

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث 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 : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et télécommunications

Par : FELLAH Fatima Zahra & AISSANI Wassila

Sujet

**Formation de voies hybrides analogique-numérique pour la réduction
d'interférences dans les réseaux cellulaires de nouvelle génération**

Soutenu publiquement, le 13/06/2023, devant le jury composé de :

Mr. BOUACHA Abdelhafid	Prof	Université de Tlemcen	Président
Mr. FEHAM Mohammed	Prof	Université de Tlemcen	Examinateur
Mr. BAHRI S.M	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2022 / 2023

Remerciement :

Les travaux présentés dans ce document ont été effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Télécommunication de la faculté de Technologie de L'Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen.

Tout d'abord, nous tenons particulièrement à remercier Allah le tout puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos parents de leurs sacrifices et patience tout au long de notre parcours.

Nous exprimons nos sincères gratitude à notre encadreur MR BAHRI. S.M pour leur disponibilité, leur gentillesse, ses conseils judicieux et ses remarques objectives que nous ont permis de mener à bien ce mémoire. Merci pour tout ce que vous avez pu nous apporter. C'est grâce à vous que le travail a pris cette forme.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent à MR BOUACHA Abdelhafid, d'avoir accepté de présider ce travail, ainsi que MR FEHAM Mohamed d'avoir bien voulu examiner ce travail.

Nous profitons de cette opportunité pour exprimer notre gratitude à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

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

Dédicace :

Je dédie ce travail à :

Mon amour, mon inspiration, mon soutien et ma force ; mes chers parents qui ont été toujours là pour

moi

Mes adorables frères

Mes grands parents et toute ma famille

Sans oublier mon binôme Wassila et à toute sa famille

Mes chers amis et à tous mes camarades de la promo de Télécom

FELLAH F.Z

Dédicace :

Avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon chère père

MOUSTEFA.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir ; qui n'a jamais dit non, âmes exigences et qui n'a

épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère SABIHA.

A IBTISSEM ET NAHLA mes sœurs et AMINE mon frère ; Qui m'avez toujours soutenu et encouragé

durant ces années d'études.

Et tous les membres de ma famille auxquels je souhaite tout le bonheur.

A mon cher binôme " FATIMA ZAHRA, , ainsi que toute sa famille.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Merci

AISSANI Wassila

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'étudier et de simuler, en utilisant le logiciel MATLAB, le système MIMO massif hybride beamforming afin d'améliorer l'efficacité spectrale et les performances de la technologie 5G, ainsi que d'optimiser le rapport signal/bruit des communications sans fil en exploitant des réseaux d'antennes.

Notre étude se focalise sur l'optimisation des précodeurs et des combineurs analogiques et numériques grâce à l'utilisation de l'algorithme du recuit simulé. Cette approche vise à simplifier le système et à réduire les coûts de mise en œuvre en optimisant le nombre d'antennes, le nombre de chaînes RF et le nombre de flux de données.

Nous constatons que la réduction du nombre de chaînes RF a un impact négligeable sur la qualité et la capacité du système, mais elle permet toutefois de simplifier et de minimiser les coûts de réalisation.

Mot clé : Massive MIMO, hybride beamforming, mm wave, Précodage hybride, Optimisation, recuit simulé.

Abstract :

The aim of this work is to study and simulate, using MATLAB software, the massive MIMO hybrid beamforming system in order to improve the spectral efficiency and performance of 5G technology, as well as to optimize the signal-to-noise ratio of wireless communications by exploiting antenna arrays.

Our study focuses on the optimization of analog and digital precoders and combiners using the simulated annealing algorithm. This approach aims to simplify the system and reduce implementation costs by optimizing the number of antennas, the number of RF channels and the number of data streams.

We find that reducing the number of RF chains has a negligible impact on system quality and capacity, but does simplify and minimize implementation costs.

Key words: Massive MIMO, hybrid beamforming, mm wave, hybrid precoding, optimization, simulated annealing.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة، باستخدام برنامج MATLAB، نظام MIMO الهجين المشع لتحسين الكفاءة الطيفية وأداء تقنية 5G، وتحسين نسبة الإشارة/الضوضاء للاتصالات اللاسلكية باستخدام شبكات الهوائي. تركز دراستنا على تحسين التجهيزات المسبقة التناظرية والرقمية وتتحد من خلال استخدام خوارزمية المحاكاة. ويهدف هذا النهج إلى تبسيط النظام وخفض تكاليف التنفيذ عن طريق تحسين عدد الهوائيات وعدد قنوات التردد الإقليمي وعدد تدفقات البيانات. نلاحظ أن خفض عدد سلاسل RF له تأثير ضئيل على جودة وقدرة النظام، لكنه يجعل من الممكن تبسيط تكاليف التنفيذ وتقليلها. **الكلمات الرئيسية: MIMO: الضخم، تشكيل الحزم الهجين، موجة مم، الترميز المسبق الهجين، التحسين، محاكاة التلقیح.**

Sommaire

<i>Remerciement</i> :	I
<i>Dédicace</i> :	II
Résumé :	IV
Sommaire	V
Liste des figures :	VII
Liste des abbreviations :	IX
Introduction générale :	1
Chapitre I : La technologie MIMO massif.....	3
I.1.Introduction :	4
I.2.Les systèmes MIMO :	4
I.3.Principe de MIMO :	4
I.4.Types de MIMO :	4
I.4.1.Système SISO :	4
I.4.2.Système MISO :	5
I.4.3.Système SIMO :	5
I.4.4.Système MIMO :	6
I.5.MIMO Massif :	6
I.5.1.Beamforming :	7
I.5.2.MIMO multi-utilisateur :	8
I.6.Caractéristique de MIMO massif :	8
I.6.1.TDD vs FDD pour le MIMO massif :	8
I.6.2.Evolutivité :	9
I.6.3.Propagation favorable :	9
I.7.les avantages du MIMO massive :	9
I.7.1.Efficacité spectrale :	9
I.7.2.Efficacité énergétique :	9
I.7.3.Suivi des utilisateurs :	10
I.8.Types de MIMO massif :	10
I.8.1.Système MIMO mono-utilisateur :	10
I.8.2.MIMO massif multiutilisateur :	11
I.8.3.Multi-User Massive MIMO avec Multi-Cell scenario :	12
I.8.4.MIMO massif distribuée :	12
I.9.Comparaison entre MIMO et MIMO massif :	13
I.10.Défis des systèmes MIMO Massifs :	13
I.10.1.La contamination des séquences pilotes :	13
I.10.2.Propagation Défavorable :	14

I.11.Conclusion :	14
Chapitre II : Antennes MIMO Massives Beamforming.	15
II.1.Introduction :	16
II.2.Définition d’antenne :	16
II.3.Antennes Réseaux :	17
II.4.1.Concept d’antennes intelligentes :	18
II.4.2.Structure d’une antenne intelligente :	19
II.5.Avantages des antennes intelligentes :	19
II.6.Types des antennes intelligentes :	20
II.6.1.Système d’antennes à faisceaux commutés SBA :	21
II.6.2.Antennes adaptatives :	21
II.6.3.Principe des antennes adaptatives :	22
II.7.Les algorithmes adaptatifs :	22
II.8.Antennes MIMO Beamforming :	24
II.8.1.Concept de base :	24
II.9.Antennes MIMO massive Beamforming :	25
II.9.1.Sélection d’antennes souples :	26
II.9.2.MIMO massives Beamforming Numérique :	26
II.9.2.MIMO massives Beamforming analogique :	26
II.9.3.MIMO Massives Beamforming hybride :	27
II.10.Conclusion :	31
Chapitre III : Le recuit simulé.	32
III.1.Présentation générale :	33
III.2.Les origines :	33
III.4.Recuit thermique:	33
III.5.Algorithme du recuit simulé :	34
III.5.1.Convergence théorique du recuit simulé :	34
III.5.2.Espace des configurations :	34
III.5.3.Règle d’acceptation :	35
III.5.4.Programme de recuit :	35
III.6.Application :	38
III.7.Conclusion :	38
III.7.1.Avantages :	38
III.7.2.Faiblesses :	38
Chapitre IV: Résultats et simulations.	40
IV.1.Introduction :	41
IV.2.Système MIMO massive beamforming hybride :	41

IV.3.Model de système :	42
IV.3.1.Conception de formateur de faisceaux hybride pour les système MIMO à grande échelle et à utilisateur unique :	43
IV.4.Notion de base sur langage utilisé (Matlab) :	47
IV.5.Principe de simulation :	48
IV.6.Simulation et discussion des résultats :	49
IV.6.1.Impact de la variation du nombre d’antennes à l’émission et à la réception :	49
IV.6.2.Impact de la variation du nombre de chaines RF à l’émission et à la réception :	51
IV.6.3.Impact de la variation du nombre de flux NS :	53
IV.7.Conclusion :	55
Conclusion générale	56

Liste des figures :

Chapitre I : La technologie MIMO massif

Figure I.1: système SISO	5
Figure I.2: système MISO	5
Figure I.3: système SIMO	5
Figure I.4: système MIMO	6
Figure I.5: Modèle MIMO Massif	7
Figure I.6: Système Massive MIMO en transmission multiutilisateurs	7
Figure I.7: Single-user Massive MIMO	10
Figure I.8: Système MU-MIMO massif. M-antennes de BS dessert K simple antenne UT	11
Figure I.9: La BS dans la l-ième cellule et le k-ième UT dans la j-ième cellule	12
Figure I.10: Illustration du concept de pilote contamination. (a) liaison montante (b) liaison Descendantes	13

Chapitre II : Antennes MIMO massives Beamforming

Figure II.1: rayonnement d'une antenne	17
Figure II.2: Réseau linéaire	17
Figure II.3: Réseau planaire	18
Figure II.4: Réseau circulaire	18
Figure II.5 : Schéma de blocs d'une antenne intelligente	19
Figure II.6: système à faisceaux commutés	21
Figure II.7: Différence entre un système à commutation de faisceaux et un système adaptative	22
Figure II.8: structure et principe du système adaptatif en réception (a) et en émission(b)	22
Figure II.9: Classification des algorithmes adaptatifs	23
Figure II.10: Configuration de canal MIMO avec Beamforming	25
Figure II.11: MIMO Beamforming Numérique	27
Figure II.12: MIMO Beamforming analogique	27
Figure II.13: Schéma bloc du Système MIMO Beamforming hybride analogique-numérique	28
Figure II.14: Système beamforming mono-utilisateur	29
Figure II.15: Système beamforming multiutilisateur	29
Figure II.16.a: Architecture des formateurs de faisceaux analogiques entièrement connectée	30

Figure II.16.b: Architecture des formateurs de faisceaux analogiques partiellement connectée	31
--	----

Chapitre III : La méthode de recuit simulé

Figure III.1: Algorithme du recuit simulé	36
---	----

Figure III.2: Paliers de la température	37
---	----

Chapitre IV : simulations et résultats

Figure IV.1: Architecture de MIMO massive beamforming hybride multi-utilisateurs	40
--	----

Figure IV.2: Schéma fonctionnel simplifié d'un système monoposte à onde millimétriques	47
--	----

Figure IV.3: L'efficacité spectrale en fonction de SNR par la variation de N_t et N_r pour la Technique beamforming hybride	49
--	----

Figure IV.4: le taux d'erreur binaire en fonction de SNR par la variation de N_t et N_r pour la Technique beamforming hybride	50
--	----

Figure IV.5: L'efficacité spectrale en fonction de SNR par la variation de N_{rf} pour la technique beamforming hybride	51
--	----

Figure IV.6: Le taux d'erreur binaire en fonction de SNR par la variation de N_{rf} pour la technique beamforming hybride	52
--	----

Figure IV.7: L'efficacité spectrale en fonction de SNR par la variation de N_s pour la technique beamforming hybride	53
---	----

Figure IV.8: Le taux d'erreur binaire en fonction de SNR par la variation de N_s pour la Technique beamforming hybride	54
---	----

Liste des abréviations :

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

BER: Bit Error Rate.

BS: Base Station.

CAN : Convertisseur Analogique Numérique.

CDMA : Code Division Multiple Access.

CMA : Constant Modulus Algorithm.

CNA : Convertisseur Numérique Analogique.

DMI : Direct Matrix Inverse.

FDD: Frequency Division Duplex.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

IOT: Internet of Things.

LMS: Least Mean Square.

LTE: Long Term Evolution.

MIMO: Multiple Input Multiple Output.

MISO: Multiple Input Single Output

MMIMO: Massive- Multiple Input Multiple Output.

MmWave: Millimètre Wave.

MU-Massive MIMO : Multi User massive MIMO.

RF: Radio Frequency.

RLS : Récurrent least Squares algorithm.

SBA: Switching Beam Antenna.

SDMA: Spatial Division Multiple Access.

SIMO: Single Input Multiple Output.

SISO: Single Input Single Output.

SNR: Signal-to-Noise Ratio.

TDD: Time-Division Duplex.

TDMA: Time Division Multiple Access.

UT: User Terminal.

5G : Cinquième Génération.

MU-MIMO : Multi User-Multiple Input Multiple Output.

SU-MIMO : single User-Multiple Input Multiple Output.

Introduction générale :

Le domaine de la technologie sans fil a connu une évolution rapide et continue au cours des dernières années. La 5G marque une nouvelle étape dans cette évolution, introduisant plusieurs innovations passionnantes. L'une des caractéristiques clés de la 5G est l'utilisation de fréquences millimétriques, offrant une disponibilité spectrale bien supérieure à celle des réseaux précédents. Cependant, bien que cette bande passante soit considérable, la transmission des données sur des ondes millimétriques peut être affectée par une atténuation du signal importante. Pourtant, grâce à la longueur courte d'onde, il est possible d'intégrer de nombreuses antennes sur les stations de base et les terminaux mobiles, créant ainsi un réseau d'antennes qui tire parti de la technique de formation de faisceau et du MIMO massif. Ces techniques permettent de réduire les interférences, d'améliorer la qualité de transmission et de liaison, ce qui renforce l'efficacité spectrale et la robustesse de la transmission.

L'augmentation du nombre d'antennes nécessaires pour améliorer la qualité de transmission et réduire les interférences entraîne une complexité accrue de l'infrastructure et des coûts de mise en œuvre. Pour résoudre ce problème, une solution proposée consiste à adopter une architecture hybride qui optimise le nombre d'antennes et les chaînes RF. Cette approche permet de former un faisceau adapté pour acheminer le maximum d'énergie utile à l'utilisateur tout en réduisant la consommation d'énergie. Cette technique combine les avantages du traitement de faisceau analogique et numérique pour améliorer la qualité de transmission tout en réduisant la complexité de l'infrastructure et les coûts associés.

L'objectif de notre travail est d'optimiser les précodeurs et les combineurs analogiques et numériques du système MIMO massif hybride beamforming en utilisant le recuit simulé. Cette approche vise à améliorer les performances et l'efficacité du système tout en simplifiant le système et en réduisant les coûts de mise en œuvre grâce à l'optimisation du nombre d'antennes, du nombre de chaînes RF et du nombre de flux de données.

Ce travail est organisé en quatre chapitres dont :

Le premier chapitre introduit la technique MIMO, en mettant d'abord l'accent sur ses différents types tels que SISO, MISO et SIMO. Ensuite, il explore la technique du MIMO massif en détaillant ses différentes variantes, caractéristiques et avantages.

Le deuxième chapitre se consacre à l'étude des antennes intelligentes et met en évidence leurs nombreux avantages. Par la suite, une attention particulière est portée sur les antennes MIMO Beamforming et MIMO Massive Beamforming, où nous examinons en détail les algorithmes adaptatifs utilisés dans leur conception.

Le chapitre quatre concerne la présentation d'un algorithme d'optimisation méta-heuristique : l'algorithme du recuit simulé (RS). Nous abordons leur principe de base et leur caractéristique. Nous mettrons aussi en évidence les éléments importants et nécessaires dans l'implantation de cet algorithme pour un problème d'optimisation.

Dans le quatrième chapitre, nous examinons le système MIMO massif hybride beamforming qui tire parti de deux vecteurs de pondération en émission et deux vecteurs de pondération en réception. L'objectif de ce système est de simplifier l'architecture et de réduire les coûts de mise en œuvre en minimisant le nombre de canaux RF requis. Pour atteindre cet objectif, nous procédons à l'optimisation des précodeurs et des combineurs analogiques

et numériques en utilisant l'algorithme du recuit simulé, ce qui permet d'améliorer l'efficacité et les performances du système. Par la suite, nous analysons l'impact du nombre d'antennes et du nombre de chaînes RF en émission et en réception sur l'efficacité spectrale et les performances du système. Enfin, nous étudions également l'influence du nombre de flux de données sur ces performances.

Nous finirons notre mémoire par une conclusion.

Chapitre I : La technologie MIMO massif.

I.1.Introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter les réseaux massifs MIMO (Multiple Input Multiple Output). La capacité des systèmes multi-antennes augmente linéairement jusqu'à une certaine valeur du nombre d'antennes d'émission, et ces systèmes présentent l'avantage supplémentaire d'être résistants aux évanouissements et aux interférences. En revanche, l'efficacité spectrale potentielle d'un tel système est supérieure à celle d'un système mono-antenne. Cette nouvelle technologie est l'approche la plus bénéfique pour les systèmes révolutionnaires du réseau mobile de cinquième génération (5G) et de l'Internet des objets. Les développements technologiques nécessiteront des systèmes de communication robustes et fiables. Cela nécessite beaucoup de progrès sur le système actuel.

I.2.Les systèmes MIMO :

C'est une technologie de transmission basée sur l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et au réception afin de transmettre plus de données simultanément et d'améliorer l'efficacité de transmission. La technologie MIMO tire parti d'un phénomène d'ondes radioélectriques appelé trajets multiples. Dans un système MIMO, on envoie un symbole différent sur chaque antenne émettrice. Chaque antenne réceptrice va capter un ou plusieurs signaux venant chacun d'une antenne émettrice qui vont suivre un chemin différent des autres existants entre l'émetteur et le récepteur [1].

I.3.Principe de MIMO :

La principale source d'interférences qu'un signal reçoit pendant la propagation est le canal. En raison du phénomène de propagation par trajets multiples, les signaux subissent des évanouissements, des décalages de fréquence et même de temps. Par contre aux systèmes classiques, les systèmes à diversité prennent avantage de ces types de propagation pour améliorer les performances du système. Pour réaliser ces améliorations, les systèmes MIMO utilisent des techniques de diversité (espace, fréquence et temps) [2].

I.4.Types de MIMO :

I.4.1.Système SISO :

Il s'agit de l'architecture radio la plus simple et peut être définie en termes MIMO comme SISO - Single Input Single Output. Ce système ressemble à un canal radio standard (l'émetteur fonctionne comme un récepteur utilisant une antenne. Il n'a pas besoin de traitement de diversité ou quoi que ce soit) [2].



Figure I.1: Système SISO.

I.4.2. Système MISO :

MISO (Multiple Input Single Output) est également connu sous le nom de diversité de transmission. Dans ce cas, les données sont envoyées de manière redondante à partir de deux antennes d'émission. A la réception, les données sont récupérées en traitant le meilleur signal reçu (la somme des signaux des deux voies) [2].



Figure I.2: Système MISO.

I.4.3. Système SIMO :

Un système SIMO (Single Input Multiple Output) utilise une antenne pour l'émission et plusieurs antennes pour la réception. Il est souvent utilisé pour lutter contre l'effet d'évanouissement qui se produit lors de la réception de plusieurs signaux provenant de plusieurs sources indépendantes [2].

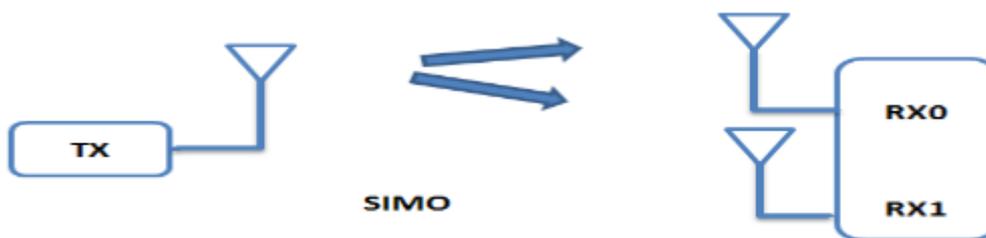


Figure I.3: Système SIMO.

La technologie MIMO massif.

I.4.4. Système MIMO :

La technologie MIMO (Multiple input Multiple output) est basée sur N_t antennes d'émission et N_r antennes de réception. MIMO peut être utilisé pour augmenter la capacité et le débit des canaux[2].

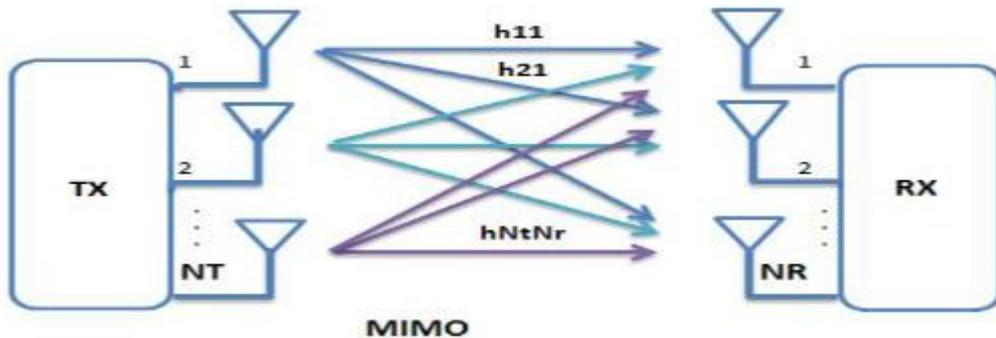


Figure I.4: Système MIMO.

a. MIMO à multiplexage spatial :

La première technique mise en œuvre découvrant les systèmes MIMO avec la publication des bellabs est le multiplexage spatial. Le principe de cette technique est l'agencement sans redondance de la séquence d'information suivant l'axe spatial. Alors, le système MIMO transmet n fois plus de symboles utiles par unité de temps qu'un système SISO. Le premier système MIMO a été proposé par Foschini en 1996, son architecture est appelé D-BLAST. Ensuite, Foschini et Wolniansky ont proposé deux schémas de codage plus réalistes, appelé V-BLAST et H-BLAST. Pour le décodage, ces codes BLAST doivent utiliser au moins autant d'antennes en réception qu'en émission[3].

b. MIMO à multiplexage spatio-temporelle :

Les systèmes MIMO utilisent ce type du multiplexage qui combine deux techniques de diversité. L'idée consiste à envoyer des versions de signal différées dans le temps via plusieurs antennes transmetteurs. Cette technique est pour maximiser la qualité[4].

I.5. MIMO Massif :

Massive MIMO est une technologie de pointe qui s'appuie sur l'exploitation des dimensions spatiales, créant de multiples degrés de liberté et motivant le principe de transmission simultanée par multiplexage spatial. En raison de l'épuisement du spectre et du respect des contraintes d'efficacité du spectre, la desserte de différents utilisateurs dans la même ressource temps-fréquence peut être considérée comme un élément clé de la 5G pour les réseaux mobiles. Massive MIMO a été conçu à l'origine pour le fonctionnement en duplex par répartition dans le temps (TDD), mais également à un potentiel pour le fonctionnement en duplex par répartition en

La technologie MIMO massif.

fréquence (FDD). La technique consiste à équiper une station de base d'un grand nombre d'antennes M pour desservir plusieurs utilisateurs K sous l'hypothèse $M > K$ [5].

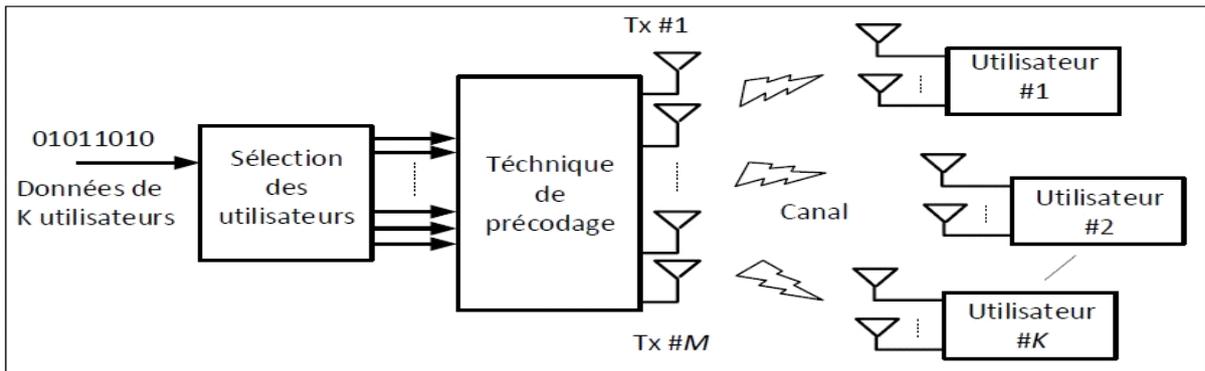


Figure I.5: Modèle MIMO Massif.

I.5.1. Beamforming :

Beamforming ou La formation de faisceau est une technique de traitement du signal utilisée dans la transmission et/ou la réception de réseaux de capteurs qui contrôlent la forme du diagramme de rayonnement. La puissance dans une direction spécifique peut être augmentée à l'aide de la formation de faisceaux côté émission. En contrôlant la phase et l'amplitude de chaque signal d'émetteur, des interférences constructives ou destructives peuvent être créées sur le front d'onde. Du côté récepteur, la formation de faisceau peut également être considérée comme un filtre spatial dans la direction d'intérêt, car elle augmente la sensibilité du récepteur dans la direction du signal souhaité et réduit la sensibilité dans la direction des interférences et du bruit. Cela revient à combiner de manière optimale des données reçues de différentes sources (antennes) avec de bons coefficients d'un filtre spatial [6].

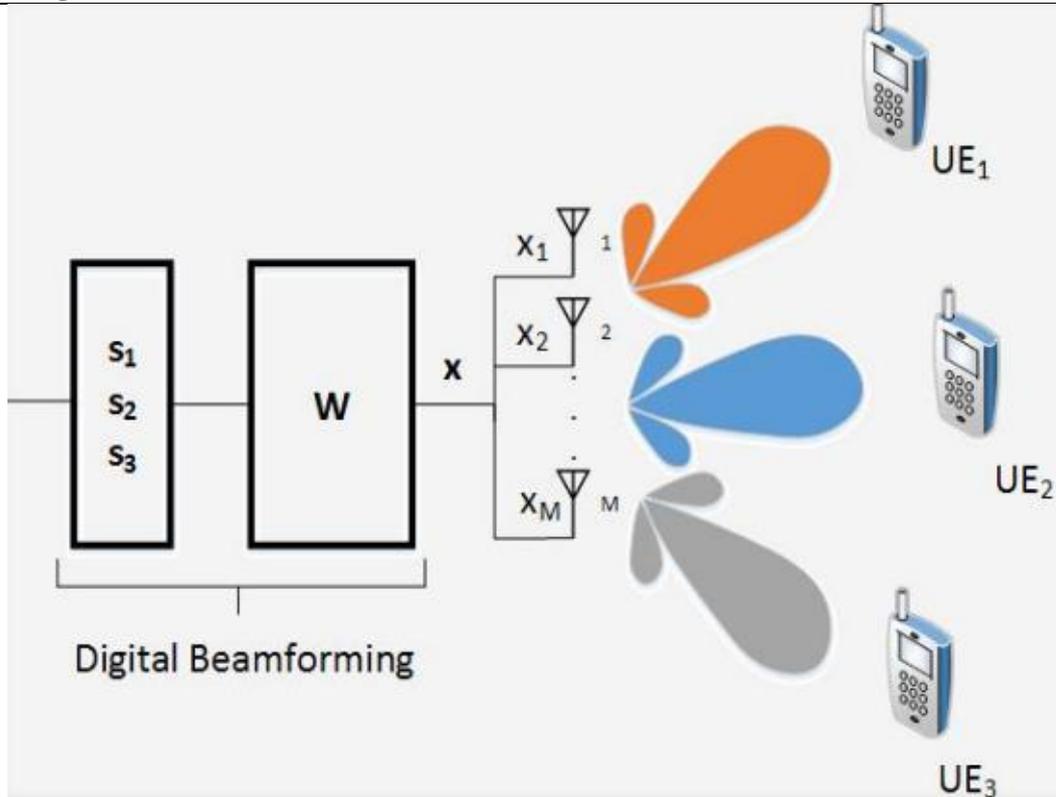


Figure I.6: Système Massive MIMO en transmission multiutilisateurs.

I.5.2.MIMO multi-utilisateur :

Augmente encore la capacité totale de chaque station de base en utilisant les mêmes ressources pour communiquer avec plusieurs appareils, créant ainsi une périphérie presque unifiée. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs appareils peut créer des canaux virtuels MIMO massifs. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter les vitesses de transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de stations de base sans consommer de bande passante ni augmenter les valeurs de modulation [7].

I.6.Caractéristique de MIMO massif :

MIMO est une forme de système, MU MIMO (multi-utilisateurs), où le nombre de stations de base et d'utilisateurs est très élevé. Dans le MIMO massif, un cent voire un millièrme d'antenne d'une station de base dessert un grand nombre d'utilisateurs (dix à cent utilisateurs) simultanément sur la même fréquence. Massive MIMO est une technologie future qui fournira des réseaux à large bande plus sûrs, plus robustes et plus efficaces (en termes d'utilisation de l'énergie et du spectre) [2].

I.6.1.TDD vs FDD pour le MIMO massif :

Massive MIMO est basé sur le principe TDD (Time Division Duplexing), et les canaux de liaison montante et descendante partagent les mêmes ressources de fréquence dans le temps. Les canaux physiques de propagation montante et descendante ont alors les mêmes propriétés; elles sont considérées comme réciproques: l'évaluation de la direction montante suffit à la station de base pour calculer les paramètres de pré-codage du

La technologie MIMO massif.

signal descendant, et les signaux reçus sont combinés pour extraire le signal émis par chaque terminal. A cet effet, le terminal envoie périodiquement des séquences pilotes : ces K séquences sont orthogonales.

Si le principe du MIMO massif doit être appliqué au FDD en mode duplex par répartition en fréquence et que différentes bandes de fréquences sont utilisées dans les sens montants et descendants, les canaux sans fil dans les sens montant et descendant doivent être évalués. vers le bas : Les résultats des mesures terminales doivent être renvoyés à la station de base.

Mais les limites du MIMO massif sur le mode duplex TDD peuvent limiter son utilisation, car de nombreux réseaux sont conçus sur la base du FDD. Actuellement, les travaux sur ce sujet suggèrent que les contraintes spécifiques au FDD peuvent être levées grâce à certaines hypothèses, mais on ne sait pas si ces hypothèses sont réalistes. A noter que l'utilisation du MIMO massif est encore associée pour l'instant au mode TDD [2].

I.6.2.Evolutivité :

Dans les systèmes MIMO massifs, les stations de base apprennent les canaux à partir des techniques TDD en formant des liaisons montantes. Le temps requis pour l'estimation du canal est indépendant du nombre d'antennes à la station de base. Par conséquent, le nombre d'antennes au niveau de la station de base peut être rendu aussi grand que possible sans augmenter le temps système d'estimation de canal [2].

I.6.3.Propagation favorable :

Cela signifie que la condition de la matrice de canaux entre le réseau d'antennes de la station de base et l'utilisateur est bonne. En Massive MIMO, sous certaines conditions, des caractéristiques de propagation favorables tiennent compte de la loi des grands nombres [2].

I.7.les avantages du MIMO massive :

les avantages offerts par le MIMO massif encouragent leur développement. Parmi c'est avantages :

I.7.1.Efficacité spectrale :

Ce sujet devient de plus en plus important car nous occupons de plus en plus le spectre électromagnétique pour divers protocoles de communication. Les gouvernements sont réservé une large bande de fréquence pour la 5G, mais le spectre n'est pas illimité. Massive MIMO utilise son réseau d'antennes pour focaliser les faisceaux vers un seul utilisateur. Cela lui permet d'offrir une efficacité spectrale 10 fois supérieure à celle des systèmes MIMO utilisés pour la 4G.

I.7.2.Efficacité énergétique :

La technologie MIMO massif.

L'efficacité énergétique des systèmes électroniques devient une préoccupation majeure pour les nouveaux concepteurs système de télécommunication. Avec Massive MIMO, les antennes peuvent être conjuguées pour augmenter le gain de signaux transmis. Cela signifie qu'ils émettent moins d'énergie lors de la transmission de données, ce qui rend le système plus économe en énergie.

I.7.3.Suivi des utilisateurs :

Le MIMO massif est particulièrement efficace sur le plan énergétique et peut suivre les utilisateurs de manière très précise. Cela est rendu possible par la réduction de la largeur du faisceau de l'antenne lorsqu'elle est focalisée pour obtenir un gain élevé. En conséquence, la station de base doit suivre chaque utilisateur avec un signal à faisceau étroit, ce qui garantit une connexion plus fiable et de meilleure qualité pour les utilisateurs par rapport au signal large utilisé jusqu'à présent [2].

I.8.Types de MIMO massif :

I.8.1.Système MIMO massif mono-utilisateur :

Dans un système MIMO mono-utilisateur, il y a une station de base avec plusieurs antennes d'un côté et un seul utilisateur de l'autre côté. Cependant, il n'est pas optimal du point de vue de l'efficacité énergétique d'utiliser un grand nombre d'antennes pour desservir un seul utilisateur, ou un petit nombre d'utilisateurs [8].

L'équation qui représente le signal reçu par l'utilisateur dans ce système MIMO mono-utilisateur est la suivante :

$$y = \sqrt{P_u}hS + w(\mathbf{I.1})$$

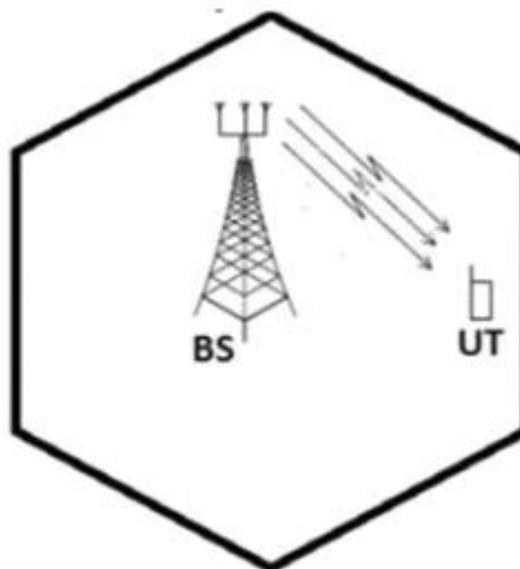


Figure I.7: Single-user Massive MIMO.

Notons par :

P_u : le SNR de liaison montante.

La technologie MIMO massif.

h : le vecteur de réponse de canal.

S : le vecteur des symboles.

W : le vecteur de bruit AWGN.

I.8.2.MIMO massif multiutilisateur :

Dans un système MIMO massif multi-utilisateur, plusieurs utilisateurs peuvent partager la même ressource temps-fréquence. Par rapport au MIMO mono-utilisateur, le MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) offre une plus grande efficacité. Dans cette section, nous étudions un système MU-MIMO dans une cellule unique où la station de base (BS) gère K utilisateurs, et chaque terminal est équipé d'une antenne.

L'équation suivante représente le signal reçu à la station de base :

$$y = \sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^k \sqrt{P_u} h_k s_{i_k} + w \quad (\text{I.2})$$

$$y = \sum_{k=1}^k \sqrt{P_u} H_s s + w \quad (\text{I.3})$$

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 k ème UT et w représente le bruit blanc additif gaussien (AWGN).

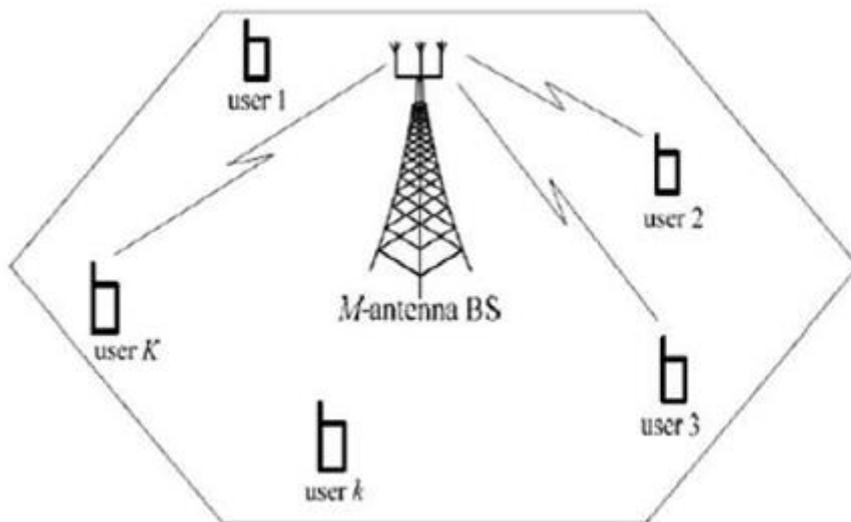


Figure I.8: Système MU-MIMO massif. M-antennes de BS dessert K simple antenne UT.

Lorsque K est supérieur ou égal à 2, le signal provenant de chaque terminal se mélange avec ceux des autres terminaux, ce qui conduit à des informations mutuelles plus faibles pour chaque terminal dans le cas du MU-MIMO par rapport au SU-MIMO, même si la puissance transmise à chaque terminal est la même.

Toutefois, lorsque le nombre d'antennes M est nettement plus grand que le nombre d'utilisateurs K , le système bénéficie de l'orthogonalité qui annule les interférences provenant des autres utilisateurs. De plus, les antennes des

La technologie MIMO massif.

terminaux sont quasiment non corrélées et indépendantes, ce qui rend le canal de propagation favorable. C'est la raison pour laquelle Massive MIMO est considéré comme le meilleur candidat pour le MU-MIMO[8].

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

Dans cette section, nous examinons les contraintes des systèmes MIMO multi-utilisateurs dans des cellules non coopératives lorsque le nombre d'antennes M tend vers l'infini. Que ce soit pour une seule cellule ou pour un système MIMO multi-cellules, l'augmentation infinie de M permet d'éliminer le bruit et les fluctuations de Rayleigh. Cependant, les interférences causées par la contamination du signal pilote persistent.

Le concept de contamination du signal pilote est nouveau dans le contexte du MU-MIMO cellulaire et est illustré dans la figure I.10. L'estimation du canal à la station de base de la cellule l est affectée par le signal pilote de la cellule j . La station de base de la cellule l transmet partiellement son signal vers les terminaux de la cellule adjacente. En raison de la formation de faisceau, les interférences causées à la cellule j ne disparaissent pas de manière asymptotique lorsque M tend vers l'infini. C'est pourquoi nous nous intéressons au système MU-MIMO-OFDM cellulaire avec des cellules hexagonales et des sous-porteuses NFFT. Chaque cellule est équipée de M antennes au niveau de la station de base et dessert K terminaux indépendants. Les stations de base sont considérées comme 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 notée H_{jl} . Basant sur l'échange, la matrice de canaux de liaison descendante entre la station de base de la cellule j et le terminal de la cellule l est présentée par H_{jl}^T [9].

Le signal reçu par la j -ième BS dans la cellule l est le suivant :

$$y_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{P_u} h_{jlk} s_{lk} + w \quad (\text{I.4})$$

$$y_j = \sum_{l=1}^L \sqrt{P_u} H_{jlk} s_{lk} + w \quad (\text{I.5})$$

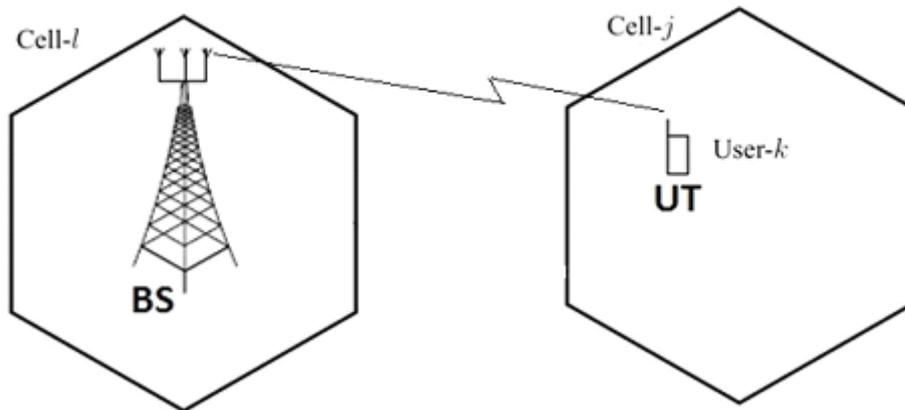


Figure I.9: La BS dans la l -ième cellule et le k -ième UT dans la j -ième cellule.

I.8.4. MIMO massif distribuée :

La technologie MIMO massif.

Le MIMO massif distribué est considéré comme un cas distinct de MU-MIMO pour fournir en plus une plus Grande capacité du système pour transmettre et recevoir des signaux à l'aide d'antennes déployées de manière dispersée. 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 les interfaces RF sont onéreux et peuvent causer des problèmes encore plus importants[9].

I.9.Comparaison entre MIMO et MIMO massif :

Le MIMO utilise plusieurs antennes pour améliorer la capacité du système et gérer les interférences , tandis que le MIMO massif va encore plus loin en utilisant un grand nombre d'antennes pour obtenir des gains de capacité plus importants et une meilleure suppression d'interférences. Le MIMO massif est considéré comme une technologie clé pour les réseaux sans fil de prochaine génération.

I.10.Défis des systèmes MIMO Massifs :

Malgré les avantages considérables du MIMO massif, il existe encore plusieurs défis à relever. Les systèmes MIMO massifs sont confrontés aux défis majeurs suivants :

I.10.1.La contamination des séquences pilotes :

Dans les systèmes multicellulaires, il est fréquent que les utilisateurs de différentes cellules utilisent des séquences pilotes distinctes et orthogonales pour estimer le canal. Cependant, en raison du nombre limité de séquences pilotes disponibles, il peut arriver que deux utilisateurs appartenant à des cellules adjacentes utilisent la même séquence pilote, ce qui entraîne une contamination des pilotes. Cette situation peut avoir un impact négatif sur les performances de la démodulation des signaux montants (UL) ainsi que sur le pré-codage des signaux descendants (DL), ce qui réduit les capacités théoriques du système. Des études ont été réalisées pour atténuer cette contamination des pilotes en utilisant différentes approches, telles que la coopération entre les cellules, l'optimisation de l'allocation des séquences pilotes en fonction de la localisation des cellules, ou l'utilisation de méthodes de pré-codage adaptées à la structure des cellules. La figure suivante illustre ce phénomène de contamination des pilotes dans les systèmes MIMO massifs [10].

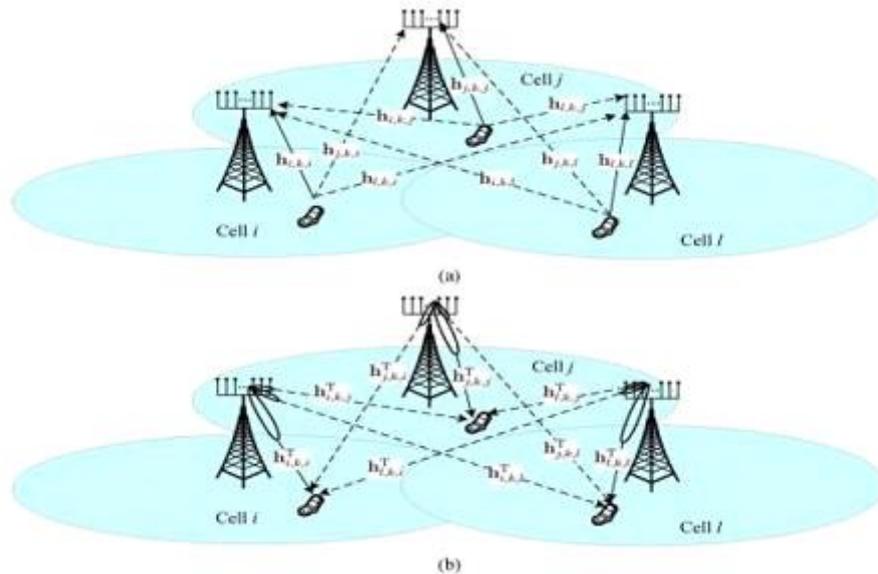


Figure I.10: Illustration du concept de pilote contamination. (a) liaison montante (b) liaison descendantes.

I.10.2. Propagation Défavorable :

L'environnement où le Massive MIMO peut fonctionner est de propagation favorables. Cependant, en pratique, il peut y avoir un environnement de propagation défavorable au canal. 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 consiste à répartir les antennes BS sur une grande surface[11].

I.11. Conclusion :

La technologie Massive MIMO est une technologie clé pour les futures industries 5G. Elle permet d'améliorer considérablement la capacité des canaux, l'efficacité énergétique et l'efficacité spectrale du système de télécommunication sans fil. En particulier, le canal de transmission est le plus sensible aux effets du défaut de transmission comme le trajet multiple, l'effet doppler, 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. MIMO massive est capable de servir un très grand nombre d'utilisateurs simultanément et dans la même fréquence. Cette technologie massive MIMO ouvrira de nouveaux horizons et fournira un débit de données et une capacité de réseau supérieurs. Dans le chapitre suivant, nous répondrons aux questions suivantes : Quels types d'antennes sont utilisés pour le MIMO massif ?

Chapitre II : Antennes MIMO Massives Beamforming.

II.1.Introduction :

Les systèmes de communication sans fil traditionnels utilisent généralement des antennes traditionnelles omnidirectionnelles ou à trois secteurs. La répartition spatiale de l'énergie rayonnée par ces antennes est déterminée pour optimiser la couverture. Cependant, ces schémas sont configurés à la fabrication et ne peuvent pas s'adapter aux conditions de propagation, d'où la dissipation de puissance dans toutes les directions. Mais comme les utilisateurs ne reçoivent que des signaux provenant de directions spécifiques, il en résulte une perte d'énergie et une pollution de l'environnement électromagnétique. Par conséquent, les interférences entre systèmes deviennent un problème: limitation du nombre d'utilisateurs, dégradation de la qualité de la communication et limitation de la portée des stations de bases.

Grâce à des développements remarquables dans le traitement du signal, les réseaux d'antennes peuvent être utilisés pour recevoir de l'énergie électromagnétique (ou des informations) dans une direction spécifique, tout en rejetant des informations ou en annulant de l'énergie dans des directions indésirables. Ainsi, le réseau peut être utilisé pour atténuer ou empêcher complètement les interférences avec le système de communication. Cependant, ce développement dans le traitement du signal a conduit au concept de réseaux d'antennes adaptatives, qui appartient à une technologie importante appelée antennes intelligentes. Ces réseaux ont adapté leurs modèles de rayonnement ou de réception en fonction de l'environnement dans lequel ils opèrent. Cela augmente encore de manière significative la capacité disponible du système de communication sans fil.

II.2.Définition d'antenne :

C'est un dispositif qui reçoit des signaux d'une ligne de transmission, les convertit en ondes électromagnétiques et les diffuse dans l'espace libre lorsque l'antenne est en mode d'émission. En mode de réception, elle capte tout simplement les ondes électromagnétiques incidentes et les reconvertit en signaux.

D'après la norme IEEE des définitions des termes pour les antennes, une antenne est un moyen de rayonnement ou de réception des ondes radio [12].

La Figure II.1 en fait une illustration très simple d'une antenne.

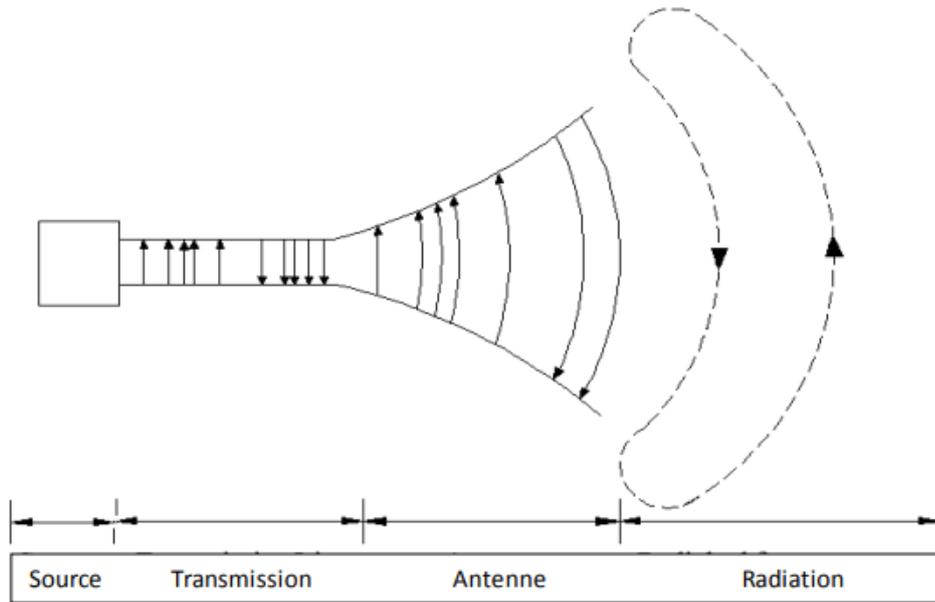


Figure II.1: Rayonnement d'une antenne.

II.3. Antennes Réseaux :

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes élémentaires réparties dans l'espace dont les sorties sont pondérées en amplitude et/ou en phase avant sommation. Le diagramme de rayonnement du réseau dépend de l'amplitude et de la phase du signal émis par chaque source. Avec ce contrôle de l'amplitude et/ou de la phase de la source, une antenne réseau peut produire un diagramme de rayonnement dans une direction souhaitée avec une forme souhaitée, par exemple plusieurs lobes sont créés simultanément dans la même direction. Ainsi, une antenne adaptative peut être définie comme un réseau capable de modifier son diagramme de rayonnement en temps réel à l'aide d'outils de synthèse numérique [13].

Les antennes réseau peuvent avoir une variété de configurations géométriques ; ces configurations varient considérablement mais peuvent être classées comme suit :

- les réseaux linéaires : alignement des sources sur une droite,



Figure II.2: Réseau linéaire.

- les réseaux planaires : les sources sont disposées sur un plan,

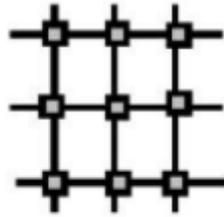


Figure II.3: Réseau planaire.

- les réseaux circulaires : les sources sont disposées sur un cercle,

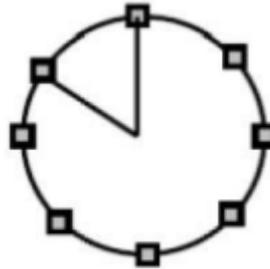


Figure II.4: Réseau circulaire.

- les réseaux volumiques : les sources sont réparties dans un volume[14].

Le champ total rayonné par le réseau est déterminé par sommation des vecteurs champs rayonnés par les différents éléments. Pour qu'un modèle soit hautement directif, les champs doivent interférer de manière constructive et intervenir dans le sens souhaité nocif pour l'espace restant[13].

Plusieurs facteurs contribuent au modèle réseau-rayons :

- la configuration géométrique (linéaire, circulaire, planaire, volumique),
- l'espacement entre les sources,
- l'amplitude d'excitation pour chaque élément,
- la phase d'excitation pour chaque élément,
- la polarisation de chaque élément,
- le diagramme élémentaire [14].

II.4. Antennes intelligentes :

II.4.1. Concept d'antennes intelligentes :

Le système présente un avantage majeur avec sa capacité de réagir automatiquement en temps réel aux variations de canal de propagation. Cela permet de réduire les niveaux des lobes secondaires présents dans la direction des interférences, tout en maintenant le lobe principal orienté vers la direction utile habituelle. Ces systèmes reposent sur un réseau d'antennes et un processeur récepteur adaptatif en temps réel, qui attribue des pondérations aux éléments afin d'optimiser le signal de sortie selon des algorithmes de contrôle prédéfinis.

Antennes MIMO Massives Beamforming.

Un réseau d'antennes adaptatives peut être défini comme un réseau capable de modifier son diagramme de rayonnement, sa réponse fréquentielle et d'autres paramètres grâce à une boucle à retour de décision interne pendant le fonctionnement de l'antenne[15].

II.4.2. Structure d'une antenne intelligente :

Les antennes intelligentes résultent de la combinaison des réseaux d'antennes et du traitement du signal pour former, orienter et contrôler de manière souhaitable un diagramme de rayonnement. Ces antennes intelligentes remplissent essentiellement deux fonctions : la détection de la position angulaire des sources et la formation du faisceau de l'antenne dans les directions privilégiées.

L'architecture de l'antenne intelligente est composée fondamentalement de trois parties :

- ✓ Un réseau d'antennes; un ensemble d'antennes disposées régulièrement selon une configuration linéaire, circulaire, ou planaire pour capter de différentes directions les signaux entrant et déterminer leur nombre.
- ✓ Un estimateur de directions d'arrivées; ce bloc estime et classe les angles ou bien les directions d'arrivées en identifiant les signaux venant originalement du bon utilisateur et ceux venant des interférents.
- ✓ Un bloc formateur de voie (beamformer); ce bloc forme le diagramme de rayonnement de l'antenne intelligente en orientant son lobe principal vers la direction du bon utilisateur, et au même temps minimisant l'influence des signaux d'interférences et de bruit.

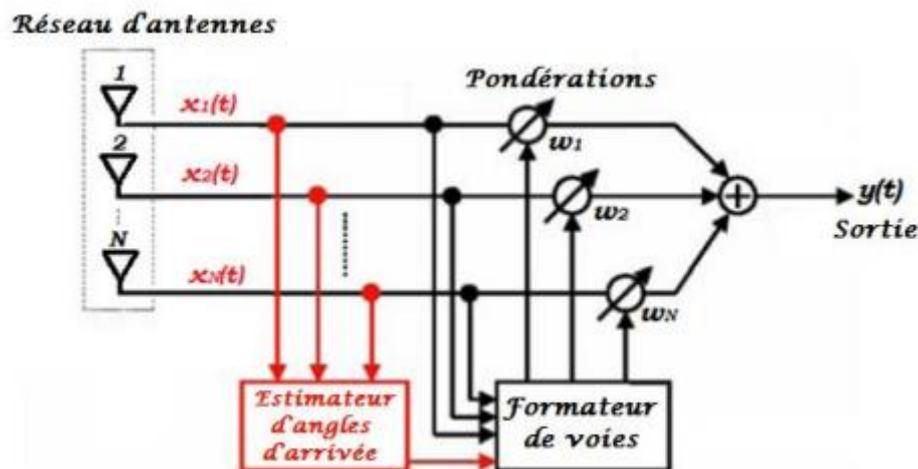


Figure II.5: Schéma de bloc d'une antenne intelligente[16].

II.5. Avantages des antennes intelligentes :

Antennes MIMO Massives Beamforming.

L'utilisation des antennes intelligentes a de nombreux avantages qui peuvent être résumés comme suit :

- L'annulation des interférences co-canal réalisée grâce à la formation de faisceaux, ce qui permet d'augmenter le rapport signal/interférence (RSI) en créant des zéros dans le diagramme de rayonnement pour supprimer les signaux indésirables provenant des interférents.
- Portée accrue grâce au gain du rapport signal sur bruit (SNR). Le lobe principal de l'antenne pointe dans la direction de l'appareil mobile, nécessitant ainsi la localisation de l'appareil mobile dans l'espace (d'où le nom « antenne intelligente »).
- En réduisant l'impact des trajets multiples, les antennes intelligentes limitent la dispersion des retards, ce qui se traduit par une augmentation des débits et une diminution de la complexité de l'égaliseur dans la chaîne de réception.
- Augmentation de la capacité:
 - Dans les systèmes cellulaires, l'annulation des interférences co-canal permet une réutilisation plus importante des fréquences (diminution du nombre de cellules par motif).
 - Technique d'Accès Multiple par Répartition Spatiale (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.
- Meilleur service: L'utilisation de systèmes d'antennes intelligentes permet au réseau d'accéder aux informations spatiales des utilisateurs. Ces informations peuvent être envoyées pour évaluer l'emplacement de l'utilisateur avec plus de précision que dans les réseaux existants. Cela peut être appliqué dans des services tels que les appels d'urgence.
- Coût réduit: étant donné que le système d'antenne intelligente optimise le gain disponible pour l'utilisateur en combinant les entrées de plusieurs éléments, l'efficacité de l'alimentation est améliorée, ce qui réduit le coût de l'amplificateur et la faible consommation d'énergie.
- Meilleure sécurité: La sécurité est un enjeu primordial dans une société de plus en plus dépendante de la conduite des affaires et de la transmission des informations personnelles. L'utilisation de systèmes d'antennes intelligentes réduit le risque de détournement de connexion. Vu de la station de base, l'intrus doit se trouver sur le même chemin que l'utilisateur.
- Compatibilité: La technologie d'antenne intelligente peut être utilisée avec différentes technologies d'accès multiple telles que TDMA, FDMA et CDMA. Il est compatible avec presque toutes les méthodes de modulation et toutes les largeurs de bande[15].

II.6.Types des antennes intelligentes :

Il existe deux systèmes d'antennes intelligentes :

- Le système à faisceaux commutés.
- Réseau adaptatif.

Les deux techniques ont pour objectif d'accroître le gain dans la direction de l'utilisateur. Ceci est réalisé en dirigeant le lobe principal dans la direction de l'utilisateur désiré et les zéros vers la direction des interférences[17].

Antennes MIMO Massives Beamforming.

II.6.1. Système d'antennes à faisceaux commutés SBA :

Le système se compose de plusieurs faisceaux fixes à haute sensibilité dans des directions spécifiques. Le système détecte le signal le plus fort et passe d'un faisceau à l'autre lorsque l'utilisateur se déplace le long du secteur. Un système à faisceau commuté consiste essentiellement en un réseau d'antennes connecté à un réseau de mise en forme de faisceau (également appelé réseau d'alimentation de faisceau), qui est connecté à un système de commutation qui permet de sélectionner le faisceau le plus approprié afin de localiser le signal d'intérêt spécifique à chaque utilisateur. Un système d'antenne à faisceau commuté divise l'espace angulaire en secteurs, chaque secteur contenant un diagramme de rayonnement prédéterminé. Lorsqu'un utilisateur entre dans la zone de couverture du système et est détecté, le secteur où se trouve l'utilisateur est déterminé par l'antenne et le système bascule sur le faisceau correspondant.

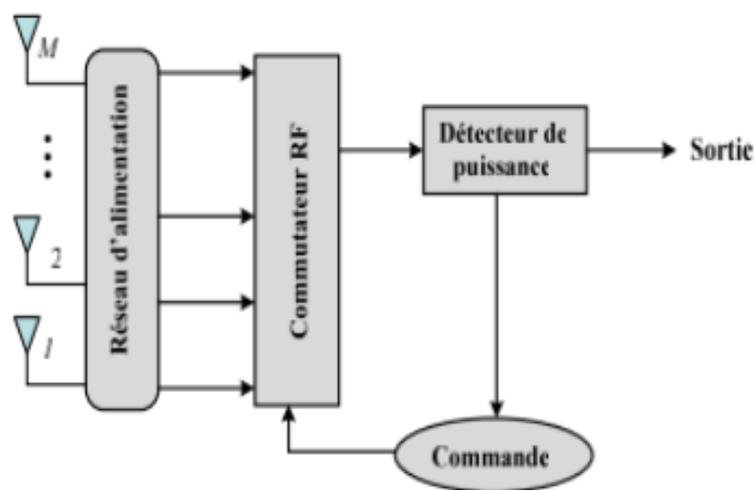


Figure II.6: Système à faisceaux commutés.

Si l'appareil mobile est au bord de l'azimut du faisceau, le signal fort s'estompera rapidement avant que l'utilisateur ne passe d'un micro-secteur à un autre. De plus, les systèmes à faisceaux commutés ne font pas la distinction entre les signaux utiles et les signaux parasites. Si le signal interférant se trouve dans le faisceau sélectionné, la qualité du signal sera médiocre[13].

II.6.2. Antennes adaptatives :

Les antennes adaptatives sont capables d'ajuster leur direction ou leur diagramme de rayonnement pour optimiser la réception et la transmission d'un signal.

Elles sont utilisées pour améliorer le rapport signal/bruit+brouillage (SINR) à la réception ainsi que l'efficacité spectrale. En utilisant divers algorithmes de traitement du signal, un système adaptatif identifie et suit tous les signaux afin de minimiser les brouillages et de maximiser la réception des signaux utiles.

Antennes MIMO Massives Beamforming.

La différence entre les deux méthodes – antennes adaptatives et antennes à commutation de faisceaux – est illustrée de façon simplifiée à la Figure II.7 qui montre comment les algorithmes adaptatifs se comportent par rapport aux signaux brouilleurs et au signal utile [16].

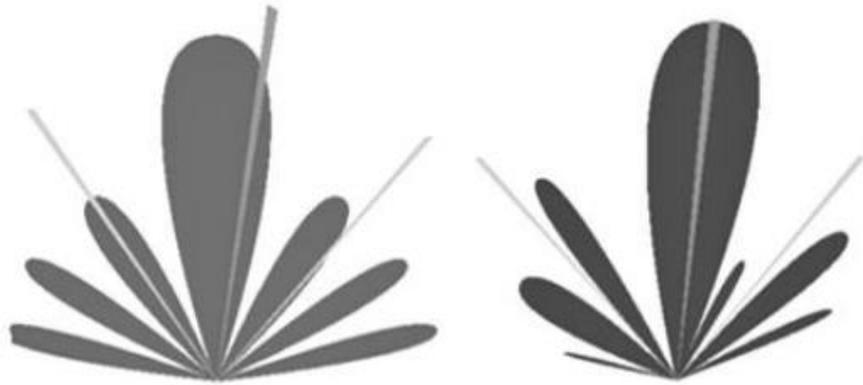


Figure II.7: Différence entre un système à commutation de faisceaux et un système adaptative.

II.6.3.Principe des antennes adaptatives :

La mise en œuvre des antennes adaptatives est la structure la plus utilisée dans le domaine des antennes intelligentes. Le principe est le suivant: Premièrement, la station de base intelligente utilise l'algorithme de détection DoA pour détecter et déterminer la direction d'arrivée (DoA) de la source d'émission dans son environnement électromagnétique. Le système identifie alors le signal utile de l'utilisateur et le sépare des autres signaux parasites. Enfin, il calcule les poids et forme un faisceau d'énergie dirigé vers le signal utile pour suivre l'appareil mobile tout au long de la communication et crée un point nul dans la direction des interférences pour limiter les interférences causées par d'autres signaux transmis, réduisant ainsi le niveau d'interférence signaux émis par d'autres téléphones portables[13].

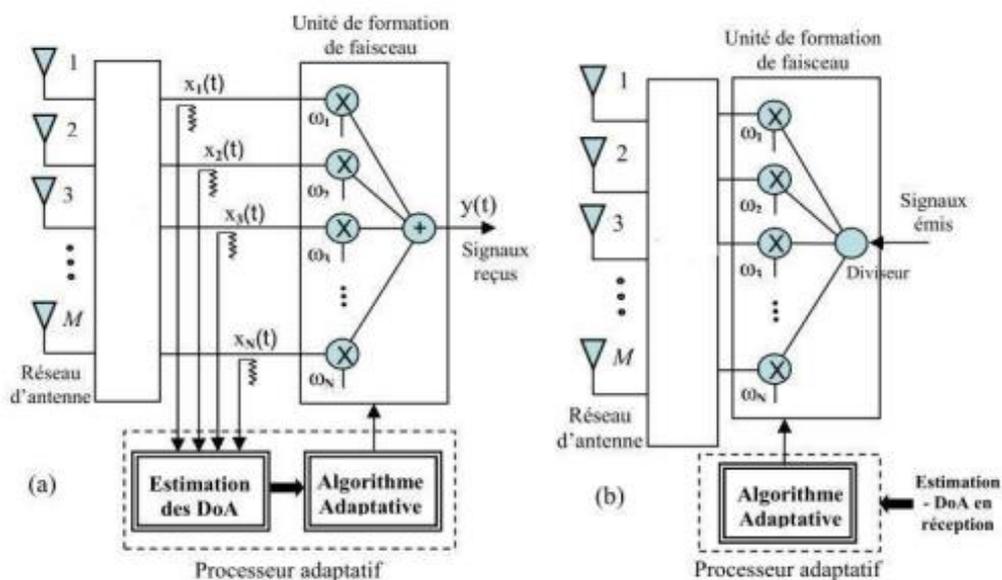


Figure II.8: Structure et principe du système adaptatif en réception (a) et en émission(b).

II.7.Les algorithmes adaptatifs :

Antennes MIMO Massives Beamforming.

Ces algorithmes sont capables de modifier automatiquement leurs comportements pour atteindre des performances optimales en fonction de leurs contextes d'exécution. Les algorithmes de formation de voies sont conçus pour optimiser certains critères spécifiques, tel que le critère de Minimum Variance Distortionless Response (MVDR), le critère de Maximum Signal to Interférence plus Noise Ratio (MSINR), et le critère de Minimum Mean Square Error (MMSE). Le dernier critère est souvent utilisé comme critère d'optimisation où le filtre spatial est optimisé pour réduire au minimum la valeur de la moyenne carrée de l'erreur du signal. Lorsque l'optimum d'un critère peut être atteint par un algorithme, ce dernier est qualifié d'optimal au sens du critère considéré. Plusieurs algorithmes de complexité variable existent pour obtenir des poids optimaux. Ces algorithmes d'adaptation peuvent être divisés en deux catégories [18]:

- Méthodes aveugles.
- Méthodes non aveugles.

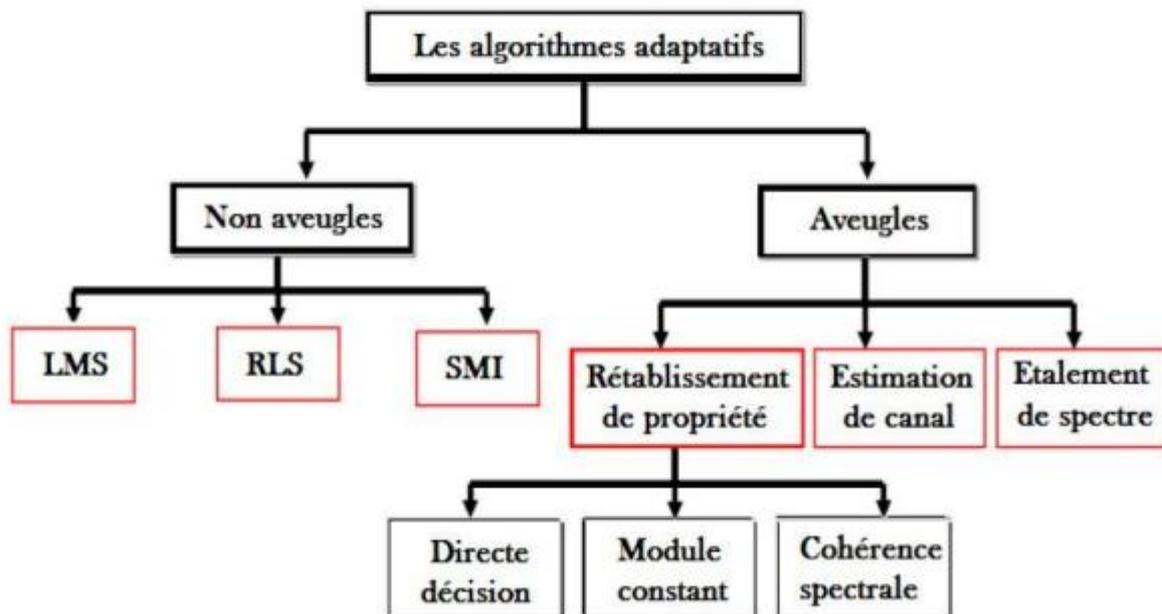


Figure II.9: Classification des algorithmes adaptatifs.

- **Méthodes aveugles :**

Le terme aveugle vient du fait que ces procédés dits d'auto-apprentissage visent à récupérer directement la séquence d'information transmise sans accéder à la séquence apprise ni identification préalable du canal. Les détecteurs aveugles exploitent la connaissance de la signature temporelle de l'utilisateur désiré. Cette connaissance est également utilisée pour estimer la signature spatiale (la réponse des antennes) de l'utilisateur en question. Cette connaissance est également utilisée pour estimer les caractéristiques spatiales (réponses des antennes) des utilisateurs associés.

- **Méthodes non aveugles :**

Antennes MIMO Massives Beamforming.

Dans les méthodes non aveugles, un signal de référence (t) est utilisé pour ajuster le vecteur de poids. Le signal (t) est connu à la fois de l'émetteur et du récepteur. Il est envoyé par l'émetteur pendant une période de référence au récepteur. L'algorithme formateur de faisceau utilise le signal de référence pour calculer le vecteur de pondération optimal. En effet, le récepteur n'a pas connaissance des signaux émis pendant toute la durée de la communication, mais uniquement pendant la durée associée à la séquence d'apprentissage.

Les algorithmes les plus utilisés sont:

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

II.8. Antennes MIMO Beamforming :

De manière générale, le MIMO beamforming est une technique de filtrage spatial qui exploite les propriétés spatiales des signaux captés par 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. Les termes "précodage" et "combinaison" sont couramment utilisés lorsque le filtre spatial est conçu pour réaliser le multiplexage spatial à la fois à l'émetteur et au récepteur[18].

II.8.1. Concept de base :

Nous proposons un système de communication de M antennes d'émission et N antennes de réception qui est illustré sur la Figure II.9:

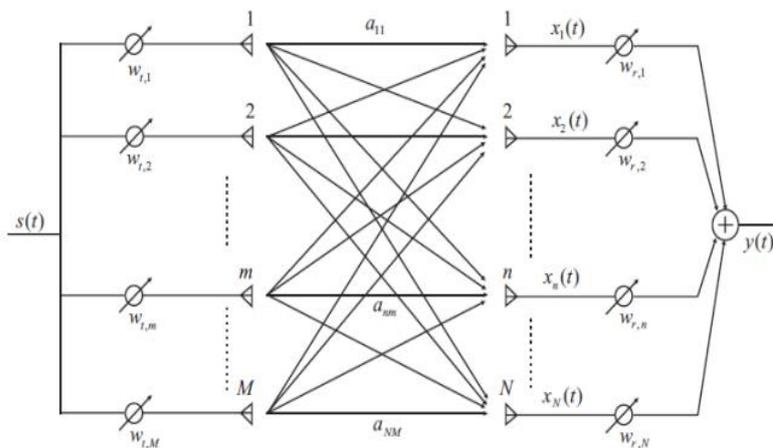


Figure II.10: Configuration de canal MIMO avec Beamforming.

Le signal de sortie $y(t)$ du système est donné par :

Antennes MIMO Massives Beamforming.

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

L'équation $y(t)$ peut être exprimée sous une forme vectorielle :

$$y(t) = W_r^H A W_t(t) s(t) + W_r^H(t) \quad (\text{II.2})$$

Où :

A : la matrice de transmission, Où a_n , représente la réponse de gain de canal entre le m -ième élément d'antenne dans l'émetteur et le n -ième élément d'antenne dans le récepteur.

$s(t)$: le signal de transmission distribué au réseau d'antennes et multiplié par la pondération complexe w_t , pour le m -ième élément.

$n_n(t)$: le bruit blanc gaussien multiplié par le poids complexe w_r pour le n -ième élément.

$$W_r = [w_{r,0}, w_{r,1}, \dots, w_{r,N-1}]^T$$

Et :

$$W_t = [w_{t,0}, w_{t,1}, \dots, w_{t,M-1}]^T$$

$(.)^H$: le transposé hermitien.

$(.)^*$: le conjugué.

$(.)^T$: le transposé du vecteur(ou matrice)[19].

II.9. Antennes MIMO massive Beamforming :

Les systèmes MIMO massifs tirent parti d'un grand nombre de petits éléments rayonnants, appelés dipôles élémentaires, pour exploiter des bandes de fréquences plus élevées. En utilisant plusieurs dipôles élémentaires, il est possible d'avoir plusieurs émetteurs/récepteurs. Les émetteurs/récepteurs peuvent utiliser soit une seule antenne élémentaire, soit un ensemble d'antennes élémentaires [20].

Lorsque le nombre d'antennes à la station de base dépasse le nombre d'utilisateurs, les canaux deviennent pratiquement orthogonaux. Cela permet d'optimiser les techniques de traitement telles que la formation de faisceaux, même en présence d'interférences.

Un avantage majeur des systèmes MIMO massifs avec formation de faisceaux est que plus le nombre d'antennes à la station de base est élevé, plus le lobe principal du diagramme de rayonnement devient étroit, réduisant ainsi les interférences [21].

Cependant, l'utilisation de réseaux d'antennes massifs présente de nouveaux défis, notamment une augmentation significative des coûts de traitement matériel et des signaux. De plus, l'installation de tels réseaux d'antennes peut être complexe en pratique, nécessitant ainsi la conception et la mise en place de réseaux d'antennes capables de s'adapter de manière flexible à des environnements complexes [22].

Antennes MIMO Massives Beamforming.

II.9.1.Sélection d'antennes souples :

Un réseau phasé est utilisé pour connecter la bande de base au réseau d'antennes. Ensuite, le processus de formation de faisceau peut être divisé en formation de faisceau numérique et formation de faisceau radiofréquence. La formation de faisceaux RF est effectuée à l'aide de circuits analogiques en modifiant la phase du signal sur l'antenne. Étant donné que le processus de formation de faisceau se déroule dans le domaine RF et utilise un équipement analogique, les termes formation de faisceau analogique et formation de faisceau RF sont souvent utilisés de manière interchangeable dans la littérature. Cependant, il convient de noter que « analog beamforming » dans la littérature fait également référence à la structure de la figure II.12. Un réseau d'antennes à N éléments connectés à une seule chaîne RF. Dans ce schéma, chaque antenne est équipée d'un déphaseur.

II.9.2.MIMO massives Beamforming Numérique :

Le beamforming numérique est effectuée sous forme de précodage numérique, où le signal de bande de base modulé pour chaque canal RF est multiplié par un coefficient spécifique au niveau de l'émetteur ou du récepteur. La formation de faisceau numérique offre une flexibilité et de bonnes performances, comme le montre la Figure II.11.

Cette architecture avancée ne sert pas vraiment à orienter les faisceaux, mais à optimiser la couverture des différents récepteurs grâce à des flux calculés individuellement. Chaque antenne possède son propre émetteur-récepteur et convertisseur de données qui peuvent traiter et diffuser plusieurs flux de données indépendants.

La station de base (BS) et le terminal forment une boucle de réglage : le signal pilote du terminal est utilisé pour réajuster en permanence la matrice de précodage dans la BTS pour le terminal. Par conséquent, chaque récepteur peut obtenir un signal parfaitement adapté via un chemin différent. Ce type d'ajustement est optimal dans les systèmes TDD où le canal radio présente un comportement mutuel en liaison montante et en liaison descendante[23].

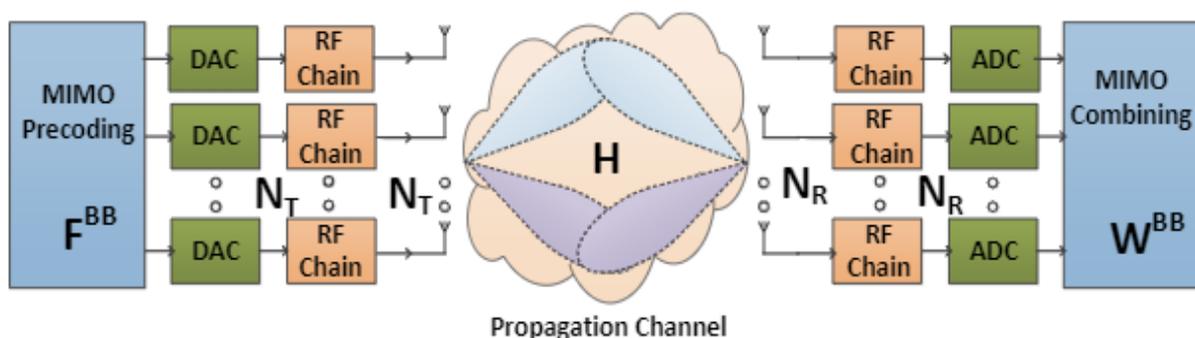


Figure II.11:MIMO Beamforming Numérique.

II.9.3.MIMO massives Beamforming analogique :

Antennes MIMO Massives Beamforming.

La formation de faisceau analogique est généralement mise en œuvre à l'aide de réseaux de déphaseurs à commande numérique. Dans cette configuration, les déphaseurs RF peuvent être actifs ou passifs, et plusieurs éléments d'antenne sont connectés à une seule chaîne RF par l'intermédiaire de déphaseurs, comme le montre la figure II.12.

Les poids des déphaseurs sont ajustés de manière adaptative à l'aide d'un traitement de signal numérique, en utilisant des stratégies spécifiques pour orienter le faisceau et atteindre un objectif donné, comme maximiser la puissance du signal reçu[23].

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.

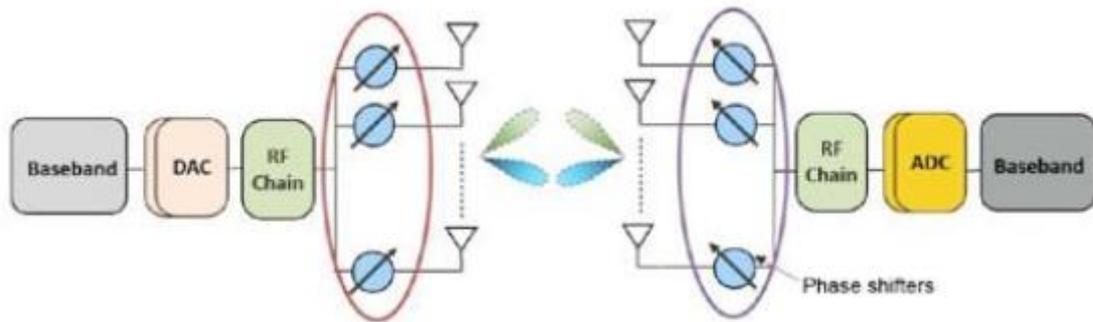
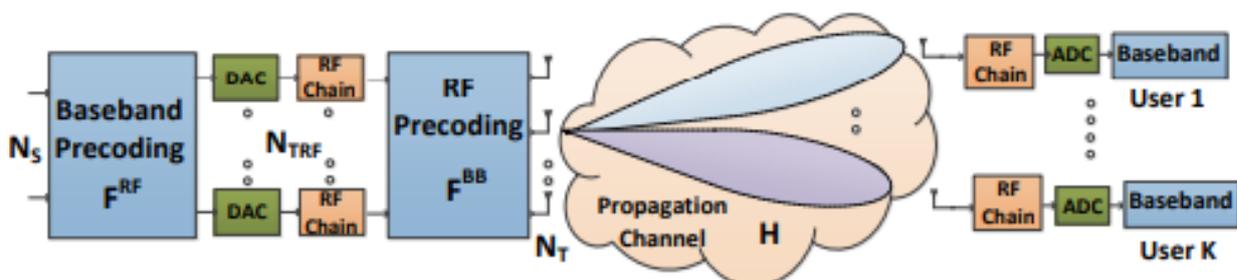


Figure II.12: MIMO Beamforming analogique.

II.9.3. MIMO Massives Beamforming hybride :

Le beamforming hybride est une combinaison des deux techniques précédentes : numérique où le nombre de chaînes RF est égal à celui des antennes et analogique à complexité réduite. 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 un peu inférieure 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[23].

En supposant que $N_s > 1$, alors l'approche hybride permet la mise en oeuvre du multiplexage spatial et du MIMO multiutilisateur.



II.9.3.1.HBF mono-utilisateur :

La formation de faisceaux hybride mono-utilisateur optimise les réseaux de formation de faisceaux analogiques et numériques pour former des faisceaux hautement directionnels vers le destinataire prévu. C'est ce que l'on appelle communément la formation de faisceaux hybride point à point.

Un système MIMO mono-utilisateur permet une communication entre un émetteur et un récepteur ayant un nombre d'antennes supérieur à 1. Ce système est dit point à point car à un instant t et à une fréquence f donnée, il n'y a qu'un seul utilisateur qui peut transmettre. Autrement dit la station de base rayonne dans toutes les directions de cellule et alloue à chaque utilisateur une plage temporelle ou fréquentielle sur laquelle il peut transporter ces informations.

En code (CDMA) est également possible de séparer les utilisateurs en leur donnant à chacun un code orthogonale. La figure II.14 montre une répartition en temps ou en fréquence, dans cet exemple la BS émet les données de chaque UE, le 1^{er} à recevoir étant le jaune, le 2^{ème} est le bleu, le 3^{ème} est le rouge et le dernier est le vert.

On peut voir que le SB rayonne uniformément dans toute la cellule, ce qui n'est pas très efficace d'un point de vue énergétique[24].

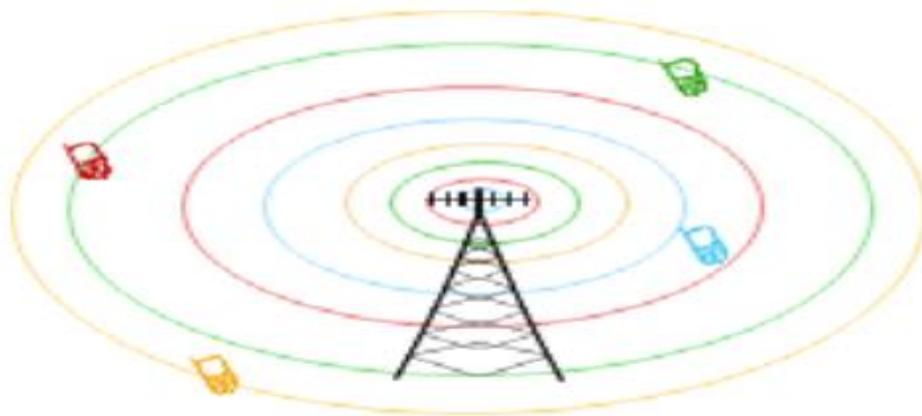


Figure II.14: Système beamforming mono-utilisateur.

II.9.3.2.HBF multiutilisateur :

Dans la formation de faisceaux hybrides multiutilisateurs, l'objectif est de former plusieurs faisceaux directionnels pour différents utilisateurs tout en minimisant les interférences entre eux. Ce système permet de séparer les utilisateurs spatialement afin de leur allouer toute la bande passante. En d'autres termes cela revient à ouvrir un lien RF entre la BS et chaque utilisateur. Comme il est illustré à la figure II.15, les utilisateurs sont visés individuellement ce qui permet d'ignorer les rayonnements inutiles dans les directions non souhaitables.

Antennes MIMO Massives Beamforming.

Cette technique favorise une plus grande efficacité énergétique et une meilleure capacité grâce à la possibilité d'allouer une bande passante complète à chaque utilisateur sur tous les temps selon le principe du SDMA [24].

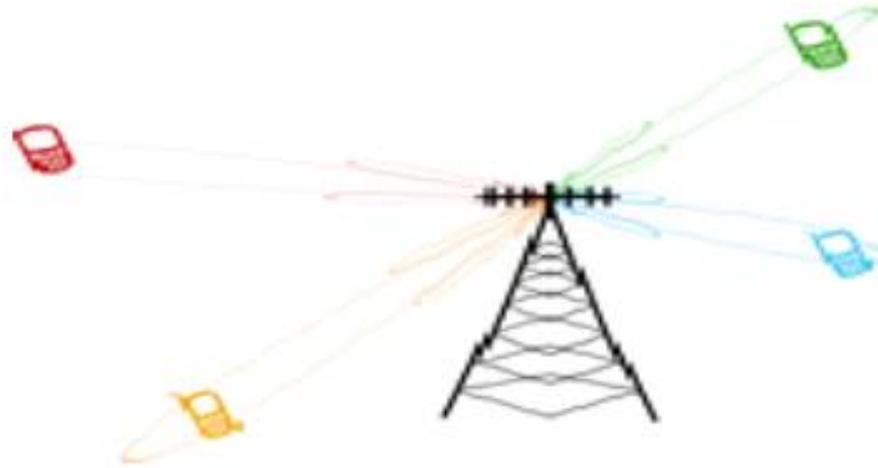


Figure II.15: Système beamforming multiutilisateur.

Deux architectures de formateur de faisceau analogique largement utilisées pour la formation de faisceau hybride sont présentées à la figure II.16.a et la figure II.16.b :

❖ Structure entièrement connectée :

Comme le montre la figure II.16.a, une architecture entièrement connectée consiste à connecter chaque chaîne RF à toutes les antennes via des additionneurs. Par conséquent, le signal transmis passe par M canaux radiofréquences (RF) (dont les mélangeurs, les amplificateurs de puissance, les déphaseurs, etc.). Comme il est illustré à la figure II.16.a, les signaux sont additionnés avant d'être appliqués à chaque antenne. L'architecture hybride entièrement connectée offre un gain de formation de faisceau élevé et une plus grande flexibilité d'orientation du faisceau [25].

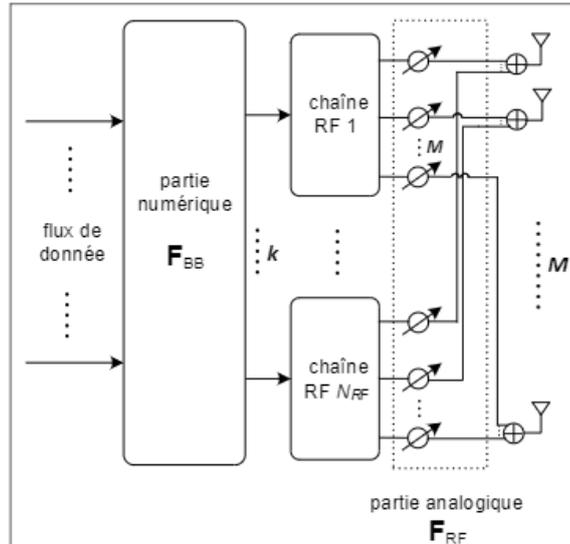


Figure II.16.a: Architecture des formateurs de faisceaux analogiques entièrement connectée.

❖ Structure partiellement connectée :

Alors que l'architecture de précodage hybride entièrement connectée offre un gain de formation de faisceau élevé et une plus grande flexibilité d'orientation de faisceau, cette dernière possède une application complexe et nécessite l'utilisation d'un sommateur pour chaque antenne. En fait, pour un tel système, le signal couvrira un nombre de canaux égal à $M \times N_{RF}$. Le précodage hybride partiellement connecté, comme le montre la figure II.16.b, peut réduire la complexité. En effet, l'ensemble du réseau d'antennes est divisé en M/N_{RF} sous-réseaux. Chaque canal RF est ensuite connecté à un certain sous-réseau. Cela réduit la complexité globale du système de M canaux RF, mais avec un gain de formation de faisceau égal à $1/N_{RF}$ par rapport à une architecture hybride entièrement connectée. Le MIMO massif combiné à des techniques de précodage hybrides partiellement connectées peut réduire considérablement le nombre d'émetteurs-récepteurs et la consommation d'énergie des systèmes 5G[25].

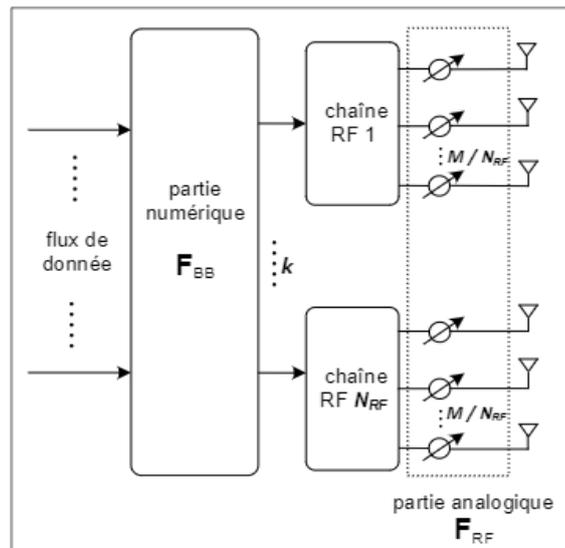


Figure II.16.b: Architecture des formateurs de faisceaux analogiques partiellement connectée.

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 : Le recuit simulé.

Le recuit simulé.

III.1.Présentation générale :

Le recuit simulé est une méthode d'optimisation qui tire son inspiration du processus de recuit utilisé pour durcir les métaux. L'idée de base est de simuler le refroidissement progressif d'un matériau en le chauffant à une température élevée, puis en le refroidissant lentement pour atteindre un état de stabilité.

De manière similaire, le recuit simulé cherche à explorer l'espace des solutions d'un problème d'optimisation en acceptant des mouvements qui conduisent à des solutions de moins bonne qualité, mais qui permettent également de s'échapper de minima locaux et de rechercher des solutions globalement meilleures.

III.2.Les origines :

Le recuit simulé est une généralisation de Monte Carlo, son but est de trouver la meilleure solution pour un problème donné. Développé en 1983 par trois chercheurs d'IBM, S. Kirkpatrick, CD Gelatt et MP Vecchi, et indépendamment en 1985 par V. Cerny à partir de l'algorithme Metropolis, il permet de décrire l'évolution des systèmes thermodynamiques. La méthode de recuit simulé est basée sur la méthode largement utilisée en métallurgie pour obtenir des alliages sans défaut, ce procédé dit "recuit".

Nous chauffons d'abord le métal à une température où il devient liquide (afin que les atomes puissent circuler librement). Une fois ce stade atteint, la température a été abaissée très lentement pour obtenir un solide. Si la température chute brutalement, on obtient un verre ; à l'inverse, si cette chute de température est très lente (laissant aux atomes le temps d'atteindre l'équilibre statistique), on obtient des structures de plus en plus régulières jusqu'à atteindre le minimum qui correspond à la structure parfaite d'un état d'énergie cristalline, le système est alors dit "gelé". Si le taux de refroidissement n'est pas assez lent, il peut mal fonctionner. Il faut ensuite les corriger en réchauffant légèrement le matériau afin de permettre aux atomes de retrouver une liberté de mouvement, facilitant d'éventuels réarrangements qui conduisent à une structure plus stable[26].

III.4.Recuit thermique:

La recherche d'un système physique pour l'état d'énergie le plus bas est un analogue formel d'un processus d'optimisation combinatoire. A température nulle, le système évolue d'une configuration à la configuration la plus basse énergie via une approche de type gradient. Ainsi, dans le cas d'un système frustré, la configuration atteinte est généralement un état métastable avec des énergies supérieures au minimum absolu.

Par contre, à des températures non nulles, le caractère probabiliste du changement de configuration peut permettre au système de remonter et d'émerger du bassin relativement le moins attractif vers un autre bassin plus profond. Idéalement, pour être proche du minimum, la température doit être suffisamment élevée pour permettre au système de sauter par-dessus la barrière, et elle doit être suffisamment basse pour qu'il soit toujours attiré vers le fond de la vallée.

Considérons alors une double dynamique: la dynamique de recherche d'un minimum à une température fixe, plus la dynamique de diminution de la température. Si vous démarrez à haute température, toutes les

Le recuit simulé.

configurations sont utilisables et le système a une faible préférence pour les états à faible énergie. En diminuant progressivement la température, le système peut d'abord rechercher un bassin d'attraction relativement important tout en évitant qu'il ne soit piégé par un attracteur métastable. Le nombre de configurations accessibles dépend de la température; à température moyenne, le système apparaît particulièrement sensible aux aspérités des paysages dynamiques. En réduisant lentement la température, nous évitons de piéger le système dans des vallées à haute énergie, en l'envoyant dans les bassins les plus importants et les plus profonds, où les chutes de température ultérieures le précipiteront au fond.

Ce mécanisme est appelé recuit et est similaire au cyclage thermique utilisé en métallurgie. En effet, dans le processus de refroidissement des métaux ou des alliages, on choisit la vitesse de chute de température en fonction des propriétés mécaniques souhaitées du solide. Par exemple, les aciers à couteaux sont durcis par refroidissement rapide: cette opération produit des cristaux très imparfaits, métastables mais très durs. En revanche, si l'on souhaite obtenir un matériau ductile et moins cassant, il faut obtenir une structure cristalline la plus parfaite possible, donc un recuit à des températures intermédiaires est nécessaire pour éliminer les défauts cristallins. Les schémas suivants permettent de suivre ces phénomènes dans le cas des ferromagnétiques [27].

III.5.Algorithme du recuit simulé :

III.5.1.Convergence théorique du recuit simulé :

Le recuit simulé est une méthode d'optimisation, elle est pour trouver le minimum global d'une fonction d'énergie dans l'espace des solutions possibles d'une façon stochastique. Le recuit simulé utilise une probabilité de transition pour se déplacer entre les différents états de l'espace de recherche, avec une température qui diminue progressivement au fil du temps.

En terme de convergence théorique, on peut prouver que le recuit simulé converge vers le minimum global si la température diminue lentement. Cependant, la vitesse de convergence dépend de plusieurs facteurs, comme la topologie de l'espace de recherche, la forme de la fonction d'énergie, la température initiale et la loi de refroidissement. En pratique, on ne peut pas trouver une stratégie de refroidissement optimale, et la performance du recuit simulé dépend de la qualité de l'initialisation, de la stratégie de voisinage et du nombre d'itérations.

III.5.2.Espace des configurations :

A chaque itération de l'algorithme, le recuit simulé examine les états adjacents s' de état actuel et détermine au hasard si le système doit fonctionner et passez à cet état ou conservez la configuration actuelle.

Ce processus amène le système vers une configuration de plus faible énergie. Cette étape est répétée jusqu'à que le système soit figé sur la même solution pendant plusieurs itérations ou lorsqu'une limite d'itérations a été dépassée.

Les voisinages d'états sont générés en effectuant des modifications de base sur la configuration du système. Pour de bons résultats, ces modifications doivent être les plus simples possibles et les deux configurations

Le recuit simulé.

doivent rester proches. Par exemple, dans le cas du voyageur de commerce, la modification de base est la permutation de deux villes adjacentes. L'exploration du voisinage est l'étape la plus importante du recuit et doit être réalisée de manière optimisée.

La probabilité de passage de l'état s à l'état s' est donnée par une fonction d'acceptation P avec T est la température du système, et l'énergie de l'état initial est l'énergie des états voisins. Cette fonction renvoie alors la probabilité de transition vers cet état. Habituellement, la probabilité de transition est 1 si la nouvelle solution est meilleure, mais selon la version de l'algorithme, ce n'est pas toujours le cas. Si l'énergie de l'état voisin est plus forte [28].

III.5.3.Règle d'acceptation :

- Si $f(s') < f(s)$ donc $e^{\frac{f(s)-f(s')}{T}} > 1$, alors r est inférieur à cette valeur, donc on accepte la solution s' .
- Si $f(s') = f(s)$ et T est très grand, alors $e^{\frac{f(s)-f(s')}{T}} = 1$, donc on a une forte chance d'accepter s' .
- Si $f(s') > f(s)$ et T est très petite, alors $e^{\frac{f(s)-f(s')}{T}} = 0$, donc on va refuser s' .

Initialement, T est choisi grand pour accepter de nombreuses solutions, même des solutions avec des valeurs réduites de f . Cet algorithme est équivalent à un accès aléatoire à l'espace de configuration. Mais à mesure que la température baisse, la plupart des mouvements augmentant l'énergie sont rejetés et l'algorithme revient à l'amélioration itérative classique. Aux températures intermédiaires, l'algorithme autorise parfois des transformations qui dégradent la fonction objectif. Ainsi, il laisse la possibilité au système de s'extraire des minima locaux [28].

III.5.4.Programme de recuit :

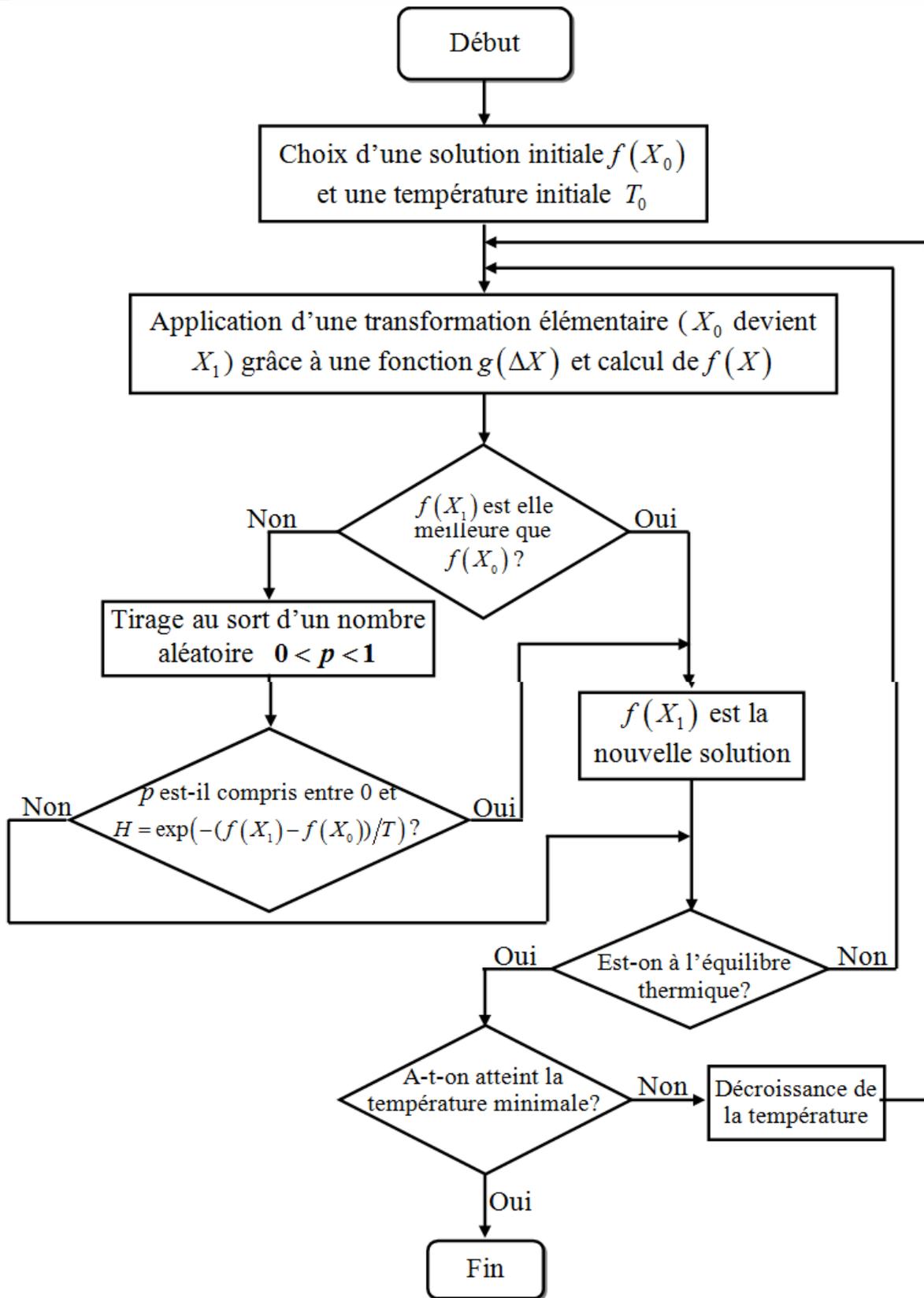


Figure III.1: Algorithme du recuit simulé [29].

a. Comment initialiser le programme de recuit simulé :

Le recuit simulé.

La solution initiale peut être choisie aléatoirement dans l'espace des solutions ou, si possible, générée par des heuristiques classiques, telles que la descente de gradient ou des algorithmes gloutons.

La température initiale doit être très élevée, puisque c'est cette température qui détermine la probabilité d'acceptation ou de rejection d'une solution qui ne favorise pas l'optimisation de la fonction f [26].

b. Règle d'acceptation de Metropolis :

Si $\Delta E > 0$ tirer un nombre r au hasard dans $[0 ; 1]$ et accepter la perturbation si $r < e^{\left(\frac{-\Delta}{\text{température}}\right)}$ [30].

c. Changement de palier de température :

Cela détermine le moment où nous voulons changer le niveau de température, c'est-à-dire combien d'itérations nous voulons faire à la même température. Ce changement se produit une fois que l'une des conditions suivantes est remplie pendant le plateau de température, soit en acceptant une perturbation de $12.N$, soit en tentant une perturbation de $100.N$.

N : désigne le nombre de paramètres du problème.

Par défaut, on prend $T_{k+1} = 0.9 T_k$ [31].

d. Décroissance de la température :

Il existe plusieurs façons de baisser la température (Figure III.2). Cependant, la réduction peut être fixée selon des lois géométriques avec l'avantage de la simplicité. Dans ce cas, cette réduction utilise la formule suivante :

$$T_{k+1} = a T_k,$$

Avec a est un facteur (taux de décroissance) de refroidissement choisie dans l'intervalle $[0.5, 0.99]$.

Par défaut, le coefficient de décroissance vaut 0.9 mais peut être modifié dans le dialogue des paramètres du recuit.

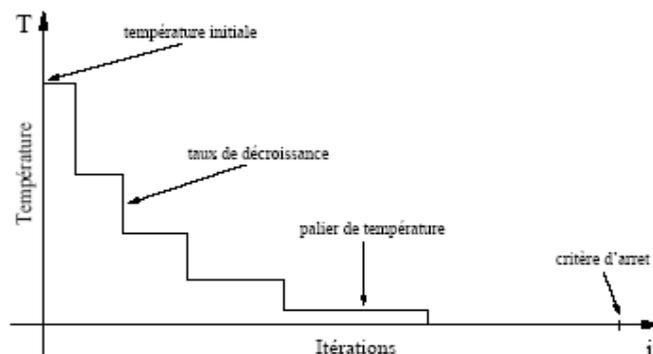


Figure III.2: Paliers de la température [32].

Le recuit simulé.

e. Arrêt du système :

Ceci indique la fin du traitement ou l'arrêt de l'algorithme. Elle correspond au fait qu'aucune autre conversion n'est acceptable. Il existe différentes méthodes pour cela, comme lorsque la température est proche de zéro ou lorsque le nombre d'étages de température est fixé à l'avance [31].

f. Vérifications indispensables lors des premières exécutions du programme :

- Le générateur de nombres réels aléatoires doit être bien uniforme.
- La qualité du résultat doit varier peu lorsque le programme est lancé plusieurs fois.
- Avec des générateurs de nombres aléatoires différents.
- Avec des configurations initiales différentes [30].

III.6.Application :

Comme tout algorithme méta heuristique, les méthodes de recuit simulé peuvent être appliquées à de nombreux problèmes d'optimisation, et les chercheurs les utilisent principalement pour :

- La conception des circuits intégrés (problème de placement et de répartition);
- Le routage des paquets dans les réseaux;
- La segmentation d'images;
- Le problème du voyageur de commerce;
- Le problème du sac à dos ;
- Et, le routage de véhicule [33].

III.7.Conclusion :

III.7.1.Avantages :

- Facilité de mise en œuvre.
- Donne généralement de meilleures solutions que les algorithmes de recherche classiques.
- Peut être utilisé pour la plupart des problèmes d'optimisation.
- Il converge vers l'optimum global (car le nombre d'itérations tend vers l'infini (Autin, 2006)). Cela fait une option intéressante pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles [26].

III.7.2.Faiblesses :

- Il existe un nombre important de paramètres à prendre en compte tels que la température initiale, le taux de décroissance de la température, la durée des paliers de la température, ainsi que le critère d'arrêt du programme.
- Réglage souvent empirique des paramètres.
- Les calculs prennent trop de temps dans certaines applications.
- Compte tenu des avancées de la physique statistique dans l'étude des milieux désordonnés, les efforts pour pallier ces lacunes s'orientent vers la parallélisation algorithmique [30].

Le recuit simulé.

En résumé, le recuit simulé est une méthode d'optimisation puissante et flexible, mais il est important de prendre en compte les limitations théoriques et pratiques pour l'utiliser de manière efficace.

Chapitre IV: Résultats et simulations.

Résultats et simulations.

IV.1.Introduction :

Au cours de ce chapitre, nous allons explorer le système MIMO massive hybride beamforming qui utilise deux vecteurs de pondération à l'émission et deux vecteurs de pondération à la réception. L'objectif de cette architecture hybride est de simplifier et de réduire les coûts de mise en œuvre en minimisant le nombre de canaux RF. Pour évaluer les performances du système en termes d'efficacité spectrale par rapport au système MIMO beamforming hybride, nous allons d'abord étudier l'impact du nombre d'antennes utilisées pour l'émission et la réception sur les performances du système. Ensuite, nous allons examiner l'effet de la variation du nombre de chaînes RF utilisées pour l'émission et la réception sur l'efficacité spectrale du système, et enfin, nous allons étudier l'impact du nombre de flux de données sur ces performances.

IV.2.Système MIMO massive beamforming hybride :

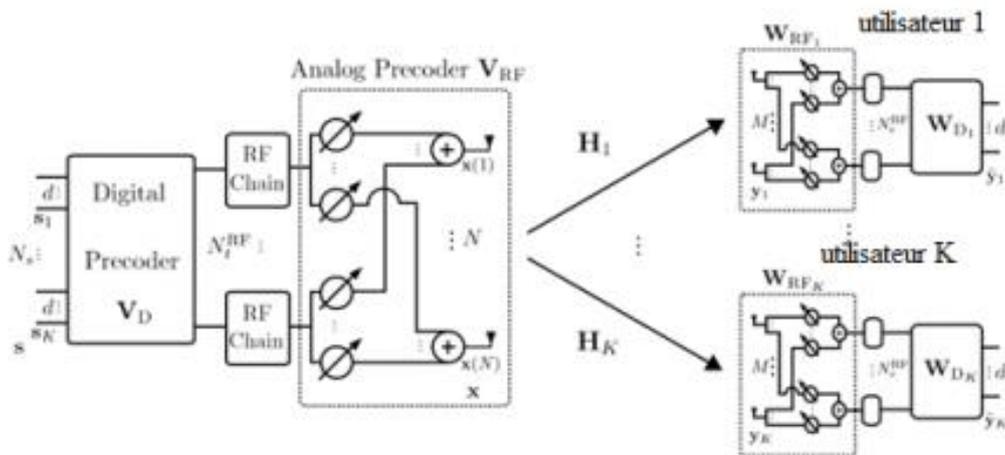


Figure IV.1: Architecture de MIMO massive beamforming hybride multi-utilisateurs.

Dans ce chapitre, une solution est présentée pour résoudre le problème de limitation du nombre de chaînes RF. Une architecture de formation de faisceau hybride à deux étages est proposée, où un formateur de faisceau numérique de faible dimension est combiné avec un formateur de faisceau RF réalisé à l'aide de déphaseurs. La première partie démontre que le nombre de chaînes RF requis dans cette architecture doit être égal au nombre total de flux de données pour obtenir des performances équivalentes à celles d'un schéma de formation de faisceau entièrement numérique, indépendamment du nombre d'éléments d'antennes dans le système.

La deuxième partie se concentre sur la conception de la formation de faisceau hybride lorsque le nombre de chaînes RF est inférieur au double du nombre de flux de données. Le scénario étudié est une communication MIMO point à point avec des réseaux d'antennes à grande échelle des deux côtés. Des algorithmes méta-heuristiques sont proposés pour concevoir les formateurs de faisceaux hybrides, en maximisant l'efficacité spectrale globale tout en respectant une contrainte de puissance totale au niveau de l'émetteur. Il est supposé que les informations sur l'état du canal (CSI) sont parfaites et instantanées pour la station de base et les terminaux utilisateurs. Ce chapitre met en évidence l'architecture de formation de faisceau hybride qui combine des éléments

Résultats et simulations.

numériques et analogiques, suscitant un intérêt croissant dans les recherches sur les systèmes de réseaux d'antennes à grande échelle [34]-[35].

IV.3. Model de système :

Considérons un système MIMO multi-utilisateurs à bande étroite descendant. Dans ce système, une station de base dispose de N antennes et N chaînes RF d'émission, tandis que chaque utilisateur est équipé de M antennes et N_r^{RF} chaînes RF de réception. Le système comprend K utilisateurs, et chaque utilisateur nécessite un débit de données d .

Étant donné que le nombre de chaînes RF d'émission/réception est limité, il n'est pas possible de mettre en œuvre un beamforming entièrement numérique qui nécessiterait une chaîne RF dédiée par élément d'antenne. À la place, nous utilisons une architecture de formation de faisceau hybride, combinant des éléments numériques et analogiques, à la fois au niveau de la station de base et des terminaux des utilisateurs.

Dans cette architecture hybride, la station de base commence par prétraitement numériquement le flux de données en bande de base à l'aide d'un précodeur numérique V_D , de dimension $N_t^{RF} \times N_s$, où $N_s = Kd$. Ensuite, les signaux traités sont convertis en fréquence porteuse à travers N chaînes RF. La station de base utilise ensuite un précodeur RF V_{RF} de dimension $N \times N_t^{RF}$, qui est mis en œuvre à l'aide de déphaseurs analogiques. En d'autres termes, $|V_{RF}(i, j)|^2 = 1$, permettant de construire le signal transmis final.

Mathématiquement, le signal transmis peut être représenté de la manière suivante :

$$X = V_{RF} V_D S = \sum_{l=1}^K V_{RF} V_{DL} S_l \quad (\text{IV.1})$$

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

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

$$y_k = H_K V_{RF} V_{DK} S_k + H_K \sum_{l \neq k} V_{RF} V_{DL} S_l + Z_K \quad (\text{IV.2})$$

Et

$$\tilde{y}_k = \underbrace{W_{tk}^H H_K V_{tk} S_k}_{\text{Signaux}} + \underbrace{W_{tk}^H H_K \sum_{l \neq k} V_{tl} S_l}_{\text{les interférences}} + \underbrace{W_{tk}^H Z_K}_{\text{bruit}} \quad (\text{IV.3})$$

Souhaités	effectives	effectif
-----------	------------	----------

Où $V_{tk} = V_{RF} V_{DK}$ et $W_{tk} = W_{RFK} W_{DK}$.

Si l'on considère une signalisation gaussienne, l'efficacité spectrale globale de l'utilisateur k dans un système similaire est décrite dans la référence [37].

$$R_K = \log_2 |I_M + W_{tk} C_K^{-1} W_{tk}^H H_K V_{TK} V_{TK}^H H_K^H| \quad (\text{IV.4})$$

Résultats et simulations.

Où $C_K = W_{tk}^H H_K (\sum_{l \neq k} V_{tl} V_{tl}^H) + H_K^H W_{tk} + \sigma^2 W_{tk}^H W_{tk}$ est la covariance de l'interférence plus le bruit à l'utilisateur k.

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

$$\underset{V_{RF}, V_D, W_{RF}, W_D}{\text{Maximiser}} \sum_{K=1}^K \beta_K R_K \quad (\text{IV.5.a})$$

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

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

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

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 ; $\frac{\beta_k}{\sum_{l=1}^k \beta_l}$

C'est-à-dire que plus il est grand, plus l'utilisateur k est prioritaire.

IV.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. 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 (IV.4) peut être simplifiée en:

$$R = \log_2 \left| I_M \frac{1}{\sigma^2} W_t (W_t^H W_t)^{-1} W_t^H V_t^H V_t^H H^H \right| \quad (\text{IV.6})$$

Où $V_t = V_{RF} V_D$ et $W_t = W_{RF} W_D$

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 (IV.5) implique une optimisation conjointe des précodeurs et des combineurs hybrides. Cependant, la conception conjointe de la matrice d'émission-réception, pour un problème d'optimisation à contraintes similaires, est généralement difficile à résoudre [37]. En outre, les contraintes sur les éléments des formateurs de faisceaux analogiques dans (IV.5.c) et (IV.5.d) rend probable le développement d'un algorithme peu complexe pour trouver la solution optimale exacte [38].

Par conséquent, ce chapitre envisage plutôt la stratégie suivante. Tout d'abord, nous cherchons à concevoir les

Résultats et simulations.

pré codeurs hybrides, en supposant que le récepteur optimal est utilisé. Ensuite, pour l'émetteur déjà conçu, nous cherchons à concevoir le combineur hybride.

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

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

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

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

Ce chapitre propose l'algorithme recuit simulé pour obtenir une bonne solution au problème (IV.7). Tout d'abord, nous dérivons la solution du pré codeur numérique du problème (IV.7) pour un précodeur RF fixe, V_{RF} . Ensuite, nous supposons un tel précodeur numérique, on propose l'algorithme recuit simulé pour trouver un pré codeur RF optimal global.

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 :

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

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

$$\text{où} \quad Q = V_{RF}^H V_{RF}$$

• Optimisation par le recuit simulé :

Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles, à partir des grandeurs à optimiser.

Il s'agit de la fonction objective (ou fonction cout ou fitness) qui est une liaison entre le problème physique et le processus d'optimisation. La fonction objective est un outil permettant d'exprimer le but de l'optimisation, et représente le moyen pour développer les positions des atomes (recuit simulé). La fonction objective doit traduire en langage mathématique le désir de l'utilisateur.

Mathématiquement, le problème consiste à chercher la loi de précodage numérique V_D appliquée à l'entrée du système pour maximiser l'efficacité spectrale donnée par l'équation suivante :

$$R1 = \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} H_{eff} V_D V_D^H H_{eff}^H \right|$$

L'application du recuit simulé à la conception d'un précodeur numérique repose sur l'analogie suivante : la fonction à minimiser est assimilée à l'énergie E du système et la loi de précodage numérique V_D aux positions des

Résultats et simulations.

atomes. On introduit également un paramètre fictif, de contrôle de la convergence de l'algorithme, assimilé à la température T du système.

Le recuit simulé étant un minimiseur par défaut, et puisque nous cherchons à maximiser l'efficacité spectrale R_1 , nous prendrons la fonction objective suivante :

$$\text{Fonction objectif} = \max - R_1$$

Max: est un nombre réel positif plus grand que la plus grande valeur que peut prendre R_1 .

Le recuit simulé aura tendance à minimiser cette différence tout en maximisant la valeur de R_1 .

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

Maintenant, nous cherchons à concevoir le précodeur RF en supposant que $\mathbf{V}_D \mathbf{V}_D^H \mathbf{H} \approx \gamma^2 \mathbf{I}$. Sous cette hypothèse, la contrainte de puissance de l'émetteur (IV.8.b) est automatiquement satisfaite pour toute conception de \mathbf{V}_{RF} . Par conséquent, le précodeur RF peut être obtenu en résolvant le problème suivant :

$$\max_{\mathbf{V}_{RF}} \log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{F}_1 \mathbf{V}_{RF} \right| \quad (\text{IV. 9})$$

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

Où $\mathbf{F}_1 = \mathbf{H} \times \mathbf{H}$.

Le problème de la conception d'un précodeur analogique peut être traduit sous la forme d'un problème d'optimisation maximisant l'efficacité spectrale R_2 donnée par l'équation suivante :

$$R_2 = \log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{F}_1 \mathbf{V}_{RF} \right|$$

L'application du recuit simulé à la conception d'un pré-codeur numérique repose sur l'analogie suivante : la fonction à minimiser est assimilée à l'énergie E du système et la loi de précodage \mathbf{V}_{RF} aux positions des atomes. On introduit également un paramètre fictif, de contrôle de la convergence de l'algorithme, assimilé à la température T du système.

Le recuit simulé étant un minimiseur par défaut, et puisque nous cherchons à maximiser l'efficacité spectrale R , nous prendrons la fonction objective suivante :

$$\text{Fonction objectif} = \max - R_2$$

Max: est un nombre réel positif plus grand que la plus grande valeur que peut prendre R_2 .

Le recuit simulé aura tendance à minimiser cette différence tout en maximisant la valeur de R_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 (IV.6) en supposant que les précodeurs hybrides sont déjà conçus.

Résultats et simulations.

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 W_{RF} et 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 :

$$\text{Max} \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} (W_{RF}^H W_{RF})^{-1} W_{RF}^H F_2 W_{RF} \right| \quad (\text{IV. 10.a})$$

$$s.t. \quad |W_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j \quad (\text{IV. 10.b})$$

Où $F_2 = \mathbf{H} \times \mathbf{V}_t \mathbf{V}_t^H \mathbf{H}^H$.

Ce problème est très similaire au problème de conception du précodeur RF.

Par conséquent, le problème (IV.10) peut être approximé sous la forme du problème de conception du pré codeur RF dans (IV.10) et la méthode de recuit simulé peut être utilisé pour optimiser W_{RF} , c'est-à-dire,

$$\max_{W_{RF}} \log_2 \left| I + \frac{1}{M\sigma^2} W_{RF}^H F_2 W_{RF} \right| \quad (\text{IV. 11.a})$$

$$s.t. \quad |W_{RF}(i, j)|^2 = 1, \quad \forall i, j \quad (\text{IV. 11.b})$$

Le problème de la conception d'un combineur analogique peut être traduit sous la forme d'un problème d'optimisation maximisant l'efficacité spectrale R3 donnée par l'équation suivante :

$$R3 = \log_2 \left| I + \frac{1}{M\sigma^2} W_{RF}^H F_2 W_{RF} \right|$$

L'application du recuit simulé à la conception d'un combineur analogique repose sur l'analogie suivante : la fonction à minimiser est assimilée à l'énergie E du système et la loi de précodage W_{RF} aux positions des atomes. On introduit également un paramètre fictif, de contrôle de la convergence de l'algorithme, assimilé à la température T du système.

Le recuit simulé étant un minimiseur par défaut, et puisque nous cherchons à maximiser l'efficacité spectrale R3, nous prendrons la fonction objective suivante :

Fonction objectif = max-R3

Max: est un nombre réel positif plus grand que la plus grande valeur que peut prendre R3.

Le recuit simulé aura tendance à minimiser cette différence tout en maximisant la valeur de R3.

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

$$W_D = J^{-1} W_{RF}^H H V_t \quad (\text{IV. 12})$$

où $J = W_{RF}^H H V_t V_t^H H^H W_{RF} + \sigma^2 W_{RF}^H W_{RF}$

Résultats et simulations.

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

Dans la section IV, nous montrons comment concevoir les formateurs de faisceau hybrides pour le cas 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 métaheuristique 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 (IV.7).

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

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

$$\log_2 \prod_{i=1}^{N_S} \left(1 + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \lambda_i\right) \quad (\text{IV. 13})$$

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

En raison des difficultés d'optimisation sur une fonction d'un sous-ensemble de valeurs propres d'une matrice, nous approximations (IV.13) 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,

$$\log_2 \left| \mathbf{I}_{N_{RF}} + \frac{\gamma^2}{\sigma^2} \mathbf{V}_{RF}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{V}_{RF} \right| \quad (\text{IV. 14})$$

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 pré codeur RF se présente maintenant sous la forme de (IV.10).

IV.4. Notion de base sur langage utilisé (Matlab) :

Le choix de l'environnement de programmation est crucial pour mener à bien des projets. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte tels que la robustesse de l'outil, sa facilité d'utilisation ainsi que la disponibilité de nombreuses fonctions de communication avec d'autres environnements. Dans le cadre de nos simulations, nous avons opté pour l'utilisation de MATLAB®, un logiciel de calcul scientifique de haut niveau offrant un environnement interactif pour le développement d'algorithmes, la visualisation et l'analyse de données. Basé sur les matrices, MATLAB intègre des fonctions pré-écrites pour de nombreuses tâches de calculs courantes, ce qui le rend plus rapide que les langages de programmation traditionnels. De plus, il permet de regrouper toutes ces fonctions en

Résultats et simulations.

un seul endroit, simplifiant ainsi la résolution de problèmes scientifiques et techniques. En utilisant MATLAB, il n'est pas nécessaire d'effectuer des tâches de programmation de bas niveau telles que la déclaration de variables ou l'allocation de mémoire.

IV.5.Principe de simulation :

Comparé aux systèmes sans fil actuels, la bande millimétrique présente une longueur d'onde considérablement plus petite, cette caractéristique permet à un réseau de contenir davantage d'élément tout en conservant les même dimensions physiques. Toutefois, fournir un module (récepteur-émetteur) pour chaque élément d'antenne devient alors beaucoup plus couteux. Par conséquent, afin de trouver un compromis, il est courant d'utiliser un commutateur (récepteur-émetteur) pour alimenter plusieurs éléments d'antennes. La figure IV.2 illustre l'une des configurations uniques qui regroupe 4 vecteurs (2 vecteurs pour l'émission, à la fois analogique et numérique et 2 vecteurs pour la réception, également analogique et numérique). Un exemple de simulation d'un tel système peut être trouver dans le but d'améliorer le rapport signal/bruit et l'efficacité spectrale des communications sans fil en utilisant des réseaux d'antennes.

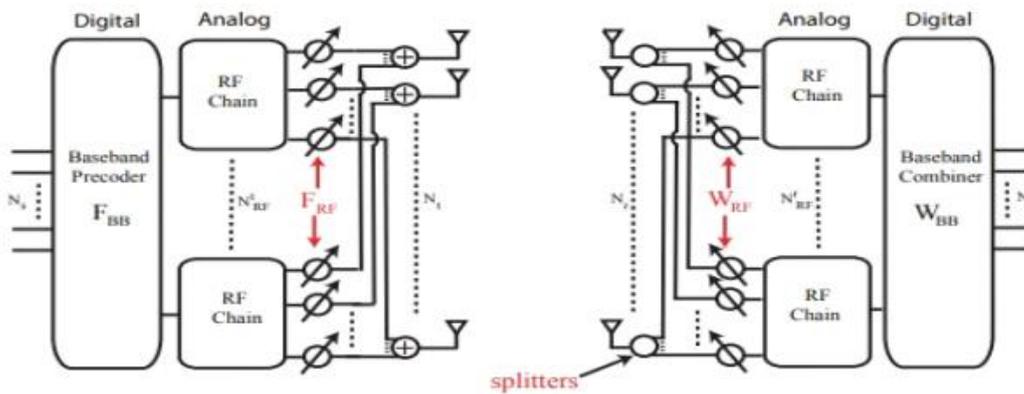


Figure IV.2: Schéma fonctionnel simplifié d'un système monoposte à onde millimétriques.

Le schéma illustré indique que du côté de l'émetteur, le nombre de commutateurs (récepteur émetteur) est inférieur au nombre d'éléments d'antennes N_t . Afin d'offrir davantage de souplesse, chaque élément d'antenne peut être relié 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 peut prendre en charge un nombre maximal de flux de données, N_s , qui est inférieur à N_{RF}^t et N_{RF}^r .

Dans cette configuration, l'application de pondérations numériques individuelles sur chaque élément d'antenne n'est plus possible. Au lieu de cela, les pondérations numériques sont restreintes à chaque chaîne RF. Au niveau de chaque élément, le signal est ajusté à l'aide de déphaseurs analogiques, qui ne modifient que la phase du signal. Ainsi, le précodage ou la combinaison du signal est réalisé en deux étapes distinctes. Cette approche, qui combine le beamforming à la fois dans les domaines numériques et analogiques, est appelée beamforming hybride.

Résultats et simulations.

IV.6.Simulation et discussion des résultats :

Dans notre simulation, nous analyserons comment l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire sont affectés par le rapport signal sur bruit dans les système MIMO beamforming hybrides. Nous examinerons différentes configurations en faisant varier le nombre d'antennes, le nombre de canaux RF et le nombre de flux de données.

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

Nous étudions une station de base utilisant la technique MIMO hybride beamforming, avec deux canaux RF (NRF=2) à l'émission et à la réception et deux flux de données (Ns=2). Nous prenons également en compte un canal MIMO multi-trajets et une modulation QPSK.

L'optimisation des précodeurs et des combineurs par le recuit simulé peut être réalisée de manière aisée en ajustant les paramètres d'entrée de l'algorithme.

Les paramètres d'entrée du recuit simulé (après plusieurs essais) sont les suivants :

Solution initiale : 0

Borne inférieure : -50

Borne supérieure : 50

Température initiale : 100

Facteur de réduction de la température initial α : 0,95

Nombre d'itérations : 15

Nous modifions le nombre d'antennes à la fois en émission et en réception afin d'évaluer les performances en termes d'efficacité spectrale et de 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 étudions la variation de l'efficacité spectrale en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Nous utilisons une BS MIMO beamforming hybride avec deux flux de données. Nous commençons tout d'abord par faire varier le nombre d'antennes en émission et en réception. Les résultats sont évalués sur une plage de SNR allant de -80 à -30.

Résultats et simulations.

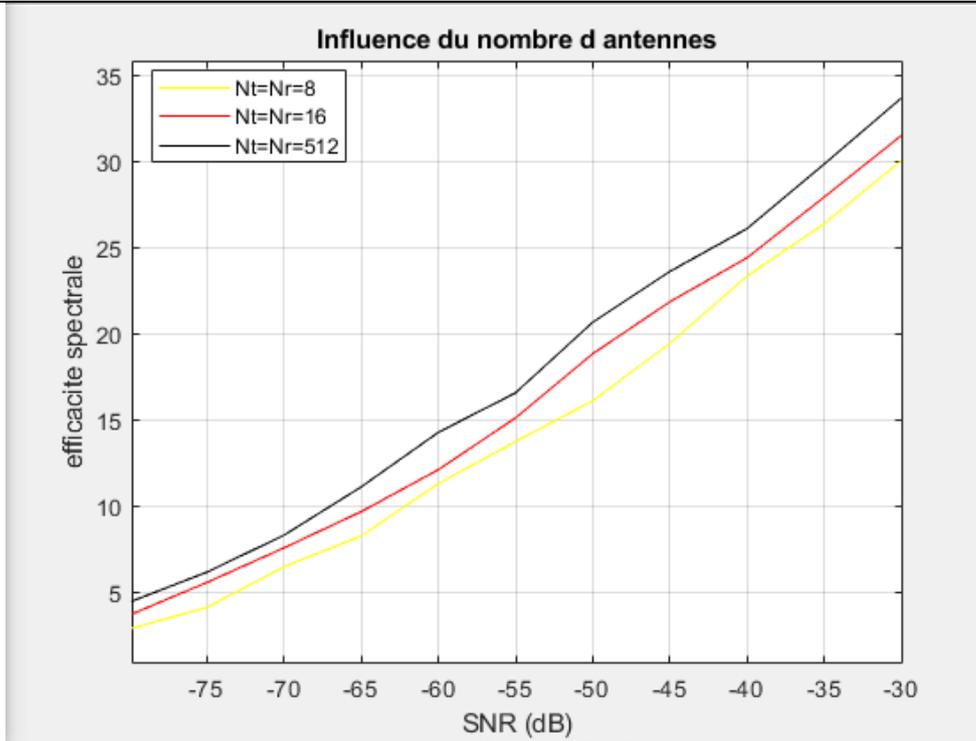


Figure IV.3: L'efficacité spectrale en fonction de SNR par la variation de N_t et N_r pour la technique beamforming hybride.

D'après les résultats de la figure IV.3, nous observons les points suivants :

- L'efficacité spectrale augmente à mesure que le rapport signal sur bruit augmente.
- Une augmentation du nombre d'antennes utilisées pour l'émission et la réception entraîne également une amélioration de l'efficacité spectrale. Par exemple, dans un système MIMO avec beamforming massif (512x512) par rapport à un système MIMO (8x8), l'efficacité s'améliore de 4 bits/s/Hz à un rapport signal sur bruit de -30 dB.

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

Dans cette section, nous étudions la variation du taux d'erreur (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Nous utilisons une BS MIMO beamforming hybride avec deux flux de données. Nous commençons tout d'abord par faire varier le nombre d'antennes en émission et en réception. Les résultats sont évalués sur une plage de SNR allant de -80 à -30.

Résultats et simulations.

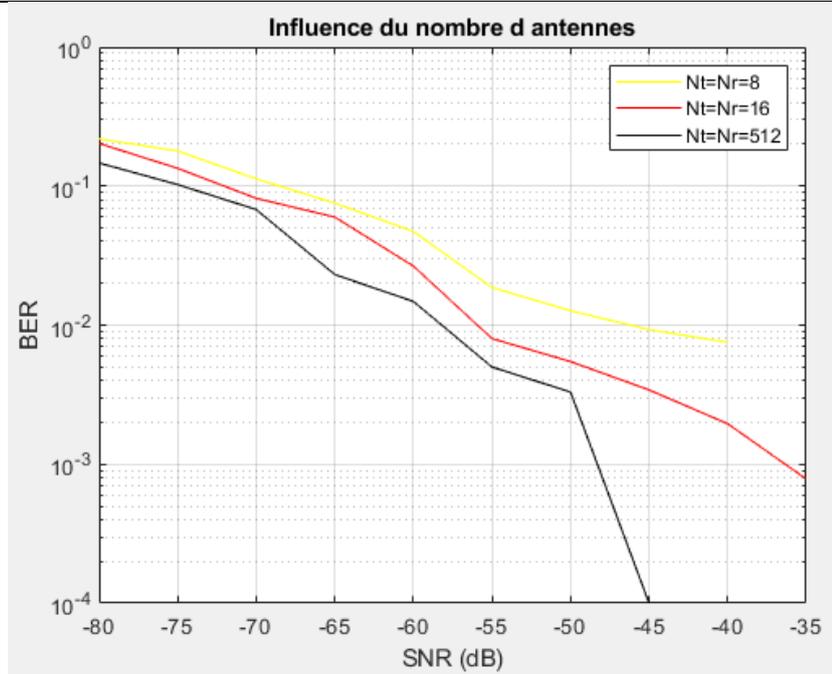


Figure IV.4: le taux d'erreur binaire en fonction de SNR par la variation de N_t et N_r pour la technique beamforming hybride.

D'après les résultats de la figure IV.4, les observations suivantes peuvent être faites :

- Le taux d'erreur binaire diminue de manière continue avec l'augmentation du rapport signal sur bruit (SNR).
- Le taux d'erreur binaire diminue lorsque le nombre d'antennes utilisées à la fois pour l'émission et la réception augmente. Par exemple, pour un taux d'erreur binaire de 10^{-2} , le SNR s'améliore de 14 dB en passant d'un système MIMO (8x8) à un système MIMO (512x512). Ainsi, pour un SNR de -45 dB, le taux d'erreur binaire est minimal (10^{-4}) pour le système MIMO (512x512).

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

Dans cette partie de la simulation, nous analysons l'efficacité spectrale des techniques de précodage hybride dans un système MIMO beamforming (16 x 16) avec un flux de données ($N_S=2$), en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Nous faisons varier le nombre de chaînes RF à la fois en émission et en réception pour chaque cas étudié.

- ✓ L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_{rf} :

Résultats et simulations.

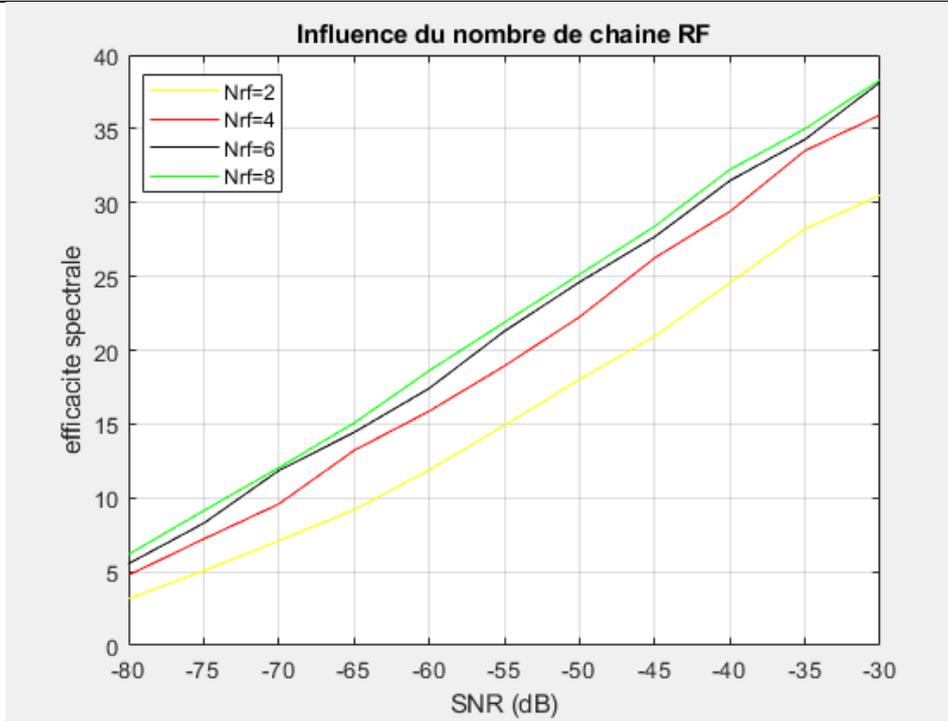


Figure IV.5: L'efficacité spectrale en fonction de SNR par la variation de Nrf pour la technique beamforming hybride.

D'après les résultats de la figure IV.5, les observations suivantes peuvent être faites :

- L'efficacité spectrale augmente lorsque le rapport signal sur bruit augmente.
 - Une légère augmentation de l'efficacité spectrale est observée lorsque le nombre de canaux RF utilisés à la fois pour l'émission et la réception passe de 4 à 8. Cependant, le nombre de canaux RF n'a pas d'impact remarquable sur l'efficacité spectrale, mais il permet de minimiser les coûts de réalisation du système.
- ✓ **Le taux d'erreur binaire en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de Nrf :**

Résultats et simulations.

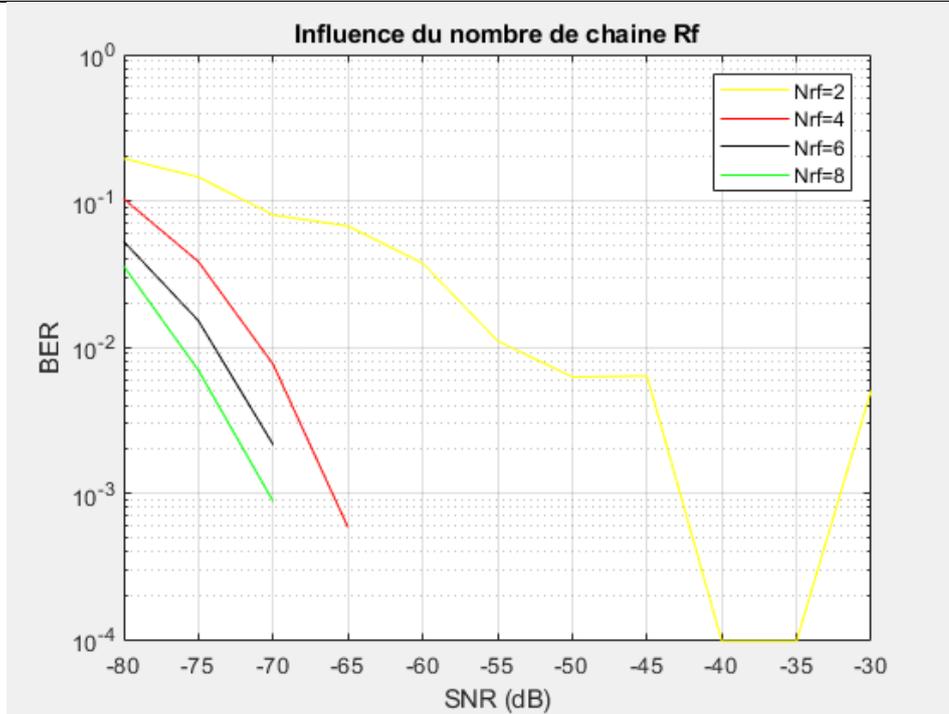


Figure IV.6: Le taux d'erreur binaire en fonction de SNR par la variation de Nrf pour la technique beamforming hybride.

D'après les résultats de la figure IV.6, les observations suivantes peuvent être faites :

- Le taux d'erreur binaire diminue lorsque le rapport signal sur bruit augmente.
- L'augmentation du nombre de canaux RF à la fois pour l'émission et la réception entraîne une diminution du taux d'erreur binaire. Par exemple, pour un BER de 10^{-2} , le SNR s'améliore de 5 dB en augmentant le nombre de canaux RF de 4 à 8. Cependant, cette amélioration est peu significative, ce qui indique que l'influence des canaux RF sur les performances du système est négligeable. Par conséquent, il est possible de réduire le nombre de canaux RF pour réduire les coûts.

IV.6.3. Impact de la variation du nombre de flux N_S :

Dans cette section, nous examinons comment l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire varient en fonction du rapport signal sur bruit d'un système MIMO beamforming hybride (16 x16) avec $N_{RF}=8$. Nous modifions également le nombre de flux de données à l'entrée (N_S) à chaque fois.

- ✓ **L'efficacité spectrale en fonction de rapport signal sur bruit SNR avec la variation de N_S :**

Résultats et simulations.

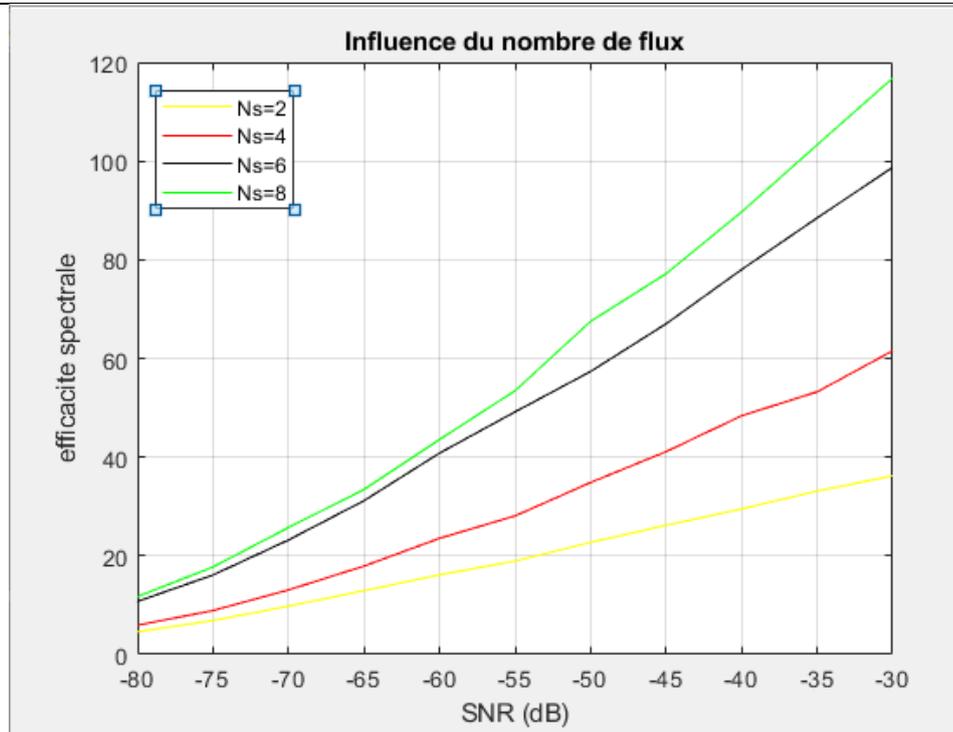


Figure IV.7: L'efficacité spectrale en fonction de SNR par la variation de N_s pour la technique beamforming hybride.

D'après les résultats de la figure IV.7, nous remarquons que :

- L'efficacité spectrale augmente lorsque le rapport signal sur bruit SNR augmente.
 - Si le nombre de flux de données à l'entrée du système augmente, l'efficacité spectrale augmente aussi. par exemple, à un SNR=-30 dB l'efficacité spectrale s'améliore de 80 bits/s/Hz pour un système MIMO beamforming hybride avec $N_s=8$ 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 Nrf :**

Résultats et simulations.

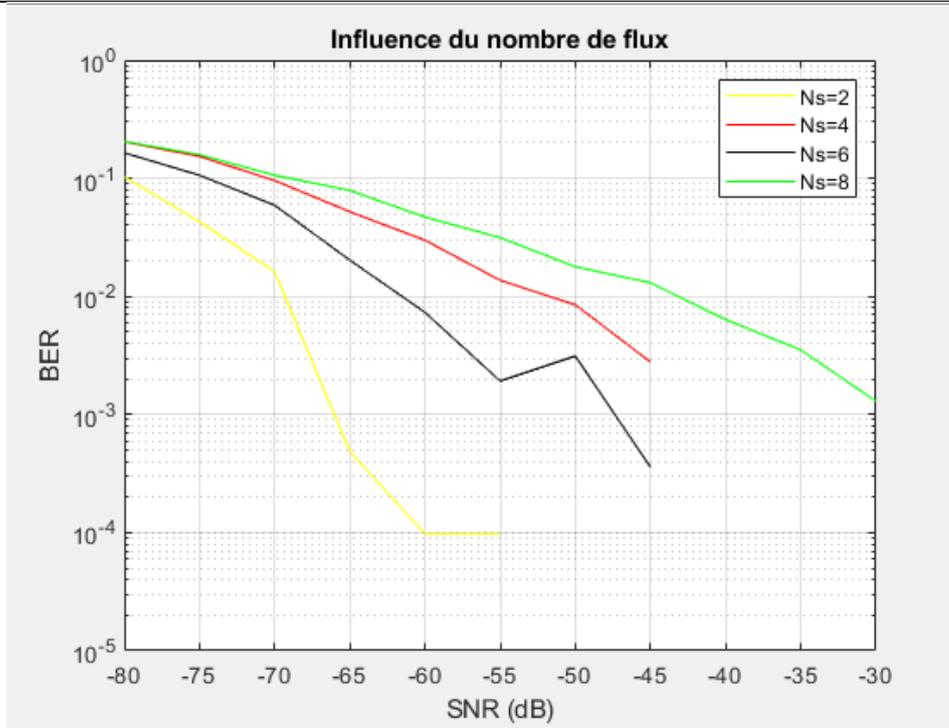


Figure IV.8: Le taux d'erreur binaire en fonction de SNR par la variation de N_s pour la technique beamforming hybride.

D'après les résultats de la figure IV.8, nous remarquons que :

- Le taux d'erreur binaire diminue lorsque le rapport signal sur bruit augmente.
- Le taux d'erreur binaire diminue lorsque le nombre de flux N_s diminue.

IV.7.Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons examiné le concept de beamforming hybride dans les systèmes MIMO massifs. Cette approche utilise deux vecteurs de pondération pour la transmission et deux vecteurs de pondération pour la réception, dans le but de simplifier et de réduire les coûts de mise en œuvre en diminuant le nombre de canaux RF nécessaires.

Tout d'abord, nous avons analysé l'influence du nombre d'antennes à la fois en émission et en réception sur les performances du système. Ensuite, nous avons étudié comment la variation du nombre de canaux RF, tant en émission qu'en réception, affecte l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire du système. Enfin, nous avons examiné l'impact du nombre de flux de données sur ces performances.

Nos observations ont montré que la réduction du nombre de canaux RF a un impact négligeable sur la qualité et la capacité du système MIMO massif avec beamforming hybride. Cette constatation confirme que l'utilisation de cette approche permet de simplifier la conception et de réduire les coûts sans compromettre les performances du système.

Conclusion générale

La demande croissante en termes de débit de transfert de données pour les réseaux cellulaires futurs a rendu nécessaire une évolution des réseaux actuels afin d'atteindre des niveaux de performances supérieurs. Il est possible d'atteindre cet objectif sans recourir à une augmentation de la bande passante ou à l'ajout de stations de base supplémentaires, en augmentant simplement l'efficacité spectrale.

L'objectif de ce mémoire était d'optimiser les précodeurs et les combineurs analogiques et numériques du système MIMO massif hybride beamforming en utilisant l'algorithme du recuit simulé. Cette approche vise à améliorer les performances et l'efficacité du système tout en simplifiant le système et en réduisant les coûts de mise en œuvre grâce à l'optimisation du nombre d'antennes, du nombre de chaînes RF et du nombre de flux de données.

Au début, nous avons présenté la technique MIMO, puis dans ce chapitre, nous avons examiné plus spécifiquement la technique du MIMO massif, en passant en revue ses caractéristiques, ses avantages et ses différents types. Bien que la technique du MIMO massif permette de résoudre de nombreux problèmes de recherche traditionnels, il reste encore des défis à surmonter pour exploiter pleinement son potentiel.

Ensuite, nous avons brièvement présenté les antennes réseau, puis nous avons approfondi la structure, la définition, les avantages et le fonctionnement des antennes intelligentes. Nous avons également présenté différents types de systèmes à antennes intelligentes, tels que les systèmes à faisceaux commutés (SBA) et les systèmes de réseaux adaptatifs. De plus, nous avons exposé des algorithmes adaptatifs et nous nous sommes penchés plus en détail sur les antennes MIMO beamforming ainsi que sur les antennes MIMO massives beamforming.

Pour résoudre le problème de conception du système, nous avons appliqué une méthode d'optimisation méta-heuristique : le recuit simulé. Les performances de cette méthode dépendent de quelques paramètres de contrôle qui doivent être réglés pour obtenir de meilleures performances. L'application de cette méthode a été réalisée dans le but d'adapter une méthode efficace, en termes d'optimisation des précodeurs et des combineurs, ainsi que du temps de calcul, au problème de conception.

Dans le quatrième chapitre, nous avons exploré le système MIMO massif hybride beamforming qui utilise deux vecteurs de pondération à l'émission et deux vecteurs de pondération à la réception dans le but de simplifier le système et de réduire les coûts de mise en œuvre en minimisant le nombre de canaux R. Pour atteindre cet objectif, nous avons optimisé les précodeurs et les combineurs analogiques et numériques en utilisant le recuit simulé afin d'améliorer l'efficacité et les performances du système. Ensuite, nous avons analysé l'impact du nombre d'antennes et le nombre de chaînes RF en émission et en réception sur l'efficacité spectrale et les performances du système. Enfin, nous avons étudié l'impact du nombre de flux de données sur ces performances.

Nos observations ont révélé que la réduction du nombre de chaînes RF a un impact négligeable sur la qualité et la capacité du système MIMO massif hybride beamforming. Cependant, cette réduction permet de simplifier et de minimiser les coûts de mise en œuvre du système.

Bibliographies:

-
- [1] H. Shin , J et H. Lee : Capacity of multiple-antenna fading channels: spatial fading correlation, double scattering, and keyhole, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 49, pp. 2636- 2647, Oct. 2003.
- [2] TRARI TANI Amel et TAHRI Asma : l'estimation de canal pour les systèmes MIMO Massif, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, mémoire de Master,2020.
- [3] RABHI,K et SEKKAI,Ch: Strategies MIMO (Multiple input Multiple output) dans les réseaux de capteurs sans fil, Université Bejaia, mémoire de master,2017.
- [4] Djikna vorian : MIMO pour les nuls. Laboratoire de Radio télécommunications et du Signal Université LAVAL, mémoire de master, Janvier 2007.
- [5] « MIMO Massif », article de Wikipedia, https://fr.wikipedia.org/wiki/MIMO_massif , consulté en janvier 2023.
- [6] Benyarou Mourad: Optimisation des systèmes multi-antennes appliqués aux systèmes MC-CDMA, Université Abou Bakr-Belkaid, Tlemcen. Thèse de doctorat, 2012- 2013.
- [7] Michael Wang: The Role of Massive MIMO in 5G .Oct 23, 2018 [Enligne]. <https://medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61>
- [8] Hadouche Khaled: contamination des pilotes en MIMO massif, Université de Blida, mémoire de master,2018.
- [9] 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, Thèse de doctorat, 2017. English.
- [10] Antoine Rozé: Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques, université Bretagne Loire, mémoire de master, 17 octobre 2016.
- [11] Gourayi Ahlem: Efficacité Energétique dans les Systèmes MIMO Massive, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, mémoire de master 2015.
- [12] définition d'antenne, https://espace.inrs.ca/id/eprint/2116/1/AKamil_2011.pdf, consulté en février 2023.
- [13] Rafiou Mohamed: Contribution de l'Antenne Intelligente Face Aux Interférences 4G Et TNT, Université d'Antananarivo, mémoire de master,25 Janvier 2017.
- [14] Ahmad El sayed Ahmad: Conception d'antennes réseaux aux performances optimisées par la prise en compte des couplages inter éléments. Application à la formation de faisceau et à la polarisation circulaire, université de Limoges, mémoire de master,14 décembre 2010.
- [15] Bendahmane, A. M. et Ghermoui, R: Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC (Doctoral dissertation). 10Strategies MIMO (Multiple input Multiple output) dans les réseaux de capteurs sans fil, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, mémoire de master,2018.
- [16] Aounallah Naceur: Utilisation des antennes intelligentes dans les systèmes de communication sans fil, université DjillaliLlabbes de Sidi Bel Abbes, mémoire de master,2015.
- [17] Mourad Nedil: Développement d'un réseau d'antennes à formation de faisceaux basé sur de nouvelles Matrices de Butler, Université du Québec, mémoire de master,2006.

-
- [18] Ismehehne Chahbi: Exploitation des antennes multiples pour l'optimisation dans les réseaux sans fil, Ecole doctorale EDITE, Thèse de doctorat, 23 Mai 2014.
- [19] Mokhefi Akila et Metahri Imene: Etude et simulation de méthode de Beamforming pour systèmes de modulation multi-porteuse pour la 5G, Université Abou bakr Belkaïd Tlemcen, mémoire de master, 2018.
- [20] Yasser Abou baker Hachemi: Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G, Université Abou bakr Belkaïd Tlemcen, mémoire de master, 19 septembre 2020.
- [21] Rasoanantenaina Lantonirina Elysa: Etude de Performance des Nouvelles Formes D'Ondes Et Du MASSIVE MIMO Sur Le Réseau 5G, université D'Antananarivo, mémoire de master Mars 2017.
- [22] Robert W Heath et Nuria Gonzalez-Prelcic, Sundeep Rangan, Wonil Rohet 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.
- [23] 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.
- [24] Marwa chouk: Annulation des interférences inter-cellulaires pour les systèmes MIMO massif dans les réseaux hétérogènes 5G, Université du Québec, mémoire de master, 2019.
- [25] BENDAHMANE Amine : le recuit simulé, université d'oran, mémoire de master, 25 octobre 2011
- [26] recuit thermique, <http://www.lps.ens.fr/~weisbuch/livre/b9.html>, consulté en mars 2023.
- [27] BERKANI Abdelhakim : Métaheuristique Hybride Réseaux de Neurones Artificiels-PSO du Recuit Simulé pour la Commande d'un Procédé Industriel Non-linéaire, université de Batna, mémoire de magistère 2013.
- [28] BOUSAHLA Miloud : Analyse et synthèse de réseaux plans ou conformés d'antennes imprimées par méta-heuristiques floue, université Abou Bekr Belkaid, Thèse de doctorat 2012.
- [29] Moezammami: chapitre-2-le-recuit-simulé
- [30] Allam Farida et Attab Saida: Hybridation de la méthode des k- means avec le recuit simulé, Université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, mémoire de master 2008-2009.
- [31] Törn, A.A: Cluster analysis as a tool in a global optimization model, In Proceedings of Third International Congress of Cybernetics and Systems, Bucharest 1975, Springer Verlag, 249-260.
- [32] SOUABNI Adem BELHOUL Abd Eraouf: L'algorithmes Séquentielle (Recuit Simulé+ Algorithme 2-Opt Pour La Résolution Du Problème De Routage De Véhicules avec Capacité (PRVC), Université de Bordj Bou Arreridj, mémoire de master, 2020/2021.
- [33] A. Alkhateeb, O et El Ayach, G et Leus, et R. Heath, "Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems, IEEE J. Sel. Topics Signal Process, 2014.
- [34] F. Sofrabi and W. Yu, "Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale MIMO systems, in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process. (ICASSP), Brisbane, Australia, Apr. 2015.

-
- [35] T. Endeshaw Bogale and L. B. Le, “Beamforming for multiuser massive MIMO systems: Digital versus hybrid analog-digital,”[Online] available: <http://arxiv.org/abs/1407.0446>, 2014.
- [36] L. Liang, Y. Dai, W. Xu, and X. Dong, “How to approach zero-forcing under RF chain limitations in large mmwavemultiuser systems?” in *IEEE/CIC Int. Conf. Commun. in China, Shanghai*, 2014, pp. 518–522.
- [37] L. Liang, W. Xu, and X. Dong, “Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, pp. 653–656, 2014.