

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

filière : Télécommunications  
Spécialité : Systèmes des Télécommunications

présenté par

HAFIS Soumia

&

KHALDI Hafida

---

# Efficacité spectrale en MIMO Massif

---

Proposé par : Dr Ait Saadi Hocine

Année Universitaire 2018-2019

---

## Remerciements

---

*Nous tenons tout d'abord à.*

*Nous remercions les deux êtres les plus remerciés **ALLAH** celui qui donne la puissance, la force, le courage et la patience, de mener à terme ce présent travail chers à nous, **nos parents** qui ont consacré leur vie à veiller à notre réussite.*

*Nous exprimons notre cordiale reconnaissance à notre encadreur **Mr AIT SAADI Hocine**, pour ses précieux conseils, son rigueur et patience, et toutes les connaissances qu'il nous a transmis.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements au membre de jury. Veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance.*

*Nous sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études, plus généralement tout le personnel enseignant du département d'électronique de l'université SAAD DAHLAB qui a participé à notre formation.*

*Finalement, nous adressons les plus vifs remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin de l'élaboration de ce modeste mémoire.*

## DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

### **À mes parents,**

Qui ont su me donner les ailes nécessaires pour réussir mon envol dans la vie, tout en sachant la peine qu'ils auraient le jour de me voir partir au loin.  
En remerciement de ce beau geste, ce mémoire leur est dédié.

### **A ma mère**

Pour son aide inestimable, qu'elle soit humaine ou scientifique, pour ce mémoire ou dans ma vie, pour ses conseils dont je ne regrette jamais l'application, pour son amour, pour ses encouragements, pour son dévouement et pour avoir réussi à être encore mon modèle

### **A mon père**

Pour son soutien indéfectible, source de sacrifice, qui est toujours disponible pour nous, et prêt à nous aider, je lui confirme mon attachement et mon profond respect.  
Puisse Dieu vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

### **A mes frères**

**AbdRezzak, Hakim, Lakhder, Kamel, AdbRaouf, Bilal et Mohamed** pour avoir me donner du soutint moralement et financièrement et que Dieu vous protège et vous procure joie et le bonheur que vous mérites.

### **A mes sœurs**

L'adorable **Karima, Fayza et Imene** pour être les oreilles quand j'ai besoin d'écoute, pour être des épaules quand je suis fatiguée, pour être des amies quand j'ai besoin de conseil.

Une spéciale dédicace à une personne qui a été toujours à côté de moi pour me soutenir, m'aider et m'écouter. Mon cher ami et famille, mon fiancé **Amine** merci pour ton amour, ton amitié.

A toute ma famille **Khaldi et Maamri.**

A ma confidente : ma binôme **Soumia**

Conserve-moi ta profonde amitié et ton immense amour et sois convaincue qu'il en est de même pour moi.

A toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail à tous ceux que j'ai omis citer.

***Hafida***

## *Dédicace*

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

*Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers :*

*A mes chers **PARENTS**, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Allah, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.*

*À mes adorables Sœurs **Asmaa** et son mari **Yacine** et son fils **Ahmed, Hadjer** et son mari **Rabah** et **Yasmina**, qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long mes études. Je vous souhaite du succès et de la prospérité et une vie remplie de joie et de bonheur.*

*Je réserve également mes remerciements à mes grands-mères, toutes mes tantes, mes oncles et mes cousines cousins pour leur soutien moral.*

*À mes copines qui ont toujours été là pour moi et sur qui j'ai toujours pu compter, je citerai : **Samia, Zineb, Ahlem** et **Soumia** et tous ceux que j'ai oublié de citer.*

*À mon chère binôme **Hafida** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet. Rein ne pourra me faire oublier les bons moments qu'on a vécu ensemble.*

*Je dédie ce travail à tous mes collègues de la promotion de système de télécommunication qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci.*

*Soumia*

---

**ملخص:** يعد MIMO ضخمة واحدا من اكثر التقنيات الواعدة للجيل القادم من شبكات الاتصالات اللاسلكية ,حيث لديه القدرة على تقديم تحسينات هائلة في الكفاءة الطيفية SE وكفاءة الطاقة EE. هدفهم هو زيادة الإنتاجية من خلال ضمان نوعية جيدة للغاية الخدمة. MIMO ضخمة هي تقنية بها عدد كبير جدا من الهوائيات لتحسين الشبكات الخلوية في المستقبل. في هذه الرسالة سوف نحلل مشكلة الكفاءة الطيفية ضخمة.

**كلمات المفاتيح:** MIMO ضخمة، متعددة المستخدمين، كفاءة الطاقة والكفاءة الطيفية.

---

**Résumé :** Le MIMO massif est l'un des technologies les plus prometteuses pour la prochaine génération des réseaux communications sans fil, car il a le potentiel de fournir des améliorations décisives de l'efficacité spectrale (SE) et de l'efficacité énergétique (EE). Son objectif est d'augmenter le débit en garantissant une très bonne qualité de service. Le MIMO massif est une technologie comprenant un nombre très élevé d'antennes pour améliorer les futurs réseaux cellulaires. Dans ce mémoire nous allons analyser le problème de l'efficacité spectrale.

**Mots clés :** MIMO massif, multiutilisateur, l'efficacité énergétique et l'efficacité spectrale

---

**Abstract:** Massive MIMO is one of the most promising technologies for the next generation of wireless communications networks, as it has the potential to deliver dramatic improvements in spectral efficiency (SE) and energy efficiency (EE). Its goal is to increase throughput by guaranteeing a very good quality of service. Massive MIMO is a technology with a very high number of antennas to improve the future cellular networks. In this master dissertation we will analyze the problem of spectral efficiency.

**Keywords:** massive MIMO, multiuser, energy efficiency and spectral efficiency.

---

# Table des matières

Introduction générale.....	1
Introduction générale.....	2
Chapitre 1 : Les Systèmes MIMO Massif .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Évolution de communication mobile .....	3
1.3 Réseaux cellulaires .....	5
1.4 MIMO (Multiple-Input/Multiple-Output) .....	6
1.5 Principe de la technique MIMO .....	6
1.6 Types de MIMO .....	7
1.6.1 SISO (Single Input Single Output) .....	7
1.6.2 SIMO (Single Input Multiple Output) .....	8
1.6.3 MISO (Multiple Output Single Input) .....	8
1.6.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output) .....	9
1.7 Massive MIMO .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
1.8 Les différents types du MIMO massif .....	10
1.8.1 MIMO mono-utilisateur .....	10
1.8.2 MIMO massif multiutilisateurs .....	11
1.9 Duplexage par division de temps ou par division de fréquence.....	12
1.10 Caractéristiques d'un système MIMO Massif .....	13
1.10.1 L'évolutivité.....	13
1.10.2 Le système TDD en MIMO massif .....	13
1.10.3 La propagation favorable.....	14
1.11 Avantage des systèmes Massive MIMO.....	15
1.12 Conclusion .....	15

Chapitre 2	: L'interférence et l'Efficacité spectrale .....	16
2.1	Introduction .....	16
2.2	MIMO multi-utilisateur .....	16
2.3	Le beamforming (faisceaux d'émission).....	17
2.4	Interférence multicellulaire .....	18
2.5	Les différents niveaux de coopération multicellulaire .....	18
2.5.1	Coordination d'interférence .....	18
2.5.2	Coopération MIMO.....	19
2.6	ICIC (Inter cell Interference Coordination).....	20
2.7	CoMP (Coordinated Multi-Point) .....	20
2.8	Les défis des systèmes Massif MIMO .....	20w
2.8.1	Contamination des pilotes.....	20
2.8.2	Efficacité spectrale.....	22
2.9	Le pré-codage.....	23
2.10	MMSE .....	24
2.11	Le fonctionnement de MIMO massif .....	24
2.11.1	Estimation MMSE du canal .....	26
2.11.2	Données de la liaison montante .....	27
2.11.3	Données de liaison descendante .....	31
2.12	Conclusion .....	34
Chapitre 3	: Simulation et résultats.....	35
3.1	Introduction .....	35
3.2	Le Système le MU-MIMO .....	35
3.3	Organigramme des simulations .....	36
3.4	L'étude de transmission des données en liaison montante .....	37
3.5	Résultat de BER en fonction le SNR avec l'algorithme MMSE.....	38

3.6	La somme des taux en liaison descendante.....	40
3.7	Les résultats de l'analyse d'Efficacité spectrale.....	42
3.7.1	En liaison montante .....	43
3.7.2	En liaison descendante .....	45
3.8	Conclusion .....	46
	Conclusion générale.....	47
	Bibliographie .....	48

## Liste des figures

<b>Figure1. 1</b> : évolution des réseaux mobile [1]. .....	4
<b>Figure1. 2</b> : Un réseau cellulaire de base.....	5
<b>Figure1. 3</b> : Le principe de la technique MIMO [3].....	7
<b>Figure1. 4</b> : SISO -Signal Input Signal Output [4]. .....	7
<b>Figure1. 5</b> : SIMO-Signal Input Multiple Outputs [4].....	8
<b>Figure1. 6</b> : MISO-Multiple Input Signal Output [4]. .....	8
<b>Figure1. 7</b> : MIMO-Multiple Input Multiple Output [4].....	9
<b>Figure1. 8</b> : système de communication MIMO massif Multi utilisateur [7]. .....	10
<b>Figure1. 9</b> : MIMO massif mono-utilisateur [8]. .....	11
<b>Figure1. 10</b> : MIMO massif multiutilisateur[8]. .....	11
<b>Figure1. 11</b> : Illustration de deux manières de diviser un bloc de ressources temps/fréquence entre UL et DL [10].....	13
<b>Figure1. 12</b> : La contrainte de M et K sue TDD et FDD pour un système MIMO massif.[11].....	14
<b>Figure2. 1</b> : Illustrations de la transmission en liaison descendante et en liaison montante dans un système MIMO multi utilisateur [8]. .....	17
<b>Figure2. 2</b> : Beamforming analogique. ....	18
<b>Figure2. 3</b> : Faisceau coordonné spécifique [8]. .....	19
<b>Figure2. 4</b> : Coopération MIMO [8]. .....	19
<b>Figure2. 5</b> : Contamination de pilote [14]. .....	21
<b>Figure2. 6</b> : Block de cohérence.....	23
<b>Figure2. 7</b> : Protocole de transmission de schéma TDD.....	24
<b>Figure2. 8</b> : Le schéma fonctionnel de la liaison montante avec le rapport maximal[9].	29
<b>Figure2. 9</b> : Le schéma fonctionnel de la liaison montante avec le forçage à zéro [9]. .	30
<b>Figure2. 10</b> : Le schéma fonctionnel de la liaison descendante avec le rapport maximal[9]. .....	32
<b>Figure2. 11</b> : Le schéma de la liaison descendante avec le forçage a zéro[9].....	33

<b>Figure3. 1</b> Organigramme montre les étapes de travail .....	36
<b>Figure3. 2</b> Taux d'erreur binaire BER en fonction de rapport signal sur bruit avec MMSE et ZF. ....	39
<b>Figure3. 3</b> Modèle du système multicellulaire montre la BS dans la $j^{\text{ème}}$ cellule avec M et les K utilisateur dans la $l^{\text{ème}}$ cellule. ....	41
<b>Figure3. 4</b> Efficacités spectrale en fonction de nombre d'antenne. ....	42
<b>Figure3. 5</b> L'efficacité spectrale en fonction de nombre d'antenne réalise par des déférents pré codage en liaison UL. ....	44
<b>Figure3. 6</b> L'efficacité spectrale en fonction de nombre d'antenne réalise par des déférents pré codage en liaison DL. ....	45

## Liste des tableaux

<b>Tableau3. 1</b> paramètre de la figure (3.2). .....	38
<b>Tableau3. 2</b> paramètre du la figure (3.4). .....	41
<b>Tableau3. 3</b> paramètre du système.....	43

## Liste des acronymes et abréviations

- 1G:** 1<sup>st</sup> generation.
- 2G:** 2<sup>nd</sup> generation.
- 3G:** 3<sup>rd</sup> generation.
- 4G:** 4<sup>th</sup> generation.
- 5G:** 5<sup>th</sup> generation.
- BS:** Base Station.
- BER:** Bit Error Rate.
- CSI:** Channel State Information.
- DL:** Down Link.
- EE:** Energy Efficiency.
- FDD:** Frequency Division Duplexing.
- ICI:** Inter Cell Interference.
- ISI:** Inter-Symbol-Interference.
- LOS:** Line Of Sight.
- MIMO:** Multiple-Input-Multiple-Output.
- MISO:** Multiple Input Signal Output.
- MMSE:** Minimum Mean Square Error.
- MU-MIMO:** Multiple User MIMO
- MR:** Maximum Ratio.
- MRC:** Maximum Report Combination.
- QAM:** Quadrature Amplitude Modulation.
- QoS:** Quality Of Service.
- RZF:** Regularized Zero-Forcing.
- SE:** Spectral Efficiency.
- SU-MIMO:** Single User MIMO.
- SINR:** Signal to Interference Noise Ratio.
- SISO:** Signal Input Signal Output.
- SIMO:** Signal Input Multiple Output.
- SNR:** Signal Noise Ratio.
- TDD:** Time Division Duplexing.

**UL:** Up Link.

**UT:** User Terminal.

**ZF:** Zero Forcing.

# Introduction générale

---

La technologie de communication est toujours en évolution, et l'évolution des Smartphones et des microprocesseurs, a conduit à la croissance fulgurante de l'utilisation des systèmes de communications et la forte expansion de l'internet mobile dans les quatre coins du globe (4G/5G) (4th generation/5<sup>th</sup> generation). La demande rapide de la croissance de la bande passante et les demandes de QoS (qualité of service) ont rendu les réseaux mobiles de la 4<sup>ème</sup> génération incapable répondre aux exigences des abonnés. La majorité des travaux de recherche dans ce domaine se focalise sur le déploiement de nouvelles technologies permettant de rendre les réseaux sans fil de plus en plus performants. Le MIMO massif a l'avantage de permettre d'augmenter le débit à 10Gbit/s ou plus avec une densité de connexion qui dépasse 1Méga de connexion / Km<sup>2</sup>. A l'aide du système TDD (Time Division Duplexing) qui est le mode de fonctionnement optimal en système MIMO massif, parce il permet une réciprocité du canal en UL (Up Link) et en DL (Down Link). L'estimation des canaux d'évanouissement aux niveaux des stations de base, permet grâce à un pré- codage d'augmenter l'efficacité spectrale des canaux. Le problème étudié dans ce mémoire, est l'efficacité spectrale et la transmission des données en liaison montante et descendante avec différentes technique tel que le ZF (Zero Forcing), le MRC (Maximum Ratio Combining) ou le MMSE (Minimum Mean Square Error).

Le travail de cette mémoire est composé de trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons l'évolution des réseaux de communication mobile vers la cinquième génération, principalement par une étude de la technologie MIMO massif.

Nous consacrons dans le deuxième chapitre aux défis de la technologie MIMO massif en passant par les différents types d'interférence, en particulier la contamination des

pilotes transmis en UL. Ensuite nous allons aborder la capacité du canal en MIMO et l'efficacité spectrale.

Le troisième chapitre expose les résultats de simulations d'un système Massive MIMO multi-cellules et multi-utilisateurs. Principalement, les simulations démontrent l'influence de certains paramètres du système, et des différentes techniques sur l'efficacité spectrale.

# Chapitre 1 : Les Systèmes MIMO Massif

---

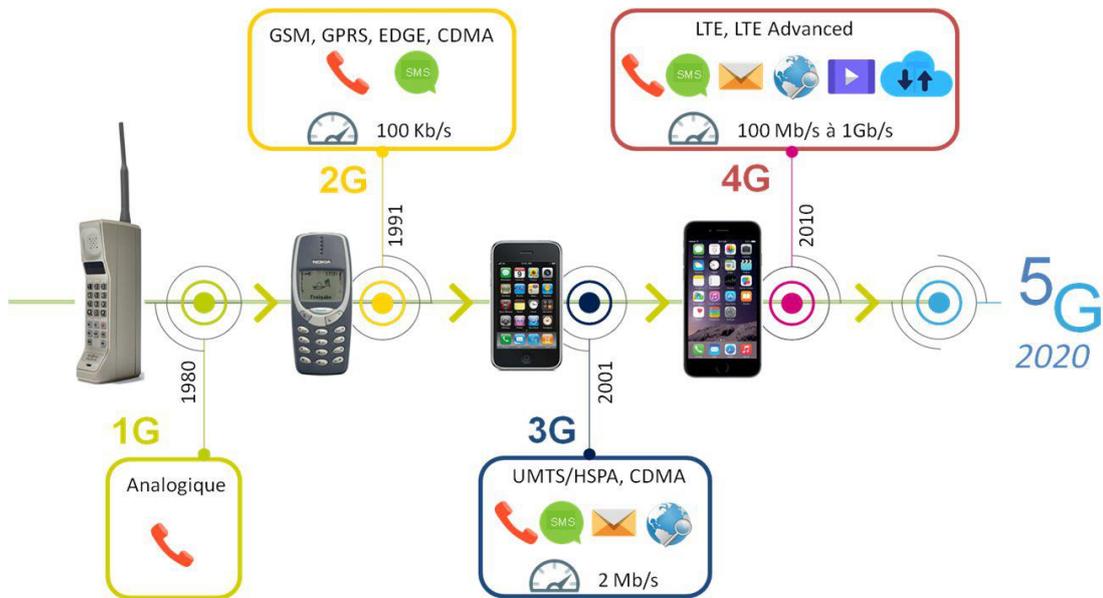
## 1.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les réseaux Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) connus sous le nom de MIMO Massif. Cette technologie présente comme l'une des méthodes les plus prometteuses pour les systèmes révolutionnaires de la cinquième génération (5G). En fait, elle permet de fournir des améliorations significatives sur l'efficacité spectrale (SE) et l'efficacité énergétique (EE).Après une brève description de l'évolution de communication mobile, nous allons donner des généralités sur les systèmes MIMO massif, leurs types et les modèles de canal MIMO massif et la caractéristique de ce dernier.

## 1.2 Évolution de communication mobile

Le réseau mobile est une technologie sans fil capable de fournir un réseau vocal et / ou de données par transmission radio. Aujourd'hui et dans les années à venir, les réseaux sans fil doivent être améliorés pour répondre à la demande d'augmentation du débit de données, de l'amélioration de la capacité, la réduction du temps de latence et de la qualité de service.

En seulement 20 ans, les réseaux de téléphonie mobile ont subi une transformation profonde en passant de la deuxième génération (2G) (communication vocale), à la troisième génération (3G) (communication vocale et transfert de données), puis à la quatrième génération (4G) (communication et transfert haut débit).



**Figure1. 1 :** évolution des réseaux mobile [1].

Depuis 1979 avec le déploiement de la première génération (1G) de réseaux sans fil analogiques, l'objectif était d'aider deux usagers à communiquer par la transmission de la voix malgré un faible niveau d'efficacité et de sécurité. La Figure 1.1 illustre l'évolution des réseaux mobiles, la deuxième génération (2G) repose sur une technologie numérique et avec la création du standard GSM, de nouveaux services ont été introduits comme le transfert de données et les SMS (Short Message Service) et les communications à bas débit. Néanmoins, la 2G ne pouvait pas encore répondre à la demande d'accès à internet haut débit par les téléphones portables. Ceci a motivé le développement de la 3G dont le but était de fournir justement du haut débit de données. Des débits de transferts de données beaucoup plus importants que ceux de la 3G ont pu être atteints avec la définition de la 4G permettant les appels vidéo et le transfert de fichiers beaucoup plus volumineux. Cependant, le réseau 4G ne peut pas répondre à la demande croissante du nombre d'objets connectés. C'est pourquoi l'industrie du téléphone mobile a choisi de développer le réseau de cinquième génération (5G) pour fournir une solution technique au problème que rencontre la 4G aujourd'hui [1].

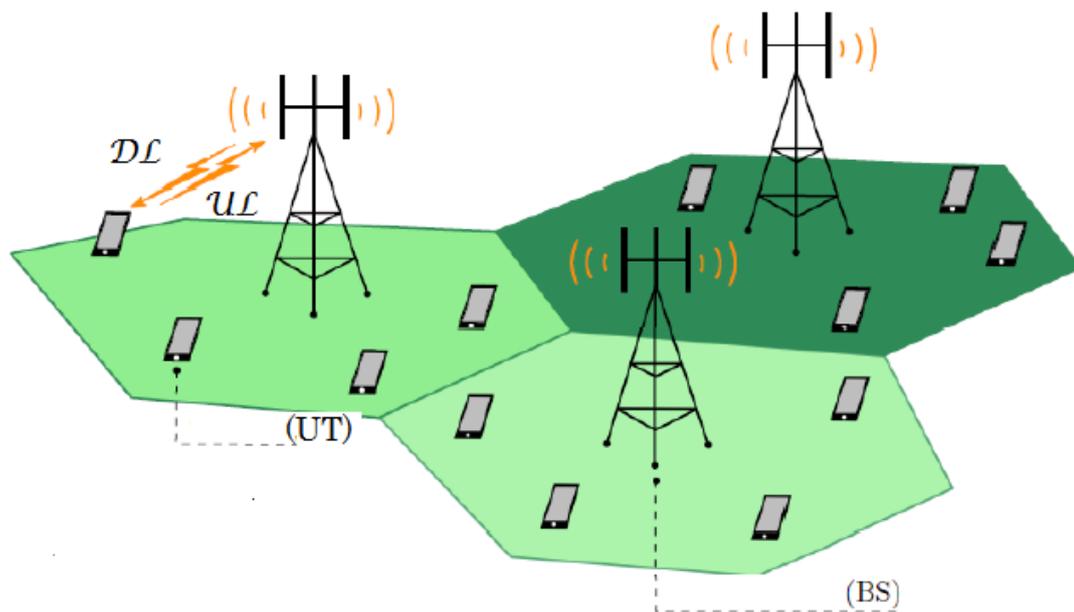
La (5 G) est une nouvelle génération de technologie de télécommunications sans fil qui promet de révolutionner la façon dont le monde communique, elle prend en charge davantage d'utilisateurs à des débits de données plus élevés avec une fiabilité accrue,

tout en consommant moins d'énergie. La 5G permet aussi, d'atteindre un meilleur rapport coût efficacité énergétique ainsi qu'une qualité de service en termes de délai de communication et de sécurité.

Les avantages de la 5G par rapport aux autres générations est certainement encore plus le débit spectaculaire pouvant être atteint en utilisant le MIMO massif.

### 1.3 Réseaux cellulaires

Dans les réseaux cellulaires ou plus généralement mobiles, les terminaux des utilisateurs situés dans une zone géographique donnée sont desservis par plusieurs BS. Chaque BS dessert simultanément un certain nombre de terminaux situés dans sa zone de couverture pour réaliser l'émission et la réception, comme c'est illustré à la figure 1.2. Une telle zone de couverture est appelée cellule.



**Figure1. 2** : Un réseau cellulaire de base.

La communication entre les terminaux et BS est bidirectionnelle ou au format full duplex. Sur la liaison descendante (DL), la station de base transmet des signaux aux terminaux affectés, alors que sur la liaison montante (UL), les terminaux transmettent des signaux à la station de base, comme illustré à la Figure 1.2. En général, TDD et le FDD sont utilisés comme schémas de transmission en duplex.

## **1.4 MIMO (Multiple-Input/Multiple-Output)**

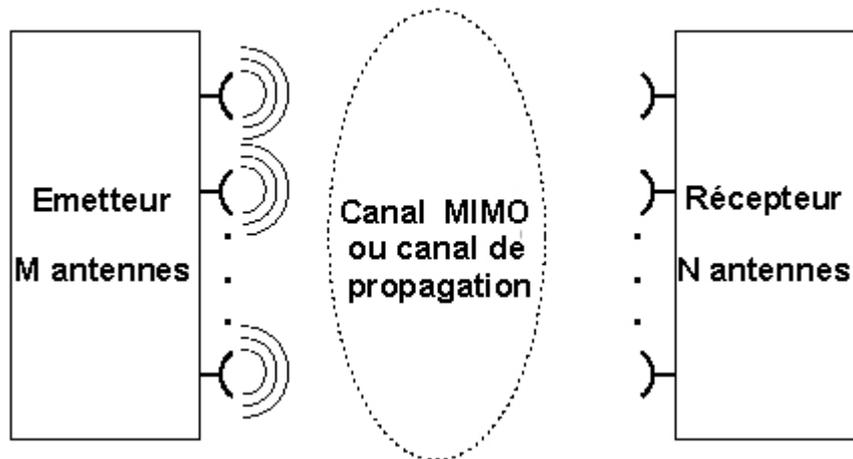
MIMO signifie Multiple-Input/Multiple-Output, en français « entrées multiples/sorties multiples ». Cette technologie sans fil utilise plusieurs antennes à l'émission et à la réception pour transférer plus de données en même temps.

Grâce à MIMO, les antennes fonctionnent plus intelligemment en leur permettant de combiner des flux de données provenant de différents chemins et à différents moments pour augmenter efficacement et la puissance de capture du signal au récepteur. Les antennes intelligentes utilisent la technologie de la diversité spatiale, qui permet de tirer le meilleur parti des antennes excédentaires. S'il y a plus d'antennes que de flux spatiaux, les antennes supplémentaires peuvent ajouter de la diversité aux récepteurs et augmenter la portée [2].

## **1.5 Principe de la technique MIMO**

Dans la technique (SISO) il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception. Or la demande de la capacité transmission des services de communications mobiles sans fils et augmente. D'où la nécessité pour des systèmes SISO d'augmenter.

Pour cela, on utilise la technique de transmission MIMO (Multiple Input, Multiple Output) illustrée par la figure 1.3. Leur particularité consiste à émettre dans un même canal des signaux des antennes différentes [3]. A la réception aussi et avec un certain nombre d'antennes et des traitements adéquats, il s'agit de simuler cette réception dans une même bande de  $n$  canaux différents et il permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes [3].



**Figure1. 3** : Le principe de la technique MIMO [3].

## 1.6 Types de MIMO

Il existe quatre modèles de configuration d'antenne de base qui sont définies ci-dessous :

### 1.6.1 SISO (Single Input Single Output)

La forme la plus simple de liaison radio peut être définie en termes MIMO en tant que SISO. Cet émetteur fonctionne avec une antenne, tout comme le récepteur présentée dans la figure 1.4.



**Figure1. 4** : SISO -Signal Input Signal Output [4].

SISO est un système simple de contrôle à une seule variable. Ce système ne nécessite aucun traitement supplémentaire ni diversité. Toutefois, les performances du canal SISO sont limitées. Les interférences et les évanouissements auront plus d'impact sur le système qu'un système MIMO utilisant une certaine forme de diversité, et la capacité du canal est limitée par la loi de Shannon - le débit dépend de la largeur de bande du canal et du rapport signal sur bruit [2]:

$$C = \log_2(1 + \rho|h|^2) \quad \text{Bit/s/Hz} \quad (1.1)$$

Avec:

- $h$  : est le coefficient complexe de canal fixe ou aléatoire.
- $\rho$  : le SNR en réception.

### 1.6.2 SIMO (Single Input Multiple Output)

La version SIMO ou MIMO à une antenne émettrice et plusieurs antennes réceptrices, est présentée par la figure 1.5. Ceci est également appelé réception de la diversité [4]. Il est souvent utilisé pour permettre à un système récepteur recevant des signaux provenant de plusieurs sources indépendantes de lutter contre les effets des évanouissements. Le canal de ce système permet de recevoir M fois le message source émis.

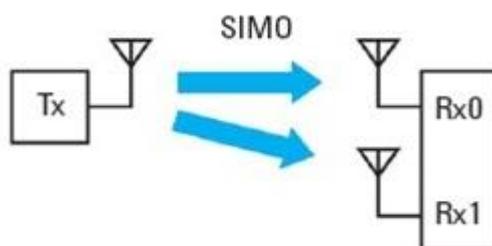


Figure1. 5: SIMO-Signal Input Multiple Outputs [4].

### 1.6.3 MISO (Multiple Output Single Input)

Le MISO est appelé diversité de transmission. L'avantage de ce système est que sur plusieurs antennes les mêmes données sont transmises de manière redondante puis transférées du récepteur à l'émetteur. Le récepteur est alors capable de recevoir le signal optimal qu'il peut ensuite utiliser pour extraire les données requises [5].

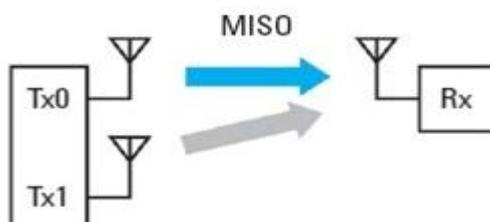


Figure1. 6 : MISO-Multiple Input Signal Output [4].

### 1.6.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output)

MIMO est une méthode de transmission de plusieurs flux de données côté émetteur et côté récepteur pour permettre à une variété de chemins aux signaux figure 1.7. MIMO est également utilisé pour améliorer la robustesse et le débit des canaux.

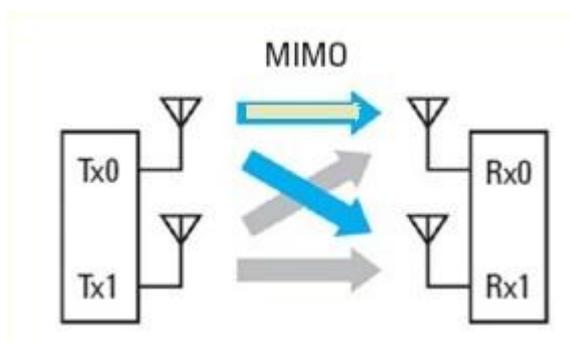
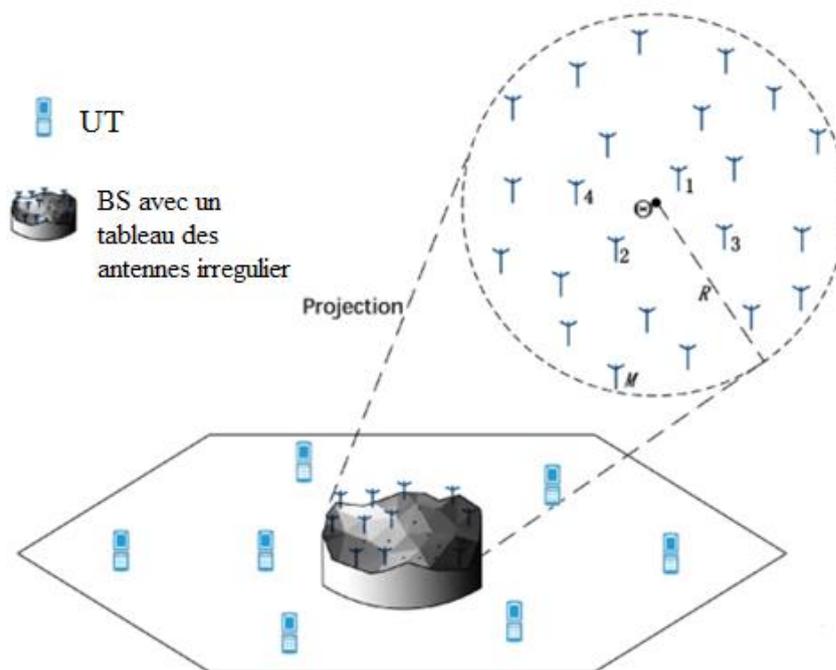


Figure1. 7: MIMO-Multiple Input Multiple Output [4].

### 1.7 MIMO Massif

MIMO massif c'est une technologie de communication sans fil qu'est présentée comme une forme du système MIMO multi-utilisateurs (figure 1.8). Il a beaucoup intéressé les chercheurs ces dernières années, et figure comme le meilleur candidat pour aider à atteindre les objectifs en matière de déploiement de la 5G, où les BS et les UT sont très nombreux. Cette technique s'intéresse à desservir plusieurs utilisateurs avec les mêmes ressources en fréquence pour transmettre des signaux différents. Cela signifie que plusieurs antennes d'émission d'une station de base peuvent émettre des signaux différents, et que plusieurs antennes de réception d'un appareil peuvent les recevoir et les diviser simultanément. Les MIMO massif peuvent permettre d'atteindre jusqu'à 10 G bps et plus).



**Figure1. 8** : système de communication MIMO massif Multi utilisateur [7].

L'utilisation des antennes supplémentaires aide à concentrer la transmission et la réception de l'énergie du signal dans plusieurs régions dans l'espace. Ceci apporte d'énormes améliorations en termes de débit et d'efficacité énergétique, en particulier lorsqu'elles sont combinées avec la planification simultanée de nombreux UT.

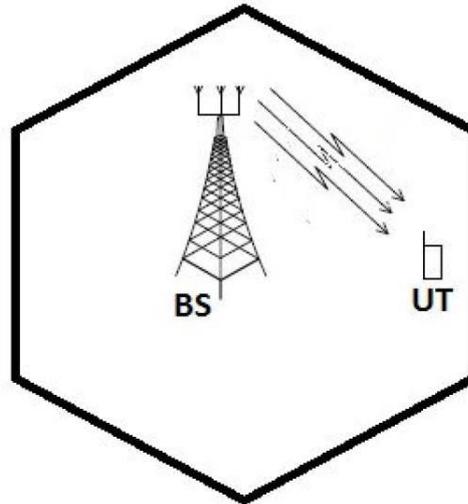
Dans les systèmes MIMO massif, un grand nombre d'antennes BS améliore l'efficacité spectrale et l'efficacité énergétique rayonnée par rapport aux technologies sans fil actuelles. Les antennes BS utilisent l'idée de formation de faisceau en utilisant la transmission uniquement dans les directions préférées de sorte que l'énergie rayonnée soit centrée dans une petite zone et que les interférences soient minimisées [3].

## 1.8 Les différents types du MIMO massif

### 1.8.1 MIMO mono-utilisateur

Le système SU-MIMO signifie plusieurs antennes au niveau de la BS et un seul utilisateur. En raison de la limitation des terminaux, le nombre d'antennes sur le terminal est généralement bien inférieur à  $M$ . De ce fait, les structures SU-MIMO entrent dans le cas 1 lorsqu'un nombre considérable d'antennes sont installées à la station de base, et donc profiter des avantages de l'orthogonalisation de canal si les circonstances favorables de

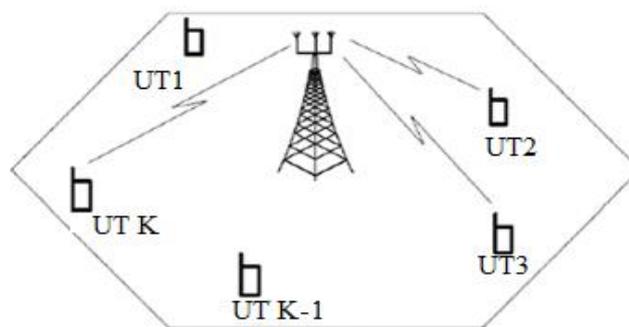
propagation de canal sont valables. Cependant, les canaux SU-MIMO peuvent être extraordinairement corrélés du fait de la faible distance des antennes côté terminal et de l'environnement de visibilité directe viable.



**Figure1. 9** : MIMO massif mono-utilisateur [8].

### 1.8.2 MIMO massif multiutilisateurs

Lorsque plusieurs terminaux sont autorisés à accéder à une ressource temps-fréquence identique, MU-MIMO offre une meilleure efficacité du système par rapport au SU-MIMO. Dans cette section, nous prenons en considération un système MU-MIMO unicellulaire, où la BS dessert  $K$  utilisateurs, chaque terminal étant équipé d'une antenne.



**Figure1. 10** : MIMO massif multiutilisateur[8].

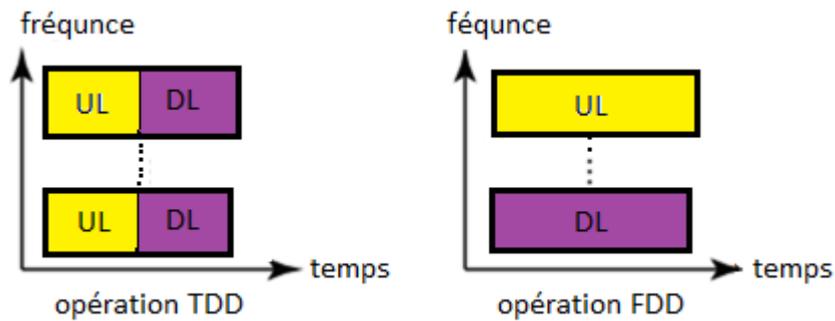
Lorsque  $K \geq 2$  comme le montre la figure 1.10, au niveau de la BS, le signal obtenu de chaque UT interfère avec ceux des autres terminaux. L'information mutuelle de chaque

terminal pour le système MU-MIMO est plus petit que celle pour le système SU-MIMO étant donné la même puissance transmise à chaque terminal. Cependant, quand le nombre  $M$  d'antennes au niveau de la BS est supérieur au nombre  $K$  utilisateurs, les signaux obtenus des terminaux sont presque orthogonaux entre eux d'où l'atténuation drastique des interférences. Aussi, étant donné que les terminaux sont autonomes, la condition favorable de propagation du canal est généralement confortable en raison du fait que les antennes des terminaux sont presque décorrélées [8].

## **1.9 Duplexage par division de temps ou par division de fréquence**

MIMO massif utilise l'information sur le canal (CSI) à la station de base et aux terminaux. Ce CSI peut être obtenu soit par estimation à partir des signaux pilotes reçus, soit par retour du récepteur à l'émetteur figure 1.11, ou les deux.

- Le duplex par division dans le temps (TDD), la station de base apprend le canal sur la liaison montante à partir des pilotes. De plus, parce que le canal est réciproque (la réponse entre deux antennes quelconques est la même dans les deux sens) une fois la station de base a appris le canal de la liaison montante, elle a automatiquement une estimation légitime du canal en liaison descendante. Massive MIMO, assume l'opération TDD [9].
- En mode duplexage par répartition en fréquence (FDD), les terminaux apprennent la liaison descendante, et la station de base apprend le canal sur la liaison descendante. Le canal appris sur la liaison montante est envoyé à la station de base via un canal de contrôle. Ce retour peut être très coûteux, sauf dans des cas particuliers, tels que la propagation en LOS, lorsque le CSI peut être efficacement quantifié. Si le CSI ne possède pas de structure spéciale, le retour analogique direct peut être aussi efficace que n'importe quel système numérique.



**Figure1. 11** :Illustration de deux manières de diviser un bloc de ressources temps/fréquence entre UL et DL [10].

## 1.10 Caractéristiques d'un système MIMO Massif

MIMO massif est une forme de structure MU-MIMO où les BS et l'utilisateur sont très nombreux. Dans ce système des milliers d'antennes BS desservent simultanément des dizaines ou centaines d'utilisateurs dans les mêmes ressources de fréquence. On cite des points importants de MIMO massif.

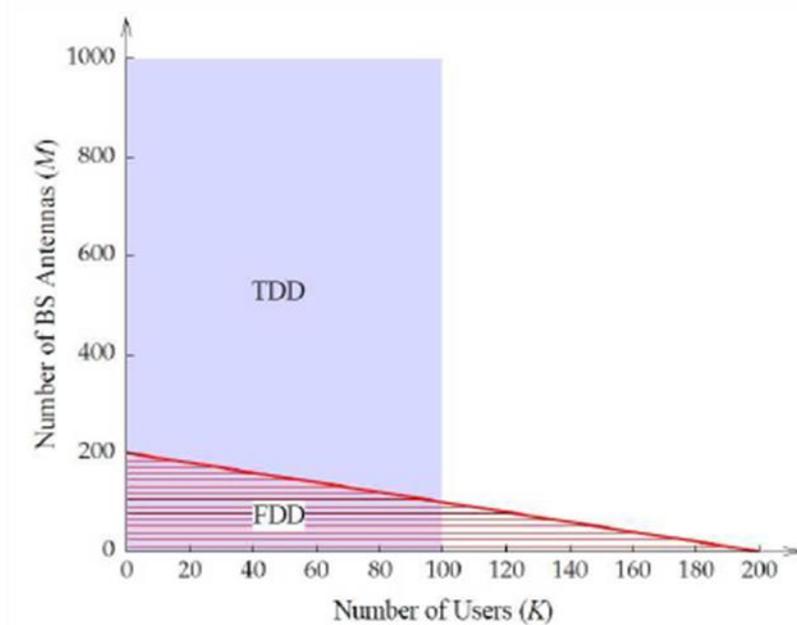
### 1.10.1 L'évolutivité

La BS apprend les canaux via un apprentissage de liaison montante en mode TDD. Le temps requis pour l'estimation du canal est indépendant du nombre d'antennes BS. En outre, le traitement du signal à chaque UT est essentiel et ne dépend pas de l'existence des autres UT, et le démultiplexage et le traitement du signal est effectué aux UT [8].

### 1.10.2 Le système TDD en MIMO massif

En mode FDD (une bande pour l'UL et une autre pour le DL), l'estimation de canal dépend du nombre d'antenne  $M$  à la BS. Par contre, en mode TDD (une seule bande), l'estimation de canal (nombre de pilotes nécessaires) est indépendante de  $M$  et se fait en UL, le temps d'estimation de canal est non biaisé de  $M$ . Dans le MIMO massif,  $M$  est grande, et par conséquent, le fonctionnement TDD est préférable. Par exemple, supposons que l'intervalle de cohérence soit  $T = 200$  symboles (correspondant à un temps de cohérence de 1 ms et à une largeur de bande de cohérence de 200 kHz). Ensuite, dans les systèmes FDD, la quantité d'antennes BS et la quantité d'UT sont limitées par  $M + K < 200$ , tandis que dans les systèmes TDD, la contrainte sur  $M$  et  $K$  est  $2K < 200$ . On peut voir sur la figure 2.7 que la place FDD est beaucoup plus petite que la

région TDD. Avec le TDD, l'ajout d'antennes supplémentaires n'affecte plus les sources nécessaires à l'acquisition du canal.



**Figure 1. 12** : La contrainte de M et K sue TDD et FDD pour un système MIMO massif.[11]

La figure 1.12 montre le gain écrasant de TDD sur FDD pour les UT. L'axe vertical correspond au nombre d'antennes BS et l'axe horizontal à la quantité d'UT. L'emplacement bleu clair indique les dimensions du gadget accessibles avec TDD par rapport à la zone rouge beaucoup plus petite pour FDD.

### 1.10.3 La propagation favorable

La propagation favorable, décrite comme une orthogonalité mutuelle entre les canaux vecteurs aux terminaux, est l'un des facteurs clés du canal radio utilisé dans les MIMO massif. Cependant, il y a eu peu de travail sur cette question en détail. Au fur et à mesure que le nombre d'antennes BS utilisées augmente, MIMO massif tend à avoir une propagation favorable. [8]

## **1.11 Avantage des systèmes Massive MIMO**

Les principaux avantages des systèmes MIMO massif peuvent être résumés comme suit [12] :

- Efficacité spectrale élevé.
- Efficacité énergétique élevé.
- Traitement simple.
- Augmentation du débit de données.
- Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.
- Renforcement des canaux.

## **1.12 Conclusion**

Le MIMO massif possède la capacité d'augmenter le débit du canal, l'efficacité spectrale et la robustesse vis-à-vis de l'évanouissement du signal et des interférences. Nous avons présenté un aperçu de la technologie MIMO massif.

# Chapitre 2 : L'interférence et l'Efficacité spectrale

---

## 2.1 Introduction

Le terme MIMO massif est né d'observations sur les avantages qu'apporte une forte augmentation du nombre d'antennes sur les performances de systèmes MIMO. Dans ce chapitre nous allons présenter les techniques utilisées dans le MIMO massif, le défi des interférences dans les réseaux 5G, et à étudier l'efficacité spectrale.

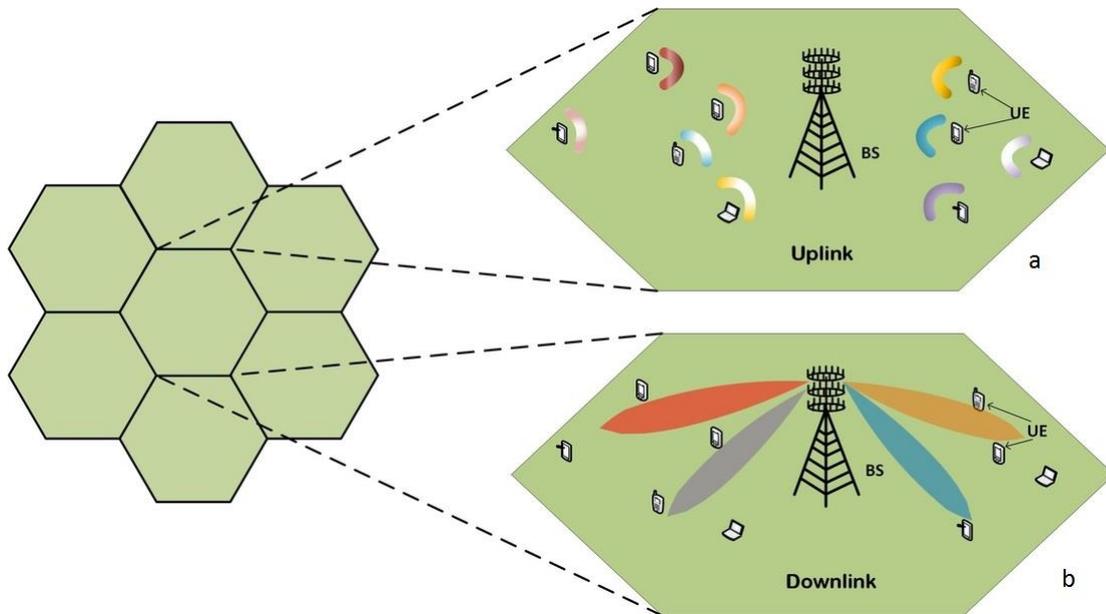
## 2.2 MIMO multi-utilisateur

L'idée des multi-utilisateurs MIMO est qu'une seule station de base avec  $M$  antennes, dessert plusieurs terminaux utilisant les mêmes ressources temps-fréquence [8]. La BS augmente un flux de données par utilisateur dans la liaison descendante et reçoit un flux par utilisateur dans la liaison montante, la BS utilise ses antennes pour séparer les multiples signaux reçus dans la liaison montante et pour diriger chaque signal vers son récepteur souhaité dans la liaison descendante.

Si le terminal est équipé de plusieurs antennes, il est souvent avantageux d'utiliser ces antennes supplémentaires pour atténuer les interférences et améliorer le SNR plutôt que d'envoyer plusieurs flux de données.

(a) Liaison montante dans MIMO multi-utilisateurs

(b) Liaison descendante dans MIMO multi-utilisateur.



**Figure2. 1** : Illustrations de la transmission en liaison descendante et en liaison montante dans un système MIMO multi utilisateur [8].

### 2.3 Le beamforming (faisceaux d'émission)

Beamforming est une technique qui permet de focaliser le signal de plusieurs antennes en un seul faisceau puissant minimisant l'énergie dans les lobes latéraux à l'extrémité de l'émetteur. Cette technique permet de faire le traitement de signal avec plusieurs réseaux d'antennes côté émetteur et / ou récepteur pour envoyer simultanément ou détecter plusieurs signaux de plusieurs terminaux désirés pour augmenter la capacité du système et sa performance [13].

On voit sur la figure 2.2 [14], que chaque trajet indirect ou signal provenant d'un autre utilisateur est automatiquement atténué et le gain obtenu dans la direction d'intérêt, qu'on appelle gain de beamforming, va permettre d'augmenter grandement le bilan de liaison.

L'application de beamforming en systèmes massif MIMO présente les avantages suivants : efficacité énergétique, efficacité spectrale améliorée, sécurité et applicabilité accrues du système pour les bandes d'ondes millimétrique.

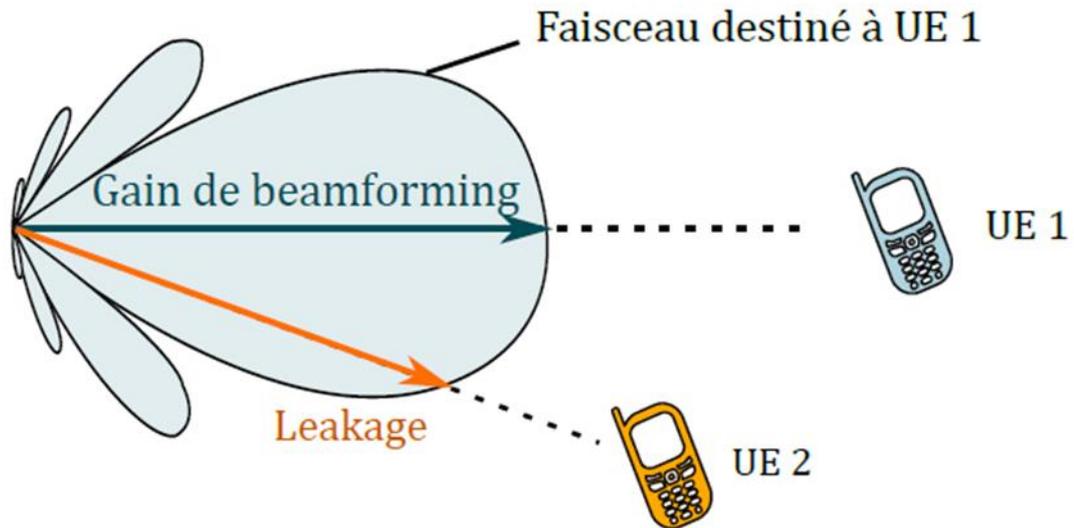


Figure2. 2 : Beamforming analogique.

## 2.4 Interférence multicellulaire

La coopération entre BS est une technique ancienne des réseaux mobiles, où les terminaux mobiles communiquent avec la BS voisine pour surmonter les effets des évanouissements à court et à long terme. La sélection de la diversité vise à augmenter à la fois la capacité et la couverture [15], et en cas de contrôle de la puissance cela permettra une réutilisation des fréquences dans chaque cellule.

## 2.5 Les différents niveaux de coopération multicellulaire

Dans cette partie, nous aborderons les différents niveaux de coopération multicellulaire les plus utilisés dans le Littérature.

### 2.5.1 Coordination d'interférence

La coordination des interférences est due au fait que les informations sur l'état du canal sont partagées via un lien de retour. En utilisant les informations d'état des canaux, les stations de base peuvent gérer la direction de la formation du faisceau, allocation et planification des utilisateurs en temps et en fréquence. Avec une quantité modeste de données de liaison, les BS peuvent atteindre de bonnes performances, en particulier si de nombreux utilisateurs existent dans le système [8]. Par contre il n'y a pas de partage de données de synchronisation ou de transmission entre les stations de base. Les

stations de base suivent ce schéma de gestion des interférences, gère les données de transmission correspondant uniquement à leur utilisateur K.

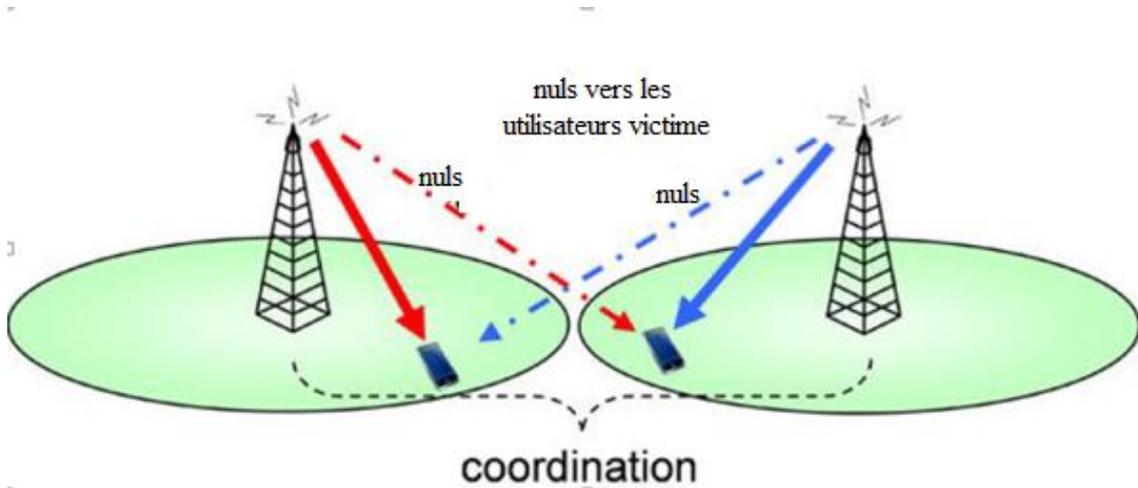


Figure2. 3 : Faisceau coordonné spécifique [8].

### 2.5.2 Coopération MIMO

Si le CSI et les données de transmission sont partagées entre les BS, la formation coopérative de faisceaux peut être réalisée. Dans un tel schéma, chaque UT peut être servi par une combinaison d'antennes appartenant à différentes stations de base ayant le SNR maximal sur ce canal. Ce type de coopération ne peut être atteint sans un délai faible avec des liaisons de grande capacité entre les stations de base [8].

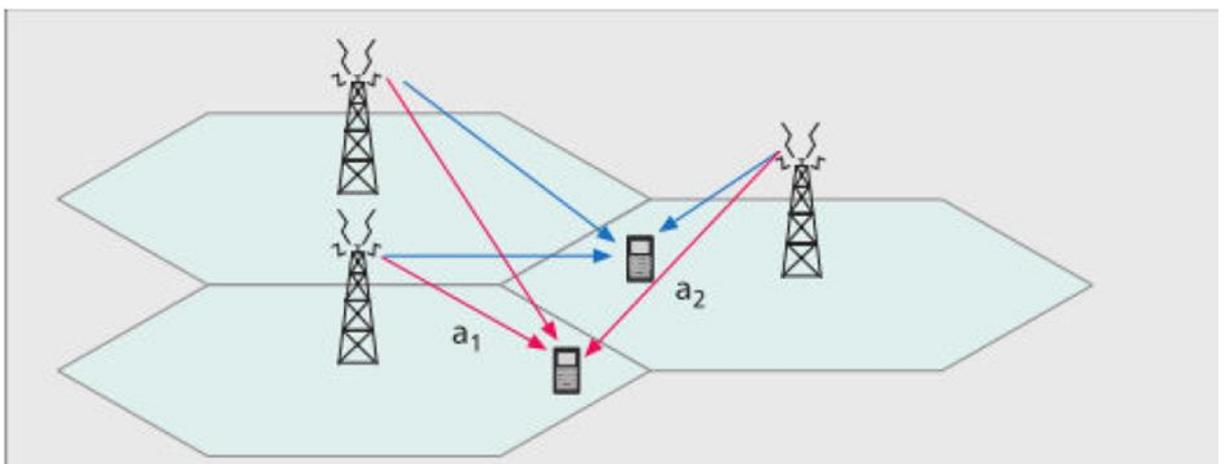


Figure2. 4 : Coopération MIMO [8].

## **2.6 ICIC (Inter cell Interference Coordination)**

Les techniques ICIC, définies dans la norme LTE, visent à réduire les interférences inter-cellules afin de faciliter le handover. Nous allons parler de coordination car un échange d'information est effectué entre l'utilisateur et les BS concernés. Ainsi lors de la gestion du handover, les BS adaptent leur puissance d'émission en fonction des indicateurs reçus pour interférer le moins possible avec l'autre BS et ainsi de faciliter le transfert d'une cellule à l'autre pour l'utilisateur concerné. Elles sont classées en 3 catégories : celles liées au domaine temporel, au domaine fréquentiel et au contrôle de puissance. Ces dernières sont efficaces mais ne permettent pas de supprimer complètement les interférences ou de profiter de la multiplicité des cellules pour accroître la capacité globale d'une zone. C'est en cela qu'interviennent les techniques CoMP. L'ICIC a l'avantage d'une Capacité accrue et Communications plus robustes grâce à la gestion des interférences [14].

## **2.7 CoMP (Coordinated Multi-Point)**

Il s'agit d'un ensemble de techniques visant à tirer parti d'une communication entre plusieurs BS afin de réduire ou de s'affranchir des interférences inter cellules tout en augmentant considérablement la capacité et l'efficacité énergétique du système. Les systèmes MIMO massif bénéficieraient beaucoup des techniques CoMP en raison de leur forte vulnérabilité aux interférences inter-cellules [14].

## **2.8 Les défis des systèmes Massif MIMO**

Les systèmes MIMO massif causent un certain engouement depuis que les objectifs 5G en termes de débit ont été introduits. C'est une technologie de pointe, quoiqu'elle satisfait des exigences de nouvelle génération, elle présente des nouveaux défis, le MIMO massif présente aussi des défis qui sont répertoriés comme suit :

### **2.8.1 Contamination des pilotes**

La contamination des pilotes est l'une des principales difficultés rencontrées pour effectuer une estimation précise. Elle se produit par la réutilisation des pilotes par les UT des cellules voisines. Ce phénomène devient particulièrement problématique en

MIMO massif car il fait apparaître une borne maximale qui limite les performances du système [16].

Pour atteindre une capacité MIMO massif, un CSI précis doit être estimé et sa connaissance est très importante. Quand la station de base reçoit un signal pilote d'un UT, elle utilise le signal reçu pour estimer le CSI qui se révèle être contaminé par les signaux pilotes d'autres terminaux qui partagent la même séquence d'entraînement. Le système TDD est préféré, où la réciprocité de canal est valable, l'émetteur peut estimer le canal des pilotes reçus à partir des équipements de l'utilisateur, et l'utiliser pour le pré codage. Ce schéma nécessite moins de ressources et convient aux grands réseaux avec un grand nombre d'antennes à la station de base, ce mode 'TDD' est le mode de fonctionnement optimal des MIMO massif. [8]

Pour que ces pilotes n'interfèrent pas, ils doivent être orthogonaux entre eux et chaque intervalle de cohérence doit héberger K formes d'ondes pilotes. Supposant que les terminaux utilisent des séquences pilotes orthogonales de longueur  $\tau_p$ , où  $\tau_c \geq \tau_p \geq K$ , la signification de  $\tau_p$  est de quantifier la quantité d'énergie que chaque terminal dépense en pilotes dans chaque intervalle de cohérence. En principe, tout échantillon  $\tau_p$  dans la partie liaison montante de l'intervalle de cohérence peut être utilisé pour les pilotes [9].

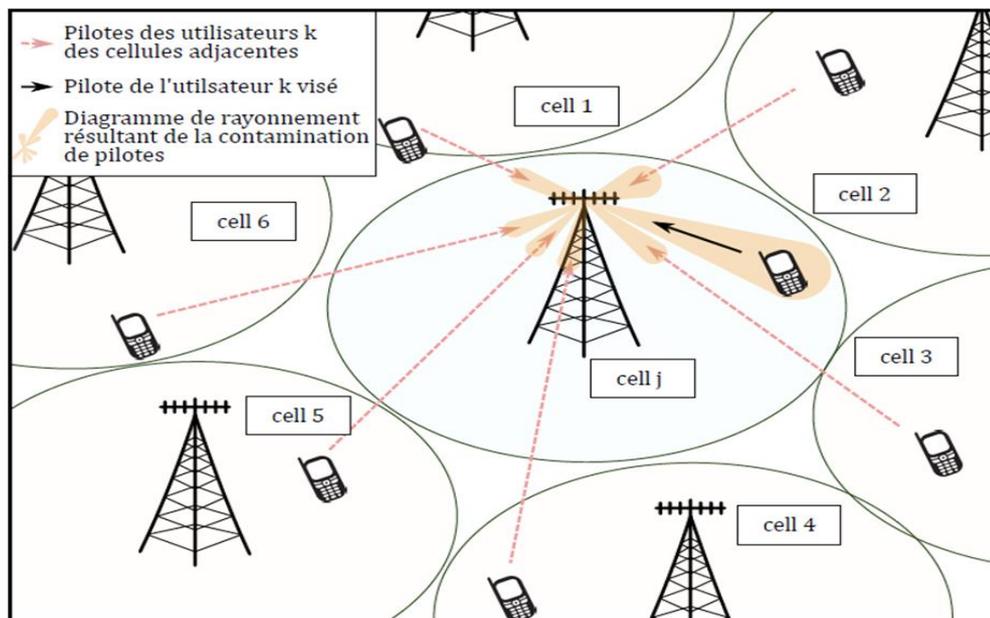


Figure2. 5 : Contamination de pilote [14].

## a Acquisition CSI

L'une des principales tâches du système MIMO massif est l'acquisition de CSI précis, un CSI précis et opportun est requis, il est considéré comme un problème particulier dans de nombreux systèmes de communication sans fil 4G et 5G. Lorsque le CSI est plus précis, il permet d'augmenter la précision de focalisation du faisceau en liaison descendante et de collecter des données avec une puissance supérieure pendant la liaison montante CSI par la BS pour séparer spatialement les UT dans UL et DL. Les canaux sont estimés plus efficacement avec un protocole TDD qui utilise la réciprocité de canal, puisque seulement Les signaux pilotes UL sont requis et aucun retour n'est nécessaire [8].

### 2.8.2 Efficacité spectrale

L'efficacité d'un système de communication était traditionnellement mesurée par l'efficacité spectrale (qui est défini comme la quantité d'informations pouvant être transférées de manière fiable par échantillon à valeur complexe), elle est exprimée en bit/s/Hz, qui est directement liée à la capacité du canal en bit/s. Cette métrique indique l'efficacité d'utilisation de la ressource spectrale. Ce critère renseigne sur l'efficacité d'utilisation de la bande passante et il est exprimé par le rapport entre le débit du réseau  $R$  et la bande passante  $B$  du signal [17] :

$$SE = \frac{R}{B} \quad (\text{Bit/s/Hz}) \quad (2.1)$$

**Théorème 1** : Si une estimation de canal MMSE est utilisée, la capacité de canal ergodique UL d' UE  $k$  dans la cellule  $j$  est délimitée par  $SE_{jk}^{ul}$  (bit/s/Hz) données par [10] :

$$SE_{jk}^{ul} = \frac{\tau_{ul}}{\tau_c} E\{\log_2(1 + SINR_{jk}^{ul})\} \quad (\text{Bit/s/Hz}) \quad (2.2)$$

**Théorème 2** : La capacité de canal ergodique DL d'UE  $k$  dans la cellule  $j$  est délimitée par [10] :

$$SE_{jk}^{dl} = \frac{\tau_{dl}}{\tau_c} \{\log_2(1 + (SINR_{jk}^{dl}))\} \quad (\text{Bit/s/Hz}) \quad (2.3)$$

Ou :  $\tau_c = \tau_p + \tau_{ul} + \tau_{dl}$

Avec :

- $\tau_c$  : La longueur d'intervalle de cohérence.
- $\tau_p$  : La durée de séquence pilote.
- $\tau_{ul}$  : Longueur des Signaux de données UL.
- $\tau_{dl}$  : Longueur des Signaux de données DL.

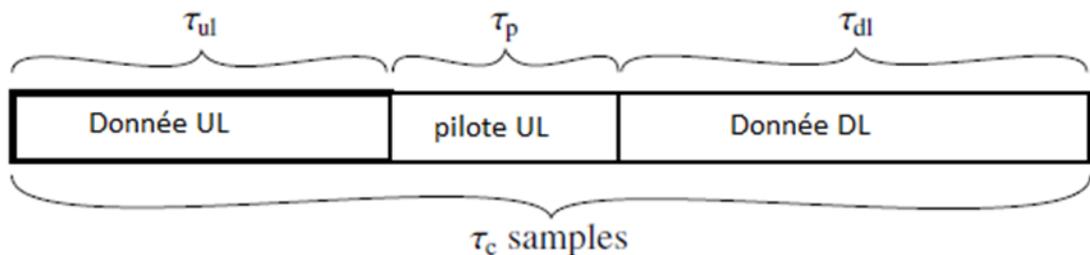


Figure2. 6 : Block de cohérence.

## 2.9 Le pré-codage

Le processus de pré codage, dont le rôle est d'exploiter une certaine connaissance du canal de propagation pour cibler plusieurs utilisateurs et les servir simultanément. Chacun d'entre eux peut alors bénéficier de la totalité de la bande passante et obtenir un débit très élevé. La focalisation d'énergie est souvent associée au terme d'efficacité énergétique se traduit par un gain plus fort lié au pré codage sans augmentation de la puissance de transmission. Le décodage linéaire ou le démultiplexage est utilisé sur la liaison montante, tandis que le pré-codage linéaire ou le multiplexage est utilisé sur la liaison descendante. Les techniques de pré-codage linéaire au niveau de la liaison descendante visent à focaliser chaque signal sur sa borne désirée et à atténuer les interférences vers d'autres terminaux [10]. Entre temps, la combinaison de réception est utilisée dans la liaison montante pour différencier les signaux envoyés depuis différents terminaux. Plus un grand nombre d'antennes est utilisé, plus la focalisation spatiale peut être fine. Les méthodes de pré-codage à faible complexité sont essentielles pour minimiser la complexité de calcul du pré-codeur [14]. Contrairement au système MIMO conventionnel, le système MIMO massif utilise des pré-codeurs linéaires, tels que la

combinaison de rapport maximum (MRC), le filtrage adapté, la formation de faisceau conjugué, la combinaison de réception d'erreur quadratique moyenne (MMSE) et le forçage zéro (ZF) [14].

## 2.10 MMSE

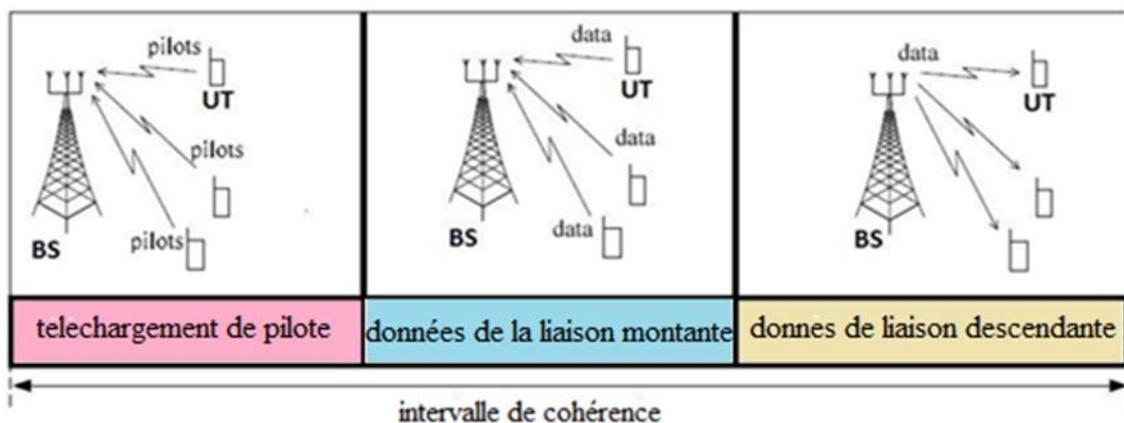
Le MMSE est une méthode d'estimation minimisant l'erreur quadratique moyenne (MSE), qui est une mesure courante de la qualité de l'estimateur, des valeurs ajustées d'une variable dépendante. Le terme MMSE fait plus spécifiquement référence à une estimation avec une fonction de perte quadratique. Dans ce cas, l'estimateur MMSE est donné par la moyenne a posteriori du paramètre à estimer. Comme la moyenne à postérieur est difficile à calculer, la forme de l'estimateur MMSE est généralement limitée à une certaine classe de fonctions. Les estimateurs MMSE linéaires sont un choix populaire, car ils sont faciles à utiliser, à calculer et très polyvalents. [18]

Les avantages du MMSE sont :

1. L'interférence restante est traitée comme un bruit additif supplémentaire. Donc, des algorithmes de détection conventionnels peuvent être appliqués.
2. Les performances s'améliorent en ajoutant plus d'antennes BS.

## 2.11 Le fonctionnement de MIMO massif

Comme nous l'avons dit précédemment que le schéma TDD est le meilleur, Il est à savoir que pendant le traitement dans le système MIMO Massif, il existe trois opérations illustrées par la figure2.7 :



**Figure2. 7** : Protocole de transmission de schéma TDD.

Les UT de chaque cellule transmettent une séquence des pilotes, qui est donnée par l'équation suivante (2.4) [9] :

$$X_p = \sqrt{\tau_p} \phi^H \quad (2.4)$$

Avec :

- $\tau_p$  : Largeur de la séquence pilotes.
- $\phi^H$  : Matrice transpose conjugué des séquences pilotes

Ce signal  $X_p$  est normalisé de sorte que chaque terminal dépense une énergie totale égale à la durée de la séquence pilote, qui est exprimé comme suite :

$$\tau_p \phi_k^H \phi_k = \tau_p \quad (2.5)$$

Toute la complexité du transfert des données sur la liaison montante réside dans la station de base. Les UT simplement pondérer leurs symboles  $\{q_k\}$  respectifs par des coefficients de contrôle de puissance  $\{\eta_k\}$ , puis de manière synchrone, transmettre ces symboles pondérés. Cependant, les symboles proviendraient probablement d'un modèle de constellation QAM. La BS reçoit un signal de chaque antenne et traite ces signaux par une opération de décodage linéaire. Ici, le décodage linéaire fait référence à l'opération de récupérer le signal transmis. Le récepteur doit ensuite effectuer une correction d'erreur décodage.

Le contrôle de puissance est important dans le MIMO Massifs, afin d'obtenir un service uniformément bon, et empêcher les terminaux ayant des canaux puissants d'interférer excessivement avec les terminaux moins fortunés. Les coefficients de contrôle de puissance dépendent uniquement sur les coefficients d'évanouissement à grande échelle  $\{\beta_k\}$ . Cela implique notamment que le pouvoir des coefficients de contrôle sont constants par rapport à la fréquence et doivent être mis à jour seulement à des intervalles peu fréquents. Dans ce chapitre Nous supposons, principalement pour des raisons de simplicité, que le contrôle de puissance est appliqué uniquement à la transmission de données, alors que les pilotes sont toujours transmis à la puissance maximale possible.

Plus en détail, le  $k^{\text{ième}}$  terminal transmet un symbole pondéré, donné par :

$$X_p = \sqrt{\eta_k} q_k \quad (2.6)$$

Avec :

$\eta_{lk}$  : le coefficient de contrôle de puissance  $0 \leq \eta_{lk} \leq 1$

$q_{lk}$  : sont des symboles non-corrélé.

À la réception des pilotes, la station de base reçoit le signal  $M^* \tau_p$ , et effectue une opération de dés étalement en corrélant les signaux reçus avec chacune des K séquences pilotes. Ceci équivaut à multiplier à droite le signal reçu par la matrice de pilotes, donne [9] :

$$Y_{pl} = \sqrt{\tau_p \rho_{ul}} \sum_{j \in P_l} G_j^l + W'_{pl} \quad (2.7)$$

Avec :

- $\rho_{ul}$  : Puissance de signal d'utilisateur.
- $W'_{pl}$ : Représente le bruit pour les éléments CN (0, 1).

Et sous forme des composantes [9] :

$$[Y'_{pl}]_{mk} = \sqrt{\tau_p \rho_{ul}} \sum_{l \in p_j} g_{jk}^{lm} + [W'_{pl}]_{mk} \quad (2.8)$$

$$\text{Et} \quad g_{jk}^{lm} = \sqrt{\beta_{jk}^l} h_{jk}^{l,m} \quad (2.9)$$

Avec :

- $\beta$  : évanouissement à grande échelle.
- $h$  : évanouissement à petite échelle, qui représente le canal de Rayleigh.

### 2.11.1 Estimation MMSE du canal

Au niveau de la liaison retour (BS-UT), la BS a besoin des informations d'état du canal (CSI) pour prendre connaissance des signaux transmis par les UT dans la liaison montante, et pour pré-coder les signaux dans la liaison descendante. Cette information de canal est envoyée via l'apprentissage de la liaison montante. Chaque utilisateur reçoit une séquence pilote orthogonale et envoie sa séquence pilote au BS. En raison de l'orthogonalité des séquences pilotes, la BS est au courant des pilotes transmis par tous les terminaux d'utilisateurs, puis estime les canaux sur la base des signaux pilotes reçus.

En outre, chaque l'utilisateur besoin d'informations partielles de CSI pour découvrir les signaux transmis de BS de manière cohérente. L'apprentissage en liaison descendante permet d'obtenir ces statistiques [3].

Dans notre travail, nous avons choisi le MMSE pour estimation de canal, car il minimise le MSE, et donc minimise le bruit. L'estimateur MMSE dans un système multi cellulaire est donnée par [9]:

$$\hat{g}_{jk}^{lm} = \frac{\sqrt{\tau_p \rho_{ul}} (\beta_{jk}^l)}{1 + \tau_p \rho_{ul} \sum_{l'' \in p_l} \beta_{l''k}^l} [Y_{pl}']_{mk} \quad (2.10)$$

Avec :  $l' \in p_l$

- $\tau_p$  : Largeur de la séquence pilotes.
- $\rho_{ul}$  : Puissance de signal d'utilisateur.
- $\beta$  : évanouissement à grand échelle.

La moyenne carrée de l'estimateur du canal est donnée par [9] :

$$\gamma_{jk}^l = \frac{\tau_p \rho_{ul} (\beta_{jk}^l)^2}{1 + \tau_p \rho_{ul} \sum_{l'' \in p_l} \beta_{l''k}^l} \quad (2.11)$$

L'erreur d'estimation est représentée dans l'équation suivante [9] :

$$\tilde{g}_{jk}^{lm} = \hat{g}_{jk}^{lm} - g_{jk}^{lm} \quad (2.12)$$

Sous forme matricielle :

$$\tilde{G}_{jk}^{lm} = \hat{G}_{jk}^{lm} - G_{jk}^{lm} \quad (2.13)$$

L'estimation MMSE sous forme matriciel :

$$\hat{G} = Z D_Y^{1/2} \quad (2.14)$$

### 2.11.2 Données de la liaison montante

Pendant la phase de données en liaison montante, l'UT de chaque cellule transmet le  $\sqrt{\eta_{lk}} q_{lk}$ .

Chaque UT utilise la version estimée du CSI. Cette estimation est effectuée sur le même lien inverse de l'intervalle de cohérence dans les deux liaisons (montante et

descendante). Les données téléchargées de chaque UT sont supposées partager le même domaine temps-fréquence. Des récepteurs linéaires inclue (MRC, MMSE, ZF) peut recevoir efficacement le flux de données téléchargé, sans qu'il nécessite des récepteurs complexes non linéaires.

La BS reçoit la valeur de vecteur signal [9] :

$$y_l = \sqrt{\rho_{ul}} Z^l \sum_{j \in l} D_{\gamma_j^l}^{1/2} D_{\eta_j}^{1/2} q_j - \sqrt{\rho_{ul}} \sum_{j \in P_l} \tilde{G}_l^j D_{\eta_l}^{1/2} q_j + \sqrt{\rho_{ul}} \sum_{j \notin P_l} G_j^l D_{\eta_j}^{1/2} q_j + w_l \quad (2.15)$$

Les trois derniers termes sont statistiquement indépendants de l'estimateur de canal :

$$\text{Cov} \left\{ -\sqrt{\rho_{ul}} \sum_{j \in P_l} \tilde{G}_j^l D_{\eta_j}^{1/2} q_j + \sqrt{\rho_{ul}} \sum_{j \in P_l} G_j^l D_{\eta_j}^{1/2} q_j + w_l \right\} =$$

$$(\rho_{ul} \sum_{j \in P_l} \sum_{k'=1}^K (\beta_{jk'}^l - \gamma_{ljk'}) \eta_{jk'} + \rho_{ul} \sum_{j \notin P_l} \sum_{k'=1}^K \beta_{jk'}^l \eta_{jk'} + 1) I_M \quad (2.16)$$

Où :

- $D_{ij} = \text{diag} \{[\beta_{j1} \beta_{j2} \dots \beta_{jk}]\}$  matrice Diagonal de taille  $M \times K$ .
- $G_{jk}^{lm} = \hat{G}_{jk}^{lm} - \tilde{G}_{jk}^{lm}$  matrice de taille  $M \times K$ .

La transmission des données en UL se fait avec les méthodes suivantes :

### ***a* Maximum ratio (rapport maximal)**

La philosophie du traitement de rapport maximal consiste à amplifier autant que possible le signal d'intérêt, la station de base souhaite maximiser le SNR reçu de chaque flux en ignorant l'effet de l'interférence multiutilisateur de signal reçu, car il n'y a pas d'atténuation active des interférences. La matrice de décodage linéaire est :

$$A = \hat{G} D_{\gamma}^{-1/2} = Z \quad (2.17)$$

La BS fait la multiplication de signal reçu par le conjugué de l'estimateur de canal. Le signal issu après cette opération est :

$$\left[ \frac{1}{\sqrt{M}} D_{\gamma_j^l}^{-\frac{1}{2}} \hat{G}_j^{lH} y_j \right]_k = \left[ \frac{1}{\sqrt{M}} Z^{lH} \left( \sqrt{\rho_{ul}} Z^l \sum_{j \in \mathcal{P}_l} D_{\gamma_j^l}^{1/2} D_{\eta_j}^{1/2} q_j \right) - \sqrt{\rho_{ul}} \sum_{j \in \mathcal{P}_l} \check{G}_j^l D_{\eta_j}^{1/2} q_j + \sqrt{\rho_{ul}} \sum_{j \in \mathcal{P}_l} G_j^l D_{\eta_j}^{1/2} q_j + w_l \right]_k \quad (2.18)$$

Après le traitement du signal reçu par la BS avec le MR, le SINR effectif résultant est [9] :

$$SINR_{lk}^{MR,ul} = \frac{M \rho_{ul} \gamma_{lk}^l \eta_{lk}}{1 + \rho_{ul} \sum_{j \in \mathcal{P}_l} \sum_{k'=1}^K \eta_{lk} \beta_{jk'}^l + \rho_{ul} \sum_{j \in \mathcal{P}_l} \sum_{k'=1}^K \beta_{jk'}^l \eta_{jk'} + M \rho_{ul} \sum_{j \in \mathcal{P}_l \setminus \{l\}} \gamma_{jk}^l \eta_{jk}} \quad (2.19)$$

L'efficacité spectrale correspondante est :

$$SE_{inst,lk}^{MR,ul} = \frac{\tau_{ul}}{\tau_c} \log_2(1 + SINR_{lk}^{MR,ul}) \quad (2.20)$$

La figure suivante montre Le schéma fonctionnel qui illustre l'action du rapport maximal en traitement :

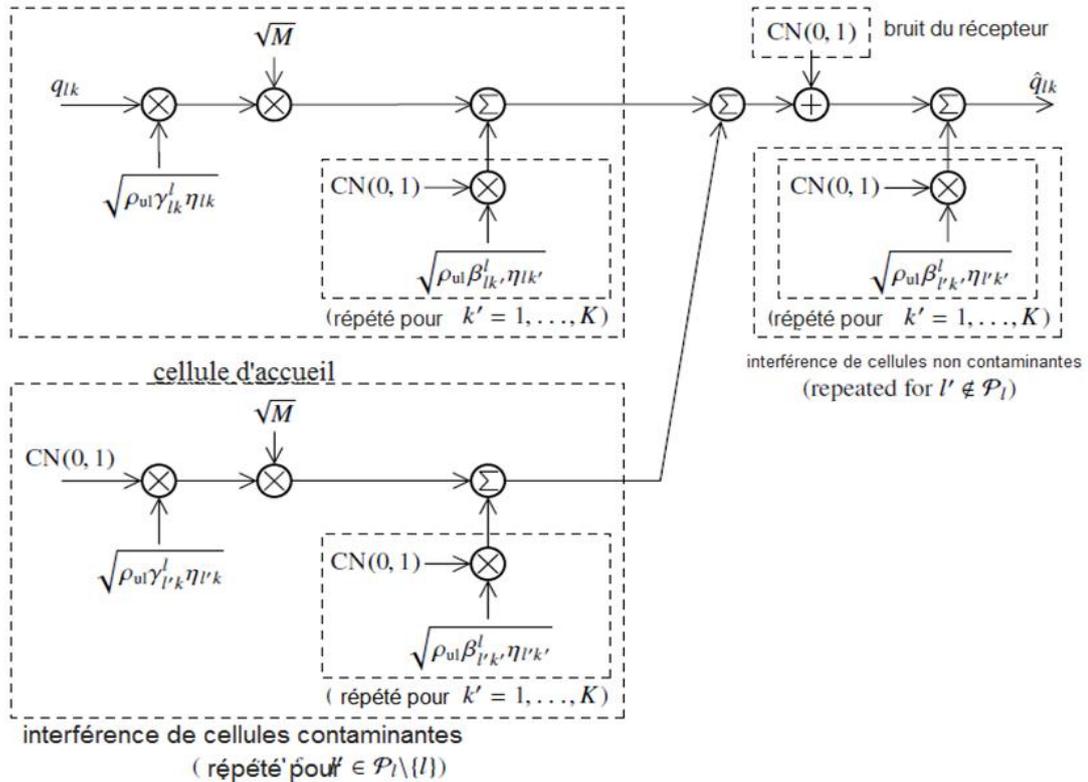


Figure2. 8 : Le schéma fonctionnel de la liaison montante avec le rapport maximal[9].

### b Zero forcing (forçage à zero)

Le ZF sert à annuler les interférences inter-utilisateurs (interférences produites par une transmission MU-MIMO) et donc qui maximise le SIR. La forme linéaire devenant très complexe. La matrice de décodage est :

$$A = \hat{G} (\hat{G}^H \hat{G})^{-1} D_Y^{1/2} = Z(Z^H Z)^{-1} \quad (2.21)$$

Le traitement ZF donne le signal suivant [9] :

$$\left[ D_Y^{\frac{1}{2}} (\hat{G}_l^{lH} \hat{G}_l^l)^{-1} \hat{G}_l^{lH} y_l \right]_k = \sqrt{\rho_{ul} \gamma_{jk}^l \eta_{lk} q_{lk}} + \sqrt{\rho_{ul}} \sum_{j \in \mathcal{P}_l} \sqrt{\gamma_{jk}^l \eta_{jk} q_{jk}} \\ + [(Z^{lH} Z^l)^{-1} Z^{lH} (-\sqrt{\rho_{ul}} \sum_{j \in \mathcal{P}_l} \tilde{G}_j^l D_{\eta_j}^{\frac{1}{2}} q_j + \sqrt{\rho_{ul}} \sum_{j \in \mathcal{P}_l} G_j^l D_{\eta_j}^{\frac{1}{2}} q_j + w_l)]_k \quad (2.22)$$

Après la variance de dernier bruit effective. Le SINR résultant avec le ZF est [9] :

$$SINR_{lk}^{ZF,ul} = \frac{(M - K) \rho_{ul} \gamma_{lk}^l \eta_{lk}}{1 + \rho_{ul} \sum_{j \in \mathcal{P}_l} \sum_{k'=1}^K (\beta_{jk'}^l - \gamma_{jk'}^l) \eta_{lk'} + \rho_{ul} \sum_{j \in \mathcal{P}_l} \beta_{jk'}^l (\sum_{k'=1}^K \eta_{jk'}) + (M - K) \rho_{ul} \sum_{j \in \mathcal{P}_l \setminus \{l\}} \gamma_{jk}^l \eta_{jk}} \quad (2.23)$$

L'efficacité spectrale résultante liée :

$$SE_{inst, lk}^{ZF,ul} = \frac{\tau_{ul}}{\tau_c} \log_2(1 + SINR_{lk}^{ZF,ul}) \quad (2.24)$$

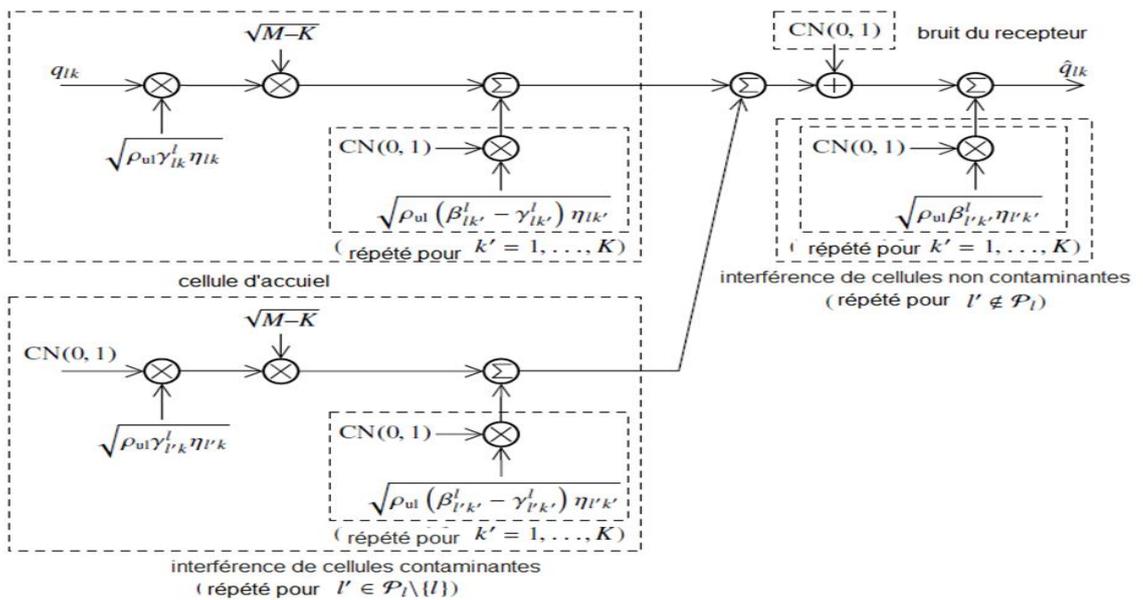


Figure2. 9 : Le schéma fonctionnel de la liaison montante avec le forçage à zéro [9].

### 2.11.3 Données de liaison descendante

Après les opérations qui sont montrés ci-dessus, La BS transmet le signal suivant [9] :

$$x_j = A_j D_{\eta_j}^{1/2} q_j \quad (2.25)$$

Les utilisateurs de la  $j^{\text{ème}}$  cellule reçoivent le signal suivant [9] :

$$y_l = \sqrt{\rho_{dl}} \sum_{j \in P_l} \hat{G}_l^{jT} A_j D_{\eta_j}^{1/2} q_j - \sqrt{\rho_{dl}} \sum_{j \in P_l} \tilde{G}_j^{lT} x_j + \sqrt{\rho_{dl}} \sum_{j \in \mathcal{C}_l} G_j^{lT} x_j + w_l \quad (2.26)$$

Et le  $k^{\text{ème}}$  utilisateur de cette cellule reçoit le signal suivant [9] :

$$y_{lk} = \sqrt{\rho_{dl}} \sum_{j \in \mathcal{I}_l} \hat{g}_{lk}^{jT} A_j D_{\eta_j}^{1/2} q_j - \sqrt{\rho_{dl}} \sum_{j \in P_l} \tilde{g}_{lk}^{jT} x_j + \sqrt{\rho_{dl}} \sum_{j \in \mathcal{C}_l} g_{lk}^{jT} x_j + w_{lk} \quad (2.27)$$

Les quatre termes de (2.27) sont mutuellement non-corrélés. Le premier terme contient, entre autres, le signal d'intérêt et les trois autres ne contiennent que du bruit effectif. La variance de la somme des trois termes de bruit effectifs est indépendante du fait que le forçage à zéro ou traitement de rapport maximum est utilisé, et il est égal à :

$$\text{Var}\{-\sqrt{\rho_{dl}} \sum_{j \in P_l} \tilde{g}_{lk}^{jT} x_j + \sqrt{\rho_{dl}} \sum_{j \in \mathcal{C}_l} g_{lk}^{jT} x_j + w_{lk}\} = \sum_{j \in P_l} (\beta_{lk}^j - \gamma_{lk}^j) (\sum_{k'=1}^K \eta_{jk'}) + \rho_{dl} \sum_{j \in \mathcal{C}_l} \beta_{lk}^j (\sum_{k'=1}^K \eta_{jk'}) + 1 \quad (2.28)$$

#### **a MR**

La matrice de pré codage est [9] :

$$A_j = \frac{1}{\sqrt{M}} Z^j \quad (2.29)$$

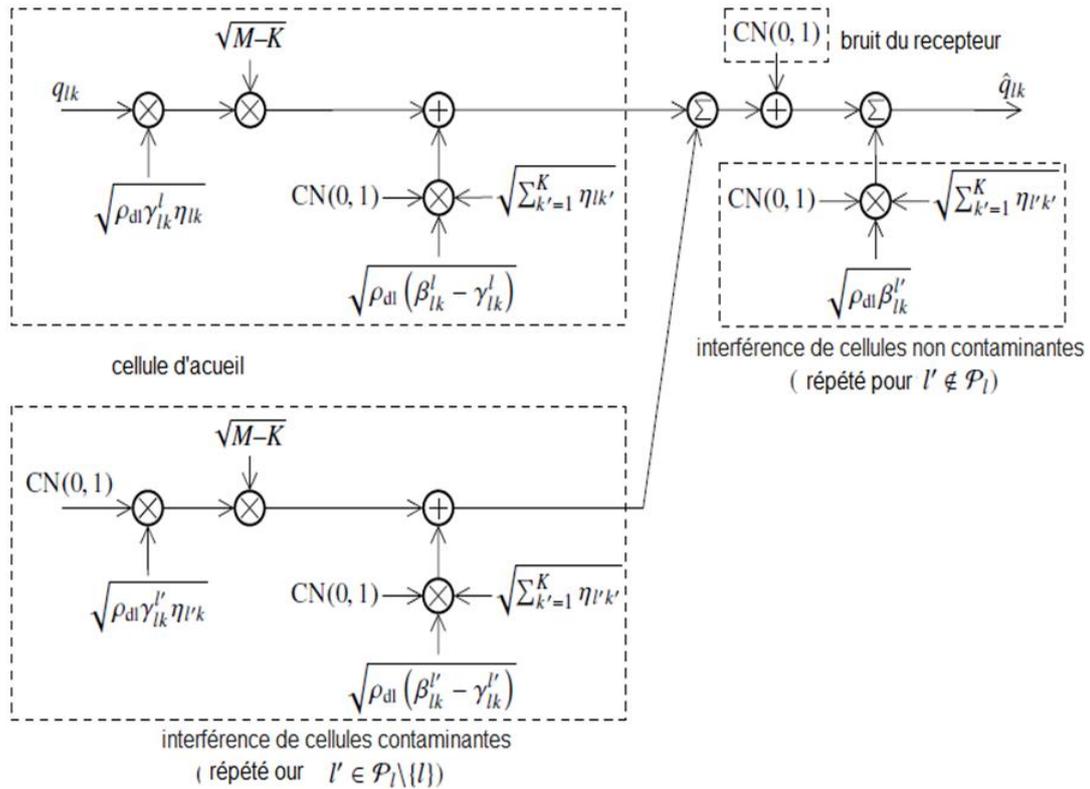
Le SINR résultant [9] :

$$\begin{aligned} & SINR_{lk}^{MR,dl} \\ &= \frac{M \rho_{dl} \gamma_{lk}^l \eta_{lk}}{1 + \rho_{dl} \sum_{j \in P_l} \beta_{lk}^j (\sum_{k'=1}^K \eta_{jk'}) + \rho_{dl} \sum_{j \in \mathcal{C}_l} \beta_{lk}^j (\sum_{k'=1}^K \eta_{jk'}) + M \rho_{dl} \sum_{j \in P_l \setminus \{l\}} \gamma_{lk}^j \eta_{jk}} \end{aligned} \quad (2.30)$$

L'efficacité spectrale liée est :

$$SE_{inst,lk}^{mr,dl} = \frac{\tau_{dl}}{\tau_c} \log_2(1 + SINR_{lk}^{mr,dl}) \quad (2.31)$$





**Figure2. 11** : Le schéma de la liaison descendante avec le forçage a zéro[9].

Nous interprétons les expressions de SINR effective comme suite :

- Le numérateur représente le gain de formation de faisceau cohérent du signal désiré.
- Le premier terme du dénominateur est la variance du bruit normalisé.
- Le deuxième terme du dénominateur est dû au brouillage causé par la contamination des cellules. Cette interférence comprend à la fois les interférences intercellulaires et les interférences intracellulaires dans la cellule. Les termes qui composent cette échelle de second terme proportionnellement avec les erreurs d'estimation du canal carré moyen, mais pas avec M.
- Le troisième terme du dénominateur représente les interférences intercellulaires cellules non-contaminé qui évoluent proportionnellement aux coefficients d'évanouissement à grande échelle, mais pas avec M. Nous utilisons le terme interférence non cohérente pour désigner les deuxième et troisième termes au dénominateur.

- Le quatrième terme du dénominateur représente l'interférence de cellules contaminant, en excluant la  $m^{\text{ième cellule}}$  elle-même, proportionnelle aux estimations avec M-k, nous appelons ce terme cohérent ingérence pour l'algorithme ZF.

Une interférence cohérente est proportionnelle à M plutôt qu'à M-K, pour l'algorithme MR .

## 2.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu quatre types d'interférence le défis du massive MIMO qui est la contamination des pilotes et l'efficacité spectrale, nous avons vu aussi le fonctionnement du MIMO massif l'estimation MMSE du canal et la transmission d'un signal en UL et DL avec deux méthodes MR et ZF et la transmission d'un signal en UL et DL avec deux méthodes MR et ZF.

## Chapitre 3 : Simulation et résultats

---

### 3.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, et à l'aide du logiciel MATLAB. Nous allons exposer les résultats et les courbes obtenues du BER en fonction du SNR, ainsi les courbes de l'efficacité spectrale d'un système MIMO massif dans la liaison montante et descendante avec les techniques de pré codage : rapport maximal (MR), forçage à zéro (ZF) et l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE).

### 3.2 Le Système le MU-MIMO

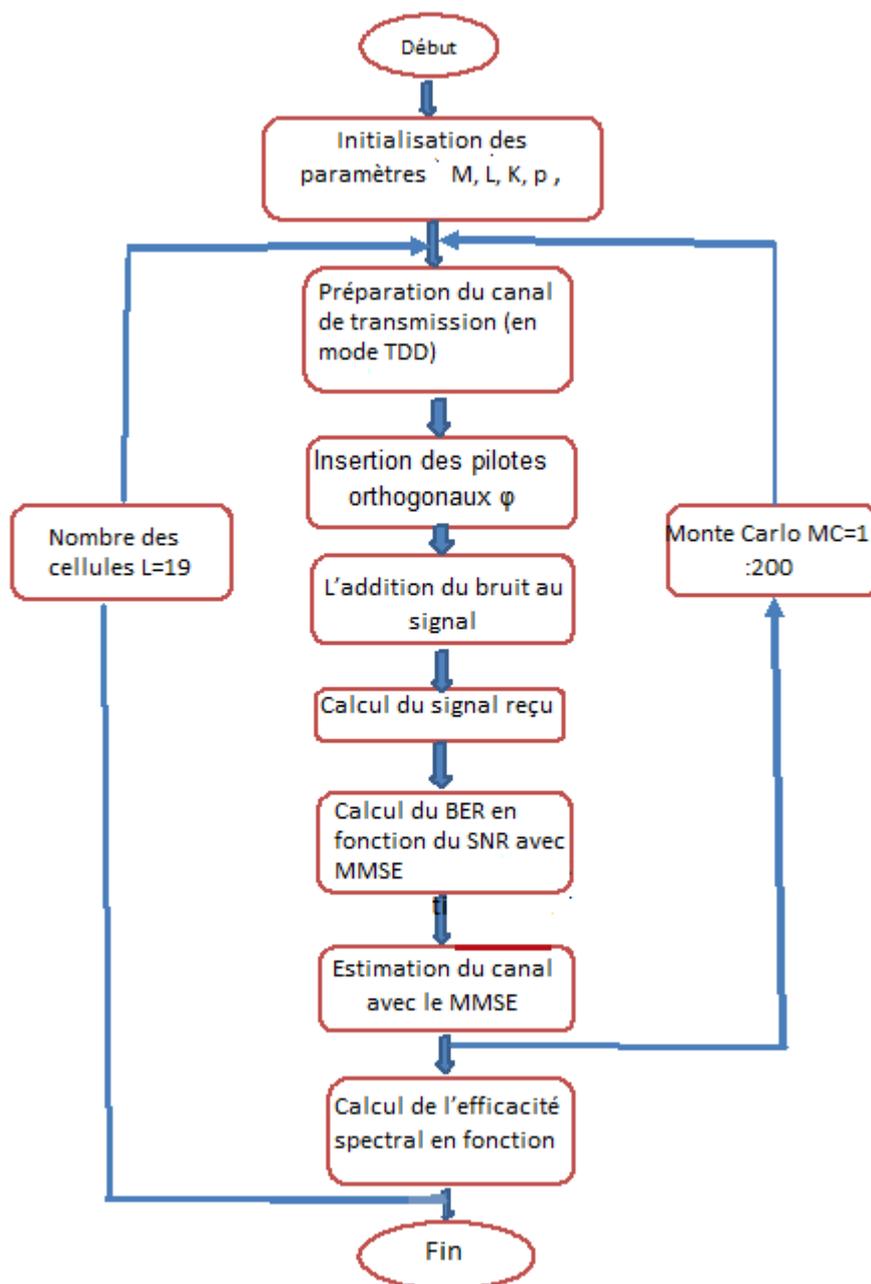
Pour le système étudié dans ce mémoire, nous considérons un système cellulaire avec  $L$  cellules numérotées 1, 2,...,  $L$ . Chaque cellule comprend une BS avec  $M$  antennes et  $K$  ( $K \leq M$ ) utilisateurs ayant une seule antenne. Nous avons choisi  $p_r$  comme une puissance moyenne (pendant la transmission) de chaque utilisateur, et  $p_f$  comme une puissance moyenne (pendant la transmission aussi) de la station de base.

Le facteur de propagation entre la  $m^{\text{ème}}$  antenne de la station de base de la  $l^{\text{ème}}$  cellule et le  $k^{\text{ème}}$  utilisateur de la  $j^{\text{ème}}$  cellule est  $\sqrt{\beta_{jk}^l} h_{jk}^{l,m}$ . Les  $\{\beta_{jk}^l\}$  sont des valeurs non-négative qui modélisent le Shadowing et le Pathloss appelant l'évanouissement à grande échelle [8], et ils varient lentement et leur estimation s'effectue sur une longue période de temps. Nous supposons une réciprocité de canal pour les liaisons montante et descendante, c'est-à-dire que le facteur de propagation  $\sqrt{\beta_{jk}^l} h_{jk}^{l,m}$  est le même pour les deux liaisons. L'évanouissement de bloc,  $\{h_{jk}^{l,m}\}$  reste constant pendant une durée de  $T$  symboles. Notez que nous autorisons une variation constante du facteur de propagation aller et retour à travers les différentes contraintes de puissance moyenne à la station de base et les utilisateurs. Les bruits additifs au niveau de chaque terminal sont des

variables aléatoires gaussiennes i.i.d. Les équations du système décrivant les signaux reçus à la station de base et les utilisateurs sont données dans la section suivante [19].

### 3.3 Organigramme des simulations

L'Organigramme suivant montre les étapes de notre travail, ou les étapes de la transmission des données en liaison montante et descendante est donné par la figure 3.1.



**Figure3. 1** Organigramme montre les étapes de travail

### 3.4 L'étude de transmission des données en liaison montante

Lorsque l'UT transmet un signal vers la BS, on appelle ça La liaison montante. La  $m^{\text{ième}}$  antenne de BS de la  $j^{\text{ième}}$  cellule reçoit un signal linéaire transmit par le  $k^{\text{ième}}$  utilisateur de la  $l^{\text{ième}}$  cellule .Le signal pilote doit se propage dans un canal de liaison montante. Au début de chaque intervalle de cohérence, tous les  $k^{\text{ème}}$  utilisateurs dans tous les cellules, transmettent ce signal d'apprentissage  $y_{lm}$  qui est donnés par l'équation (3.1)[19].  $y_{lm}$  Constitué de la somme de séquences d'apprentissage qui sont des vecteurs colonnes de longueur  $\tau_p$ .

$$y_{lm} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{\rho_{ul} \tau_p \beta_{jk}^l} h_{jk}^{l,m} \varphi_{JK} + w_{lm} \quad (3.1)$$

Avec :

- $\sqrt{\tau_p} \varphi_{JK}$  : (normalisé de telle sorte que  $\varphi_{JK}^\dagger \varphi_{JK} = 1$ ) est le vecteur d'apprentissage transmis par le  $k^{\text{ième}}$  utilisateur de la  $j^{\text{ième}}$  cellule.
- $w_{lm}$  : le bruit additif.

Donc le signal d'apprentissage  $y_{lm}$  doit être estimé, et la station de base reçoit le ( $M^* \tau$ ) signal [19]:

$$Y_l = \sqrt{\rho_{ul} \tau_p} \sum_{j=1}^L \Psi_{JK} D_{jl} H_{jl} + W_l \quad (3.2)$$

Avec :

- $\mathbf{Y}_l = [y_{l1} y_{l2} \dots y_{lm}]$  et  $\mathbf{W}_l = [w_{l1} w_{l2} \dots w_{lm}]$  sont des matrices de dimensions  $\tau_p \times M$ .
- $\Psi_j = [\varphi_{j1} \varphi_{j2} \dots \varphi_{jK}]$  est une matrice de dimensions  $\tau_p \times K$ .
- $\mathbf{D}_{jl} = \text{diag} \{[\beta_{j11} \beta_{j12} \dots \beta_{jlk}]\}$  : Matrice diagonale.
- $\mathbf{H}_{jl} = \begin{bmatrix} h_{jl11} & \dots & h_{jl1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{jlK1} & \dots & h_{jlKM} \end{bmatrix}$  : matrice de dimensions  $K \times M$ .

Le canal utilisé pour la transmission est le canal Rayleigh, Nous allons maintenant donner l'estimateur de la réponse du canal  $h_{jl}$ , En utilisant la méthode MMSE, nous obtenons :

$$\widehat{H}_{jl} = \sqrt{\rho_{ul}\tau_p} D_{jl}^{\frac{1}{2}} \Psi_j^\dagger \left( 1 + p_r \tau_p \sum_i^L \Psi_i D_{il} \Psi_i^\dagger \right)^{-1} Y_l \quad (3.4)$$

L'estimateur MMSE de canal entre cette station de base est tous les utilisateurs, est :

$$\widehat{H}_l = [\widehat{H}_{1l} \widehat{H}_{2l} \cdots \widehat{H}_{jl}]. \quad (3.5)$$

### 3.5 Résultat de BER en fonction le SNR avec l'algorithme MMSE

Dans cette section nous faisons faire varier le SNR : 0 :2 :20. Le facteur de réutilisation des pilotes est de 1, c'est-à-dire que toutes les cellules utilisent les mêmes séquences pilotes (les pilotes inter-cellules ne sont pas orthogonaux). Chaque cellule se compose de K = 4 utilisateurs et une station de base (BS) contenant M = 8 antennes. Dans la même cellule, les pilotes sont orthogonaux. Dans une mise en œuvre pratique, les symboles proviendraient probablement d'une constellation QAM [8], dans cette analyse La modulation numérique utilisée est 64QAM.

Une estimation du canal sur la liaison UL est réalisée avec l'algorithme MMSE donné par l'équation (3.4). Nous avons calculé le taux d'erreur binaire BER selon l'équation suivante :

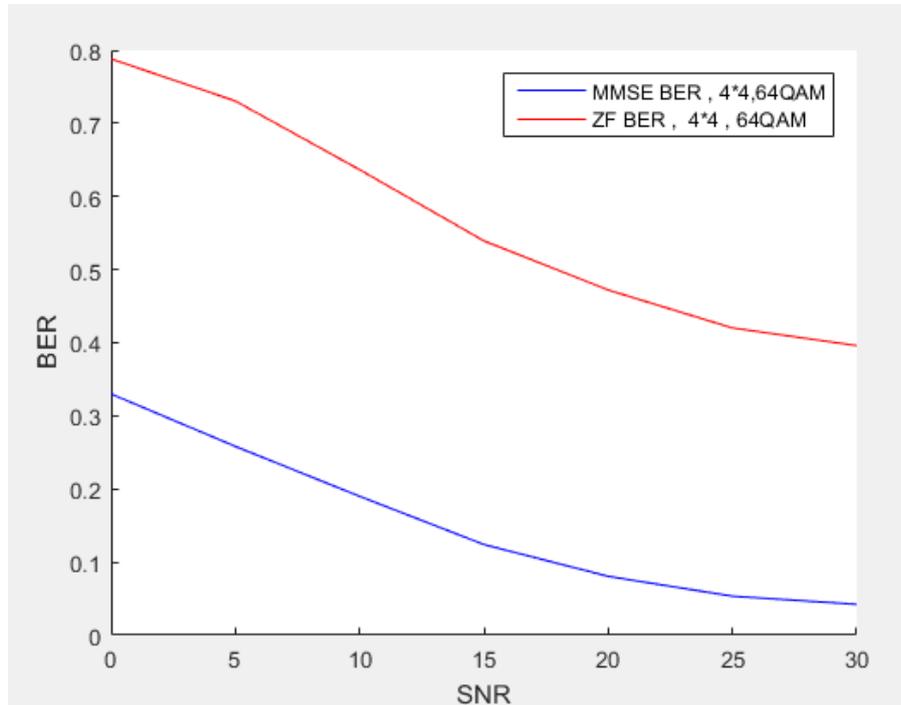
$$BER = \frac{\text{nombre totale des bits erronés}}{\text{nombre totale des bits transmit}} \quad (3.6)$$

Tableau des paramètres de simulation :

Les paramètres	Leurs valeurs
<b>M</b> : nombre d'antenne	4
<b>K</b> : nombre d'utilisateur	8
<b>L</b> : nombre des cellules	2
<b>Mb</b> : nombre de constellation	64
$\tau_p$ : la durée de séquence pilote	4
<b>SNR</b> en dB	0 :5 :30

**Tableau3. 1** paramètre de la figure (3.2).

Les résultats graphiques obtenus par la simulation, sont dans la figure 3.2 qui est la suivante :



**Figure3. 2**Taux d'erreur binaire BER en fonction de rapport signal sur bruit avec MMSE et ZF.

La figure ci-dessus illustre la variation de taux d'erreur binaire 'BER' en fonction de rapport signal sur bruit 'SNR' pour les algorithmes MMSE et ZF. Dans cette expérience, Nous remarquons que le BER est démenti pour les deux algorithmes, et la grande différence de BER entre les deux algorithmes, ou le taux d'erreur pour le ZF est supérieure pour le MMSE.

Au canal de transmission il y a toujours un signal indésirable qui s'ajoute au signal transmit au niveau de canal de transmission, et la différence entre eux est appelée le SNR, C'est particulièrement utile lorsque l'on compare les performances de BER de différents schémas de modulation numérique sans prendre en compte la bande passante.

En résumé, l'utilisation de plusieurs antennes au niveau des systèmes MIMO peut servir à améliorer la fiabilité de transmission en réduisant la probabilité d'erreur (gain en diversité) et à augmenter le débit de transmission (gain de Multiplexage).

### 3.6 La somme des taux en liaison descendante

La station de base envoie un signal vers l'utilisateur k qui est donnée par [19] :

$$x_{jk} = \sqrt{\rho_{dl}\beta_{jj}}h_{jj}a_jq_j + \sum_{l \neq j} \sqrt{\rho_{dl}\beta_{jl}}h_{jl}a_lq_l + w_j \quad (3.7)$$

Où :

- **h** : canal de transmission.
- **a** : facteur de propagation.
- **q** : symboles à transmettre.
- **w<sub>j</sub>**: bruit additif.

L'expression **R<sub>j</sub>** est formée pour sommer les taux réalisable dans le cadre considéré dans cette section est-elle est exprimé comme suite [19] :

$$R_j = C \left( \frac{\rho_{dl}\beta_{jj} \frac{\rho_{ul}\tau_p\beta_{jj}}{1+\rho_{ul}\tau_p\sum_{i=1}^L\beta_{ij}} E^2(\theta)}{1 + \rho_{dl}\beta_{jj} \frac{\rho_{ul}\tau_p\beta_{jj}}{1+\rho_{ul}\tau_p\sum_{i=1}^L\beta_{ij}} var(\theta) + \sum_{l \neq j} \rho_{dl}\beta_{jl} \frac{\rho_{ul}\tau_p\beta_{jl}}{1+\rho_{ul}\tau_p\sum_{i=1}^L\beta_{il}} E(\theta^2) + \sum_{l=1}^L \rho_{dl}\beta_{jl} \frac{1+\rho_{ul}\tau_p\sum_{i \neq j}\beta_{il}}{1+\rho_{ul}\tau_p\sum_{i=1}^L\beta_{il}}} \right) \quad (3.8)$$

Où :

$$C(\theta) = \log_2(1 + \theta)$$

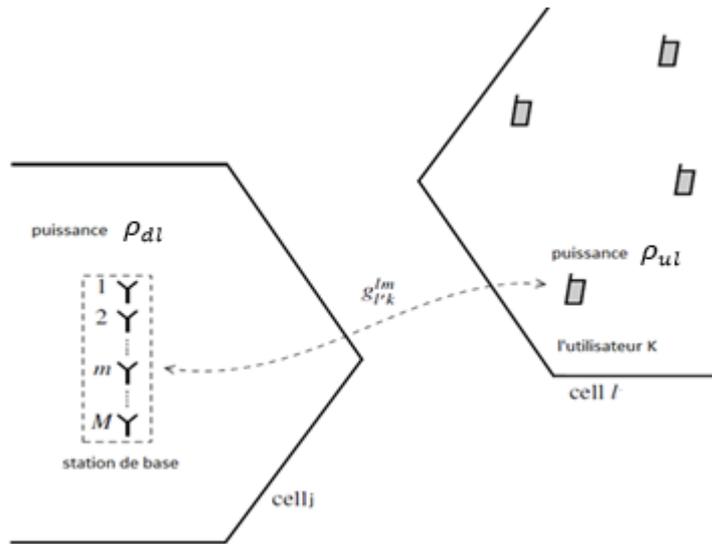
**R<sub>j</sub>** : l'efficacité spectrale (bits/s/Hz).

$$E(\theta) = \frac{\Gamma(M+\frac{1}{2})}{\Gamma(M)}, E(\theta^2) = M$$

$$var(\theta) = M - E^2(\theta).$$

$\Gamma(.)$  : Est la fonction Gamma.

La figure (3.3) montre un exemple de réseau mobile sans fil multi cellulaire composé de deux cellules pour mieux comprendre l'effet de contamination des pilotes et d'interférence. La cellule contaminée est la cellule j, elle contient les utilisateurs K=8 et chacun a une puissance Pr=10 dB, pour la deuxième cellule qui contient la station de base avec M antennes de puissance Pf=10 dB. Les séquences d'apprentissage orthogonales utilisées dans la 1<sup>ère</sup> sont réutilisées dans la 2<sup>ème</sup> cellule.



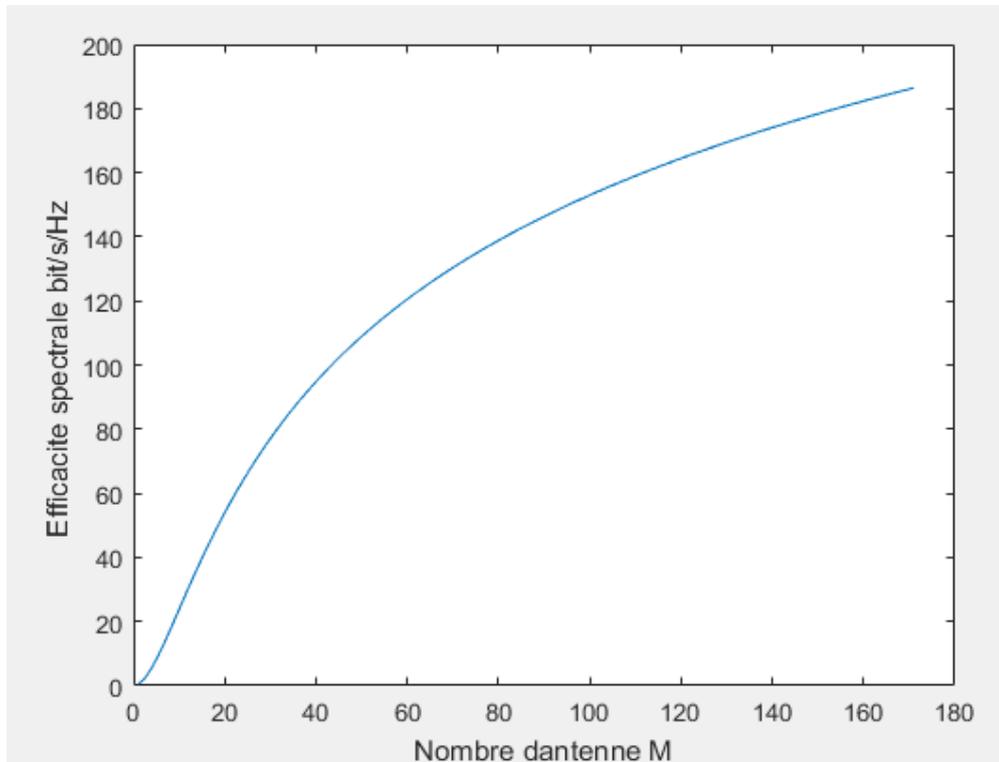
**Figure3. 3**Modèle du système multicellulaire montre la BS dans la  $j^{\text{ème}}$  cellule avec M et les K utilisateur dans la  $l^{\text{ème}}$  cellule.

Le Tableau 3.2 donnée les paramètres pour la programmation de L=19 cellules

Les Paramètres	Les valeurs
<b>M</b> : nombre d'antenne	8
<b>K</b> : nombre d'utilisateur	40
<b>L</b> : nombre des cellules	19
$\tau_p$ : longueur des séquences pilote	4
$\rho_{ul}$ : puissance d'UT	10 dB
$\rho_{dl}$ : puissance de la BS	10 dB
$B_{ij}$ : facteur de propagation (a)	1 pour $i=j$ a =0.8 pour $i \neq j$

**Tableau3. 2** paramètre du la figure (3.4).

Les résultats graphiques de simulation sont comme suite :



**Figure3. 4** Efficacités spectrale en fonction de nombre d'antenne.

Nous remarquons dans la figure 3.4 que l'efficacité spectrale augmente linéairement avec le nombre d'antenne M, grâce au traitement du signal cohérent. Cela se produit même avec une contamination de pilote. Cependant, cet effet donne lieu à des interférences cohérentes qui se développent avec M, à moins que cette interférence ne soit supprimée à l'aide de MMSE combinaison/pré codage. Ces antennes M permettent d'améliorer encore les performances de ces systèmes, une fiabilité de communication, un délai de transmission réduit et des débits très élevés.

### **3.7 Les résultats de l'analyse d'Efficacité spectrale**

Dans la section suivante, nous allons analyser la réalisation de l'efficacité spectrale en liaison UL et DL, sous le cadre d'estimation de canal par la méthode MMSE. En augmentant le nombre d'antennes jusqu'à 140 antennes. La différence est apparue de type de traitement utilisé pour réduire l'interférence.

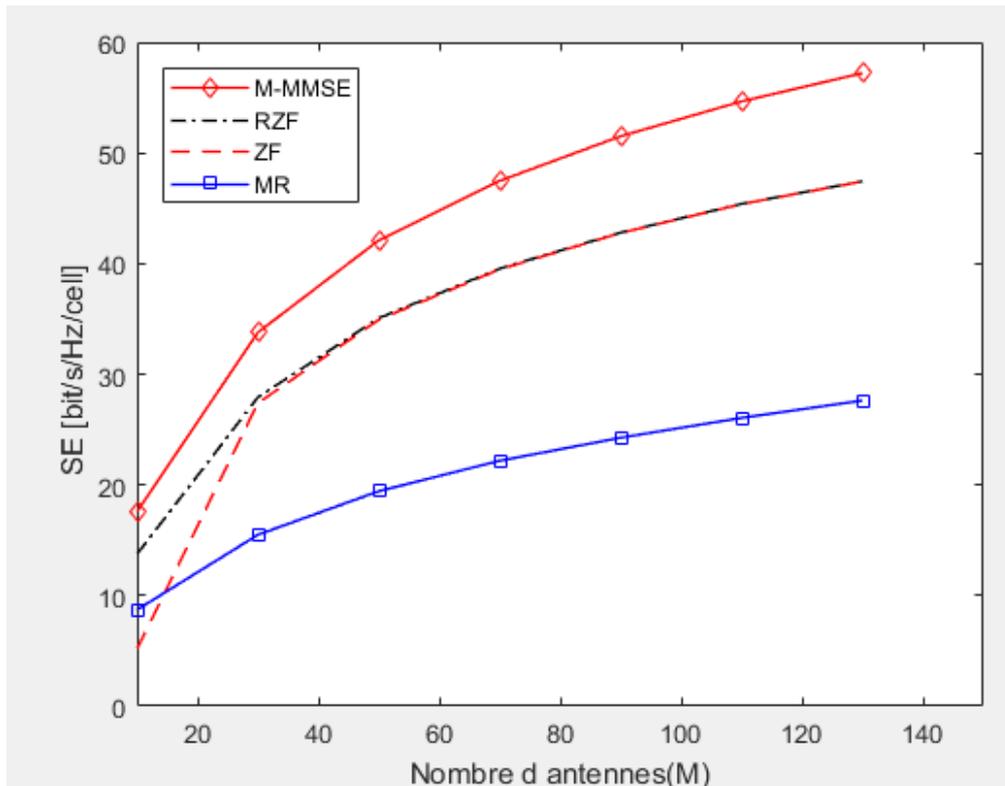
Les paramètres de programmation de liaison l'UL et DL, sont dans le tableau suivant :

Les paramètres	Les valeurs
<b>M</b> : nombre d'antenne	140
<b>L</b> : nombre de cellule	16
<b>K</b> : nombre d'utilisateur	10
<b>f</b> : facteur de réutilisation des pilotes	1
$\tau_p$ : longueur des séquences pilote	f*K
$\tau_c$ : La longueur d'intervalle de cohérence	200 s
<b>B</b> : bande de communication	20 MHz
$\rho_{ul}$ : puissance de liaison UL	100 mW
$\rho_{dl}$ : puissance de liaison DL	20 dB
<b>Noise Figure</b> : bruit par la BS	7 dB
<b>nr</b> : nombre de réalisation des canaux	16

**Tableau3. 3** paramètre du système.

### 3.7.1 En liaison montante

Au niveau de liaison montante la BS reçoit un signal envoyé par un UT, nous allons étudier les variations de l'ES pour les différents schémas de combinaison. Dans cette session, nous considérons K= 10 utilisateurs par cellule. Les résultats de simulations obtenus sont illustrés par les figures suivantes :



**Figure 3.5** L'efficacité spectrale en fonction de nombre d'antenne réalise par des différents pré codage en liaison UL.

La figure (3.5) montre efficacité spectrale en fonction de nombre d'antenne dans la liaison montante, en réutilisant les mêmes pilotes c'est-à-dire  $f=1$ . L'algorithme M-MMSE (Multi-cellule MMSE) fournit la plus grande valeur de SE et exige la plus grande complexité de calcul (car le M-MMSE est l'un des systèmes qui suppriment les interférences), par contre le MR fournit la SE la plus faible par rapport aux autres algorithmes.

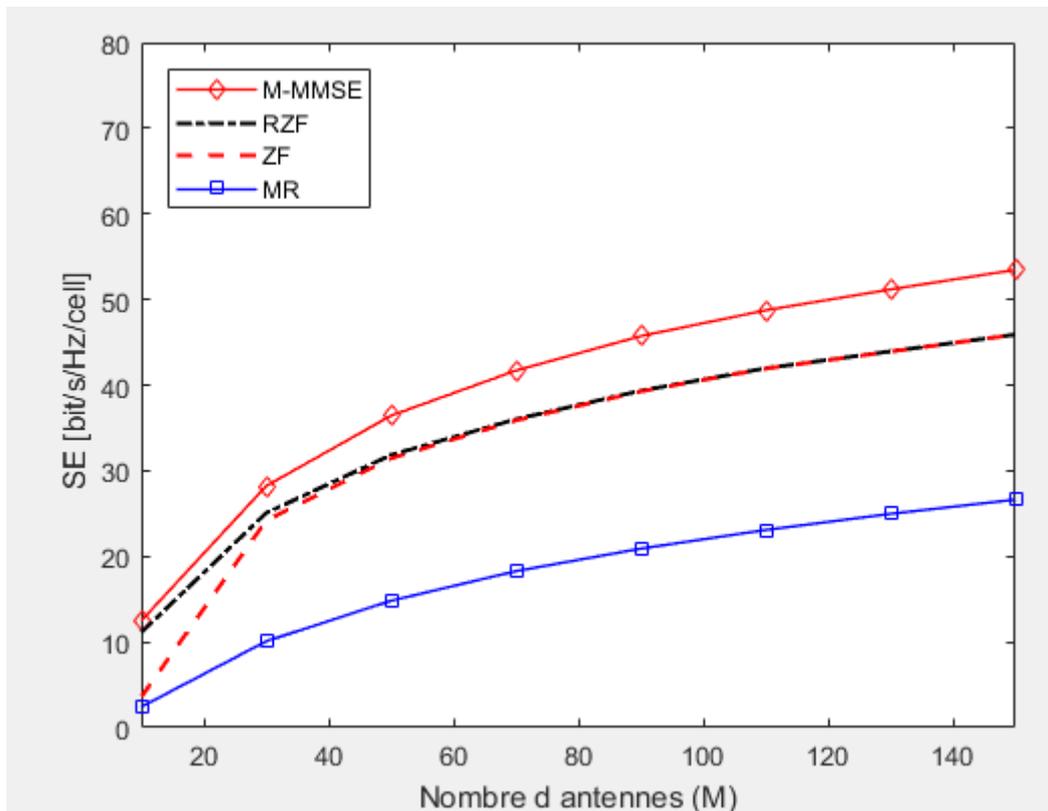
L'efficacité spectrale diminue un peu avec chaque approximation faite en utilisant les schémas de pré codage moins complexes que M-MMSE. Notez que RZF et ZF donnent essentiellement la même efficacité spectrale dans la gamme  $M \geq 30$  qui présente un intérêt principal dans Massive MIMO, mais que le SE avec ZF se dégrade rapidement pour  $M < 20$  car la BS ne dispose pas de suffisamment de degrés de liberté pour annuler les interférences sans annuler également une grande partie du signal souhaité. En fait, la puissance du signal désiré et la puissance d'interférences d'un UT est essentiellement indépendante dans l'UT, car tous les signaux sont reçus par la même BS. Par conséquent, ZF doit être évité pour parvenir à une mise en œuvre robuste. Il est intéressant de noter

que la MR ne fournit que la moitié de la SE des autres schémas, mais elle réduit également la complexité de 10% par rapport au format RZF.

### 3.7.2 En liaison descendante

Pour la liaison descendante, Chaque BS transmet des données vers ces utilisateurs à l'aide de pré codage tel que MMSE, MR et ZF. De sorte que la puissance du signal transmit par la BS soit également la puissance d'émission allouée à cet utilisateur. Une façon de mettre en œuvre la normalisation de pré codage consiste à faire le vecteur de pré codage = 1 dans chaque bloc de cohérence, mais c'est parfois plus analytiquement traitable d'avoir une normalisation moyenne sur de nombreux blocs de cohérence.

Résultat graphique correspondante à cette liaison est :



**Figure 3. 6** L'efficacité spectrale en fonction de nombre d'antenne réalise par des différents pré codage en liaison DL.

La figure 3.6 montre la somme moyenne SE en liaison descendante avec  $f=1$ . Pour ce résultat nous remarquons toujours que les schémas de pré-codages le M-MMSE fournit la valeur la plus élevée de SE et le MR présente la valeur la plus faible, par rapport aux

autres algorithmes dans la liaison DL. Les pré-codeurs RZF et ZF fournissent presque le même SE, sauf que ZF pose des problèmes de robustesse pour  $M < 20$  antennes.

Comme dans l'UL, la complexité de calcul est plus grande pour les schémas de pré-codage / combinaison qui fournissent des SE plus élevées, et nous pouvons désigner M-MMSE, RZF et MR comme trois compromis distincts entre un SE élevé et une complexité faible. Ce sont les schémas à choisir dans une mise en œuvre pratique.

La diminution de la valeur de SE en DL par rapport à la valeur de SE en UL, est que la puissance du signal désirés et la puissance d'interférence sont couplés dans le DL, car tous les signaux désirés et interférés provenant d'une cellule particulière sont reçus par le même canal de la BS de la cellule.

### **3.8 Conclusion**

Les résultats de ce chapitre, montrent les performances des systèmes MIMO massif, en terme efficacité spectrale en UL et DL. Nous avons vu que l'algorithme MMSE est très performant par rapport au ZF en terme taux d'erreur binaire BER. L'efficacité spectrale est l'un des avantages majeurs des MIMO massif, cette conclusion est confirmée en observant l'augmentation de l'efficacité spectrale en fonction du nombre d'antenne  $M$  dans la BS pour différents pré-codeurs M-MMSE et RZF.

# Conclusion générale

---

Le MIMO Massif est une technologie sans fil qui utilise la technologie de communication multiutilisateur, avec un très grand nombre d'antennes sur chaque station de base (BS) permet de servir un grand nombre d'utilisateurs simultanément, le besoin constant d'améliorer les vitesses de transfert de données pousse les chercheurs sans fil à raffiner les systèmes de communication existants et à compter de meilleures solutions pour les normes futures. Ce mémoire est consacré à l'étude de l'efficacité spectrale des systèmes MIMO massif pour la 5G.

Le premier chapitre, présente l'évolution des réseaux jusqu'à la 5G utilisant les MIMO massif. En détail, il examine le système Massive MIMO, ses caractéristiques et avantages.

Ensuite dans le deuxième chapitre, nous nous sommes concentrées sur le schéma de transmission d'une manière générale. La technologie MIMO fournit différents schémas d'amélioration des performances de la liaison, notamment le traitement de la diversité, le multiplexage spatial, ou encore la formation de faisceaux d'antennes. Les expressions de l'ES pour l'UL et DL qui peuvent être calculées numériquement pour n'importe quel modèle de canal.

Le chapitre 3 présente l'analyse des résultats de simulation, en particulier les résultats de l'efficacité spectrale d'un système MIMO massif en fonction de nombre d'antennes. Nous avons montré à travers de nombreux résultats concrets de simulation que l'égaliseur MMSE présente une meilleure performance par rapport aux autres détecteurs (ZF, MR, RZF), car il fournit la valeur la plus élevée d'ES.

# Bibliographie

---

- [1] Moret, Boris, "Amplificateur de puissance autonome pour applications OFDM et beamforming de la 5G aux fréquences millimétriques en technologie CMOS avancée", Bordeaux, 2017.
- [2] Bendimerrad FETHI TARIK, "MIMO ET ACCÈS MULTIPLES AVANCÉS POUR RÉSEAUX SANS FIL", Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT), Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, novembre 2013.
- [3] A. Diallo, "Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO", Université Nice Sophia Antipolis, 2007.
- [4] "LTE MIMO Types Of Inputs and Outputs", [Online]. Available: <http://www.teletopix.org/4g-lte/lte-mimo-4g-lte/lte-mimo-types-of-inputs-and-outputs/>.
- [5] MIMO – Multiple Input and Multiple Output Wireless Communications <https://www.edgefx.in/multiple-input-and-multiple-output-mimo-wireless-communications/> . 18 juin 2014
- [7] Xiaohu Ge, Ran Zi, , Haichao Wang, Jing Zhang, IMinho Jo, " MULTI –USER MASSIVE MIMO COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON IRREGULAR ANTENNA ARRAYS" ,18 avril 2016.
- [8] A Abboud, "Interference Mitigation in 5G Mobile Networks Uplink Pilot Contamination in TDD Massive MIMO Scheme", Thèse de doctorat Université de Limoges, 22 septembre 2017.
- [9] Thomas L. Marzetta, Erik G, Larsson Hong Yang et Hien Quoc Ngo, "Fundamentals of Massive MIMO", 2016.

- [10] Björnson, Emil, Jakob Hoydis, and Luca Sanguinetti. "Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency", Foundations and Trends® in Signal Processing: vol.11.No.3-4, pp 154-655, 2017.
- [11] Randriamiadana Z.A, Randriamitantsoa P.A, Ratsimba M.N, Randriamitantsoa A.A, "ETUDE DE LA CAPACITE DU CANAL POUR UN SYSTEME MIMO MASSIF", ISSN 2220-0673, Vol.2, 2016.
- [12] HAJRI Salah Eddine," L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs", Thèse de doctorat Université Paris-Saclay, 2018.
- [13] Ehab ALI, Mahamod ISMAIL, Rosdiadee NORDIN et Nor Fadzilah ABDULAH, "Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research", 2017.
- [14] A. Roze, "Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques", Thèse de doctorat Electronique. INSA de Rennes, 2016.
- [15] D. Gesbert, S. G. Kiani, A. Gjendemsj, and G. E. Len, "Adaptation, coordination, and distributed resource allocation".
- [16] Mariam Shukuru Kawambwa, "PILOT CONTAMINATION MITIGATION TECHNIQUES IN MASSIVE MIMO SYSTEMS: A PRECODING APPROACH", 2016.
- [17] Jaouadi, Randa. "Compromis efficacité énergétique et efficacité spectrale pour les objets communicants autonomes". Diss. Nantes, 2017.
- [18] N. Hassan, X. Fernando, "Massive MIMO Wireless Networks: An Overview Electronics", 6, 63; 5 September 2017.
- [19] J. Jose, A. Ashikhmin, Thomas L. Marzetta and Sriram Vishwanath,"Pilot Contamination and Precoding in Multi-Cell TDD Systems", 8 AUGUST 2011.