incidence sur les autres activités des UTs. [6]

I.6.3 Propagation favorable

Cela signifie que la matrice de canal entre le réseau d'antenne de la station de base et des utilisateurs est bien conditionnée. En MIMO Massif, sous certaines conditions, la propriété de propagation favorable tient compte de la loi des grands nombres. [6]

I.7 Avantage du MIMO Massif

Les systèmes MIMO massifs sont extrêmement complexes. Cependant, les avantages offerts par le MIMO massif encouragent leur développement. Parmi ces avantages :

Efficacité spectrale : Ce sujet prend de plus en plus d'importance, car nous grignotons toujours d'avantage du spectre électromagnétique pour divers protocoles de communication. Les gouvernements ont réservé une large bande de fréquences pour la 5G, mais ces spectres ne sont pas illimités. Le MIMO massif est en mesure d'exploiter son réseau d'antennes pour concentrer les faisceaux jusqu'aux utilisateurs individuels. Cela lui permet de proposer une efficacité spectrale 10 fois supérieure à celles des systèmes MIMO utilisés pour la 4G.

Efficacité énergétique : L'efficacité énergétique des systèmes électroniques devient un grand souci pour les concepteurs des nouveaux systèmes de télécommunications. Avec le MIMO massif, les antennes peuvent être conjuguées pour augmenter le gain de signaux transmis. Cela signifie qu'elles irradient moins d'énergie lorsqu'elles transmettent des données, améliorant l'efficacité énergétique du système.

Suivi des utilisateurs : L'élément qui rend le MIMO massif si efficace énergétiquement parlant lui permet également de suivre très précisément les utilisateurs. Lorsque les faisceaux des antennes sont concentrés pour obtenir un gain élevé, leur largeur diminue. Ainsi, la BS doit suivre chaque utilisateur avec un signal de faisceau étroit. Ce suivi fournira aux utilisateurs une connexion plus fiable et de meilleure qualité que les signaux larges qui ont été utilisés jusqu'à présent.[6]

I.8 Types de MIMO massif

I.8.1 Système MIMO mono-utilisateur

Le système MIMO mono-utilisateur est constitué d'un côté, d'une BS comportant plusieurs antennes et d'un seul utilisateur de l'autre côté. Du point de vue de l'efficacité énergétique,

l'utilisation d'un réseau d'antennes massif pour desservir un seul ou un petit nombre d'UT n'est pas judicieuse.

Dans le cas du système MIMO mono-utilisateur, le signal reçu par l'utilisateur est donné par l'équation suivante : [7]

$$y = \sqrt{P}uhs + w \quad (\text{I.6})$$

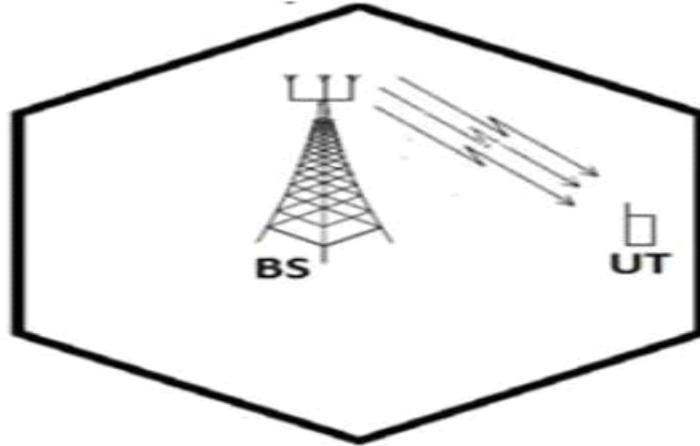


Figure I.11: Single-User Massive MIMO.

Notons P_u , le SNR de liaison montante, par h , le vecteur de réponse de canal, par s , le vecteur des symboles et par w le vecteur de bruit AWGN.

I.8.2 MIMO massif multiutilisateur

Lorsque plusieurs terminaux sont autorisés à accéder à une ressource temps-fréquence identique, MU-MIMO offre une plus grande efficacité du système contrairement à SUMIMO. Dans cette section, nous prenons en considération un système MU-MIMO à cellule unique, où la BS dessert K UT avec chaque terminal équipé d'une antenne. Le signal reçu à la BS est :

$$Y = \sum_{k=1}^K \sqrt{P}u h_k s_k + W \quad (\text{I.7})$$

$$y = \sqrt{P}u H s + w \quad (\text{I.8})$$

y est $M \times 1$ matrice de signaux reçus, $h_k \in \mathbf{H}$, par exemple. $\mathbf{H} = [h_1 \dots h_k \dots h_K]$ représente le vecteur de canal entre les antennes BS et le k ème UT, $s_k \in \mathbf{s}$ par exemple.

$s^T = [s_1 \dots s_k \dots s_K]$ représente le symbole transmis par kème UT et w représente le bruit blanc additif gaussien (AWGN).

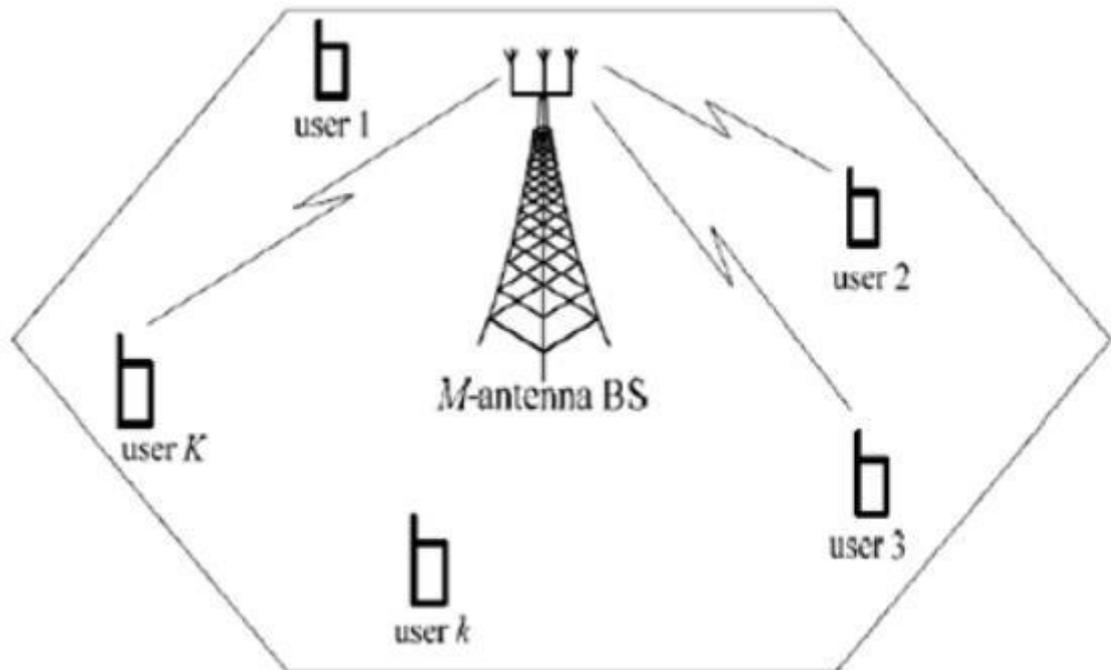


Figure I.12: Système MU-MIMO massif. M-antennes de BS dessert K simple antenne UT.

Lorsque $K \geq 2$, le signal obtenu de chaque terminal interfère avec ceux des autres terminaux donc les informations mutuelles de chaque terminal pour MU-MIMO sont plus petites que celles de SU-MIMO avec la même puissance transmise à chaque terminal.

Cependant, lorsque $M \gg K$, l'orthogonalité de système annule les interférences des autres utilisateurs et rend le canal de propagation favorable du fait que les antennes aux terminaux sont presque non corrélées et découplées. C'est la raison pour laquelle le MIMO Massif est le meilleur candidat pour MU-MIMO. [7]

I.8.3 Multi-User Massive MIMO avec Multi-Cell scenario :

Dans cette section, nous envisageons la restriction des systèmes MIMO.

Multi-utilisateurs pour des cellules non coopératives alors que M grandit sans limite. Pour une seule cellule, aussi bien que pour le MIMO multi-cellule, l'augmentation sans limite de M annule le bruit et les évanouissements de Rayleigh. Toutefois, les interférences dues à une contamination pilote persisteront.

L'idée de pollution pilote est nouvelle dans un contexte cellulaire MU-MIMO et est illustrée à la figure I.13.

L'estimation de canal de la station de base dans la cellule l est contaminée par le pilote de la cellule j . La station de base de la cellule l transmettra son signal partiellement aux côtés des terminaux de la cellule adjacente.

En raison de la formation de faisceau, le brouillage causé à la cellule j ne disparaît pas de manière asymptotique quand $M \rightarrow \infty$.

Pour cela nous pensons au système cellulaire multiutilisateur MIMO-OFDM avec des cellules hexagonales et des sous-porteuses NFFT. Toutes les cellules disposent de M antennes au niveau de la station de base et couvrent K terminaux indépendants.

Les stations de base sont supposées non coopératives.

La matrice de canaux composites $M \times K$ entre les K UT dans la cellule l et les BS dans la cellule j est notée H_{jl} . En se basant sur la réciprocité, la matrice de canal de la liaison descendante entre la station de base de la cellule j et les terminaux de la cellule l est présentée par H_{jl}^T . Le signal reçu à la j ème BS sera le suivant : [8]

$$y_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{P} u_{jlks} h_{jlks} + W \quad (\text{I.9})$$

$$y_j = \sum_{l=1}^L \sqrt{P} u_{jlks} H_{jlks} + W \quad (\text{I.10})$$

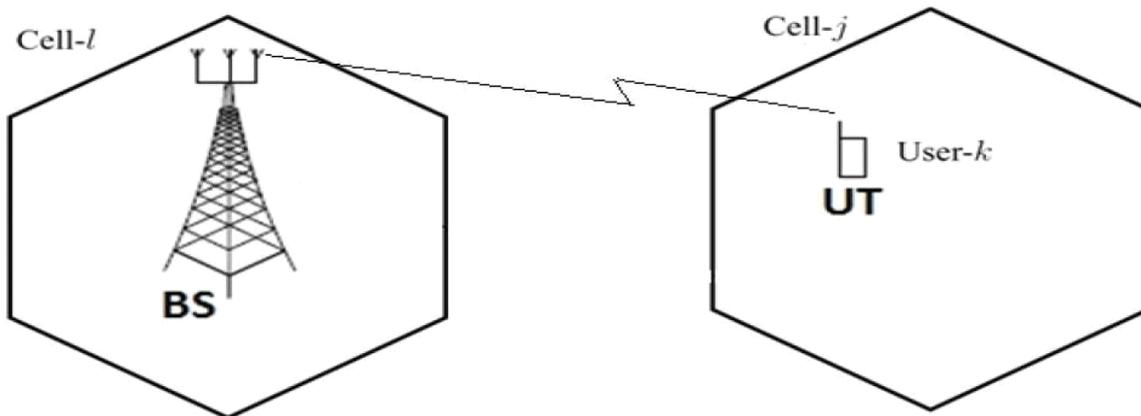


Figure I.13: La BS dans la l -ième cellule et le k -ième UT dans la j -ième cellule

I.8.4 MIMO massif distribuée

Le MIMO massif distribué peut être traité comme un cas distinct de MU-MIMO pour fournir en plus une plus grande capacité du système utilisant des antennes déployées dispersées pour transmettre et recevoir des signaux. L'un des mécanismes de la MIMO Massif consiste à permettre la coopération entre les BS dans des cellules distinctes, ce qui réduit l'interférence entre les cellules. Cependant, la synchronisation se transforme en un problème par excellence même pour des antennes distribuées au même BS. Dans certains cas, la quantité massive d'antennes à la station de base peut en outre être positionnée dans des endroits uniques (par exemple, au sommet des bâtiments). Dans ce cas, la synchronisation est un problème, et l'interface RF peu coûteux peut également introduire de plus gros problèmes.[8]

I.9 Comparaison entre MIMO et MIMO massif

Comparés au MIMO, les avantages du MIMO massif incluent :

Amélioration de l'Efficacité spectrale (SE).

Grand Quantité de degrés de liberté dans le domaine spatial.

Bonnes performances du système avec uniquement un schéma de pré-codage linéaire (simple), par ex-Forçage à zéro, transmission du rapport maximal, erreur quadratique moyenne minimale

Faciliter l'allocation des ressources

I.10. Défis des systèmes MIMO Massifs

Malgré les énormes avantages de MIMO Massive, de nombreuses questions doivent encore être abordées. Les principaux défis de MIMO Massif sont répertoriés comme suit :

I.10.1 La contamination des séquences pilotes

Les utilisateurs appartenant à une même cellule utilisent généralement différentes séquences pilotes orthogonales. Cependant, du fait de leur nombre limité, dans un système multi-cellulaire, il est possible qu'un utilisateur d'une cellule utilise la même séquence pilote qu'un autre utilisateur d'une cellule adjacente, créant ainsi un phénomène de contamination des pilotes ("pilots contamination"). Ce phénomène est communément observé dans les transmissions UL multi-cellulaires.

Le canal estimé par la station de base et l'utilisateur considéré, et entre la station de base et l'utilisateur de la cellule adjacente. Cette contamination des pilotes, propre aux systèmes multi-

antennes et multicellulaires (MIMO conventionnel, MIMO Massif) utilisant un estimateur de canal linéaire génère des perturbations aussi bien dans la démodulation des signaux

UL que dans les performances du pré codage DL, aboutissant ainsi à une réduction des capacités théoriques. Plusieurs études sont menées afin d'atténuer l'impact de ce phénomène.

Certaines solutions permettent de réduire les effets de ces perturbations à travers la coopération entre cellules, l'ingénierie radio (optimisation de l'allocation des séquences pilotes selon la localisation des cellules) ou encore les méthodes de pré codage adaptées à la structure des cellules. La figure suivante représente la contamination pilote dans les systèmes MIMO Massif.

[9]

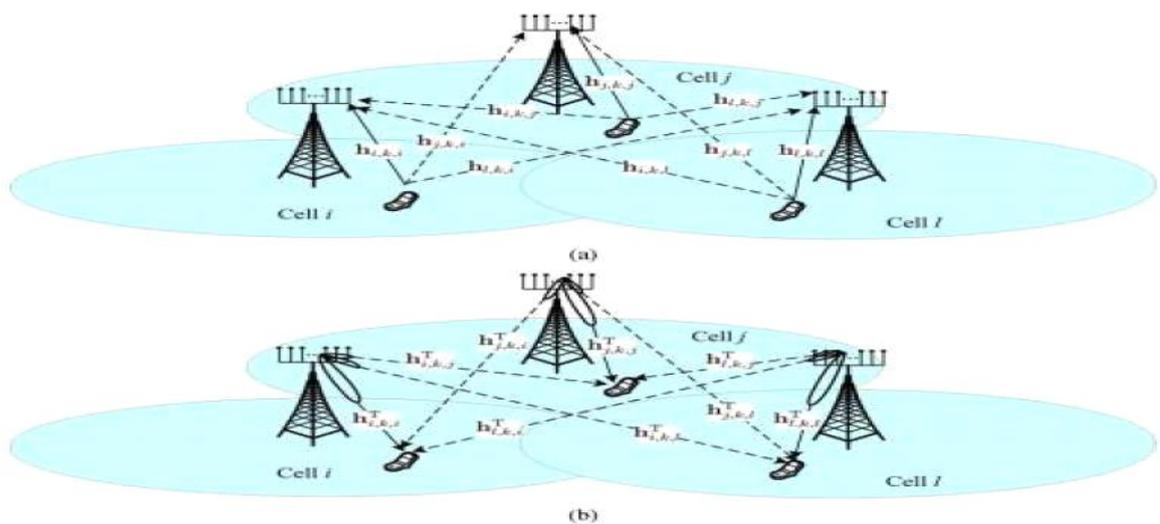


Figure I.14: Illustration du concept de pilote contamination. (a) liaison montante (b) liaison descendante.

I.10.2 Propagation Défavorable

MIMO Massif fonctionne sous les environnements favorables de propagation. Cependant, dans la pratique, il peut y avoir des environnements de propagation où les canaux ne sont pas favorables. Par exemple, dans des environnements de propagation où le nombre de diffuseurs est faible par rapport au nombre d'utilisateurs, ou les canaux de différents utilisateurs au BS partagent certains diffuseurs communs, le canal n'est pas favorable. Une possibilité pour résoudre ce problème est de distribuer les antennes de BS sur une grande surface. [10]

I.11 Conclusion

La technologie MIMO massive est pour l'industrie une technologie clé dans la future 5G. Elle permet d'améliorer considérablement la capacité des canaux, l'efficacité énergétique et l'efficacité spectrale du système sans fil de télécommunication.

En particulier, le canal de transmission est le plus sensible aux effets du défaut de transmission comme le trajet multiple, l'évanouissement, etc... Et, c'est pour cela que la technique de diversité est introduite en utilisant la technologie d'antenne MIMO qui permet d'émettre et de recevoir des signaux simultanément via plusieurs antennes. Pour le MIMO massive, ce nombre d'antennes atteint plus d'une centaine d'éléments [8]. MIMO massive est capable de servir un très grand nombre d'utilisateurs simultanément et dans la même fréquence. Cette technologie MIMO massive ouvrira de nouveaux horizons et offrira un débit de données et une capacité de réseau beaucoup plus importants. Dans le prochain chapitre on va répondre à la question suivante : Quels types d'antennes le MIMO massive utilise ?

Chapitre II : Antennes MIMO

Massive Beamforming.

II. 1 Introduction

L'utilisation des systèmes de communication sans fil continue de progresser, nous devons nous concentrer sur le déploiement de nouvelles technologies pour rendre les réseaux de plus en plus efficaces. Cette technique, appelée MIMO massifs beamforming, a été proposée pour des réseaux d'antennes équipés d'émetteurs et de récepteurs pour une transmission à haut débit. Par conséquent, le débit et la qualité de la transmission de données peuvent être considérablement améliorés en utilisant cette technique.

Le but de ce chapitre est de présenter en détail les concepts liés aux systèmes d'antennes intelligentes. Fournit un aperçu des modes de fonctionnement des antennes intelligentes et des concepts liés aux systèmes MIMO beamforming, MIMO hybride beamforming et MIMO massifs des antennes intelligentes, afin de faire une projection sur l'objectif des travaux menés durant notre mémoire.

II.2 Définition d'antenne

L'antenne est le transducteur entre le milieu de propagation et le système dans lequel elle fonctionne. Il est un dispositif qui transforme les ondes électromagnétiques guidées en ondes rayonnées dans l'espace libre en mode émission ou l'inverse en mode réception, donc de recevoir ou d'émettre des ondes radioélectriques [11].

Les antennes font partie d'un système de télécommunication et sont utilisées pour rayonner ou recevoir des ondes électromagnétiques.

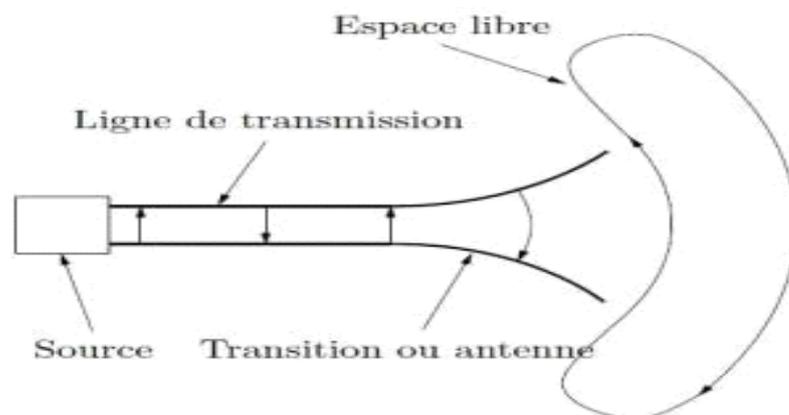


Figure II. 1: Schéma général d'une antenne en mode transmission.

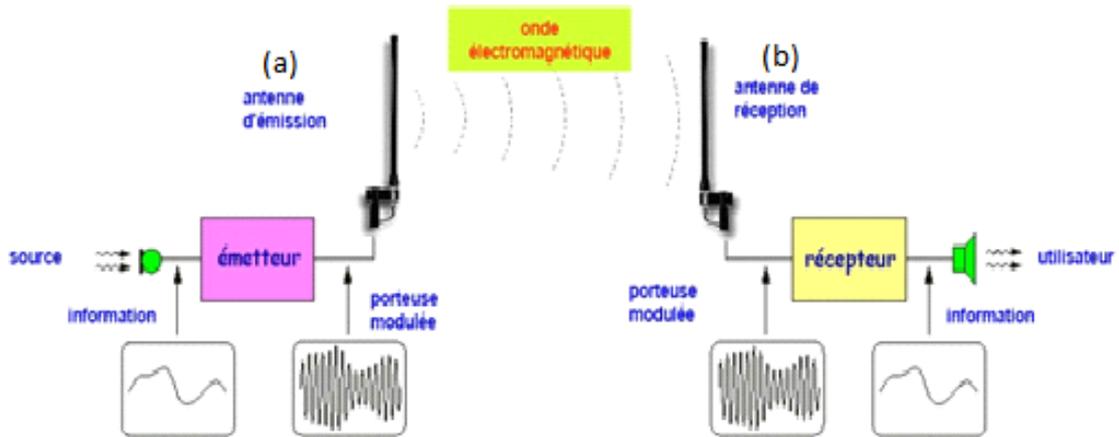


Figure II. 2: L'antenne en mode d'émission(a) et réception (b).

- L'antenne en mode d'émission (Figure II.2. (a)).
- L'antenne en mode et réception (Figure II.2. (b)).

II.3 Antennes Réseaux

Le réseau d'antennes est composé de capteurs spatialement séparés et la sortie des capteurs est introduite dans le réseau pondéré. En général, toute combinaison d'éléments dans différentes structures géométriques peut former un réseau [12].

- L'espacement entre les éléments du réseau est suffisamment petit pour qu'il n'y ait pas de changement d'amplitude entre les signaux reçus aux différents éléments.
- Il n'y a pas de couplage mutuel entre les éléments.
- Tous les champs incidents peuvent être décomposés en nombres discrets d'ondes planes. En d'autres termes, le nombre de signaux est limité.
- Par rapport à la fréquence porteuse, la bande passante du signal incident sur le réseau est plus petite.

Il existe plusieurs types de réseaux d'antennes tels que le réseau linéaire uniforme, planaire et circulaire [13], comme le montre la figure II.3.

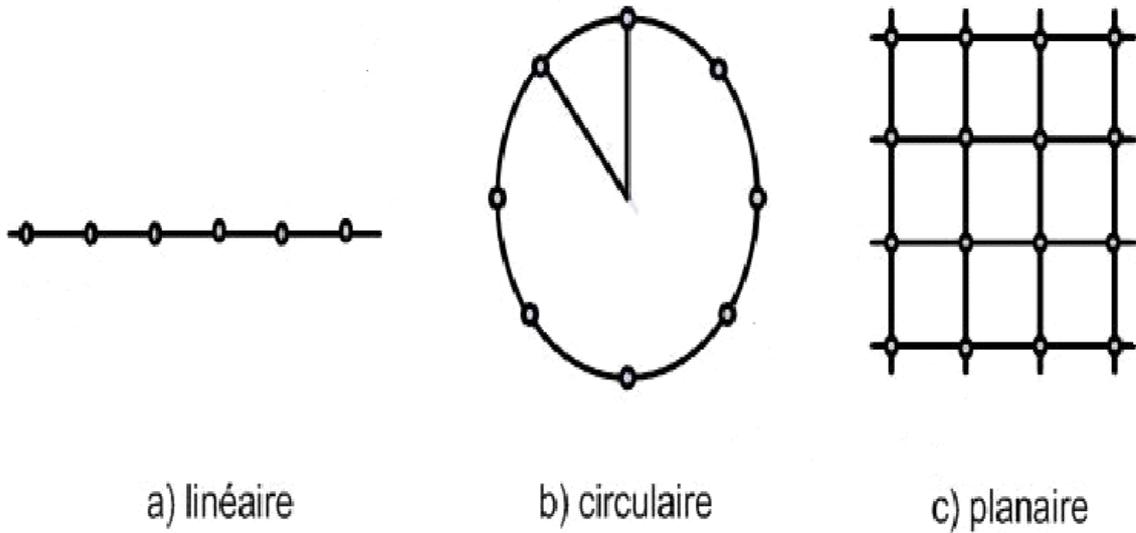


Figure II. 3: Différentes géométries de réseaux pour les antennes intelligentes.

- a) les réseaux linéaires : alignement des sources sur une droite,
- b) les réseaux circulaires : les sources sont disposées sur un cercle,
- c) les réseaux planaires : les sources sont disposées sur un plan,

II.4 Antennes intelligentes

Les systèmes à antennes intelligentes (smart antenna) entrent dans un domaine technologique multidisciplinaire dont la croissance a été très importante dans le courant de ces dernières décennies. Ils bénéficient des interactions croissantes entre l'électromagnétisme et le traitement de signal. L'intérêt de ces systèmes est leur capacité à réagir automatiquement, en temps réel, à des modifications du canal de propagation. Ils permettent de réduire les niveaux des lobes secondaires existants dans la direction de l'interférence, tout en maintenant le lobe principal en direction utile [14].

Habituellement, ces systèmes reposent sur un réseau d'antennes et sur un processeur récepteur adaptatif en temps réel qui attribue des pondérations aux éléments, afin d'optimiser le signal de sortie selon les algorithmes de contrôle prédéfinie [15].

II. 4. 1. Concept d'antennes intelligentes

Les antennes intelligentes représentent un moyen prometteur pour améliorer la capacité des systèmes de transmission.

L'idée est d'utiliser la dimension spatiale des capteurs. La figure II.4 Présent ce principe.

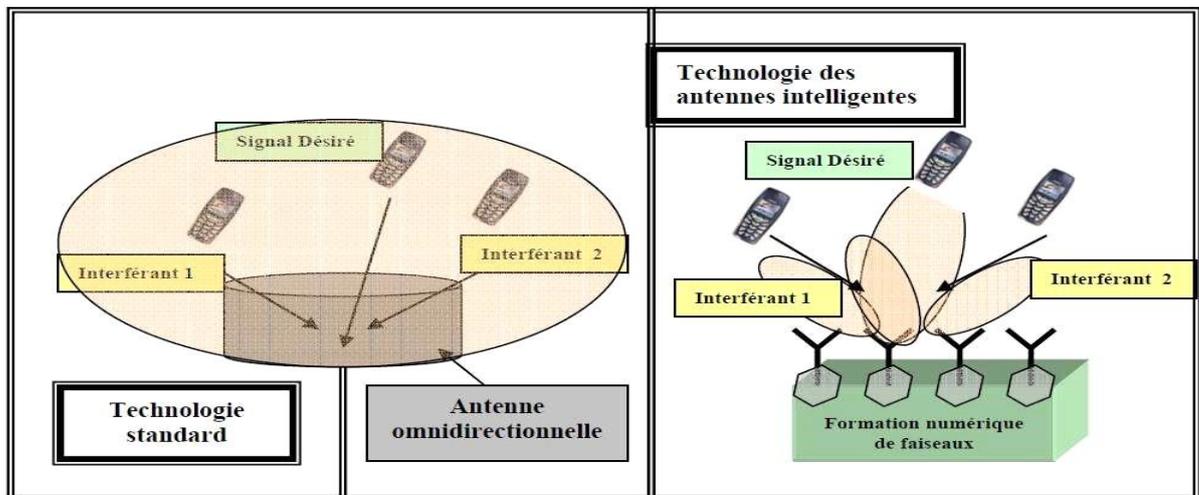


Figure II. 4:Le principe de base d'une antenne intelligente.

Le principe de base peut se résumer aux étapes suivantes :

1- La station de base intelligente focalise sur un signal en particulier plutôt de capter les signaux provenant de toutes les directions.

2- Former des faisceaux d'énergie orientés vers un usager particulier sans avoir à connaître l'emplacement de cet usager. Cela serait comparable à un dispositif de poursuite, une sorte de signature spatiale. C'est comme doter chaque téléphone cellulaire de sa propre liaison sans fil.

3- Il faut moins d'énergie pour focaliser un signal sur 20 degrés qu'il en faut pour l'orienter sur 360 degrés. Cette économie d'énergie prolongerait en outre la durée de vie de la pile.

Donc, en ajoutant un éventail d'antennes et ayant recours à un mode perfectionné de traitement numérique des signaux, on peut créer les antennes intelligentes [16].

II. 4. 2. Structure d'une antenne intelligente

La structure de l'antenne intelligente est illustrée sur (la figure II.5). Il est constitué d'un réseau de M antennes élémentaires dont la sortie est pondérée par un nombre complexe ω avant d'être sommée.

L'unité de contrôle de la pondération rend possible la mise en forme d'un diagramme de rayonnement en ajustant "intelligemment" l'amplitude et/ou la phase avec lesquelles les signaux reçus (ou émis) sur les différents éléments sont combinés.

Chapitre II : Antennes MIMO Massive Beamforming.

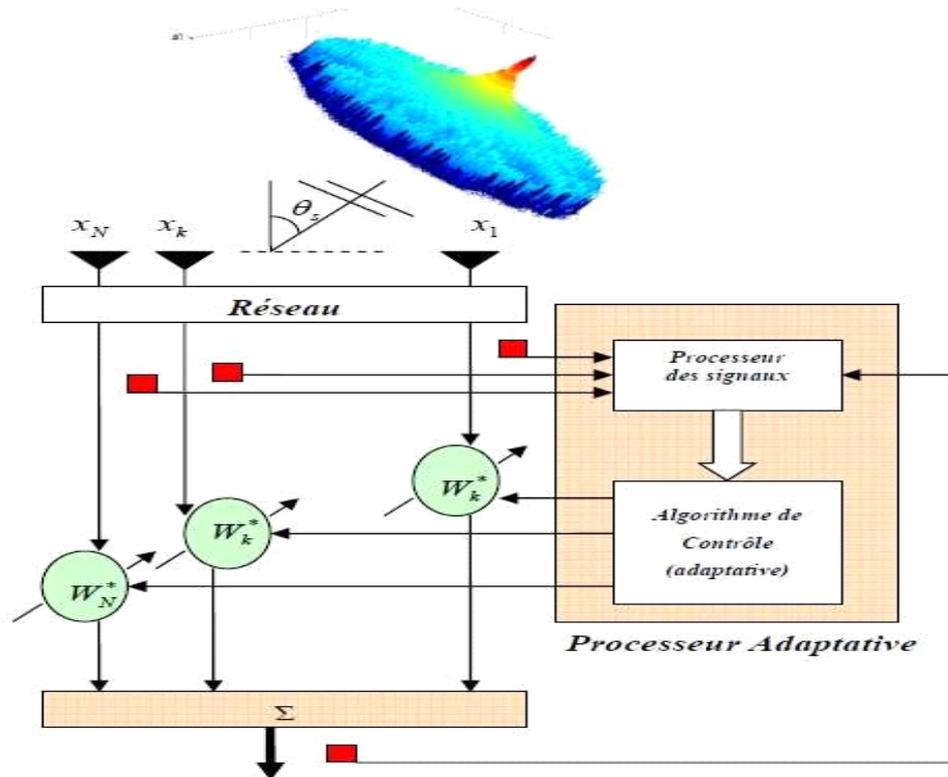


Figure II. 5: Schéma représentatif d'une antenne adaptative.

La sortie du réseau s'écrit [17] :

$$Y(t) = [W_1, W_2, \dots, W_N] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_N(t) \end{bmatrix} = W^H(t)X(t) \quad (\text{II.1})$$

Où $w^H(t)$ est le conjugué de la transposée complexe de du vecteur de poids.

$x_i(t)$ Désigne le signal reçu par la i -ème antenne.

Si nous posons que le premier élément de réseau est la référence de phase, le déphasage relatif du signal reçu au $n^{\text{ième}}$ élément est :

$$\phi_n = [2\pi d(n-1)/\lambda] \sin\theta_s \quad (\text{II.2})$$

Nous désignons par θ_s la direction du signal incident et e le diagramme élémentaire.

Alors le signal sur le $n^{\text{ième}}$ élément est :

Chapitre II : Antennes MIMO Massive Beamforming.

$$x_n(t) = e \cdot \exp j (wt + \phi_n) \quad (\text{II.3})$$

Nous obtenons en fin :

$$y(t) = \sum_{n=1}^N e \cdot w_n \cdot \exp j \left[\left(wt + \left(\frac{2nd(n-1)}{\lambda} \right) \right) \sin \theta_s \right] \quad (\text{II. 4})$$

II. 5. Avantages des antennes intelligentes

Les avantages de l'utilisation d'antennes intelligentes sont nombreux :

-Annulation des brouillages, et donc une augmentation du rapport signal à interférent (RSI). L'annulation dans les directions des interférents est réalisée en formant des zéros dans le diagramme de rayonnement (formation de voies).

-Augmentation de la portée grâce au gain obtenu sur le rapport signal à bruit (RSB).

Le lobe principal de l'antenne est orienté dans la direction du mobile, une localisation du mobile dans l'espace est donc nécessaire (d'où le terme "antenne intelligente").

- Limitation de la dispersion des retards en réduisant l'effet des trajets multiples : Augmentation des débits, diminution de la complexité de l'égaliseur dans la chaîne de réception.

-Augmentation de la capacité : Dans les systèmes cellulaires, l'annulation des interférences permet une réutilisation plus importante des fréquences (diminution du nombre de cellules par motif).

- Technique d'Accès Multiple par Répartition Spatiale (AMRS ou SDMA : Spatial Division Multiple Access) : Dans une même cellule, plusieurs utilisateurs qui occupent le même canal (temps, fréquence ou code) peuvent être séparés spatialement par l'antenne à condition que leurs écarts angulaires soient suffisants.

- Meilleurs services : l'utilisation des systèmes à antenne intelligente permet au réseau d'avoir l'accès aux informations spatiales sur les utilisateurs. Cette information peut être envoyée pour évaluer la position des utilisateurs avec beaucoup plus de précision que dans le réseau existant. Ceci peut être appliqué dans des services comme ceux des appels d'urgence.

- Dépenses réduites à cause du rendement de la puissance fournie par le système à antenne intelligente en combinant les entrées des multiples éléments pour optimiser le gain disponible vers l'utilisateur, et qui résulte dans les coûts réduits d'amplificateur et la faible consommation d'énergie.

- Meilleure sécurité : Dans une société qu'est de plus en plus dépendante de la conduite des affaires et de la transmission de renseignements personnels, la sécurité est une question importante. L'utilisation des systèmes à antenne intelligente diminue le risque de tapement de connexion.

L'intrus doit être situé dans le même sens que l'utilisateur comme on le voit à partir de la station de base [18].

- Compatibilité : La technologie d'antenne intelligente peut être appliquée à différentes techniques d'accès multiples, telles que TDMA, FDMA et CDMA. Elle est compatible avec presque toutes les méthodes de modulation et des bandes passantes [19].

II. 6. Types des antennes intelligentes

Il existe deux types de systèmes d'antennes intelligentes, les systèmes d'antennes à faisceau commuté (SBA) et les systèmes de réseaux d'antennes adaptatifs. Les deux types de systèmes peuvent ajouter du gain en fonction de l'emplacement de l'utilisateur.

Cependant, un seul système adaptatif peut atteindre un gain optimal en identifiant, en suivant et en minimisant les interférences de signal.

II. 6. 1. Systèmes d'antennes à faisceaux commutés SBA

Le système se compose de plusieurs faisceaux fixes avec une sensibilité élevée dans des directions spécifiques.

Le système détecte le signal le plus fort, et lorsque le mobile se déplace dans tout le secteur, il achèvera le passage d'un faisceau à un autre. Ce procédé de faisceau de commutation peut être considéré comme une extension du système cellulaire en forme de secteur, offrant ainsi une plus grande sélectivité spatiale. Comme la montre la figure II.6, un système à faisceaux commutés est formé essentiellement d'un réseau d'antennes lié à un réseau commutateur de faisceau (appelé aussi réseau d'alimentation de faisceaux), ce dernier est lié à un système de commutation permettant de choisir le faisceau le plus adéquat afin de localiser le signal d'intérêt propre à chaque usager [20].

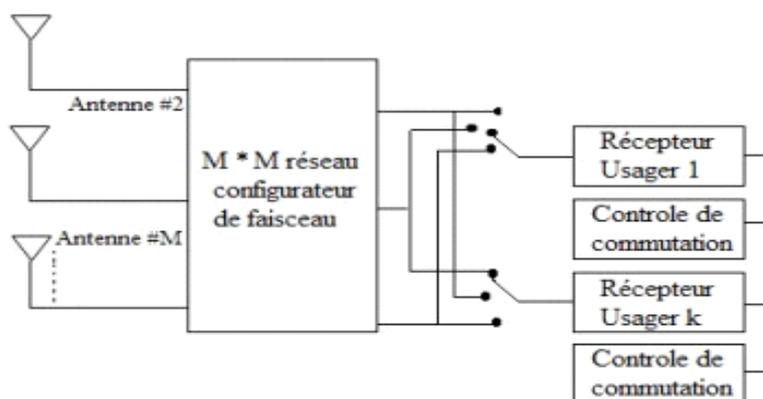


Figure II.6: Structure d'un système à faisceaux commutés SBA.

II. 6. 2. Antennes adaptatives

Le réseau adaptatif peut être défini comme étant un réseau d'antennes relié à un processeur de traitement de signal qui peut adapter le diagramme de rayonnement de l'antenne en privilégiant une direction désirée et en atténuant les directions des interférences. Actuellement, le réseau adaptatif est connu sous le nom de l'antenne intelligente.

La figure II.7 montre le principe de fonctionnement d'un réseau adaptatif. Les algorithmes sont optimisés pour s'adapter à des changements dynamiques du signal. Les pondérations complexes sont ensuite ajustées pour obtenir le diagramme de rayonnement optimal dont le lobe principal est orienté vers l'utilisateur désiré et les zéros du diagramme de rayonnement sont placés dans les directions des interférences [20].

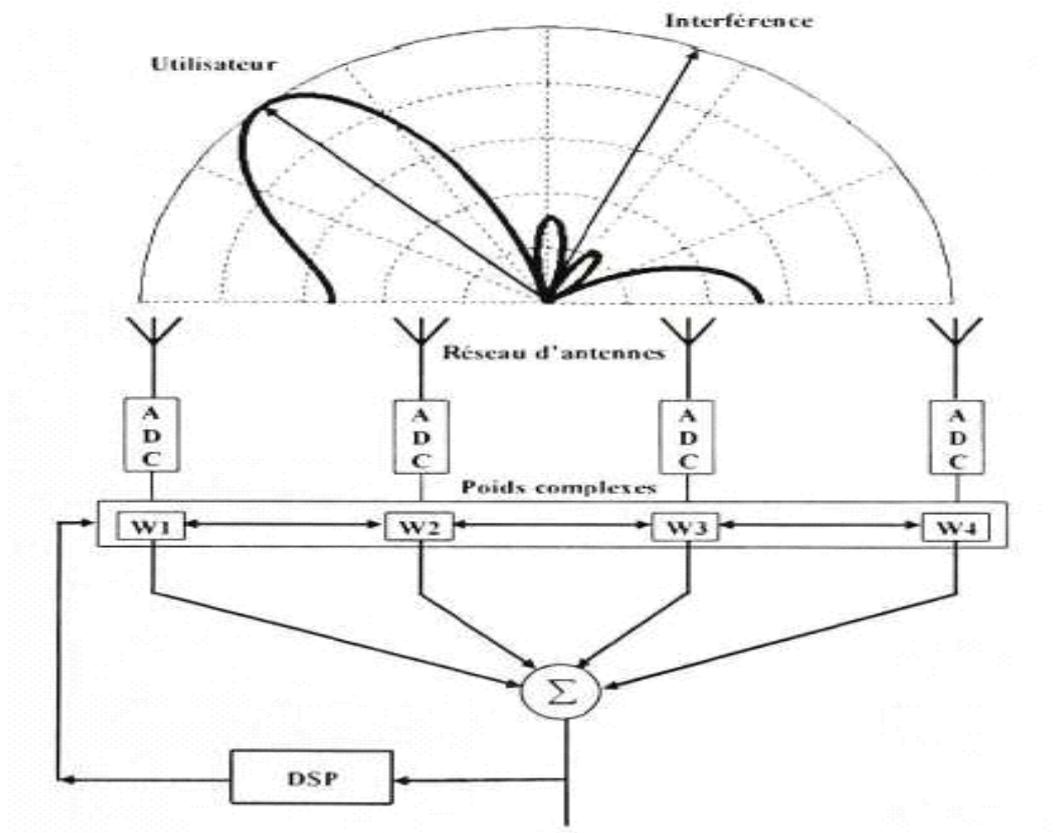


Figure II. 7: Réseau adaptatif à 4 éléments.

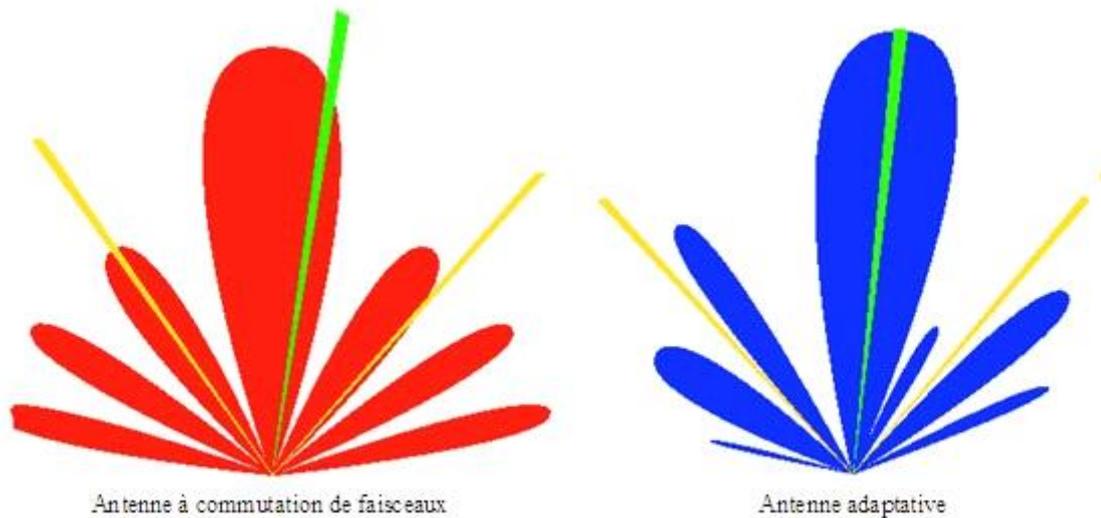


Figure II. 8: différence entre un système à commutation de faisceaux et un système adaptatif.

II. 7. Les algorithmes adaptatifs

Pour obtenir les pondérations optimales, diverses méthodes sont possibles. Nous introduirons ici les méthodes de formation adaptatives de faisceau. La désignation "adaptative" illustre le fait que ces formateurs contrairement à la formation de voies et annulation d'interférents dépendent du signal reçu.

Les algorithmes les plus utilisés sont :

- L'algorithme des moindres carrés récursifs (RLS).
- L'algorithme d'inversion directe de la matrice de convergence (DMI).
- Algorithme à module constant (CMA).
- L'algorithme à gradient stochastique (LMS).

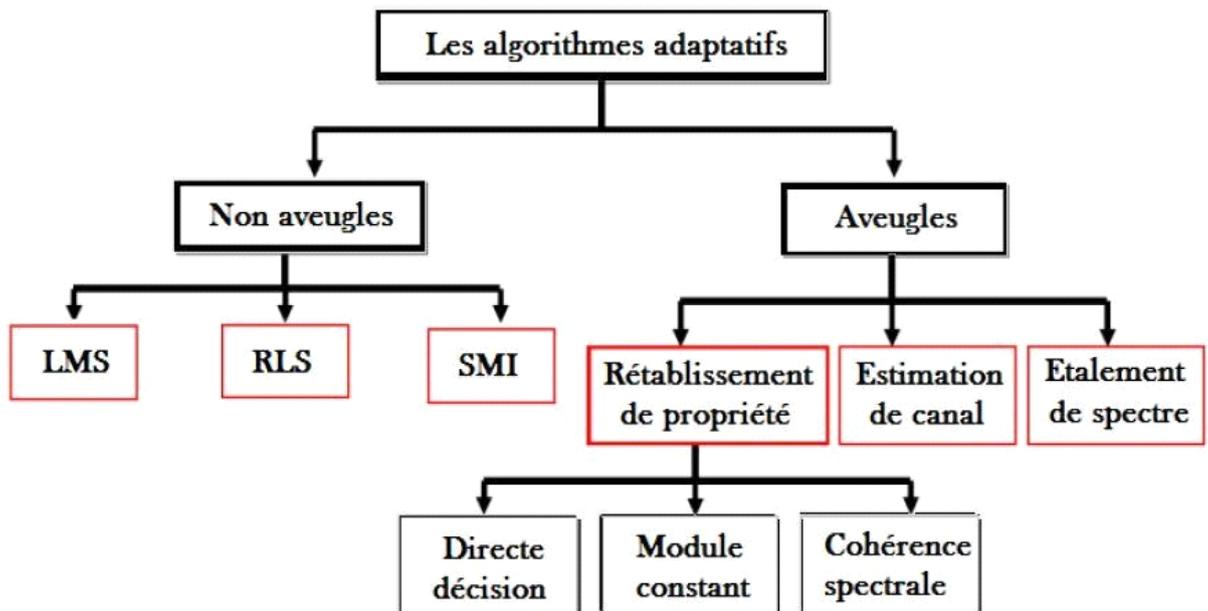


Figure II.9: Classification des algorithmes adaptatifs.

II. 8. Antennes MIMO beamforming

En général, le MIMO beamforming est défini comme un type de technique de filtrage spatial pour exploiter les propriétés spatiales des signaux à partir des capteurs multiples. Par exemple, en manipulant la phase et l'amplitude des signaux de chaque capteur, la formation des faisceaux peut être effectuée de telle sorte que les signaux d'une direction désirée soient ajoutés de manière constructive ou déconstruite.

Le terme beamforming est souvent utilisé comme technique à la fois à l'émetteur et au récepteur pour augmenter le SNR reçu. Alors que les termes précodage et combinaison sont toujours utilisés lorsque le filtre spatial est conçu pour atteindre le multiplexage spatial à l'émetteur et au récepteur.

II. 8. 1. Concept de base

Un système de communication à bande étroite de M antennes d'émission et N antennes de réception est illustré à la figure II.10.

Chapitre II : Antennes MIMO Massive Beamforming.

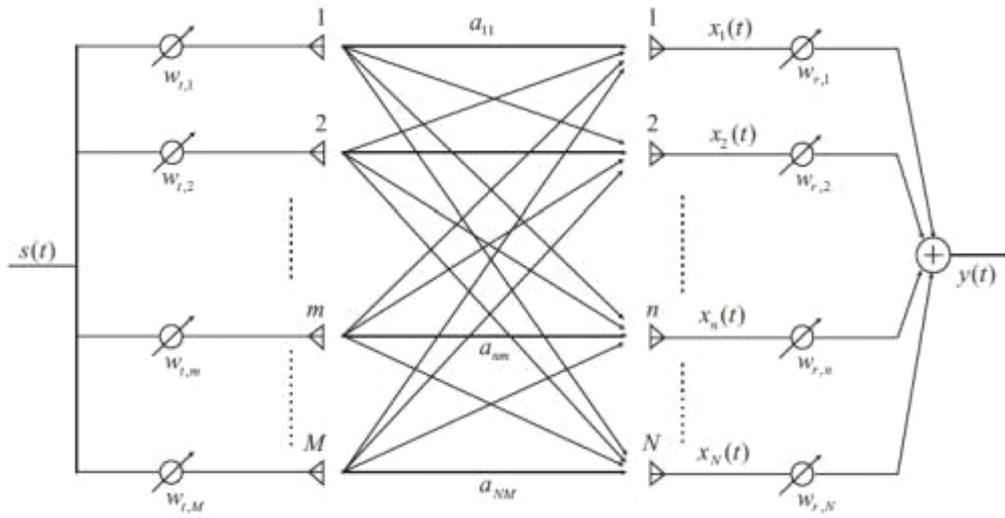


Figure II. 10 : Configuration de canal MIMO à bande étroite avec Beamforming.

Dans l'hypothèse d'un évanouissement plat, la caractéristique de propagation entre ces réseaux est exprimée par la matrice de transmission A , où a_n , représente la réponse du gain du canal entre le m -ième élément d'antenne dans l'émetteur et le n ième élément d'antenne dans le récepteur. Le signal de transmission $s(t)$ est distribué au réseau d'antennes et multiplié par la pondération complexe ω_t , pour le m -ième élément. En ajoutant le bruit blanc gaussien et en multipliant par le poids complexe ω_r , pour le n ième élément, le signal de sortie $y(t)$ du système est donné par [20] :

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{r,n}^* a_{n,m} \omega_t s(t) + \sum_{n=0}^{N-1} \omega_{r,n}^* n_n(t) \quad (\text{II.5})$$

L'équation (II.5) peut être exprimée sous une forme vectorielle.

$$y(t) = W_r^H A W_t^H s(t) + W_r^H n(t) \quad (\text{II.6})$$

Où :

$$W_r = [\omega_{r,0}, \omega_{r,1}, \dots \dots \dots, \omega_{r,M-1}]^T \quad (\text{II.7}) \text{ et}$$

$$W_t = [\omega_{t,0}, \omega_{t,1}, \dots \dots \dots \omega_{t,-1}]^T \quad (\text{II.8})$$

Le transposé du vecteur (ou matrices).

$(.)^T$ Le transposé du vecteur (ou matrices).

Chapitre II : Antennes MIMO Massive Beamforming.

$(\cdot)^H$ Représente le transposé hermitien du vecteur (ou matrice).

$(\cdot)^*$ Le conjugué du vecteur.

Sur la base de la méthode de combinaison de rapport maximal (MRC), avec les vecteurs de pondération d'émission et de réception w_t et w_r en termes de la contrainte $\|w_t\| = \|w_r\| = 1$, le maximum du rapport signal sur bruit de la sortie est donné par :

$$SNR_{out} = \frac{w_r^H A w_t w_t^H A^H w_r P_S}{\|w_r\|^2 P_N} \quad (\text{II.9})$$

Où P_S et P_N sont la puissance du signal transmis et le bruit. Ainsi, $\frac{P_S}{P_N}$ est mesuré à l'entrée SNR.

Si la matrice du canal A est bien connue des deux côtés, le SNR reçu est optimisé en choisissant les vecteurs de poids w_r et w_t en tant que vecteurs propre principal de gauche et de droite de la matrice du canal A . Le SNR reçu correspondant est donné par :

$$SNR_{out} = \lambda_{max} SNR_{in} \quad (\text{II.10})$$

Où λ_{max} est la plus grande valeur propre de la matrice de Wishart AA^H .

La capacité résultante peut être donnée par [34] :

$$C = \frac{\log_2(1 + \lambda_{max} SNR_{in}) b/s}{Hz} \quad (\text{II.11})$$

II. 9. Antennes MIMO massives beamforming

Les antennes MIMO massive sont constitués par un grand nombre de dipôles élémentaires appelés aussi éléments rayonnants de petite taille, et ceci est rendu possible grâce à l'utilisation de bandes de fréquences plus hautes.

L'utilisation d'un grand nombre de dipôles élémentaires permet de bénéficier de plusieurs émetteurs/récepteurs. Dans ce cas, un émetteur/récepteur peut utiliser soit une seule antenne élémentaire soit un regroupement d'antennes élémentaires [23].

Si le nombre d'antennes à une BS est significativement plus grand que le nombre d'utilisateurs desservis, le canal de chaque utilisateur depuis la BS est presque orthogonal à celui de tout autre utilisateur.

Cela permet à des techniques de traitement d'émission ou de réception très simples, telles que le Beamforming, d'être pratiquement optimales avec suffisamment d'antennes même en présence d'interférences.

Chapitre II : Antennes MIMO Massive Beamforming.

Plus le nombre d'antennes est élevé au niveau de la BS, plus le lobe principal du diagramme de rayonnement dirigé vers un utilisateur est étroit et plus la réjection d'interférences est forte. C'est l'un des principaux atouts d'un système MIMO massive Beamforming [24].

L'utilisation de réseaux d'antennes de très grande taille aux BS apporte de nouveaux problèmes, tels que des coûts de traitement de matériel et de signal considérablement accrus. L'installation des réseaux d'antennes de grande taille peut être difficile en pratique, ce qui stimule la conception et la mise en œuvre de réseaux d'antenne pour s'adapter avec souplesse à l'environnement complexe [25].

II.9.1 MIMO massives Beamforming Numérique

Le beamforming numérique est effectué sous forme de precodage numérique dont on multiplie le signal module en bande de base de chaque chaîne RF à l'émetteur ou au récepteur par un coefficient particulier. Le beamforming numérique offre une flexibilité et de bonnes performances comme le montre la figure II. 6.

Cette architecture avancée ne sert pas véritablement à l'orientation des faisceaux, mais plutôt à optimiser la couverture des différents récepteurs via des flux calculés individuellement. Chaque antenne possédant son propre émetteur-récepteur et convertisseur de données, l'ensemble peut traiter et diffuser plusieurs flux de données indépendants.

La station de base (BS) et le terminal forment une boucle de régulation : les signaux pilotes du terminal sont utilisés pour réajuster en continu la matrice de precodage dans la BTS pour ce terminal. Chaque récepteur est ainsi alimenté avec des signaux parfaitement adaptés via différents chemins. Ce type de régulation est optimal dans les systèmes DRT où le canal radio affiche un comportement réciproque en liaison montante et descendante [36].

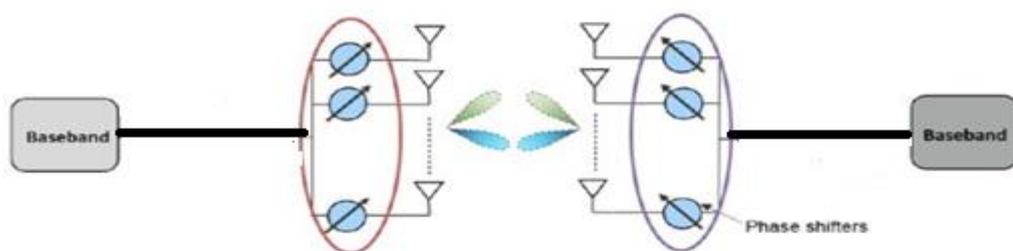


Figure II. 11 : MIMO Beamforming Numérique

II.9.2 MIMO massives Beamforming analogique

Le Beamforming analogique est souvent mise en œuvre à l'aide d'un réseau de déphaseurs à commande numérique. Dans cette configuration, les déphaseurs RF peuvent être actifs ou passifs,

Chapitre II : Antennes MIMO Massive Beamforming.

plusieurs éléments d'antenne sont connectés via des déphaseurs à une seule chaîne RF, comme illustrés sur la figure II.12.

Les poids des déphaseurs sont ajustés de manière adaptative en utilisant un traitement numérique du signal en utilisant une stratégie spécifique pour diriger le faisceau et atteindre un objectif donné, par exemple pour maximiser la puissance du signal reçu[36].

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

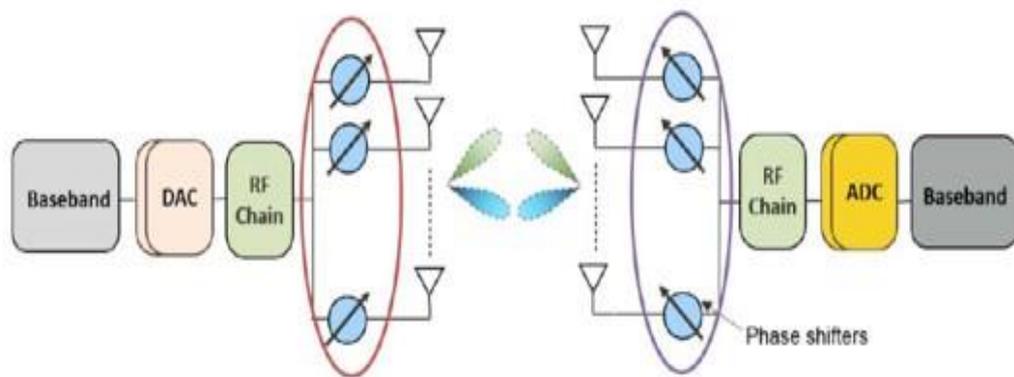


Figure II.12: MIMO Beamforming analogique

II.9.3 Beamforming hybride

Le compromis proposé plus récemment entre les architectures de Beamforming numériques conventionnelles où le nombre de chaînes RF est égal à celui des antennes, et les architectures analogiques à complexité réduite impliquent l'utilisation d'une combinaison des deux. Cette architecture hybride tire parti des avantages des deux architectures, elle divise le processus d'optimisation MIMO entre les domaines analogique et numérique. Dans ces systèmes hybrides, des chaînes RF numériques qui sont beaucoup moins nombreuses que le nombre total d'antennes sont adoptées, comme représentée sur la figure II.13: $N_s < L_t < N_t$ et $N_r > L_r > N_s$, chacune étant liée au réseau d'antennes via un réseau de déphaseurs analogique, cela augmente considérablement le nombre de déphaseurs, mais, il s'agit d'un faible coût par rapport à la chaîne RF numérique.

En supposant que $N_s > 1$, alors l'approche hybride permet la mise en œuvre du multiplexage spatial et du MIMO multi-utilisateur [36].

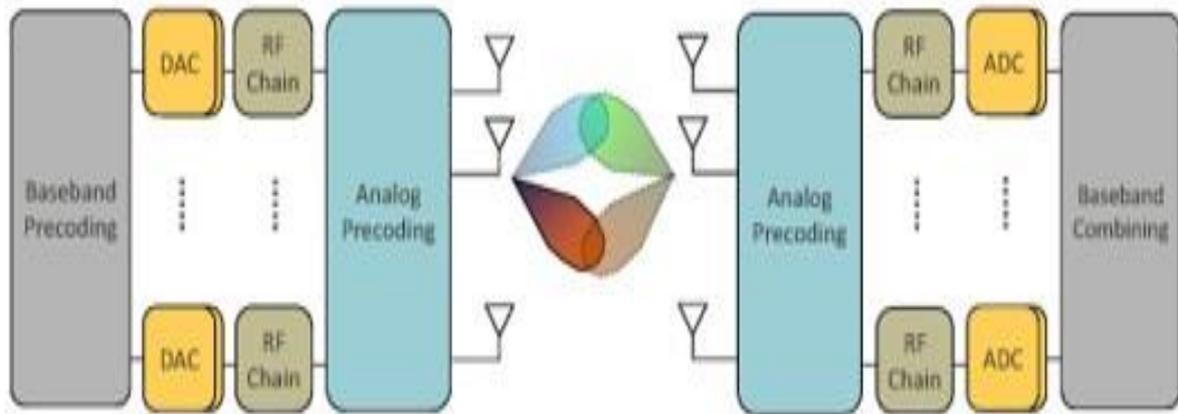


Figure II. 7: Schéma bloc du Système MIMO Beamforming hybride analogique-numérique

1. MIMO massive beamforming hybrid point a point

Un système MIMO peut être utilisé de deux manières différentes :

-Un système MIMO point-à-point met en œuvre une communication entre un émetteur et un récepteur, chacun ayant un nombre d'antennes supérieur à 1. On parle de point-à-point car, à un instant t et à une fréquence donnée, il n'y a qu'un seul utilisateur concerné par la transmission. En d'autres termes la SB rayonne dans toute la cellule et alloue à chaque utilisateur une plage temporelle (TDMA) ou fréquentielle (FDMA) sur laquelle toutes les informations transportées par cette ressource leur sont destinés. Une répartition

-En code (CDMA) est également possible et vise à séparer les différents utilisateurs en leur appliquant à chacun une séquence orthogonale. La figure II.14 illustre une répartition en temps ou en fréquence (la ressource exploitée étant représentée par les différentes couleurs). Dans cet exemple simpliste la SB émet les données de chaque UE successivement, le premier à recevoir étant le terminal jaune, le 2^e le vert, le 3^e le rouge et le dernier le vert.

On voit que la SB rayonne uniformément dans toute la cellule, ce qui est peu efficace d'un point de vue énergétique.[28]

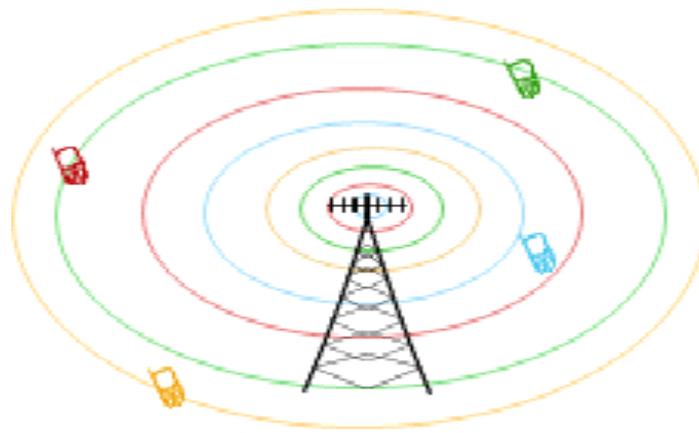


Figure II. 8: système beamforming Point à point.

2. MIMO massives beamforming hybride Multi-Utilisateurs

En MIMO multi-utilisateurs, les traitements réalisés à la Mass-BS permettent de séparer spatialement les utilisateurs afin de leur allouer toute la bande passante. En d'autres termes cela revient à ouvrir un lien RF entre la Mass-BS et chaque utilisateur. On voit en effet que sur la figure II.15 les utilisateurs sont visés individuellement ce qui permet d'éviter tout rayonnement inutile dans des directions indésirables. Il en résulte une plus grande efficacité énergétique et une capacité améliorée grâce à la possibilité d'allouer la totalité de la bande, sur tous les temps symboles, à chaque utilisateur selon le principe du SDMA.[28]

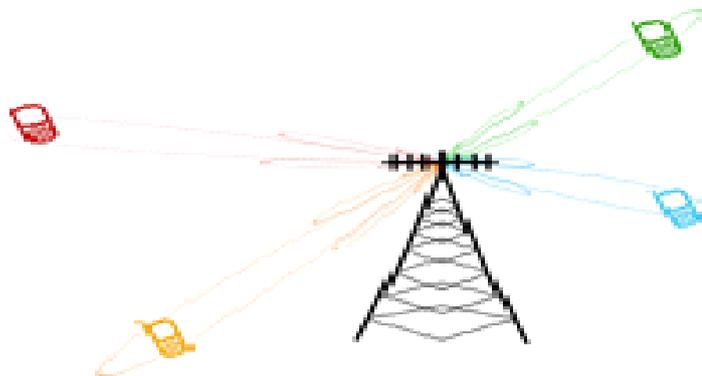


Figure II.15: système beamforming Multi-utilisateurs.

II. 10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les antennes intelligentes pour le MIMO massive.

Premièrement, nous avons introduit la définition des antennes et les antennes réseaux. Nous avons aussi introduit le concept, la définition et les avantages des antennes intelligentes et de deux catégories d'antennes (les systèmes à faisceaux commuté SBA et les systèmes de réseaux adaptatifs). Puis, nous avons présenté des algorithmes adaptatifs. Ensuite, nous avons également présenté plus en détail les antennes MIMO beamforming et les antennes MIMO massives Beamforming.

Chapitre III :

Résultats et simulations.

III. 1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudierons le système MIMO massive hybride beamforming qui comprend deux vecteurs de pondérations à l'émission et deux vecteurs de pondération à la réception. Le but de cette architecture hybride est de simplifier et minimiser le cout de réalisation du système en diminuant le nombre des canaux RF. Pour comparer les performances du système en termes d'efficacité spectrale par rapport au système MIMO beamforming hybride nous étudierons dans un premier temps l'impact du nombre d'antennes à l'émission et à la réception sur les performances du système. Ensuite nous examinerons l'effet de la variation du nombre de chaines RF à l'émission et à la réception sur l'efficacité spectrale du système et finalement nous étudierons l'impact du nombre de flux de données sur ces performances.

III. 2. Système MIMO massive beamforming hybride

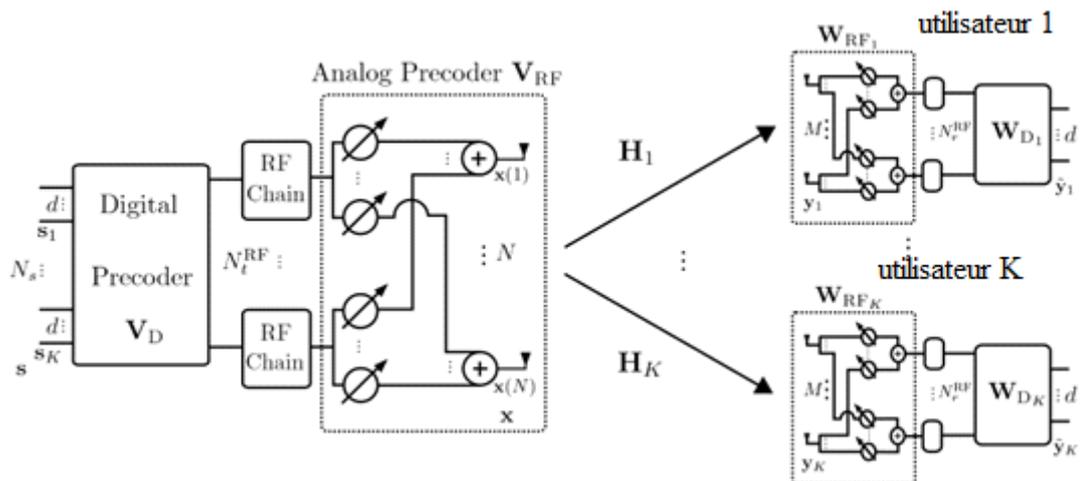


Figure III. 1: L'architecture de MIMO massive beamforming hybride multi-utilisateurs.

Pour résoudre le problème du nombre limité de chaînes RF, ce chapitre envisage une architecture de formation de faisceau hybride à deux étages dans laquelle le formateur de faisceau est construit par concaténation d'un formateur de faisceau numérique (bande de base) de faible dimension et d'un formateur de faisceau RF (analogique) mis en œuvre à l'aide de déphaseurs. Dans la première partie de ce chapitre, nous montrons que le nombre de chaînes RF dans l'architecture de formation de faisceau hybride doit seulement être égal au nombre total de flux de données pour atteindre exactement les mêmes performances que celles de tout schéma de formation de faisceau entièrement numérique, quel que soit le nombre d'éléments d'antennes dans le système.

Chapitre III : Résultats et simulations.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous examinons le problème de conception de la formation de faisceau hybride lorsque le nombre de chaînes RF est inférieur au double du nombre de flux de données pour le scénario de communication MIMO (multiple-input multiple-output) point à point avec des réseaux d'antennes à grande échelle aux deux extrémités. Pour cela, nous proposons des algorithmes heuristiques pour concevoir les formateurs de faisceaux hybrides pour le problème de la maximisation de l'efficacité spectrale globale sous une contrainte de puissance totale au niveau de l'émetteur, nous supposons aussi une information sur l'état du canal (CSI) parfaite et instantanée au niveau de la station de base et de tous les terminaux utilisateurs.

Dans ce chapitre, nous examinons l'architecture alternative de formation de faisceau hybride numérique et analogique qui a suscité un grand intérêt dans les travaux récents sur les systèmes de réseaux d'antennes à grande échelle [29]-[30].

III.3 Model de système

Considérons un système MIMO multi-utilisateurs à bande étroite descendant dans lequel une station de base avec N antennes et N_t^{RF} chaînes RF d'émission pour K utilisateurs, chacun équipé de M antennes et N_r^{RF} chaînes RF de réception. De plus, on suppose que chaque utilisateur a besoin de d flux de données et que $N_t^{\text{RF}} \leq N$ et $d \leq N_r^{\text{RF}} \leq M$. Comme le nombre de chaînes RF d'émission/réception est limité, la mise en œuvre d'un beamforming entièrement numérique, qui nécessite une chaîne RF dédiée par élément d'antenne, n'est pas possible. Au lieu de cela, nous considérons une architecture de formation de faisceau hybride numérique et analogique de deux étages au niveau de la station de base et des terminaux des utilisateurs, comme le montre la figure III.1.

Dans la structure de formation de faisceaux hybride, la station de base modifie d'abord le flux de données numériquement en bande de base à l'aide d'un précodeur numérique V_D , de dimension $N_t^{\text{RF}} \times N_s$, où $N_s = Kd$, puis convertit les signaux traités en fréquence porteuse en passant par N_t^{RF} chaînes RF. Ensuite, la station de base utilise un précodeur RF V_{RF} de dimension $N \times N_t^{\text{RF}}$ qui est mis en œuvre à l'aide des déphaseurs analogiques, c'est-à-dire avec $|V_{\text{RF}}(i,j)|^2 = 1$, pour construire le signal transmis final. Mathématiquement, le signal transmis peut-être écrit comme suit :

$$X = V_{\text{RF}} V_D s = \sum_{\ell=1}^K V_{\text{RF}} V_{D\ell} s_\ell \quad (\text{III.1})$$

Où $V_D = [V_{D1}, \dots, V_{DK}]$, et $s \in \mathbb{C}^{N_s \times 1}$ est le vecteur de symboles de données qui est la concaténation du vecteur de flux de données de chaque utilisateur tel que $s = [s_1^T, \dots, s_K^T]^T$, où s_ℓ est le vecteur de flux de données pour l'utilisateur ℓ . En outre, on suppose que $E[ss^H] = \mathbf{I}_{N_s}$.

Chapitre III : Résultats et simulations.

Pour l'utilisateur k, le signal reçu peut-être modéliser comme suit :

$$y_k = H_k V_{RF} V_{Dk} s_k + H_k \sum_{\ell \neq k} V_{RF} V_{D\ell} s_\ell + z_k \quad (\text{III.2})$$

et

$$\tilde{y}_k = \underbrace{W_{tk}^H H_k V_{tk} s_k}_{\text{signaux souhaités}} + \underbrace{W_{tk}^H H_k \sum_{\ell \neq k} V_{t\ell} s_\ell}_{\text{les interférences effectives}} + \underbrace{W_{tk}^H z_k}_{\text{bruit effective}} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Où } V_{tk} = V_{RF} V_{Dk} \text{ et } W_{tk} = W_{RFk} W_{Dk} .$$

Dans un tel système, l'efficacité spectrale globale de l'utilisateur k, dans l'hypothèse d'une signalisation gaussienne, est [31].

$$R_k = \log_2 \left| I_M + W_{tk} C_k^{-1} W_{tk}^H H_k V_{tk} V_{tk}^H H_k^H \right| \quad (\text{III.4})$$

Où $C_k = W_{tk}^H H_k (\sum_{\ell \neq k} V_{t\ell} V_{t\ell}^H) H_k^H W_{tk} + \sigma^2 W_{tk}^H W_{tk}$ est la covariance de l'interférence plus le bruit à l'utilisateur k.

Le problème qui nous intéresse dans ce chapitre est de maximiser l'efficacité spectrale globale sous la contrainte de la puissance d'émission totale, en supposant une connaissance parfaite de H_k , c'est-à-dire que nous cherchons à trouver les précodeurs hybrides optimaux à la station de base BS et les combineurs hybrides optimaux pour chaque utilisateur en résolvant le problème suivant :

$$\text{Maximiser}_{V_{RF}, V_D, W_{RF}, W_D} \sum_{k=1}^K \beta_k R_k \quad (\text{III.5.a})$$

$$\text{Tr}(V_{RF} V_D V_D^H V_{RF}^H) \leq P \quad (\text{III.5.b})$$

$$|V_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j \quad (\text{III.5.c})$$

$$|W_{RFk}(i, j)|^2 = 1 \quad \forall i, j, k \quad (\text{III.5.d})$$

où P est la puissance total de la station de base et le poids β_k représente la priorité de l'utilisateur k, i.e. $\frac{\beta_k}{\sum_{\ell=1}^K \beta_\ell}$ c'est-à-dire que plus il est grand, plus l'utilisateur k est prioritaire.

III.3.1. Conception de formateur de faisceaux hybride pour les système MIMO à grande échelle et à utilisateur unique

Cette partie de ce chapitre porte sur la conception de formateurs de faisceaux hybrides. Nous considérons d'abord un système MIMO à grande échelle point à point dans lequel une station de base avec N antennes envoie N_s symboles de données à un utilisateur avec M antennes où $\min(N, M) \gg N_s$. Sans perte de généralité, nous supposons un nombre identique de chaînes RF d'émission/réception, c'est-à-dire $N_t^{RF} = N_r^{RF} = N_{RF}$, pour simplifier la notation. Pour un tel système à structure hybride, l'expression de l'efficacité spectrale dans (4) peut être simplifiée en :

$$R = \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{W}_t (\mathbf{W}_t^H \mathbf{W}_t)^{-1} \mathbf{W}_t^H \mathbf{H} \mathbf{V}_t^H \mathbf{H}^H \right| \quad (\text{III.6})$$

où $\mathbf{V}_t = \mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_D$ et $\mathbf{W}_t = \mathbf{W}_{RF} \mathbf{W}_D$.

Dans cette partie, nous nous concentrons d'abord sur la conception de la formation de faisceau hybride dans le cas où le nombre de chaînes RF est égal au nombre du flux de données, c'est-à-dire $N^{RF} = N_s$. Pour ce cas, nous proposons un algorithme heuristique qui permet d'atteindre un taux proche de la capacité. À la fin de cette partie, nous montrons que, par d'autres approximations, l'algorithme de conception de formation de faisceau hybride proposé pour

$N^{RF} = N_s$, peut également être utilisé dans le cas de $N_s < N^{RF} < 2N_s$.

Le problème de la maximisation de l'efficacité dans (5) implique une optimisation conjointe des précodeurs et des combinateurs hybrides. Cependant, la conception conjointe de la matrice d'émission-réception, pour un problème d'optimisation à contraintes similaires, est généralement difficile à résoudre [32]. En outre, les contraintes sur les éléments des formateurs de faisceaux analogiques dans (5c) et (5d) rendent improbable le développement d'un algorithme peu complexe pour trouver la solution optimale exacte [33].

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 combinateur hybride.

Le problème de conception des précodeurs hybrides peut être divisé en deux étapes comme suit. Le problème de conception de l'émetteur peut être écrit comme suit :

$$\max_{V_{RF}, V_D} \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} H V_{RF} V_D V_D^H V_{RF}^H H^H \right| \quad (\text{III.7.a})$$

$$s.t. \quad \text{Tr}(V_{RF} V_D V_D^H V_{RF}^H) \leq P \quad (\text{III.7.b})$$

$$|V_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j \quad (\text{III.7.c})$$

Ce chapitre propose l'algorithme heuristique suivant pour obtenir une bonne solution au problème (7). Tout d'abord, nous dérivons la solution du précodeur numérique du problème (7) pour un précodeur RF fixe, V_{RF} . Ensuite, nous supposons un tel précodeur numérique, on propose un algorithme itératif pour trouver un précodeur RF optimal local.

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

La première partie de l'algorithme considère la conception de V_D en supposant que V_{RF} est fixe. Pour un précodeur RF fixe, $H_{eff} = H V_{RF}$ peut être considéré comme un canal effectif, et le problème de conception du précodeur numérique peut s'écrire comme suit :

$$\max_{V_D} \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} H_{eff} V_D V_D^H H_{eff}^H \right| \quad (\text{III.8.a})$$

$$s.t. \quad \text{Tr}(Q V_D V_D^H) \leq P \quad (\text{III.8.b})$$

où $Q = V_{RF}^H V_{RF}$.

Ce problème a une solution bien connue de remplissage d'eau (Waterfilling) comme :

$$V_D = Q^{-1/2} U_e \Gamma_e \quad (\text{III.9})$$

où U_e est l'ensemble des vecteurs singuliers de droite correspondant aux N_s plus grandes valeurs singulières de $H_{eff} Q^{-1/2}$ et Γ_e est la matrice diagonale des puissances allouées à chaque flux.

Notez que pour les systèmes MIMO à grande échelle, $Q \approx N\mathbf{I}$ avec une forte probabilité [27].

Cela est dû au fait que les éléments diagonaux de $Q = V_{RF}^H V_{RF}$ sont exactement N tandis que les éléments hors diagonale peuvent être approximés comme une sommation de N termes indépendants, ce qui est bien inférieur à N avec une forte probabilité pour un grand N .

Cette propriété nous permet de montrer que le précodeur numérique optimal pour $N^{RF} = N_s$ satisfait typiquement $V_D V_D^H \propto \mathbf{I}$.

Chapitre III : Résultats et simulations.

La constante de proportionnalité peut être obtenue avec une autre hypothèse d'allocation de puissance égale pour tous les flux. C'est-à-dire $\Gamma_e \approx \sqrt{P/N^{RF}} I$. Ainsi, le précodeur numérique optimal est $\mathbf{V}_D \approx \gamma \mathbf{U}_e$ où $\gamma^2 = P/(N N^{RF})$.

Puisque \mathbf{U}_e est une matrice unitaire pour le cas où $N^{RF} = N_s$, nous avons $\mathbf{V}_D \mathbf{V}_D^H \approx \gamma^2 \mathbf{I}$.

L'algorithme proposé pour la conception du formateur de faisceaux numériques est résumé dans l'algorithme 1.

Algorithme 1

1 : En supposant que $\mathbf{V}_D \mathbf{V}_D^H = \gamma \mathbf{I}$ ou $\gamma = \sqrt{P/(N N^{RF})}$ trouver \mathbf{V}_{RF} en résolvant le problème dans (10) en utilisant l'algorithme 2.

2 : Calculer $\mathbf{V}_D = (\mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{V}_{RF})^{-1/2} \mathbf{U}_e \Gamma_e$, où \mathbf{U}_e et Γ_e sont définis comme suit (9).

3 : Trouver \mathbf{W}_{RF} en résolvant le problème dans (14) en utilisant l'Algorithme 2.

4 : Calculer $\mathbf{W}_D = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H} \mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_D$

Où $\mathbf{J} = \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H} \mathbf{V}_{RF} \mathbf{V}_D \mathbf{V}_D^H \mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{H}^H \mathbf{W}_{RF} + \sigma^2 \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{W}_{RF}$

B. Conception du précodeur RF pour $N^{RF} = N_s$

Maintenant, nous cherchons à concevoir le précodeur RF en supposant que $\mathbf{V}_D \mathbf{V}_D^H \approx \gamma^2 \mathbf{I}$.

Sous cette hypothèse, la contrainte de puissance de l'émetteur (8b) est automatiquement satisfaite pour toute conception de \mathbf{V}_{RF} . Par conséquent, le précodeur RF peut être obtenu en résolvant le problème suivant :

$$\max_{\mathbf{V}_{RF}} \log_2 \left| I + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{F}_1 \mathbf{V}_{RF} \right| \quad (\text{III.10})$$

$$s.t \quad |\mathbf{V}_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j$$

$$\text{Où} \quad \mathbf{F}_1 = \mathbf{H}^H \mathbf{H}.$$

La nature découplée des contraintes dans cette formulation nous permet de concevoir un algorithme itératif de descente de coordonnées sur les éléments du précodeur RF.

Afin d'extraire la contribution de $\mathbf{V}_{RF}(i, j)$ à la fonction objective (10), il est montré dans [34], [35] que la fonction objective (10) peut être réécrite comme suit :

Chapitre III : Résultats et simulations.

$$\log_2 |C_j| + \log_2 (2 \operatorname{Re} \{V_{RF}^*(i, j) \eta_{ij}\} + \zeta_{ij} + 1) \quad (\text{III.11})$$

où

$$C_j = I + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} (\bar{V}_{RF}^j)^H F_1 \bar{V}_{RF}^j$$

Et \bar{V}_{RF}^j est la sous-matrice de V_{RF} dont la j -ème colonne est supprimée,

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

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

$$\operatorname{Et} G_j = \frac{\gamma^2}{\sigma^2} F_1 - \frac{\gamma^4}{\sigma^4} F_1 \bar{V}_{RF}^j C_j^{-1} (\bar{V}_{RF}^j)^H F_1 .$$

Puisque C_j , ζ_{ij} et η_{ij} sont indépendants de $V_{RF}(i, j)$, si nous supposons que tous les éléments du précodeur RF sont fixes à l'exception de $V_{RF}(i, j)$, la valeur optimale pour l'élément du précodeur RF à la i ème ligne et à la j ème colonne est donnée par

$$V_{RF}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{si } \eta_{ij} = 0, \\ \frac{\eta_{ij}}{|\eta_{ij}|}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Cela nous permet de proposer un algorithme itératif qui commence avec un précodeur RF initial faisable satisfaisant (12), c'est-à-dire $V_{RF}^{(0)} = \mathbf{1}_{N \times N^{RF}}$, puis met à jour séquentiellement chaque élément du pré codeur RF selon (12) jusqu'à ce que l'algorithme converge vers une solution optimale locale de V_{RF} du problème (10). Notez que, puisque dans chaque étape de mise à jour des éléments de l'algorithme proposé, la fonction objective (12) augmente (ou du moins ne diminue pas), la convergence de l'algorithme est donc garantie.

L'algorithme proposé pour la conception du formateur de faisceau RF dans (12) est résumé dans l'algorithme 2.

Algorithme 2 :

Exiger : F_1, γ^2, σ^2

1 : Initialiser $V_{RF} = \mathbf{1}_{N \times N^{RF}}$

2 : pour $j = 1 \rightarrow N^{RF}$ faire

3 : Calculer $C_j = I + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} (\bar{V}_{RF}^j)^H F_1 \bar{V}_{RF}^j$

4 : Calculer $G_j = \frac{\gamma^2}{\sigma^2} F_1 - \frac{\gamma^4}{\sigma^4} F_1 \bar{V}_{RF}^j C_j^{-1} (\bar{V}_{RF}^j)^H F_1$

5 : pour $i = 1 \rightarrow N$ do

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

$$7 : V_{RF}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{si } \eta_{ij} = 0 \\ \frac{\eta_{ij}}{|\eta_{ij}|}, & \text{ailleurs} \end{cases}$$

8 : fin pour

9 : fin pour

10 : Vérifier la convergence. Si c'est le cas, arrêter ; sinon, passer à l'étape 2.

C. Conception de la combinaison hybride pour $N^{RF} = N_s$

Enfin, nous cherchons à concevoir les combineurs hybrides qui maximisent l'efficacité spectrale globale dans (6) en supposant que les précodeurs hybrides sont déjà conçus.

Dans le cas où $N^{RF} = N_s$, le combineur numérique est une matrice carrée sans contrainte sur ses entrées. Par conséquent, sans perte d'optimalité, la conception de \mathbf{W}_{RF} et \mathbf{W}_D peut être découpée en concevant d'abord le combineur RF en supposant que le combineur numérique est optimal.

Et ensuite trouver le combineur numérique optimal pour ce combineur RF. Par conséquent, le problème de conception du combineur RF peut être écrit comme suit :

$$\max \log_2 \left| I + \frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{W}_{RF})^{-1} \mathbf{W}_{RF}^H F_2 \mathbf{W}_{RF} \right| \quad (\text{III.13.a})$$

$$s.t \quad |\mathbf{W}_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j \quad (\text{III.13.b})$$

Chapitre III : Résultats et simulations.

Où $\mathbf{F}_2 = \mathbf{H}\mathbf{V}_t\mathbf{V}_t^H\mathbf{H}^H$.

Ce problème est très similaire au problème de conception du précodeur RF dans (12), à l'exception du terme supplémentaire $(\mathbf{W}_{RF}^H\mathbf{W}_{RF})^{-1}$.

De manière analogue à l'argument avancé dans la Section III.2-B pour le précodeur RF, on peut montrer que le combineur RF satisfait typiquement $\mathbf{W}_{RF}^H\mathbf{W}_{RF} \approx M\mathbf{I}$, pour un grand M.

Par conséquent, le problème (13) peut-être approximé sous la forme du problème de conception du précodeur RF dans (13) et l'algorithme 1 peut être utilisé pour concevoir \mathbf{W}_{RF} en remplaçant \mathbf{F}_2 et M^{-1} par \mathbf{F}_1 et γ^2 , respectivement, c'est-à-dire,

$$\max_{\mathbf{W}_{RF}} \log_2 \left| I + \frac{1}{M\sigma^2} \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{F}_2 \mathbf{W}_{RF} \right| \quad (\text{III.14.a})$$

$$s.t. \quad |\mathbf{W}_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j \quad (\text{III.14.b})$$

Enfin, en supposant que tous les autres formateurs de faisceaux sont fixes, le combineur numérique optimal est la solution MMSE comme suit :

$$\mathbf{W}_D = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H} \mathbf{V}_t \quad (\text{III.15})$$

$$\text{Où } \mathbf{J} = \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H} \mathbf{V}_t \mathbf{V}_t^H \mathbf{H}^H \mathbf{W}_{RF} + \sigma^2 \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{W}_{RF}$$

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

Dans la section III, nous montrons comment concevoir les formateurs de faisceau hybrides pour le cas $N^{RF} \geq 2N_s$ pour lequel la structure hybride peut atteindre le même taux que le taux du formateur de faisceau optimal entièrement numérique. Plus tôt dans cette section, nous avons proposé un algorithme heuristique de conception de formateurs de faisceaux hybrides pour

$$N^{RF} = N_s.$$

Nous nous proposons maintenant de concevoir les formateurs de faisceaux hybrides dans le cas où $N_s < N^{RF} < 2N_s$.

Pour $N_s < N^{RF} < 2N_s$, le problème de conception de l'émetteur peut toujours être formulé comme dans (7).

Pour un précodeur RF fixe, on peut voir que le précodeur numérique optimal peut toujours être trouvé selon (9), mais il satisfait maintenant $\mathbf{V}_D \mathbf{V}_D^H \approx \gamma^2 [\mathbf{I}_{N_s} \mathbf{0}]$.

Pour un tel précodeur numérique, la fonction objective de (7) qui doit être maximisée sur \mathbf{V}_{RF} peut-être réécrite comme suit :

Chapitre III : Résultats et simulations.

$$\log_2 \prod_{i=1}^{N_s} \left(1 + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \lambda_i\right) \quad (\text{III.16})$$

Où λ_i est la i ème plus grande valeur propre de $V_{RF}^H H^H H V_{RF}$.

En raison des difficultés d'optimisation sur une fonction d'un sous-ensemble de valeurs propres d'une matrice, nous approximations (16) avec une expression comprenant toutes les valeurs

propres c'est-à-dire $\log_2 \prod_{i=1}^{N_s} \left(1 + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \lambda_i\right)$,

ou de manière équivalente,

$$\log_2 \left| I_{N_{RF}} + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} V_{RF}^H H^H H V_{RF} \right| \quad (\text{III.17})$$

Ce qui constitue une approximation raisonnable pour les situations pratiques où la N^{RF} est de l'ordre de N_s .

En outre, grâce à cette approximation, le problème de conception du précodeur RF se présente maintenant sous la forme de (10).

L'algorithme 2 peut donc être utilisé pour obtenir le précodeur RF.

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

Choisir le bon environnement de programmation est très important pour étudier des projets. Cela se fait en fonction de plusieurs facteurs : résistance de l'assemblage, facilité d'utilisation et disponibilité de nombreuses fonctions de communication avec d'autres environnements, etc.

Afin de réaliser les différentes simulations de notre système, nous avons utilisé les outils logiciels MATLAB®. Ce dernier est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un environnement interactif de développement d'algorithmes, de visualisation et d'analyse de données, voire de calcul numérique (MATLAB signifie MATrixLABoratory).

MATLAB permet de résoudre les problèmes scientifiques et techniques. C'est un langage basé sur les matrices, il allie mathématique, modélisation graphique, programmation et dispose d'une large bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites avec des notations simples et puissantes pour de nombreuses tâches de calculs communes par rapport aux autres simulateurs.

Ces fonctions peuvent être construites dans tous les langages de programmation, MATLAB permet de les regrouper dans un seul endroit, avec MATLAB, nous pouvons résoudre les problèmes de mathématiques scientifiques plus rapidement que les langages de programmation

traditionnels, car il n'est pas nécessaire d'effectuer des tâches de programmation de bas niveau, telles que déclarer des variables, spécifier des types de données et allouer de la mémoire.

III.5 Principe de simulation

Par rapport aux systèmes sans fil actuels, la longueur d'onde dans la bande 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 (récepteur-émetteur) pour chaque élément d'antenne. C'est pourquoi, à titre de compromis, un commutateur (récepteur émetteur) est souvent utilisé pour alimenter plusieurs éléments d'antennes. L'une des configurations uniques est illustrée dans la figure III.2. Et qui groupe 4 vecteurs (2 vecteurs à l'émission (analogique et numérique) et 2 vecteurs à la réception (analogique et numérique)). Un exemple de simulation d'un tel système peut être trouvé dans le but d'améliorer le rapport signal/bruit et l'efficacité spectrale de communication sans fil en utilisant des réseaux d'antennes.

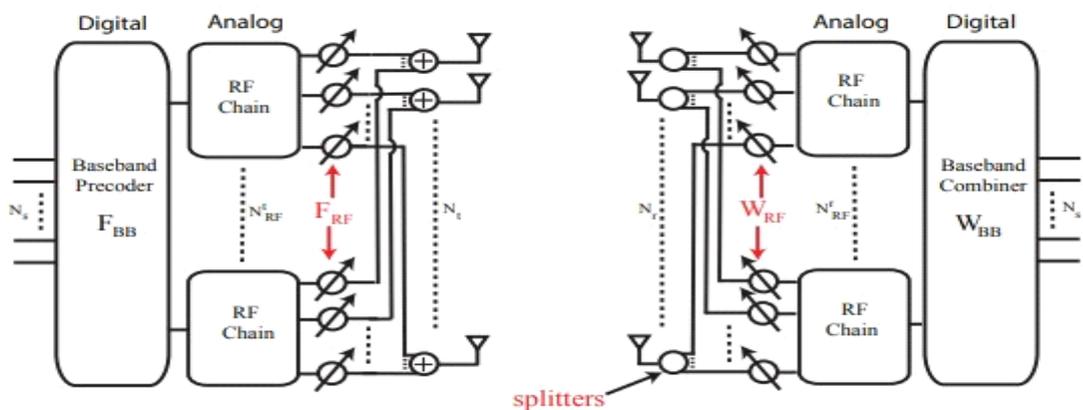


Figure III. 2: Schéma fonctionnel simplifié d'un système monoposte à ondes millimétriques.

La figure ci-dessus montre que : du côté de l'émetteur, le nombre de commutateurs (récepteur émetteur) N_{RF}^t est inférieur au nombre d'éléments d'antennes N_t . Pour offrir plus de flexibilité, chaque élément d'antenne peut être connecté à une ou plusieurs unités (récepteur-émetteur). De plus, un déphaseur analogique peut être inséré entre chaque unité (récepteur-émetteur) et l'antenne pour fournir une capacité de pilotage limitée. La configuration sur le côté récepteur est similaire. Le nombre maximal de flux de données, N_s , que ce système peut prendre en charge est plus petit que N_{RF}^t et N_{RF}^r .

Dans cette configuration, il n'est plus possible d'appliquer des pondérations numériques sur chaque élément d'antenne. Au lieu de cela, les pondérations numériques ne peuvent être appliquées qu'à chaque chaîne RF. Au niveau de l'élément, le signal est ajusté par des déphaseurs analogiques,

qui ne modifie que la phase du signal. Ainsi, le précodage ou la combinaison sont en fait effectués en deux étapes. Comme cette approche réalise le beamforming dans les domaines numérique et analogique, elle est appelée beamforming hybride.

III.6 Simulations et discussion des résultats :

Dans notre simulation, nous étudierons l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire en fonction du rapport signal sur bruit pour les systèmes MIMO beamforming hybride en variant le nombre d'antennes, le nombre des canaux RF et le nombre de flux de données.

III.6.1 Impact de la variation du nombre d'antennes à l'émission et à la réception :

Nous considérons une station de base MIMO hybride beamforming avec $N_{tRF} = N_{rRF} = 2$ et deux flux de données ($N_s = 2$). Nous considérons aussi un canal MIMO multi-trajets et une modulation du type QPSK. Nous varions le nombre d'antennes à l'émission et à la réception pour évaluer les performances en termes d'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire.

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

Dans cette section, nous évaluons la variation de l'efficacité spectrale en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Nous considérons pour cela une station de base MIMO beamforming hybride avec $N_s = N_{rf} = 2$. Nous varions dans un premier temps le nombre d'antennes à l'émission et à la réception. Les résultats sont évalués dans la plage de SNR $[-30, 0]$.

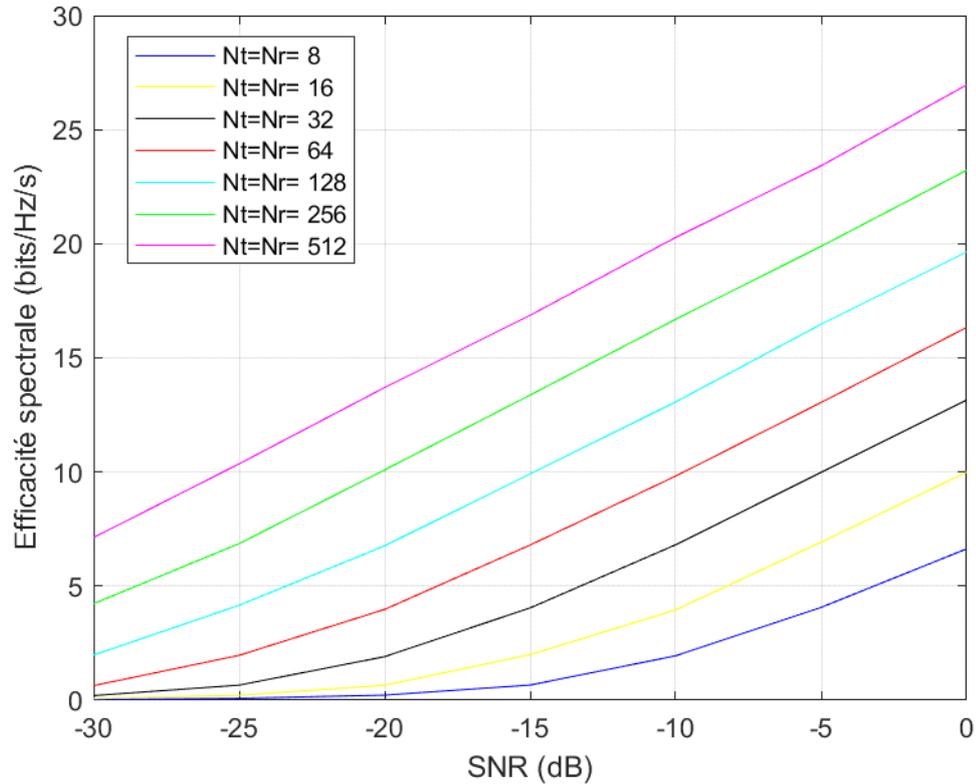


Figure III. 3: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de Nt et Nr pour la technique beamforming hybride.

Nous remarquons d'après les résultats de la figure (III.3) que :

- L'efficacité spectrale augmente en augmentant le rapport signal sur bruit SNR.
- L'efficacité spectrale augmente aussi si le nombre d'antennes à l'émission et à la réception augmente. Par exemple l'efficacité s'améliore de 20 bites/s/Hz à un SNR de 0dB pour un système MIMO massive beamforming (512x512) par rapport au système MIMO (8x8).

Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de Nt et Nr :

Dans cette section, nous évaluons la variation du taux d'erreur en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Nous considérons pour cela une station de base MIMO beamforming hybride avec $N_s=N_r=2$. Nous varions dans un premier temps le nombre d'antennes à l'émission et à la réception. Les résultats sont évalués dans la plage de SNR $[-30, 0]$.

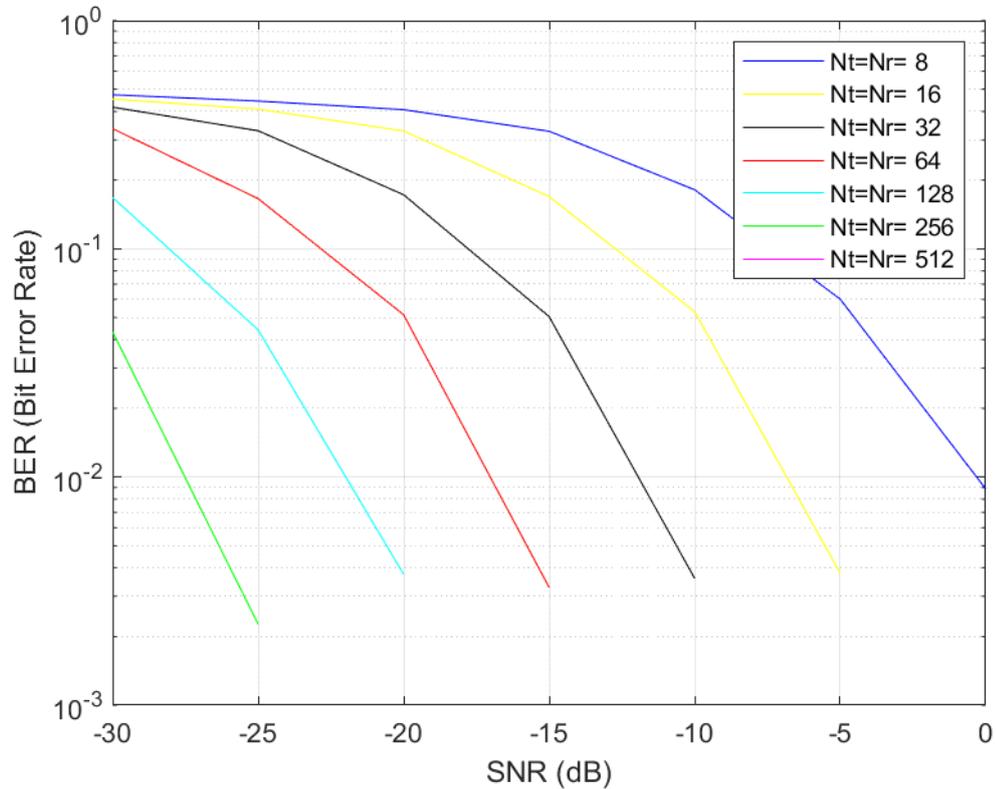


Figure III. 4: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_t et N_r pour la technique beamforming hybride.

Nous remarquons d'après les résultats de la figure (III.4) que :

- Le taux d'erreur binaire diminue de façon monotone avec le SNR.
- Le taux d'erreur binaire diminue aussi si le nombre d'antennes à l'émission et à la réception augmente. Par exemple le gain s'améliore de 22 dB pour un système MIMO (256 x 256) par rapport au système MIMO (16x16) pour un taux d'erreur de 10^{-2} . Aussi le BER atteint 10^{-2} à un SNR de -27 dB pour le système MIMO (256x256).
- Le taux d'erreur binaire est nul pour $N_t=N_r=512$.
- L'utilisation d'un ordre de diversité importante permet de combattre les distorsions et les brouilleurs subissent par le signal lors de la transmission, ce qui permet d'améliorer d'une façon très importante les performances d'un tel système.

III.6.2 Impact de la variation du nombre de chaînes RF à l'émission et à la réception

Nous évaluons, dans cette partie de simulation l'efficacité spectrale des approches de précodage hybride en fonction du SNR d'un système MIMO beamforming (64 x 64) avec un flux de données $N_s=2$. Nous variant pour chaque cas le nombre de chaînes RF à l'émission et à la réception.

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

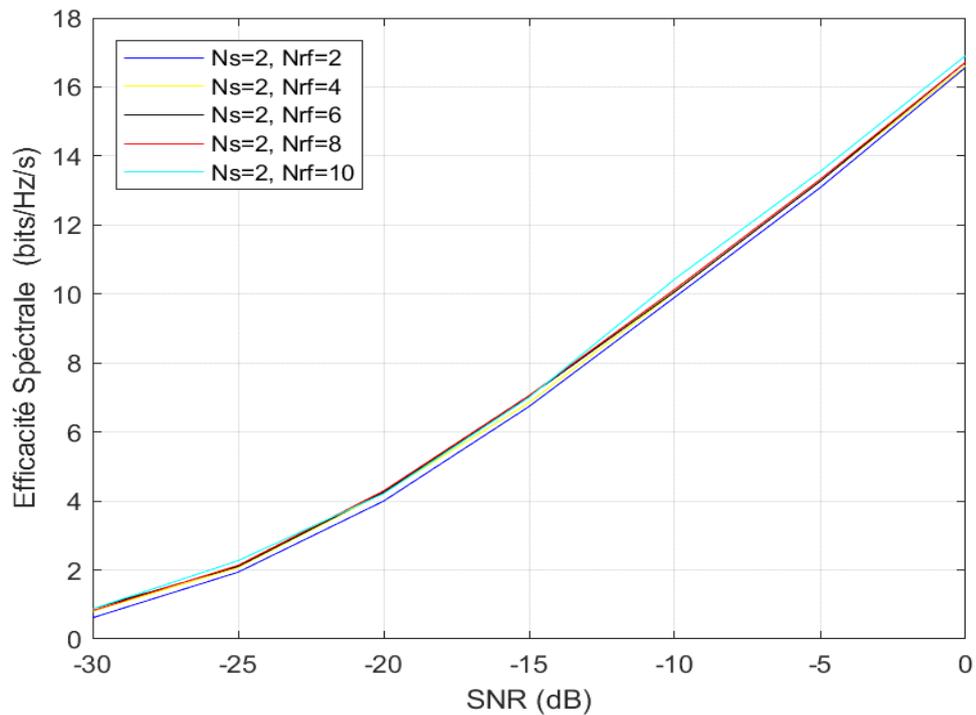


Figure III.5: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de Nrf pour la technique beamforming hybride.

Nous remarquons d'après les résultats de la figure (III.5) que :

- L'efficacité spectrale augmente en augmentant le rapport signal sur bruit SNR.
- L'efficacité spectrale augmente légèrement si le nombre des canaux RF à l'émission et à la réception augmente.
- Nous pouvons conclure que la diminution du nombre des canaux RF n'influe pas sur l'efficacité spectrale par contre permet de simplifier et minimiser le coût de réalisation du système.

Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de Nrf:

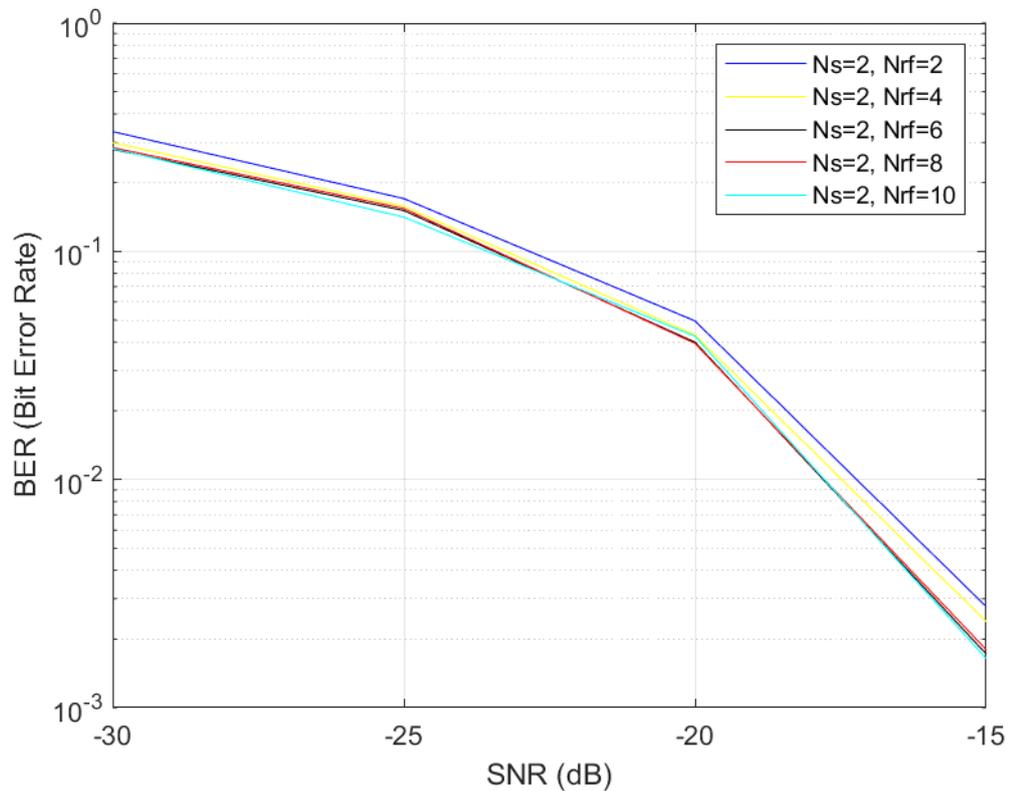


Figure III.6: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de Nrf pour la technique beamforming hybride.

Nous remarquons d'après les résultats de la figure (III.6) que :

- Le taux d'erreur binaire diminue en augmentant le rapport signal sur bruit SNR.
- Le taux d'erreur binaire diminue légèrement si le nombre des canaux RF à l'émission et à la réception augmente.

III.6.3 Impact de la variation du nombre de flux (Ns) :

Nous étudions dans cette section la variation de l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire en fonction du rapport signal sur bruit d'un système MIMO beamforming hybride (64 x64) avec Nrf=10, en variant chaque fois le nombre de flux de données à l'entrée N_s .

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

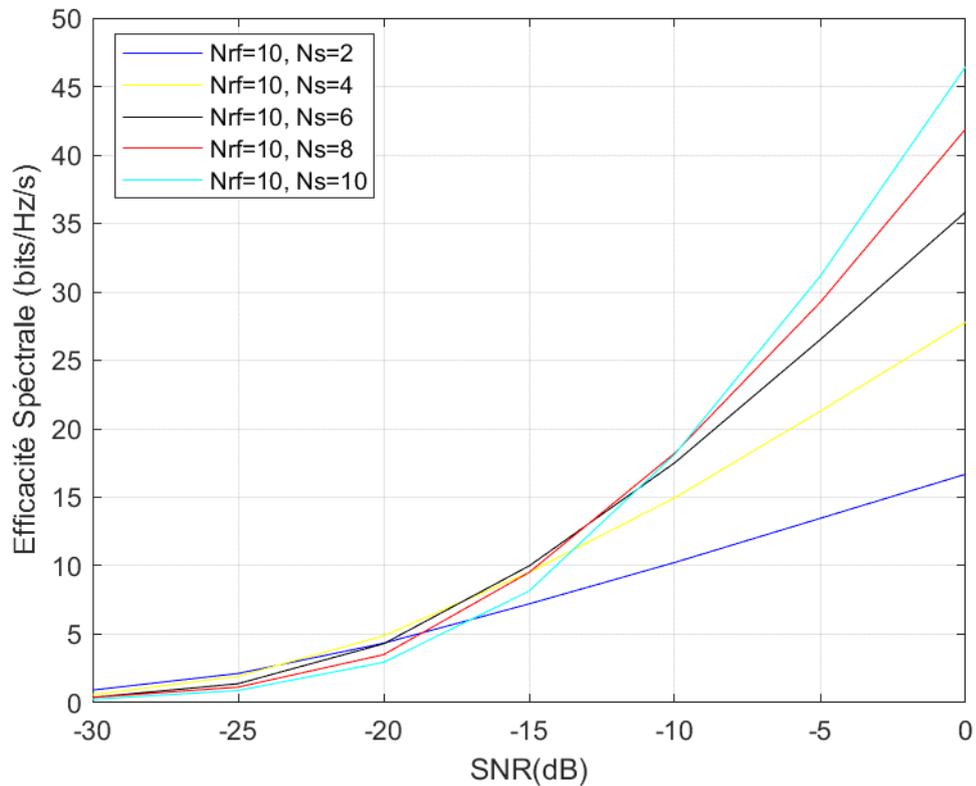


Figure III. 7: L'efficacité spectrale obtenue par la variation de N_s pour la technique beamforming hybride.

Nous remarquons d'après les résultats de la figure (III.7) que :

- L'efficacité spectrale augmente en augmentant le rapport signal sur bruit SNR.
- L'efficacité spectrale augmente aussi si le nombre de flux de données à l'entrée du système augmente. Par exemple l'efficacité spectrale s'améliore de 30 bits/s/Hz à un SNR de 0 dB pour un système MIMO beamforming hybride avec $N_s=10$ par rapport à deux flux de données à l'entrée du système ($N_s=2$).

Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_s :

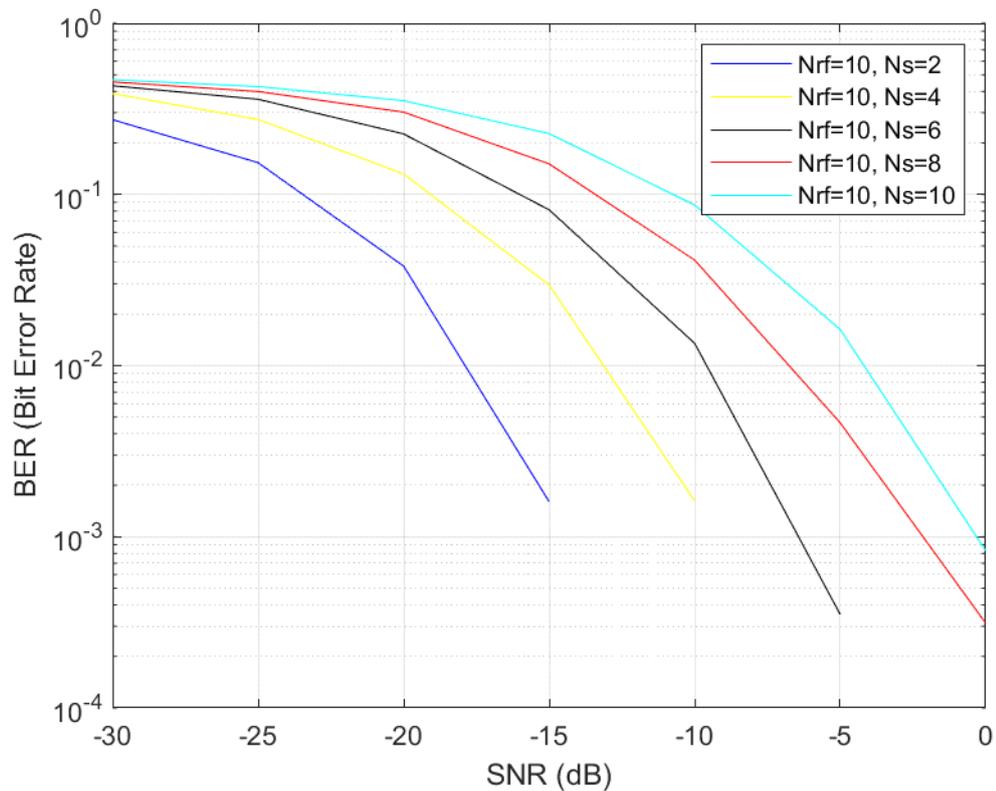


Figure III. 8: Taux d'erreur binaire obtenue par la variation de N_s pour la technique beamforming hybride.

Nous remarquons d'après les résultats de la figure (III.8) que :

- Le taux d'erreur binaire diminue en augmentant le rapport signal sur bruit SNR.
- Le taux d'erreur binaire diminue aussi si le nombre de flux N_s diminue.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le système MIMO massive hybride beamforming qui comprend deux vecteurs de pondération à l'émission et deux vecteurs de pondération à la réception dans le but de simplifier et minimiser le coût de réalisation du système en diminuant le nombre de canaux RF.

Nous avons étudié dans un premier temps l'impact du nombre d'antennes à l'émission et à la réception sur les performances du système. Ensuite nous avons examiné l'effet de la variation du nombre de chaîne RF à l'émission et à la réception sur l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire du système, et finalement nous avons étudié l'impact du nombre de flux de données sur ces performances.

Nous avons constaté que la diminution du nombre de chaînes RF a un impact mineur sur la qualité et la capacité du système MIMO massive hybride beamforming.

Conclusion générale

La demande vertigineuse de débit de transfert de données pour les futurs réseaux cellulaires a imposé la nécessité de faire évoluer les réseaux actuels vers des niveaux de performances plus importantes.

Cet objectif peut être atteint sans avoir besoin de plus de bande passante ou de stations de base supplémentaires si l'efficacité spectrale est augmentée.

Le but du travail présenté dans ce mémoire, est l'étude et la simulation des systèmes MIMO massives beamforming avec l'objectif d'obtenir une efficacité spectrale plus fiable pour la 5 G.

Dans un premier temps, nous avons mené une étude sur la technique MIMO, nous avons aussi abordé dans ce chapitre la technique MIMO Massive. Passer en revue les caractéristiques, les avantages et les types de cette technique. Bien que la technique MIMO massive supprime de nombreux problèmes de recherches traditionnels, Il reste encore des défis à relever pour concrétiser tout le potentiel de la technique.

En second lieu, nous avons présenté brièvement les antennes réseaux. Et nous avons aussi détaillé la structure, la définition, les avantages et le principe de fonctionnement des antennes intelligentes. Nous avons également détaillé les types des systèmes à antennes intelligentes (les systèmes à faisceaux commutés SBA et les systèmes de réseaux adaptatifs). D'autre part, nous avons présenté des algorithmes adaptatifs et plus en détail les antennes MIMO Beamforming et les antennes MIMO massives beamforming.

Finalement nous avons étudié l'impact du nombre d'antennes à l'émission et à la réception sur les performances du système ensuite nous avons examiné l'effet de la variation du nombre de chaine RF à l'émission et à la réception sur l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire du système puis étudié l'impact du nombre de flux de données sur ces performances.

Nous avons constaté que la diminution du nombre de chaines RF a un impact mineur sur la qualité et la capacité du système MIMO massive hybride beamforming par contre permet de simplifier et minimiser le cout de réalisation du système.

BIBIOPHIE

[1] : Ludovic COLLIN « Optimisation de systèmes multi antennes basée sur la distance minimale », l'Université de Bretagne Occidentale, 17 décembre 2002

[2] : Pierre GRUYER, Simon PAILLARD, « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM », Université de Bretagne 12 décembre 2005.

[3] : « MIMO Massif », article de Wikipedia consulté le 11 Avril 2019.

https://fr.wikipedia.org/wiki/MIMO_massif

[4] : Benyarou Mourad, « Optimisation des systèmes multi-antennes appliqués aux systèmes MC-CDMA. », Université Abou Bakr-Belkaid, Tlemcen. Thèse de doctorat 2012- 2013.

[5]: The Role of Massive MIMO in 5G. Michael Wang. Oct 23, 2018 [Enligne]. Htpps : //medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61 [consulté le 03 Avril 2019].

[6] :A. Trari Tani ,A.Ahri, «L'estimation de canal pour les systèmes MIMO massif. » ,Université Abu Bakr-Belkaid, Tlemcen. Mémoire de master 2019 Tlemcen.

[7] : Hadouche Khaled «contamination des pilotes en MIMO massif», mémoire de master 2018 BLIDA.

[8] : Ahmad Abboud « Atténuation des interférences dans les réseaux mobiles 5G : Contamination pilote des liaisons montantes dans le schéma massif MIMO TDD ». Electronics. Université de Limoges, 2017. English.

[9] : TRARI TANI AMEL, «TAHRI ASMA L'ESTIMATION DE CANAL POUR LES SYSTEMES MIMO MASSIF» mémoire de master Université ABOU BAKR BELKAID – TLEMCEN.

[10] : Gourayi Ahlem «Efficacité Energétique dans les Systèmes MIMO Massive» mémoire de master Université SAAD DAHLAB de BLIDA 2015.

[11] : Ibra Dioum, "Conception de systèmes multi diversité et MIMO: application aux petits objets nomades communicants." Université Nice Sophia Antipolis.

[12]: Oussoukine .Amal . Rayeh .Narimane." MIMO Beamforming Multi-utilisateurs ". Diss 2016.

[13]:M. EL Hadi Kenane. "Contribution a l'optimisation d'un réseaux d'antennes intelligentes au système UMTS".Diss.2017.

[14]: Zhao, Long, et al. Massive MIMO in 5G Networks:Selected Applications. Springer International Publishing, 2018.

- [15]: Haddouche Khaled, "contamination des pilotes en MIMO massive".Diss 2018
- [16]: Khelifa.H & Gilles.Y.D, « Conception et réalisation d'antennes intelligentes, Laboratoire de Radiocommunications et de Traitement du Signal ». IEEE 1998-1999, p.77.
- [17]: Bouanane .Mohammed .Mehdi .Hadj .Slimane .Riyadh. "Antennes MIMO Adaptatives Large Bande Bases sur l'Algorithme Itératif ".Diss 2015.
- [18] : Habott .Abdoullah .Yahgouba .Houda "Les Antennes Intelligentes ".Diss 2020.
- [19] : Détection Multi-Utilisateurs par réseau d'antennes appliquées à un signal MCCDMA 2008.
- [20]:BUTLRT.J.R, « Lowe, Beam forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas ». Electron. Design, Apr. 1961. Volume 9: p. 170-173.
- [21] : Mokhefi .Akila .Metahri .Imene . " Etude et simulation de méthode de Beamforming pour systèmes de modulation multi-porteuse pour la 5G ".Diss.2018.
- [22] : Moez .Ben Kilani. "Conception et implémentations de nouvelles configurations de matrice de Butler en technologies planaire et conforme".Diss Novembre 2012.
- [23] : Antoine Rozé : Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques, université Bretagne Loire, 17 octobre 2016.
- [24] : Yasser Abou baker Hachemi : Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G, Université Abou bakr Belkaïd Tlemcen, 19 septembre 2020.
- [25]: Rasoanantenaina Lantonirina Elysa : Etude de Performance des Nouvelles Formes D'Ondes Et Du MASSIVE MIMO Sur Le Réseau 5G, université D'Antananarivo, Mars 2017.
- [26]:R. L. Haupt, " Phase-only adaptive nulling with a genetic algorithm, " IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 45, no. 6, pp. 1009-1015, Jun 1997.
- [27]:SAADANI Kanza, MANNI Nouara « Modélisation et caractérisation des canaux millimétriques mm wave (28-80GHZ) »Diss 2018.
- [28] : J. Bach Andersen, "Array gain and capacity for known random channels with multiple element arrays at both ends," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 18, no. 11, pp. 2172-2178, November 2000.
- [29]: C. H. Doan, S. Emami, D. A. Sobel, A. M. Niknejad, and R. W. Brodersen, "Design considerations for 60 GHz CMOS radios," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 12, pp. 132–140, 2004.

- [30]: T. E. Bogale, L. B. Le, and A. Haghghat, “Hybrid analog-digital beamforming: How many RF chains and phase shifters do we need?” [Online] available: <http://arxiv.org/abs/1410.2609>, 2014.
- [31]: A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, “Capacity limits of MIMO channels,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 684–702, 2003.
- [32]: D. P. Palomar, J. M. Cioffi, and M. A. Lagunas, “Joint Tx-Rx beamforming design for multicarrier MIMO channels: A unified framework for convex optimization,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, no. 9, pp. 2381–2401, 2003.
- [33]: O. El Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. Heath, “Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 3, Mar. 2014.
- [34]: C. H. Doan, S. Emami, D. A. Sobel, A. M. Niknejad, and R. W. Brodersen, “Design considerations for 60 GHz CMOS radios,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 12, pp. 132–140, 2004.
- [35]: A. F. Molisch, M. Z. Win, and J. H. Winters, “Reduced-complexity transmit/receive-diversity systems,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, no. 11, pp. 2729–2738, 2003.
- [36]: Robert W Heath, Nuria Gonzalez-Prelcic, Sundeep Rangan, Wonil Roh et Akbar M Sayeed An overview of signal processing techniques for millimeter wave mimo systems. *IEEE journal of selected topics in signal processing*, 10(3):436–453, 2016.