



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes de Télécommunication

Thème

Etude de massive MIMO pour 5G

Réalisé par :

- DACI Kaoutar
- DOU Warda

Soutenu en juin 2019 devant le jury composé de :

Mr. CHEMSA Ali

Maitre de conférences "A"

Président

Mr. GHENDIR Saïd

Maitre de conférences "B"

Examineur

Mr. KHELIL Abdellatif

Maitre de conférences "B"

Examineur

Mr. AJGOU Riadh

Maitre de conférences "A"

Rapporteur

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2018/2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tout d'abord, tout remerciement et louange à notre Dieu `ALLAH' le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué sous l'encadrement de **Dr. AJGOU Riadh**, à qui nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance, pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques

Nous remercions vivement nos familles **DACI** et **DOU** pour leur aide morale et matérielle durant toute la période de préparation.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation au département de Technologie.

Nous tenons à remercier très chaleureusement **Mr. SOUALEH Badr Eddine**, de nous avoir aidé de son coté

Un grand merci est adressé aux examinateurs **Dr. CHEMSA ALI** et **Dr. GHENDIR SAID** et **Dr. KHELIL ABDELLATIF** pour nous honorer d'avoir accepté la lecture et l'évaluation de ce modeste travail.

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.

Dédicace

À mes parents,

À ma famille,

À mes amis.

Kacutar

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمد لله الذي منّ عليّ بأن أكون في مكاني هذا أكتب هاته الكلمات ومنحني فرصة شكر أشخاص غالين على قلبي.. أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع أولا لأخي (شعبان)، الذي فارق الدنيا، لكن ذكره لا ولم ولن تفارقني قط، فما كنت لولاه لأصل لما أنا عليه اليوم، فلقد كان لي السراج الذي أنار درب حياتي وألهمني الصمود والتحدي لبلوغ مقاصدي فشكرا يا أخي، ورحمك الله وأسكنك فسيح جناته، سأسعى جاهدة لأكون فخرك وعزك في الدنيا والآخرة. ولا أنسى أُمي التي أخصها بالشكر فهي مصدر إيماني بذاتي، ومرآتي لمستقبل زاهر فما فتنت تحتني لأكون أفضل نسخة من نفسي. والشكر كل شكر لسندي في الحياة أبي الحبيب على إيمانه بي وعلى دعمه المتواصل وتشجيعه الدائم، دمت ذخرا لي يا رب دون أنسى إخوتي وأخواتي وعائلتي كلها فهذه السطور مهما طالّت لن تفقّهم.

ولا أنسى بالشكر صديقاتي ورفيقات دربي (ابتهاال. مبروكة. إيمان. نجاة. زبيدة) وكل من ساعدني من قريب أو من بعيد فلهم جزيل الشكر.

واخص بالشكر الإنسانية التي لن توفّيها حقها الكلمات وزميلتي في هذه المذاكرة (كوثر داسي) على تعاونها معي ولا أنسى زملاء الدراسة كل واحد باسمه.

وردة ضو

ملخص: أدت الحاجة إلى استيعاب المزيد من المستخدمين بمعدل تدفق أعلى ودقة أفضل مع استهلاك أقل للطاقة، إلى توليد جيل جديد للاتصالات النقالة، الجيل الخامس الذي يعتمد على تقنيات حديثة ، من أهمها تقنية massif MIMO (متعدد المداخل، متعدد المخارج) المكثفة، تعتمد هذه التقنية على الاستفادة من المسارات المتعددة لتحسين سعة النظام، وهي مناسبة بشكل خاص لتكنولوجيا الأمواج المليمترية. الهدف من هذا المشروع هو دراسة ومحاكاة التحسينات التي أدخلت على الكفاءة الطيفية من خلال استخدام تقنية MIMO المكثفة هذه.

كلمات المفاتيح: شبكة المحمول، الجيل الخامس، MIMO المكثفة، الكفاءة الطيفية.

Résumé : Le besoin d'accueillir plus d'utilisateurs à des débits de données plus élevés avec une meilleure fiabilité tout en consommant moins d'énergie a imposé la naissance d'une nouvelle génération de communication mobile la 5G basant, parmi autre, sur la technique MIMO (multi-input, multi-output) massif, cette technique est appuyée sur le bénéficié de trajet multiple pour améliorer la capacité de système. Elle convient notamment à la technologie des ondes millimétriques. L'objectif de ce projet est d'étudier et simuler l'amélioration apportait à l'efficacité spectrale par l'utilisation de cette technologie de MIMO massif.

Mots clés : Réseau mobile ; 5G ; MIMO massif ; efficacité spectrale.

Abstract: The need to accommodate more users at higher data rates with better reliability while consuming less power has forced the birth of a new generation of 5G mobile communication based, among other things, on the technical MIMO (multi-input, multi-output) massive, this technique is relied on multipath benefit to enhance system capability. It is particularly suitable for millimeter wave technology. The objective of this project is to study and simulate the improvement brought to the spectral efficiency by the use of this massive MIMO technology.

Keywords: Mobile network; 5G; massive MIMO; spectral efficiency.

Table des matières

Résumé	IV
Table des matières	V
Liste des figures	VII
Listes des acronymes et abréviations	IX
Introduction générale	1
Chapitre 1 La 5G de réseau mobile	2
1.1 Introduction	2
1.2 Evolution de communications mobiles	2
1.3 Réseaux cellulaires	4
1.4 Applications visées pour le réseau de 5G	5
1.5 Objectifs de la 5G	6
1.6 5G : New Radio	7
1.6.1 Scénarios de déploiement de NR	7
1.6.2 Numérolgies	9
1.6.3 Structure de trame	10
1.6.4 NR Resource Block	11
1.6.5 Bande passante du canal NR	12
1.7 Conclusion	12
Chapitre 2 La Technologie MIMO massif	13
2.1 Introduction	13
2.2 MIMO traditionnel	13
2.3 Principes du MIMO	14
2.4 Types de MIMO	14
2.4.1 MIMO – SISO	15
2.4.2 MIMO – SIMO	15
2.4.3 MIMO – MISO	16
2.4.4 MIMO – MIMO	17
2.5 Massive MIMO	20
2.5.1 Beamforming	20
2.5.2 MU-MIMO	21
2.6 Caractéristiques de Massive MIMO	21
2.6.1 L'évolutivité	21
2.6.2 Massive MIMO préfère TDD Scheme	22
2.6.3 Le réseau d'antennes ne doit pas être physiquement grand	23

2.6.4	Massive MIMO offre une propagation favorable	23
2.7	Avantages des systèmes Massive MIMO	23
2.8	Types Massive MIMO	23
2.8.1	Single-User MIMO	23
2.8.2	Multi-User Massive MIMO	24
2.8.3	MU- Massive MIMO avec Multi-Cell scénario.....	25
2.8.4	MIMO massif distribuée	26
2.9	Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif	27
2.10	Modèle du système.....	27
2.11	Techniques de pré-codage linéaire	28
2.11.1	SVD	29
2.11.2	MR	29
2.11.3	ZF.....	30
2.11.4	RZF/MMSE	30
2.12	Défis de Massive MIMO.....	30
2.13	Efficacité spectrale (SE).....	31
2.14	Conclusion.....	32
Chapitre 3	Simulation et résultat.....	33
3.1	Introduction	33
3.2	Amélioration de SNR.....	33
3.3	Capacité de canal.....	34
3.4	TDD et FDD.....	35
3.5	Pré-codage.....	36
3.5.1	Liaison montante (UL).....	36
3.5.2	Liaison descendante (DL).....	37
3.6	Réutilisation du pilote	38
3.7	Optimisation de SE en fonction de M et K	39
3.8	Conclusion.....	40
Conclusion générale.....	41	
Bibliographie	42	

Liste des figures

CHAPITRE 01

Figure 1.1: Évolution des réseaux mobiles	3
Figure 1.2 : Un réseau cellulaire de base	4
Figure 1.3: Applications de la 5G	6
Figure 1.4 : Scénarios de déploiement de NR	8
Figure 1.5 : Organisation des trames dans la 5G-NR	10
Figure 1.6 : Longueur des slots pour chaque numérologie	11
Figure 1.7 : Numérologie - Espacement des sous-porteuses	11
Figure 1.8 : Canal 5G-NR	12

CHAPITRE 02

Figure 2.1: SISO - Single Input Single Output	15
Figure 2.2: SIMO - Single Input Multiple Output	16
Figure 2.3: MISO - Multiple Input Single Output	16
Figure 2.4 : MIMO- Multiple Input Multiple Output	17
Figure 2.5 : Une illustration de MIMO massive	20
Figure 2.6: Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs	21
Figure 2.7 : La contrainte de M et K sur TDD et FDD pour un système MIMO massif.	22
Figure 2.8 : Single-User Massive MIMO	24
Figure 2.9 : Système MU-MIMO massif. M-antennes de BS dessert K simple antenne UT	25
Figure 2.10 : La BS dans la l-ième cellule et le k-ième UT dans la j-ième cellule	26
Figure 2.11 : Le modèle du système MIMO massif	27
Figure 2.12 : Les défis de Massive MIMO	31
Figure 2.13 : Block de cohérence	32

CHAPITRE 03

Figure 3.1 : BER en fonction de SNR pour différente type de MIMO	33
Figure 3.2 : Capacité du canal en fonction de SNR pour différente M	34
Figure 3.3 : L'efficacité spectrale sur la liaison descendante en fonction de nombre d'antennes M de BS par différentes techniques de transmission	35
Figure 3.4 : L'efficacité spectrale de liaison montante en fonction de nombre d'antennes M de BS pour des différents pré-codages	36
Figure 3.5 : L'efficacité spectrale de liaison descendante en fonction de nombre d'antennes M de BS pour des différents pré-codages	37
Figure 3.6 : L'efficacité spectrale en fonction de nombre d'utilisateurs, avec différents facteurs de réutilisation pilotes. Pour SNR =0dB et SNR=20dB	38
Figure 3.7 : L'efficacité spectrale en fonction de nombre d'antennes M de BS et le nombre d'utilisateurs optimal pour un SE le plus élevé.	39

Listes des acronymes et abréviations

3GPP	3 rd Generation Partnership Project
5G	Cinquième Génération
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
CSI	Channel State Information
DL	Downlink
DoF	Degrees of Freedom
EE	Energy Efficiency
eNB	evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
FDD	Frequency -Division Duplex
gNB	Next Generation NodeB
GSM	Global System for Mobile Communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet Of Things
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
MIMO	Multi Input Multi Output
MISO	Multi Input Single Output
M-MMSE	Multicell Minimum Mean-Squared Error
MR	Maximum Ratio
MU-MIMO	Multi-User MIMO
NFFT	Non-equispaced Fast Fourier Transform
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

RB	Resource Block
RF	Radio Frequency
RZF	Regularized Zero-Forcing
SE	Spectral Efficiency
SIMO	Single Input Multi Output
SISO	Single Input Single Output
SMS	Short Message Service
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SU-MIMO	Single User MIMO
SVD	Singular Value Decomposition
TDD	Time-Division Duplex
UL	Up Link
UT	User Terminal
WLAN	Wireless Local Area Network
ZF	Zero Forcing



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement rapide de la technologie de communication sans fil a entraîné une augmentation explosive du nombre d'utilisateurs mobiles. La prévalence des appareils intelligents conduit à la croissance explosive des exigences en matière de communication numérique sans fil. Bien que les nouvelles technologies telles que la modulation à petite cellule et à ordre élevé puissent améliorer l'efficacité de la fréquence dans une certaine mesure, elles ne peuvent toujours pas satisfaire aux exigences. La technologie massive entrée multiples et sorties multiples (MIMO) est un sujet important et d'actualité, largement motivé par les exigences des communications sans fil de cinquième génération (5G) ou futures. Il existe trois techniques clés pour les communications 5G du point de vue de la capacité du système : la technique massive MIMO est d'abord adoptée pour améliorer le SE de système ; les ressources spectrales en ondes millimétriques sont utilisées pour étendre la bande passante du système ; et des réseaux multicouches et ultra-denses sont déployés pour augmenter la réutilisation spectrale géographique. Les systèmes utilisant des réseaux d'antennes massifs pour desservir plusieurs utilisateurs sont appelés systèmes de communication MIMO massifs. Ils sont capables de combattre l'atténuation des signaux millimétriques, de fournir le backhaul sans fil et de supprimer les interférences dans les réseaux multicouches et plus denses. Par conséquent, ce mémoire se concentre sur la technologie MIMO massive afin de fournir la meilleure efficacité spectrale pour des conceptions de système pratiques. Il est structuré autour de trois chapitres :

Le premier chapitre présente l'évolution des réseaux de communication mobile et la nécessité de passer à la cinquième génération.

Après avoir montré la modification apportée par la 5G New Radio (NR) aux systèmes de télécommunication ; nous consacrons le deuxième chapitre à l'étude de la technologie MIMO massif passant par la présentation de MIMO traditionnel.

Le troisième chapitre propose une analyse graphique sur l'impact des paramètres du système sur l'efficacité spectrale de ce dernier. Enfin, avec une conclusion générale et perspective on termine notre travail.

CHAPITRE 1 LA 5G DE RÉSEAU MOBILE

1.1 Introduction

Le réseau mobile est une technologie sans fil capable de fournir un réseau vocal et / ou de données par transmission radio. Le téléphone mobile est l'une des applications les plus connues du réseau mobile. Auparavant, la commutation de circuit était utilisée pour transmettre la voix sur un réseau, puis nous avons utilisé à la fois la commutation de circuit et la commutation de paquets pour la voix et les données. Actuellement, la commutation de paquets est uniquement utilisée. C'est ainsi que le spectre est passé de 1G à 4G. 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, de la réduction du temps de latence et de la qualité de service. Nous sommes dans la 4ème génération de communication sans fil, des recherches sont menées actuellement pour développer de nouvelles normes pour la prochaine génération au-delà de la 4G, Avec la demande croissante des abonnés, la 4G sera définitivement remplacée par la 5G à l'aide de technologies de pointe. Ce chapitre a pour but de décrire le contexte des applications mobiles et des principaux enjeux associés afin de présenter l'arrivée de la cinquième génération.

1.2 Evolution de communications mobiles

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). En effet, d'un téléphone conçu à l'origine pour effectuer une conversation vocale entre deux utilisateurs sans fournir aucun autre service que le simple envoi/réception de messages textes, le Smartphone moderne est devenu aujourd'hui un véritable centre de données portatif donnant accès à une multitude de services et d'applications (appareil photo, navigateur internet, jeux...). Cette généralisation des accès internet via le Smartphone et l'arrivée des appels vidéo, poussent pour un débit de données encore plus conséquent[1]

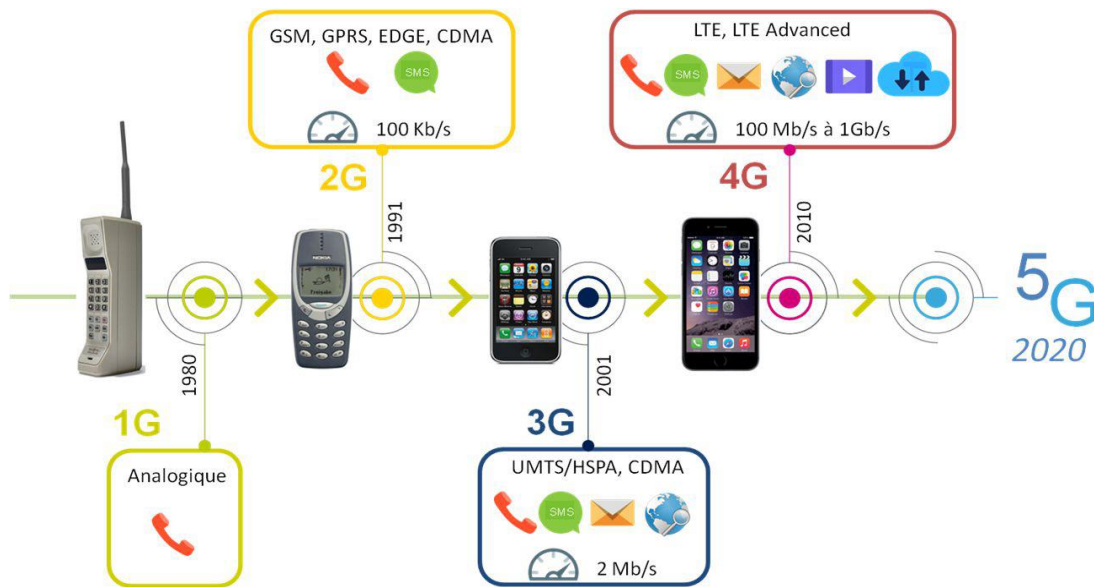


Figure 1.1. Évolution des réseaux mobiles

Depuis 1979 avec le déploiement de la première génération (1G) de réseaux sans fil, principalement analogique, une nouvelle technologie est née tous les 10 ans (Figure 1.1). La deuxième génération (2G) de réseaux mobiles et le passage au numérique avec la création du standard GSM ont introduit de nouveaux services de transfert de données comme les SMS (Short Message Service). Néanmoins, la 2G ne pouvait pas encore répondre à la demande d'accès à internet depuis les téléphones portables. Ceci a motivé le développement de la 3G qui est arrivée sur le marché en 2001 avec les premiers Smartphones. Puis en 2009, 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.

Le concept de 5G regroupe à la fois une évolution des réseaux mobiles existants pour satisfaire les futures demandes en transfert de données, mais aussi une révolution avec la création d'une nouvelle technologie de communication plus compétitive, c'est-à-dire un réseau qui sera plus efficace et moins cher. [1]

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 stations de base. Chaque station de base dessert simultanément un certain nombre de terminaux situés dans la zone de couverture de la station de base, comme illustré à la figure 1.2. Une telle zone de couverture est appelée cellule, ce qui permet de partitionner une zone géographique étendue en cellules [2].

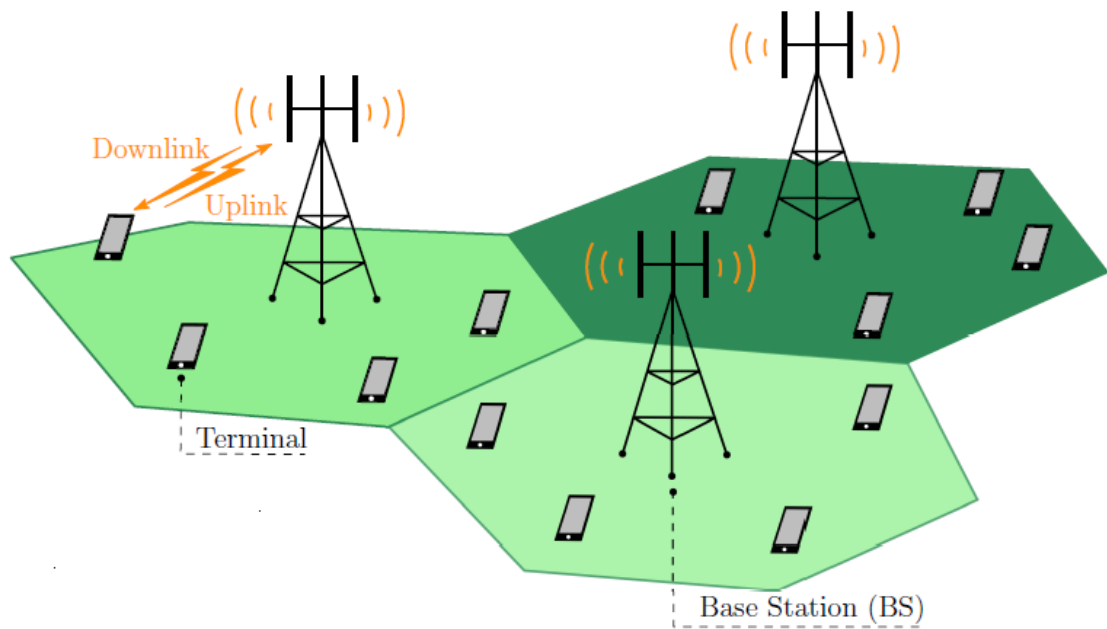


Figure 1.2. Un réseau cellulaire de base

La communication entre les terminaux et BS est bidirectionnelle ou au format 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.

Une mesure de performance pertinente des réseaux cellulaires est le débit de la zone. La métrique de performance de débit surfacique, est donnée par :

$$\text{Débit de surface}[\text{bit/s/km}^2] = B[\text{Hz}] \cdot D[\text{cells/km}^2] \cdot SE[\text{bit/s/Hz/cell}] \quad (1.1)$$

Où B est la largeur de bande de communication, D la densité de cellules moyenne et SE l'efficacité spectrale par cellule. Par conséquent, pour améliorer le débit de couverture des réseaux cellulaires, nous pouvons :

- Allouer plus de bande passante.
- Ajouter plus de BS.
- Améliorer la SE.

L'augmentation de la bande passante n'est pas aussi attrayante, car le spectre de fréquences est une ressource naturelle à coût élevé et confronté à la rareté. En outre, cela implique également l'utilisation de bandes de fréquences beaucoup plus élevées, ce qui limite la portée de la communication. Malgré cela, des bandes de longueurs d'onde millimétriques peuvent être utilisées pour les applications à courte portée. Densifier le réseau, en employant plus de BS, est une tâche difficile sans déplacer les BS plus près des terminaux, ce qui augmente les risques d'être dans l'ombre, réduisant ainsi la couverture. Ce sont les principales raisons pour lesquelles il est préférable d'améliorer la SE. Une façon d'améliorer le SE consiste à utiliser plusieurs antennes au niveau de la station de base pour collecter plus d'énergie à partir des ondes électromagnétiques [3].

1.4 Applications visées pour le réseau de 5G

La 5G fournira la connectivité sans fil pour un large éventail de nouvelles applications présentées sur la Figure 1.3 : La 5G va pénétrer dans chacun des éléments de notre société future et créer un écosystème d'information multidimensionnel centré sur l'utilisateur. Elle va briser la limitation de temps et d'espace pour permettre une expérience utilisateur immersive et interactive. La 5G raccourcira également la distance entre l'homme et les choses, et mettre en œuvre une intégration transparente pour réaliser une interconnexion facile et intelligente entre les personnes et toutes les choses. 5G nous permet de réaliser la vision : « L'information est à portée de main, et tout sera resté en contact ».

Un grand nombre de cas d'utilisation ont été proposés par différentes organisations. L'internet mobile et l'Internet des objets (IoT) sont les deux principaux moteurs du marché de développement futur des communications mobiles, et ils déclencheront une grande gamme de cas d'utilisation. [4]

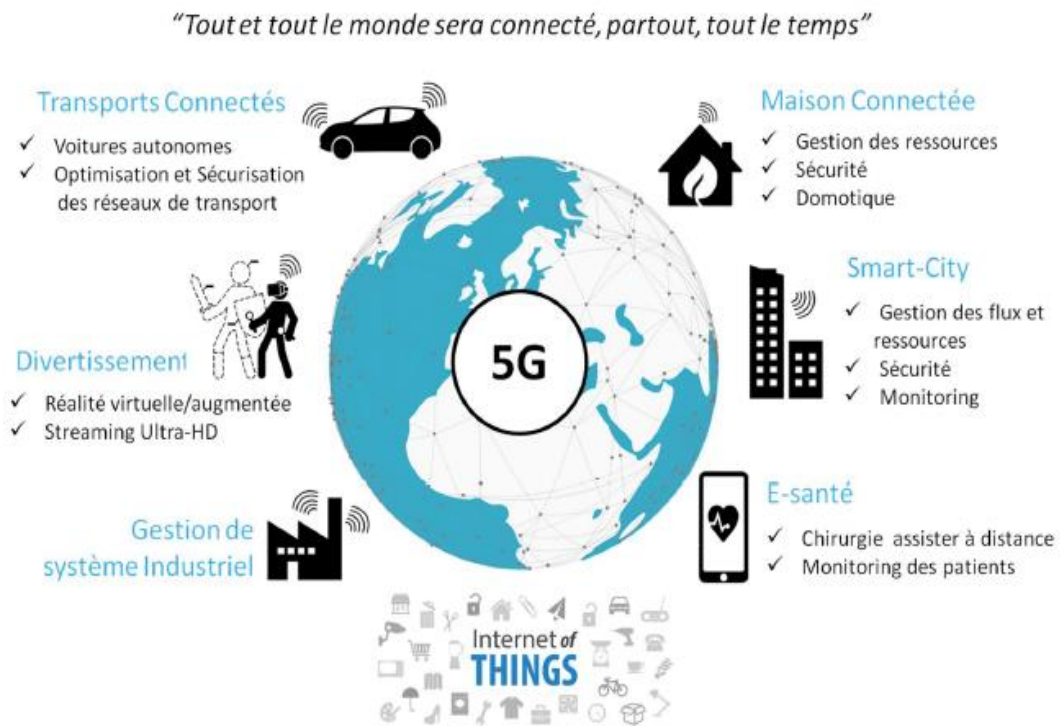


Figure 1.3. Applications de la 5G. [1]

1.5 Objectifs de la 5G

Les principaux industriels et opérateurs du secteur des communications sans fil élaborent actuellement les objectifs et standards de la cinquième génération de réseau mobile (la 5G). L'étape de standardisation démarrée au sein de différents consortiums d'opérateurs et industriels (3GPP, NGMN...) permettra de mettre en place une réglementation à l'horizon 2020. Le premier objectif à atteindre concerne le débit montant et descendant alloué à chaque utilisateur afin d'assurer un accès internet haut débit depuis un smart phone ou tablette. Dans un contexte d'utilisation en mobilité faible ou nulle, le débit visé en bord de cellule par utilisateur est supérieur à 100 Mbit/s et le débit maximum par utilisateur devra dépasser les 10 Gbit/s. Dans un cas d'utilisation en forte mobilité (par exemple, dans le cas de communications entre véhicules), l'amélioration de l'architecture du réseau devra notamment permettre de réduire la latence de la communication. L'objectif est d'obtenir un délai de transmission inférieur à 10 ms. Pour d'autres applications de l'IoT (télémédecine, sécurité...), un haut niveau de fiabilité sera également requis. Des modifications majeures dans l'architecture du réseau et l'apport de nouvelles technologies sans fil seront requises dans les réseaux 2G/3G/4G actuels pour atteindre ces objectifs. Le coût et la consommation énergétique des éléments constituant ce nouveau réseau et les

terminaux mobiles associés seront des points décisifs pour parvenir à une solution viable du point de vue économique. [5]

1.6 5G : New Radio

Répondre aux exigences mentionnées nécessite des changements radicaux dans le modèle du réseau en plus d'innovations perturbatrices. Dans ce contexte, les réseaux 5G peuvent faire appel à un large éventail de nouvelles technologies. Cela permet un saut dans les performances qui éclipse ses prédécesseurs. Ces innovations toucheront la transmission et la conception de la couche physique en plus d'introduire des bouleversements dans les couches supérieures du réseau. En fait, 5G New Radio (NR) utilisera de nombreuses technologies clés afin d'atteindre de nouveaux niveaux de performance et d'efficacité. Les combinaisons de ces dernières étendront l'importance des communications mobiles et leurs permettront de jouer un rôle central dans un monde de cas d'utilisation changeants. Parmi les innovations potentielles dans la couche physique 5G, on peut citer : [6]

- Communications dans la plage des ondes millimétriques.
- Communications massives MIMO.
- Accès multiple non orthogonal (NOMA).
- Communications sans fil full-duplex.
- Agrégation de porteuse et modulations Multi carrier.
- Plus grand spectre.
- Communication de liaison latérale.
- Nouvelle forme d'onde et numérologie (OFDM) hétérogène.

1.6.1 Scénarios de déploiement de NR

Pour assurer la compatibilité ascendante avec LTE / LTE-A, l'architecture de NR est requise pour un interfonctionnement étroit avec LTE / LTE-A. Pour cette exigence, les cellules LTE / LTE-A et NR peuvent avoir une couverture différente (Figure 1.4.a) ou la même couverture, et les scénarios de déploiement suivants sont réalisables : [7]

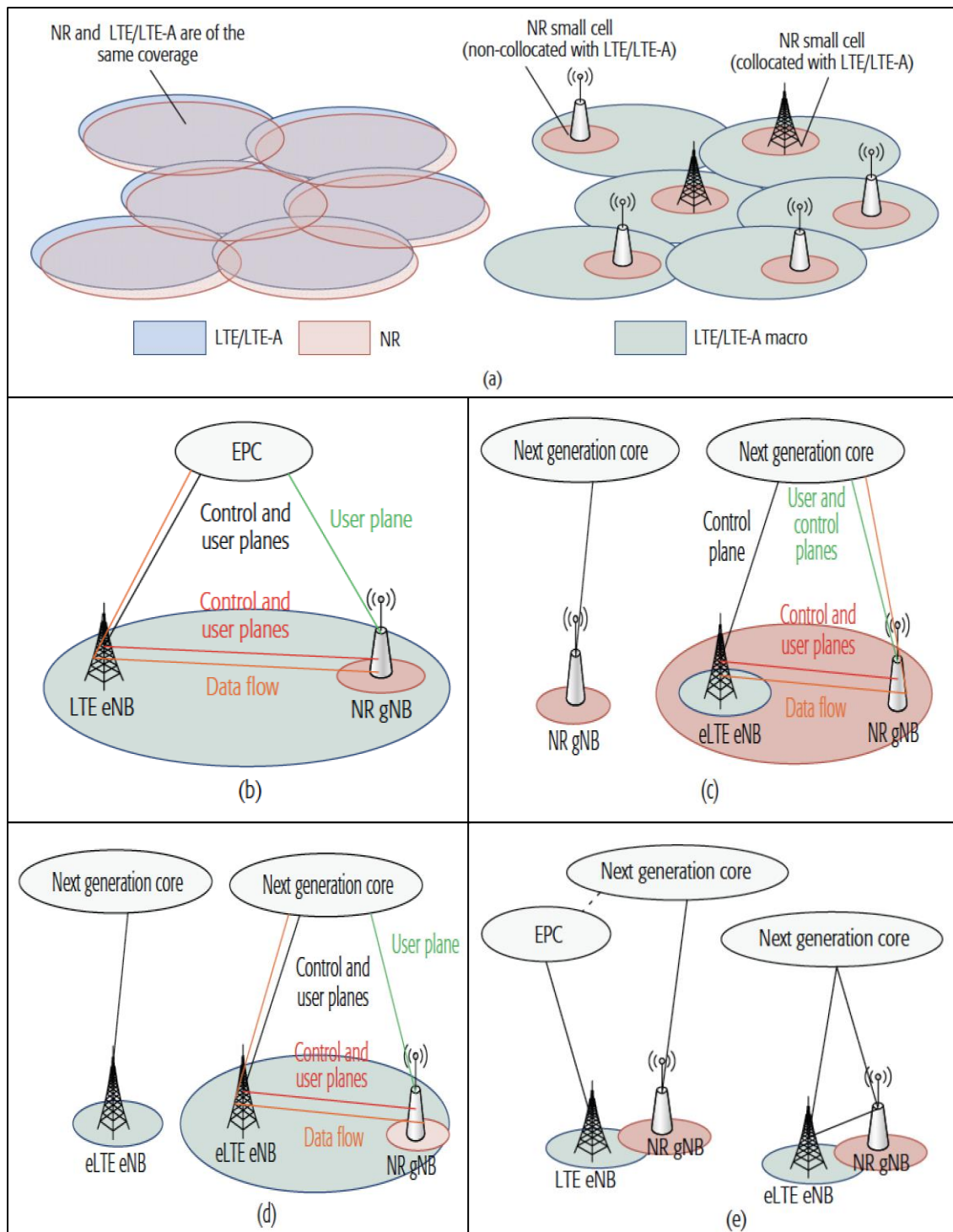


Figure 1.4. Scénarios de déploiement de NR.[7]

a *LTE / LTE-A eNB est un nœud maître* Un eNB LTE / LTE-A offre un support d'ancrage (dans les plans de contrôle et utilisateur), tandis qu'un NR gNB propose un support de rappel. Le flux de données est agrégé sur un eNB et un gNB via le noyau de paquet évolué (EPC) (Figure 1.4.b).

b *NRgNB est un nœud maître* Un NR gNB autonome offre des services sans fil (dans les plans de contrôle et utilisateur) via le noyau de la prochaine génération. Un eLTE et eNB colocalisés peut également fournir des porteuses d'amplificateur pour des connexions doubles (Figure 1.4.c).

c *eLTE eNB est un nœud maître* Un eLTE eNB autonome offre des services sans fil (dans les plans de contrôle et utilisateur) via le cœur de prochaine génération ou un NR gNB colocalisé est en mesure de fournir des supports de rappel, comme illustré à la Figure 1.4.d.

d *Transfert de technologie inter-radio (RAT) entre (e) eNB LTE / LTE-A et NR gNB* Un eNB LTE / LTE-A se connecte à l'EPC et un gNB NR se connecte au noyau de nouvelle génération pour prendre en charge le Handover entre eux. Un eLTE eNB peut également se connecter au noyau de la prochaine génération, et le transfert entre eNB et gNB peut être entièrement géré via le noyau de la prochaine génération (Figure 1.4.e).

1.6.2 Numérolgies

Les scénarios ci-dessus révèlent un déploiement hétérogène de NR avec une couverture différente. En tenant compte de la mobilité des équipements d'utilisateur (UE) jusqu'à 500 km / h, plusieurs longueurs de préfixe cyclique (CP) doivent être adoptées dans NR. En pratique, la fréquence porteuse et la largeur de bande de la sous-porteuse peuvent également affecter la longueur du CP adopté. Par conséquent, il peut exister de multiples combinaisons de paramètres de transmission physiques dans NR, tels que l'espacement des sous-porteuses, la durée des symboles de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), les longueurs CP, etc. Ces paramètres de transmission physiques sont collectivement désignés sous le nom de numérolgies dans NR.

En NR, les émetteurs et les récepteurs peuvent bénéficier d'une bande passante plus large dans les bandes de fréquences élevées. Dans ce cas, l'espacement des sous-porteuses peut être étendu (supérieur à 15 kHz, comme adopté par LTE / LTE-A, et éventuellement jusqu'à 960 kHz). De plus, les fréquences porteuses élevées sont également vulnérables à l'effet Doppler et un espacement important des sous-porteuses

peut faciliter l'atténuation des interférences entre porteuses. D'autre part, NR devrait également prendre en charge un faible espacement des sous-porteuses, tel que 3,75 kHz, comme le permet l'internet des objets à bande étroite (NB-IoT), pour bénéficier d'un meilleur rendement énergétique dans les bandes de basses fréquences. En conséquence, les espacements des sous-porteuses dans NR sont évolutifs en tant que sous-ensemble ou sur-ensemble de 15 kHz. Les espacements possibles des sous-porteuses peuvent être de $15 \text{ kHz} \times 2^\mu$, où μ peut être un entier positif / négatif ou zéro. Pour chaque valeur d'espacement de sous-porteuse, plusieurs longueurs de CP peuvent être insérées pour s'adapter à différents niveaux de brouillage inter-symbole à différentes fréquences porteuses et mobilité.[7] Les types NR numérologie sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 1. Numérolgies de transmission prises en charge [8].

μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 \text{ [kHz]}$	Préfixe cyclique (CP)
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Élargie
3	120	Normal
4	240	Normal

1.6.3 Structure de trame

Les transmissions en liaison descendante et montante sont organisées en trames d'une durée de 10 ms, figure 1.5, chacune divisée en dix sous-trames de 1 ms.

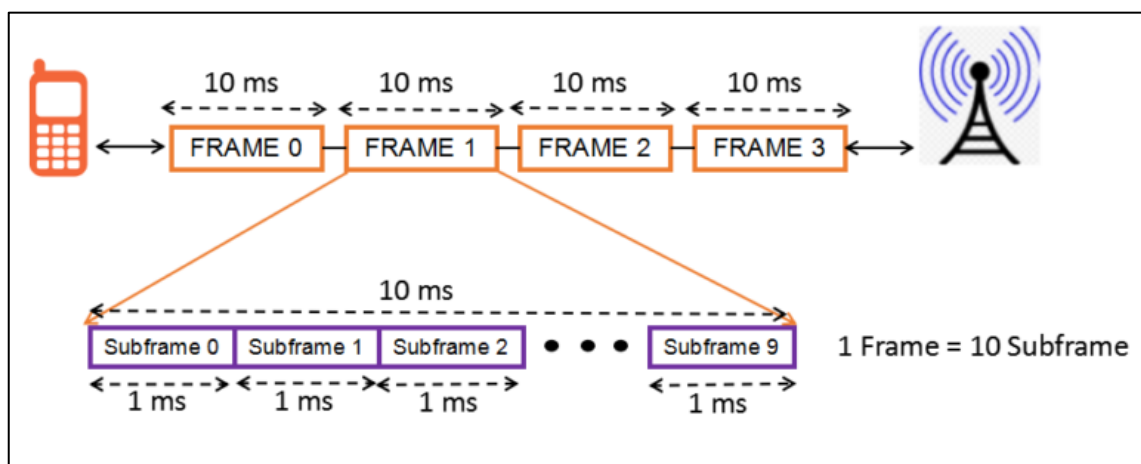


Figure 1.5. Organisation des trames dans la 5G-NR [9]

La longueur de slot varie en fonction de l'espacement des sous-porteuses. La tendance générale est que la longueur de slot diminue à mesure que l'espacement des sous-porteuses s'élargit, figure 1.6. Cette tendance provient de la nature de l'OFDM.

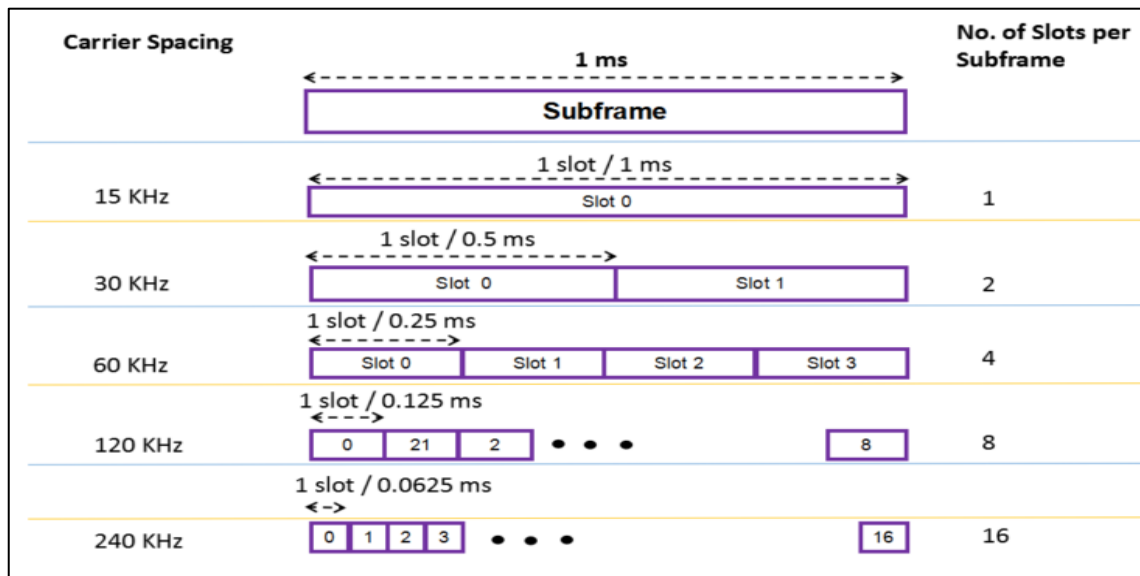


Figure 1.6. Longueur des slots pour chaque numéologie [9]

1.6.4 NR Resource Block

Un NR bloc de ressources (RB) contient 14 symboles dans le domaine temporel et 12 sous-porteuses dans le domaine fréquentiel. En bande LTE, la largeur de bande de RB est fixée à 180 KHz mais en NR, elle n'est pas fixe et dépend de l'espacement des sous-porteuses. La figure 1.7 montre les espacements des SP pour chaque numéologie.

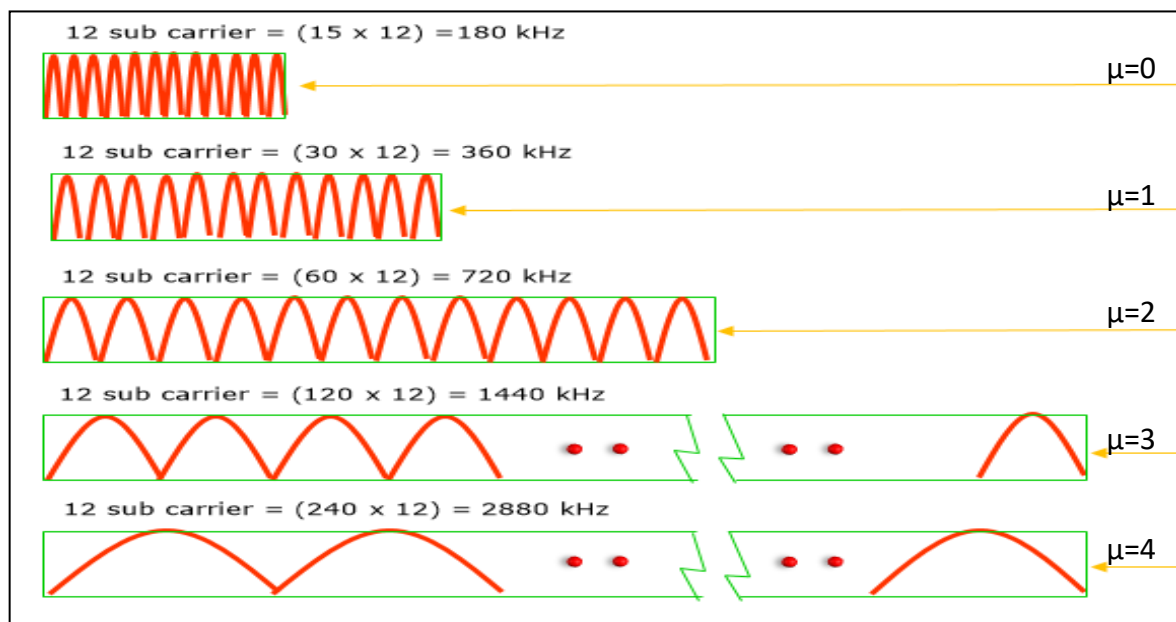


Figure 1.7. Numéologie - Espacement des sous-porteuses [10]

1.6.5 Bande passante du canal NR

Le NR devrait fonctionner avec une largeur de canal de 100 MHz pour les bandes inférieures <6 GHz et une bande de 400 MHz dans la gamme des ondes millimétriques. NR est conçu pour fournir une efficacité de bande passante plus élevée, atteignant 99%, soit environ 90% en LTE (10% gaspillé en bande de garde).

Chaque numérologie a défini le nombre de RB, ayant connaissance de la largeur d'un bloc de ressources, il est possible de calculer la bande passante du canal tel que :

$$CBW = N_RB \times N_SP \times \Delta f + 2 \times BG \quad (1.2)$$

- Où :
- CBW : la bande passante de canal
 - N_RB : Nombre de ressource block
 - N_SP : Nombre de sous porteuse = 12
 - BG : la bande de garde

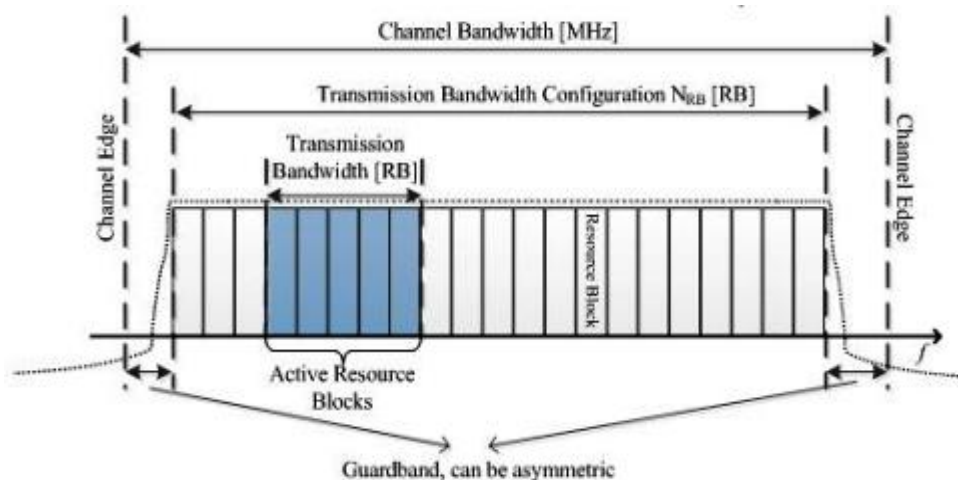


Figure 1.8. Canal 5G-NR [11]

1.7 Conclusion

Avec les exigences croissantes des abonnés, la 4G sera définitivement remplacée par la 5G à l'aide de technologies de pointe, telles que la technologie MIMO massive, la communication directes (Device-to-device), la communication à ondes millimétriques, l'accès multiple par division de faisceau dans la technologie MIMO massive. La numérologie de NR de la 5G donne une flexibilité convient avec son architecture hétérogène.

CHAPITRE 2 LA TECHNOLOGIE MIMO

MASSIF

2.1 Introduction

L'objectif du chapitre actuel est de présenter les réseaux MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) massifs connus sous le nom de *Massive MIMO*. Cette technologie émergente se présente comme l'une des méthodes les plus prometteuses pour les systèmes révolutionnaires de la cinquième génération des réseaux mobiles (5G) et de l'internet des objets. [12] Les évolutions technologiques exigeront des systèmes de communication puissants et fiables. Cela nécessite de nombreux progrès sur les systèmes actuels. Dans le cadre des améliorations possibles s'inscrit le *Massive MIMO*. Ainsi on explore la technologie MIMO traditionnel.

2.2 MIMO traditionnel

La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) est une technologie sans fil qui utilise plusieurs émetteurs et récepteurs pour transférer plus de données en même temps. La technologie MIMO tire parti d'un phénomène d'ondes radioélectriques appelé trajets multiples, où les informations transmises rebondissent sur les murs, les plafonds et d'autres objets, atteignant l'antenne de réception plusieurs fois sous différents angles et à des moments légèrement différents. Elle exploite le comportement par trajets multiples en utilisant plusieurs émetteurs et récepteurs « intelligents » avec une dimension « spatiale » supplémentaire pour augmenter considérablement les performances et la portée. MIMO permet à plusieurs antennes d'envoyer et de recevoir plusieurs flux spatiaux 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 la puissance de capture du signal du 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. [13]

2.3 Principes du MIMO

Comme cela a été expliqué précédemment, la principale source des perturbations, que subit un signal lors de sa propagation, est le canal. En effet, à cause des phénomènes de propagation multi-trajets, le signal subit des évanouissements, des décalages fréquentiels ou même temporels. Contrairement aux systèmes classiques, les systèmes à diversité prennent avantage de ces types de propagation pour améliorer les performances du système. Pour mettre en place ces améliorations, les systèmes MIMO exploitent les techniques de :

- **Diversité d'espace** : Aussi connue sous le nom de diversité d'antenne
- **Diversité fréquentielle** : Cette technique demande l'envoi du même signal sur des fréquences différentes. Il faut toutefois faire attention à la largeur de bande cohérente et à l'étendue fréquentielle due aux multi-trajets et aux distances à franchir par la transmission.
- **Diversité temporelle** : Lorsque l'on sépare l'envoi du même signal par le temps cohérence du canal, il est possible de profiter de la diversité temporelle. Tout dépend également de la vitesse de déplacement du mobile et de la fréquence porteuse.[14]

2.4 Types de MIMO

Il existe quatre modèles de configuration d'antenne de base qui incluent :

- ✓ SISO - Single Input Single Output
- ✓ SIMO - Entrée unique Sortie multiple
- ✓ MISO - Sortie unique à entrées multiples
- ✓ MIMO - Entrée multiple Sortie multiple

Le terme MU-MIMO est également utilisé pour une version pour plusieurs utilisateurs des différentes formes de technologie d'antenne se rapportant à une ou plusieurs entrées et sorties. Ceux-ci sont liés à la liaison radio. De cette manière, l'entrée est l'émetteur lorsqu'elle est transmise dans la liaison ou le chemin du signal et

la sortie est le récepteur, elle se trouve à la sortie de la liaison sans fil. Par conséquent, les différentes formes de liaisons à une / plusieurs antennes sont définies ci-dessous :

2.4.1 MIMO – SISO

La forme la plus simple de liaison radio peut être définie en termes MIMO en tant que SISO - Single Input Single Output. Cet émetteur fonctionne avec une antenne, tout comme le récepteur Comme présentée dans la figure 2.1



Figure 2.1. SISO - Single Input Single Output

L'avantage d'un système SISO est sa simplicité. SISO n'exige aucun traitement en termes des diverses formes de diversité pouvant être utilisées. 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

$$C = B \log_2(1+SNR) \quad [\text{bit/s}] \quad (2.1)$$

Où **C** est la capacité du canal, **B** la largeur de bande du canal et **SNR** est le rapport signal sur bruit.

2.4.2 MIMO – SIMO

La version SIMO ou MIMO à sorties multiples et à entrée unique se produit lorsque l'émetteur a une seule antenne et que le récepteur dispose de plusieurs antennes Comme présentée dans la figure 2.2. Ceci est également appelé réception de la diversité. 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. Il est utilisé depuis de nombreuses années avec les stations d'écoute / réception à ondes courtes pour lutter contre les effets des évanouissements et des interférences ionosphériques.



Figure 2.2. SIMO - Single Input Multiple Output

SIMO présente l'avantage d'être relativement facile à mettre en œuvre, bien que le traitement soit nécessaire dans le récepteur. L'utilisation de SIMO peut être tout à fait acceptable dans de nombreuses applications, mais lorsque le récepteur est situé sur un appareil mobile tel qu'un combiné de téléphone portable, les niveaux de traitement peuvent être limités par la taille, le coût et la charge de la batterie

SIMO peut être utilisé sous deux formes :

- **Diversité commutée SIMO** : Cette forme de SIMO recherche le signal le plus puissant et bascule vers cette antenne
- **Rapport maximum combinant SIMO** : Cette forme de SIMO prend les deux signaux et les additionne pour donner la combinaison. De cette manière, les signaux des deux antennes contribuent au signal global

2.4.3 MIMO – MISO

MISO est également appelé diversité de transmission. Dans ce cas, les mêmes données sont transmises de manière redondante à partir des deux antennes émettrices (figure 2.3). Le récepteur est alors capable de recevoir le signal optimal qu'il peut ensuite utiliser pour extraire les données requises.



Figure 2.3. MISO - Multiple Input Single Output

L'avantage d'utiliser MISO est que les multiples antennes et le traitement de redondance sont déplacés du récepteur vers l'émetteur. Dans des cas tels que les

équipements utilisateur de téléphone cellulaire, cela peut constituer un avantage significatif en termes d'espace pour les antennes et de réduction du niveau de traitement requis par le récepteur pour le codage de redondance. Ceci a un impact positif sur la taille, le coût et la durée de vie de la batterie car le niveau de traitement plus bas nécessite moins de consommation de la batterie.[13]

2.4.4 MIMO – MIMO

MIMO est une technologie d'antenne radio qui utilise plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur pour permettre à une variété de chemins de signaux de transporter les données (figure 2.4), en choisissant des chemins séparés pour chaque antenne afin de permettre l'utilisation de plusieurs chemins de signaux.

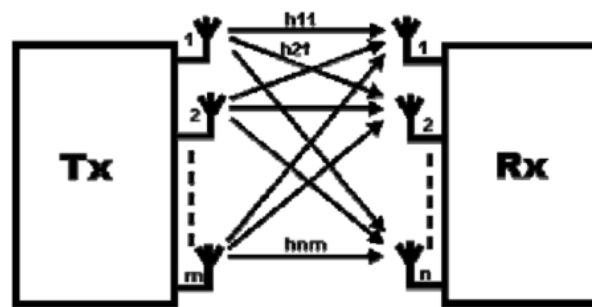


Figure 2.4. MIMO- Multiple Input Multiple Output

L'une des idées fondamentales du traitement du signal spatio-temporel des systèmes sans fil MIMO, dans laquelle le temps est complétée par la dimension spatiale inhérente à l'utilisation de plusieurs antennes réparties dans l'espace, c'est-à-dire l'utilisation de plusieurs antennes situées à différents points. En conséquence, les systèmes sans fil MIMO peuvent être considérés comme une extension logique des antennes intelligentes utilisées depuis de nombreuses années pour améliorer la technologie sans fil.

On le trouve entre un émetteur et un récepteur, le signal peut emprunter plusieurs chemins. De plus, en déplaçant les antennes même sur une petite distance, les chemins utilisés changeront. La variété de chemins disponibles résulte du nombre d'objets apparaissant sur le côté ou même dans le chemin direct entre l'émetteur et le récepteur. Auparavant, ces chemins multiples ne servaient qu'à introduire des interférences. En utilisant MIMO, ces chemins supplémentaires peuvent être utilisés

avantageusement. Ils peuvent être utilisés pour renforcer la liaison radio en améliorant le rapport signal sur bruit ou en augmentant la capacité de données de la liaison.

Les deux principaux formats de MIMO sont donnés ci-dessous :

- **Diversité spatiale** : La diversité spatiale est souvent utilisée dans ce sens étroit se réfère à transmettre et recevoir la diversité. Ces deux méthodologies sont utilisées pour apporter des améliorations au rapport signal sur bruit et sont caractérisé par l'amélioration de la fiabilité du système vis-à-vis des différentes formes d'évanouissement
- **Multiplexage spatial** : cette forme de MIMO est utilisée pour fournir une capacité de données supplémentaire en utilisant les différents chemins pour acheminer du trafic supplémentaire, c'est-à-dire en augmentant la capacité de débit de données.

L'un des principaux avantages du multiplexage spatial MIMO réside dans le fait qu'il est en mesure de fournir une capacité de données supplémentaire. Le multiplexage spatial MIMO y parvient en utilisant les chemins multiples et en les utilisant efficacement comme "canaux" supplémentaires pour transporter des données. La quantité maximale de données pouvant être acheminée par un canal radio est limité par les limites physiques définies dans la loi de Shannon.

Les systèmes d'antenne à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) sont utilisés dans la norme sans fil, y compris IEEE 802.11n, 3GPP LTE et WiMAX mobile systèmes. La technique prend en charge un débit de données amélioré, même sous conditions de brouillage, évanouissement du signal et trajets multiples. La demande de plus les débits de données sur de plus longues distances a été l'une des principales motivations derrière le développement du multiplexage par répartition orthogonale de fréquence MIMO (OFDM) systèmes de communication.

La loi de Shannon définit le débit maximal auquel des données sans erreur peuvent être transmises sur une largeur de bande donnée en présence de bruit. Il est généralement exprimé sous la forme présentée dans l'équation (2.1), qui montre qu'une augmentation du SNR d'un canal entraîne des gains marginaux en débit de canal. En conséquence, le moyen traditionnel d'atteindre des débits de données plus élevés consiste à augmenter la largeur de bande du signal. Malheureusement, augmenter la

largeur de bande du signal d'un canal de communication en augmentant le débit de symboles d'une porteuse modulée augmente sa sensibilité aux évanouissements par trajets multiples. Pour les canaux à large bande passante, une solution partielle à la résolution du problème des trajets multiples consiste à utiliser une série de sous-porteuses superposées à bande étroite. Non seulement l'utilisation de sous-porteuses OFDM qui se chevauchent améliore l'efficacité spectrale, mais les débits de symboles plus bas utilisés par les sous-porteuses à bande étroite réduisent l'impact des produits de signaux à trajets multiples.

Les canaux de communication MIMO apportent une solution intéressante au problème de la propagation par trajets multiples en exigeant plusieurs trajets de signal. En effet, les systèmes MIMO utilisent une combinaison de plusieurs antennes et de plusieurs chemins de signal pour acquérir des connaissances sur le canal de communication. En utilisant la dimension spatiale d'une liaison de communication, les systèmes MIMO peuvent atteindre des débits de données nettement supérieurs à ceux des canaux SISO (Single Input, Single Output) traditionnels. Dans un système 2 x 2 MIMO, les signaux se propagent le long de plusieurs chemins de l'émetteur aux antennes du récepteur.

En utilisant cette connaissance de canal, un récepteur peut récupérer des flux indépendants de chacune des antennes de l'émetteur. Un système MIMO 2 x 2 génère deux flux spatiaux permettant de doubler efficacement le débit binaire maximal de ce qui peut être obtenu avec un canal de communication SISO 1 x 1 traditionnel.

La capacité maximale de canal d'un système MIMO peut être estimée en fonction de N flux spatiaux. Une approximation de base de la capacité du canal MIMO est fonction des flux spatiaux, de la largeur de bande et du rapport signal sur bruit (SNR). Elle est illustrée dans l'équation suivante :

$$C = N B \log_2 (1 + \text{SNR}) \quad [\text{bit/s}] \quad (2.2)$$

Ou C est la capacité du canal, N est le nombre du flux spatiaux, B la largeur de bande du canal et SNR est le rapport signal sur bruit.

Compte tenu de l'équation de la capacité de canal MIMO, il est possible d'étudier la relation entre le nombre de flux spatiaux et le débit de différentes implémentations de configurations SISO et MIMO. [13]

2.5 Massive MIMO

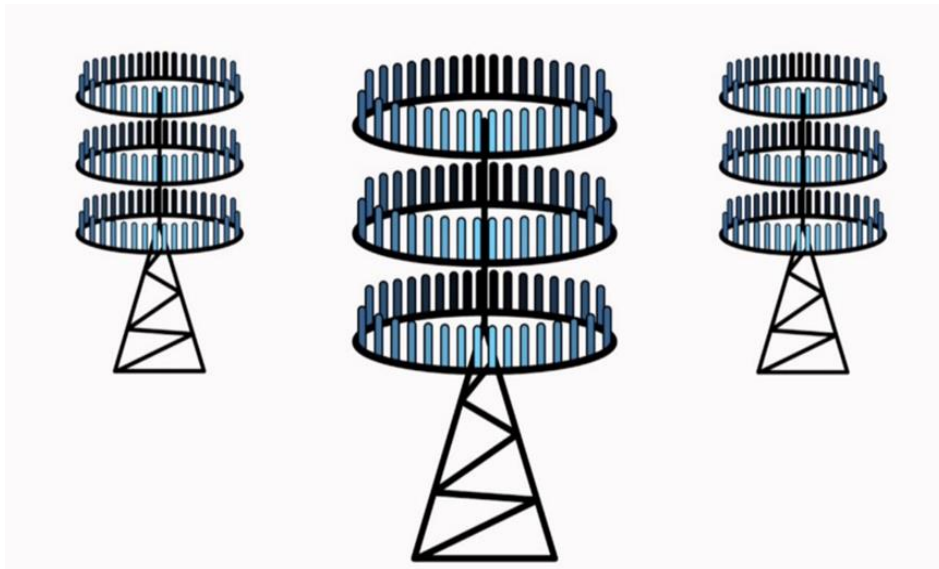


Figure 2.5. Une illustration de MIMO massive

MIMO peut être résumée selon un principe : le multiplexage spatial MIMO consiste à utiliser simultanément les mêmes fréquences radioélectriques 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 réseaux MIMO standard utilisent généralement deux ou quatre antennes pour transmettre les données et le même nombre pour les recevoir. Massive MIMO, en revanche, est un système MIMO avec un nombre d'antennes particulièrement élevé. Massive MIMO augmente le nombre d'antennes d'émission (des dizaines ou plus de 100 éléments) sur une station de base (figure 2.5). Massive MIMO propose deux innovations majeures :

2.5.1 Beamforming

Est un système de signalisation du trafic pour stations de base cellulaires qui identifie la voie de transmission de données la plus efficace pour un utilisateur particulier et réduit les interférences pour les utilisateurs à proximité. Aux stations de base MIMO massives, des algorithmes de traitement du signal tracent le meilleur itinéraire de transmission par voie aérienne vers chaque utilisateur. Ils peuvent ensuite envoyer des paquets de données individuels dans de nombreuses directions différentes, en les renvoyant des bâtiments et d'autres objets selon un modèle parfaitement

coordonné. En résumé, pensez à la technologie MIMO massive en tant que structure 3D massive augmentant les capacités de couverture horizontale et verticale.

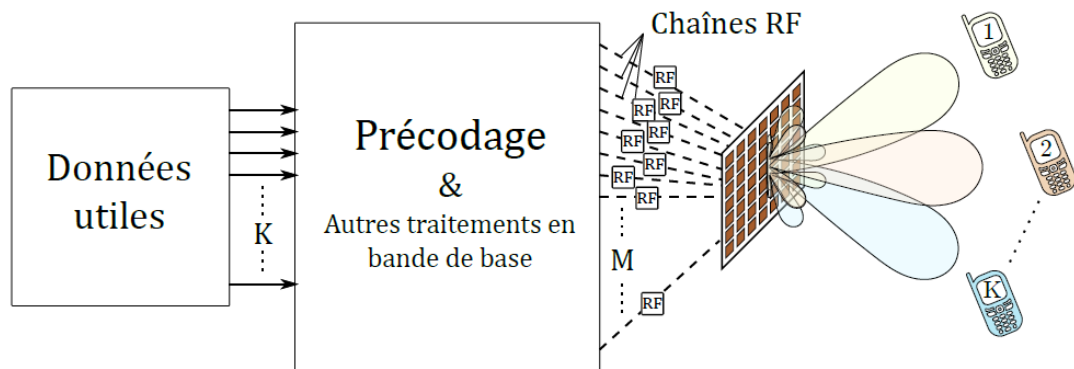


Figure 2.6. Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs [15]

2.5.2 MU-MIMO

Augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant ainsi un côté périphérique pratiquement unifié. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grande échelle. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter la vitesse de transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de la station de base sans consommer plus de bande passante ni augmenter les valeurs de modulation.[16]

2.6 Caractéristiques de Massive MIMO

Massive MIMO est une forme de structure MU-MIMO dans laquelle la variété d'antennes BS et le nombre d'UT sont énormes. Dans Massive MIMO, des milliers d'antennes BS desservent simultanément des dizaines, voire des centaines d'utilisateurs, avec les mêmes ressources de fréquence. Certains points essentiels de Massive MIMO sont :

2.6.1 L'évolutivité

La station de base apprend les canaux via un apprentissage de liaison montante, avec opération TDD. Le temps requis pour l'estimation du canal est indépendant du nombre d'antennes BS. Par conséquent, la large gamme d'antennes BS peut être aussi large que souhaité sans extension de la surcharge d'estimation de canal. De plus, le traitement du

signal à chaque UT est essentiel et ne dépend pas de l'existence d'autres UT, le traitement du signal par démultiplexage est effectué au niveau des UT. L'ajout ou la perte de certains UT du service n'a plus d'incidence sur les autres activités UT.

2.6.2 Massive MIMO préfère TDD Scheme

En mode FDD, l'estimation de canal repose sur le nombre d'antennes BS M . Par contre, en mode TDD, le temps d'estimation de canal est non biaisé de M . Dans Massive MIMO, 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 TDD, l'ajout d'antennes supplémentaires n'affecte plus les sources nécessaires à l'acquisition du canal.

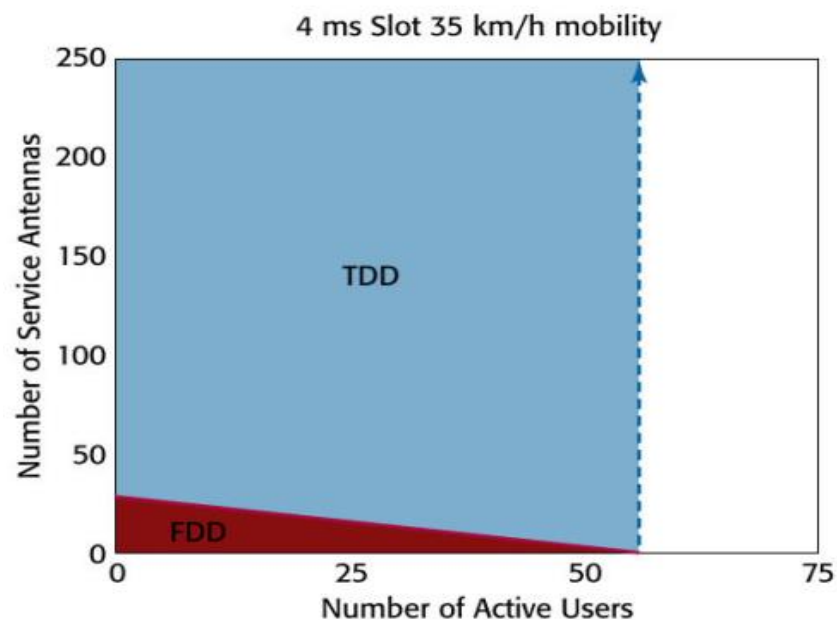


Figure 2.7. La contrainte de M et K sur TDD et FDD pour un système MIMO massif.

La figure 2.7 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.

2.6.3 Le réseau d'antennes ne doit pas être physiquement grand

Par exemple, imaginez un réseau cylindrique de 128 antennes, comprenant quatre cercles de 16 éléments d'antenne bipolarisés. Selon à 2,6 GHz, la distance entre les antennes adjacentes est d'environ 6 cm, ce qui correspond à la moitié de la longueur d'onde, et par conséquent, ce réseau occupe uniquement une dimension physique de 28 cm sur 29 cm.

2.6.4 Massive MIMO offre une 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 Massive MIMO. 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, Massive MIMO tend à avoir une propagation favorable. Cette réalité tient à la réglementation de grands nombres[17]

2.7 Avantages des systèmes Massive MIMO

Les principaux avantages des systèmes Massive MIMO peuvent être résumés comme suit [18] :

- ✓ Gain d'efficacité spectrale élevé.
- ✓ Gain d'efficacité énergétique élevé.
- ✓ Traitement simple.
- ✓ Augmentation du débit de données.
- ✓ Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.
- ✓ Renforcement des canaux

2.8 Types Massive MIMO

2.8.1 Single-User MIMO

En raison de la gêne physique 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. Du point de vue de l'efficacité énergétique, l'utilisation d'un réseau d'antennes massif pour desservir une seule ou une petite quantité d'UT (figure 2.9) peut également ne pas être judicieuse. Par conséquent, dans ce cas, la réalisation de MIMO massif pour SU-MIMO peut également être limitée.

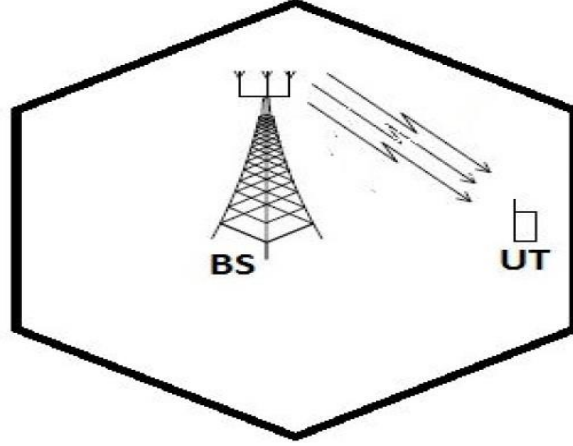


Figure 2.8. Single-User Massive MIMO

$$\mathbf{y} = \sqrt{\mathbf{P}\mathbf{u}} \mathbf{h} \mathbf{s} + \mathbf{w} \quad (2.3)$$

Notons par $\mathbf{P}\mathbf{u}$, le SNR de la liaison montante, par $\mathbf{h}$, le vecteur de réponse du canal, par $\mathbf{s}$, le vecteur du symbole et par $\mathbf{w}$, le vecteur de bruit AWGN.

2.8.2 Multi-User Massive MIMO

Lorsque plusieurs terminaux sont autorisés à accéder à une ressource temps-fréquence identique (figure 2.10), MU-MIMO offre une efficacité système supérieure à celle de SU-MIMO. Dans cette section, nous prenons en considération les systèmes MU-MIMO à cellule unique, dans lesquels la station de base sert des K UT, chaque terminal étant équipé d'une antenne. Le signal reçu sur la station de base d'un système MU-MIMO sur la liaison montante est :

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \sqrt{\mathbf{P}\mathbf{u}_k} \mathbf{h}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{w} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{y} = \sqrt{\mathbf{P}\mathbf{u}} \mathbf{H} \mathbf{S} + \mathbf{w} \quad (2.5)$$

$\mathbf{y}$ est la matrice de signal reçu $M \times 1$,

$\mathbf{h}_k \in \mathbf{H}$. Ou $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \dots \mathbf{h}_k \dots \mathbf{h}_K]$ représente le vecteur de canal entre les antennes BS et le $k^{\text{ième}}$ UT,

$\mathbf{s}_k \in \mathbf{S}$. Ou $\mathbf{S}^T = [\mathbf{s}_1 \dots \mathbf{s}_k \dots \mathbf{s}_K]$ représente le symbole transmis par le $k^{\text{ième}}$ UT

w représente le bruit gaussien blanc additif (AWGN).

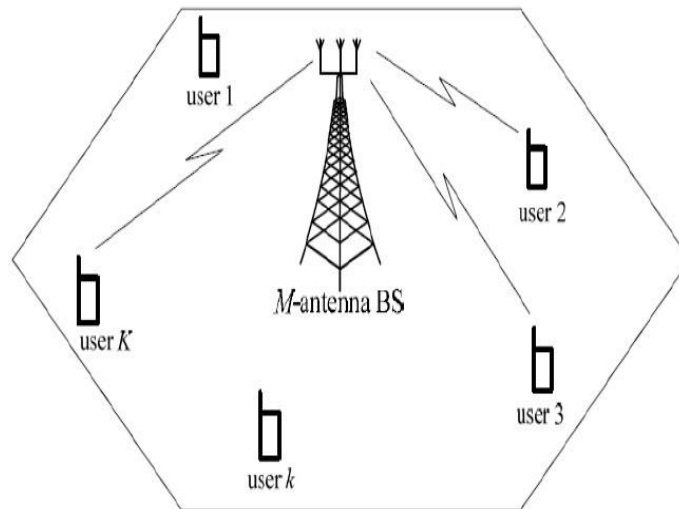


Figure 2.9. Système MU-MIMO massif. M -antennes de BS dessert K simple antenne UT

Lorsque $K \geq 2$, le signal obtenu de chaque terminal interfère avec ceux des autres terminaux et nous devons donc anticiper que les informations mutuelles de chaque terminal pour MU-MIMO sont plus petites que celles de SU-MIMO avec la même puissance transmise à chaque terminal. Cependant, lorsque $M \gg K$, l'orthogonalisation de canal se déclenche, de sorte que le signal obtenu de chaque terminal est presque orthogonal, c'est-à-dire exempt d'interférences dans la structure de signalisation privilégiée en dessous des conditions de propagation de canal favorables. De plus, étant donné que les terminaux sont autonomes, la condition de propagation de canal favorable est généralement confortable du fait que les antennes aux terminaux sont presque non corrélées et découplées. Cela suggère que Massive MIMO est le souhait de la configuration MU-MIMO.

2.8.3 MU- Massive MIMO avec Multi-Cell scénario

Dans cette section, nous envisageons la restriction des systèmes MIMO multiutilisateurs cellulaires non coopératifs alors que M grandit sans limite. Pour une seule cellule, aussi bien que pour la MIMO multi-cellule, le fait de laisser M augmenter sans limite a pour effet final de faire disparaître le bruit thermique et l'évanouissent de Rayleigh à petite échelle. Toutefois, l'interférence de cellules distinctes due à une contamination pilote persistera avec plusieurs cellules. L'idée de pollution pilote est nouvelle dans un contexte cellulaire MU-MIMO et est illustrée à la figure 2.11 suivante. Cependant, l'habitude de poser un problème dans le contexte de la CDMA,

généralement sous le titre de « contamination pilote ». L'estimation de canal calculée à l'aide de la station de base dans la cellule l est contaminée par la transmission pilote de la cellule j . La station de base de la cellule l transmettra son signal partiellement aux côtés des terminaux de la cellule adjacente. En raison de la formation de faisceau, le brouillage causé à la cellule j ne disparaît pas de manière asymptotique comme $M \rightarrow \infty$. Un système cellulaire multiutilisateur MIMO-OFDM avec des cellules hexagonales et des sous-porteuses NFFT est favorisé. Toutes les cellules desservent K terminaux indépendants et disposent de M antennes au niveau de la station de base. Les stations de base sont supposées non coopératives. La matrice de canaux composites $M \times K$ entre les K UT dans la cellule l et les BS dans la cellule j est notée $\mathbf{H}_{jl}$. En se basant sur la réciprocité, la matrice de canal de liaison descendante entre la station de base de la cellule j et les terminaux de la cellule l est présentée par $\mathbf{H}_{jl}^T$. Le signal reçu à la $j^{\text{ème}}$ BS sera le suivant:

$$\mathbf{y}_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{P_u} \mathbf{h}_{jlk} \mathbf{s}_{lk} + \mathbf{w} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{y}_j = \sum_{l=1}^L \sqrt{P_u} \mathbf{H}_{jl} \mathbf{s}_l + \mathbf{w} \quad (2.7)$$

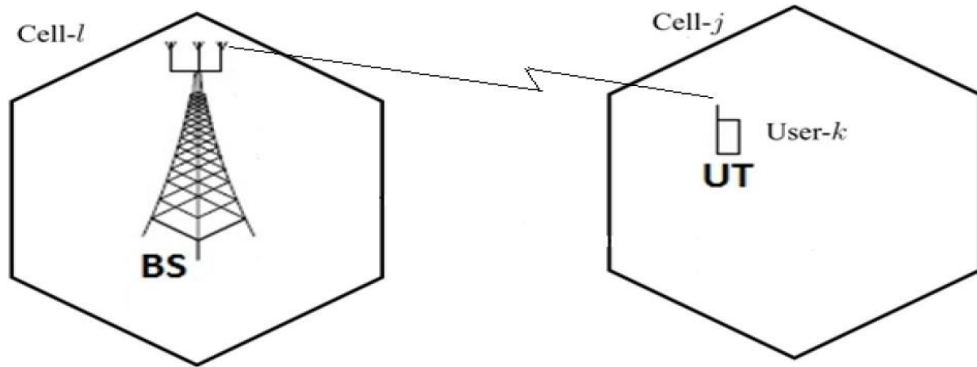


Figure 2.10. La BS dans la l -ième cellule et le k -ième UT dans la j -ième cellule

2.8.4 MIMO massif distribuée

Distribué Massive MIMO peut être traité comme un cas distinct de MU-MIMO afin de fournir en plus une plus grande capacité système en utilisant des antennes déployées dispersées pour émettre et recevoir des signaux. L'un des mécanismes de la MIMO massive décaissée consiste à permettre la coopération entre les stations de base dans des cellules distinctes, ce qui réduit les interférences entre les cellules. Cependant, la

synchronisation devient un problème essentiel même pour les antennes distribuées dans la même station de base. Dans certains cas, la quantité massive d'antennes au niveau de la station de base peut en outre être positionnée à des endroits uniques (par exemple, au sommet des bâtiments). Dans ce cas, la synchronisation est un problème, et l'interface RF peu coûteuse peut également poser de plus grands problèmes.[17]

2.9 Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif

Comparés au MIMO traditionnel, les avantages du MIMO massif incluent :

- Amélioration de SE
- Quantité massive de degrés de liberté dans le domaine spatial
- Bonnes performances système avec uniquement un schéma de pré-codage linéaire (simple), par ex Forçage nul, transmission du rapport maximal, erreur quadratique moyenne minimale
- Faciliter l'allocation des ressources.[19]

2.10 Modèle du système

Dans les systèmes MIMO massifs, un grand nombre d'antennes sont équipées en station de base. Le modèle de système est illustré à la figure 2.12. Le côté gauche présente le processus de liaison montante, tandis que le côté droit est un processus de liaison descendante. On peut voir sur cette image que, lorsque les utilisateurs tentent de communiquer avec la station de base, leur flux de données doit être pré-codé d'abord en fonction des informations d'état de canal obtenues, qui sont estimées par l'envoi de la séquence pilote.

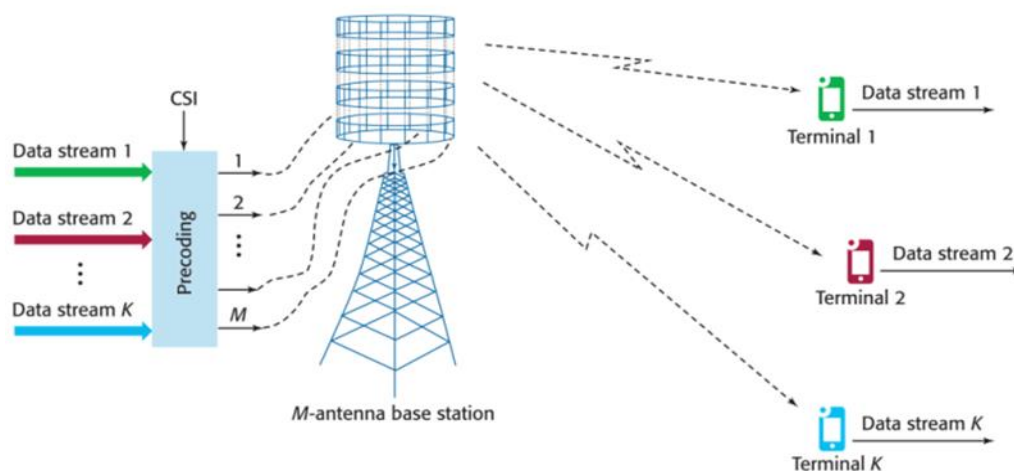


Figure 2.11. Le modèle du système MIMO massif

Sur la base du modèle de système, nous pouvons facilement obtenir un modèle mathématique pour les systèmes MIMO massifs,

$$\bar{\mathbf{y}} = \mathbf{W}\mathbf{H}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{W}\mathbf{H}\mathbf{n} \quad (2.8)$$

$\mathbf{x}$ est le signal transmis, $\bar{\mathbf{y}}$ est le signal reçu, $\bar{\mathbf{y}} \in \mathbb{C}$. $\mathbf{W} \in NT * NT$ est matrice de pré-codage. $\mathbf{H}$ est une matrice de canaux, $\mathbf{H} \in \mathbb{C}NT \times NR$. $\bar{\mathbf{n}}$ est un vecteur de bruit.[19]

2.11 Techniques de pré-codage linéaire

Les techniques de pré-codage linéaire, parfois également appelées formation de faisceau, ont été largement développées au cours des dernières décennies. Il est considéré comme un moyen avantageux d'exploiter toute la diversité de la chaîne. Pour les systèmes MU-MIMO, en supposant un canal à évanouissement plat, les techniques de pré-codage sont utilisées pour former un signal de faisceau via l'utilisateur cible tout en réduisant les interférences des autres utilisateurs. En général, outre les méthodes de décomposition en valeurs singulières (SVD) à optimisation de capacité, les méthodes de pré-codage linéaire peuvent être classées selon deux approches : l'approche par forçage zéro (ZF) telle que ZF et la méthode ZF (RZF) régularisée / erreur quadratique moyenne minimale (MMSE). Cette approche cherche à minimiser l'interférence d'accès multiple parmi les utilisateurs et conduit à une architecture centralisée dans laquelle la station de base recueille la réponse de canal de tous les utilisateurs pour former la matrice de pré-codage. L'approche de pré-codage conjugué est basée sur l'algorithme de rapport maximum (MR), dans le but de maximiser la puissance de signal utile du côté réception. Cette approche utilise généralement le conjugué de la réponse de canal en tant que pré-codeurs, pour permettre aux signaux pré-codés émis par différentes antennes de s'ajouter "en phase" à l'emplacement du récepteur, ce phénomène est également appelé focalisation spatiale. L'approche de pré-codage conjugué conduit souvent à une architecture décentralisée dans laquelle un traitement par antenne est réalisable. La complexité de calcul est largement réduite par rapport à l'approche ZF. Dans cette partie, les différentes techniques de pré-codage sont présentées dans le contexte du système OFDM MU-MIMO, dans lequel chaque sous-porteuse OFDM est considérée comme un sous-canal à évanouissements plats. Un scénario de transmission d'une BS avec M antennes d'émission et K utilisateurs d'une seule antenne est considéré. Une synchronisation parfaite est supposée entre la station de base et les utilisateurs. [20]

2.11.1 SVD

Les techniques de pré-codage basées sur la SVD sont considérées comme les méthodes optimales pour optimiser les performances du système. En fait, le canal MIMO peut être constitué d'un ensemble de liaisons indépendantes et parallèles, le nombre maximal de liaisons étant égal au nombre minimal d'antennes d'émission et de réception.

Avec un CSI parfait, les canaux parallèles sont établis en appliquant SVD à la matrice de canaux :

$$\mathbf{H}_p = \mathbf{U}_p \mathbf{D}_p \mathbf{V}_p^H \quad (2.9)$$

Où : $\mathbf{U}_p \in \mathbb{C}^{M \times M}$ est utilisé par l'émetteur comme matrice de pré-codage, $\mathbf{V}_p \in \mathbb{C}^{K \times K}$ est multiplié par le signal du récepteur comme matrice de post-codage. De cette manière, les signaux sont transmis par l'intermédiaire de faisceaux indépendants, qui sont en fait les vecteurs propres de la matrice de corrélation de canaux $\mathbf{H}_p^H \mathbf{H}_p$. Les charges de puissance du faisceau sont les valeurs singulières au carré $\mathbf{D}_p^2$.

L'inconvénient de la méthode SVD est la complexité informatique élevée. De plus, la matrice de post-codage doit être communiquée aux utilisateurs pour décoder le signal reçu. [20]

2.11.2 MR

Avec le rapport maximal (MR), la station de base souhaite maximiser le SNR reçu de chaque flux en ignorant l'effet de l'interférence multiutilisateur signal reçu car il n'y a pas d'atténuation active des interférences. Ensuite, la matrice de pré-codage est donnée par

$$\mathbf{F}_{MR} = \alpha_{MR} \mathbf{H}^H \quad (2.10)$$

Où α_{MR} est un scalaire à normalisation contrôlant, la puissance d'émission et le rapport signal sur bruit.

MR maximise le gain de matrice de la transmission, mais dans la mesure où il néglige l'effet des interférences multiutilisateur, il fonctionne mal dans les scénarios à grande interférences. [21]

2.11.3 ZF

Un schéma de pré-codage linéaire qui supprime toute interférence, interférence entre symboles et inter-utilisateurs, est appelé forçage à zéro (ZF). La matrice de pré-codage de ZF est donnée par le pseudo-inverse du canal

$$\mathbf{F}_{ZF} = \alpha_{ZF} \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} \quad (2.11)$$

Où α_{ZF} est un scalaire normalisant

La principale différence entre ZF et MRT réside dans l'inversion de matrice, qui fournit la suppression d'interférence souhaitée. Ce calcul inverse peut entraîner une augmentation importante de la complexité. Mais, les propriétés des canaux MIMO massifs nous permettent de réduire considérablement la complexité des calculs par rapport à la réalisation d'inverses matriciels généraux. [21]

2.11.4 RZF/MMSE

En plus des pré-codeurs MR et ZF, il est possible d'utiliser une forme régularisée de pré-codage ZF (RZF). Il s'agit d'un pré-codeur linéaire situé entre MR et ZF, partageant des propriétés avec les deux. La matrice de pré-codage RZF peut être écrite en tant que

$$\mathbf{F}_{RZF} = \alpha_{RZF} \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H + \beta_{reg} \mathbf{I}_{KN})^{-1} \quad (2.12)$$

Où la constante de régularisation β_{reg} peut être utilisée pour échanger entre gain de matrice et suppression d'interférence. Si β_{reg} est sélectionné pour minimiser l'erreur quadratique moyenne (MSE) $E \|\mathbf{p} - \frac{1}{\sqrt{\rho}} \hat{\mathbf{p}}\|^2$, où ρ est une constante de mise à l'échelle, $\mathbf{p}$ est Les symboles transmis aux utilisateurs, $\hat{\mathbf{p}}$ Les signaux reçus par les utilisateurs, nous obtenons le pré-codeur minimal MSE (MMSE). [21]

2.12 Défis de Massive MIMO

Les systèmes Massive MIMO 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. Selon la littérature actuelle sur les MIMO massifs [22], les principales orientations de recherche sur les MIMO massives sont répertoriées dans la figure 2.12

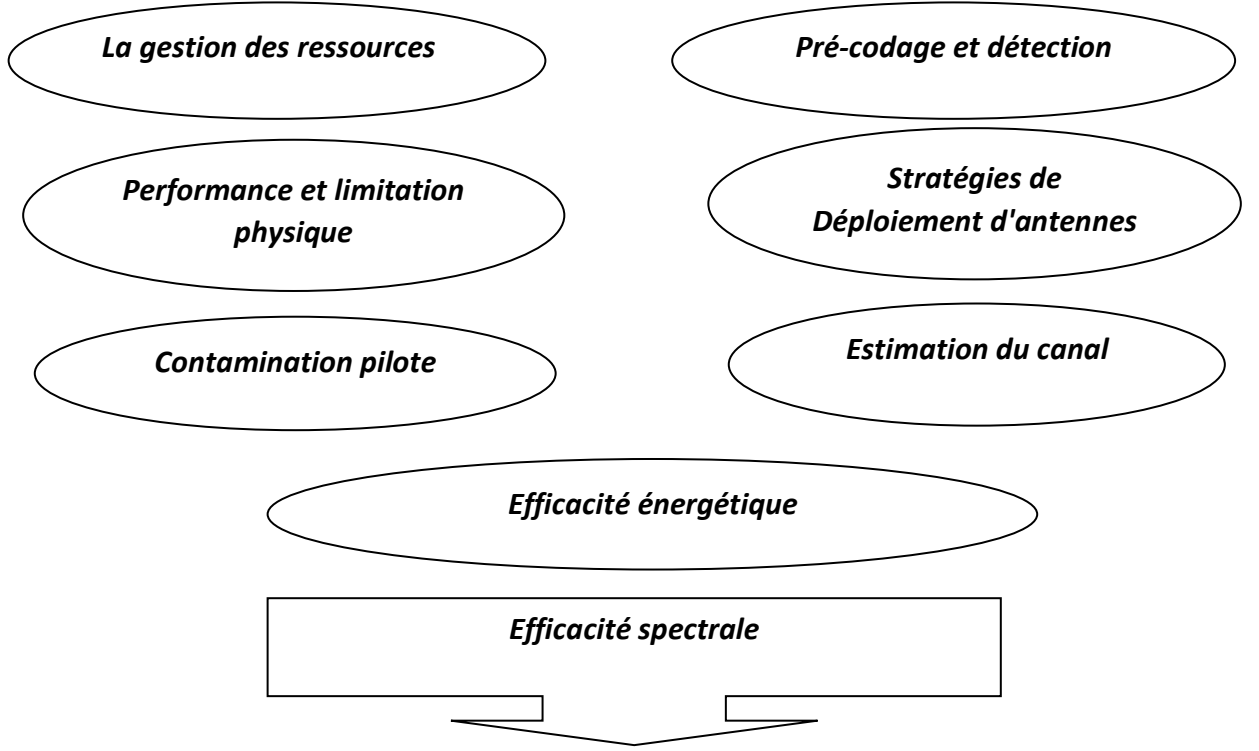


Figure 2.12. Les défis de Massive MIMO

2.13 Efficacité spectrale (SE)

L'efficacité d'un système de communication était traditionnellement mesurée par l'efficacité spectrale 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 du signal [23] :

$$SE = \frac{R}{B}(\text{bit/s/Hz}) \quad (2.15)$$

Théorème 1 : Si une estimation de canal MMSE est utilisée, la capacité de canal ergodique UL de UE k dans la cellule j est délimitée par SE_{jk}^{UL} [bit/s/Hz] donné par :[3]

$$SE_{jk}^{UL} = \frac{\tau_u}{\tau_c} E\{\log_2(1 + \text{SINR}_{jk}^{UL})\} \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (2.16)$$

Théorème 2 : La capacité de canal ergodique DL de UE k dans la cellule j est délimitée par [3] :

$$SE_{jk}^{DL} = \frac{\tau_d}{\tau_c} \log_2(1 + \text{SINR}_{jk}^{DL}) \quad (2.17)$$

$$\text{Où : } \tau_c = \tau_p + \tau_u + \tau_d \quad (2.18)$$

Avec : τ_c le temps de cohérence

τ_p Signaux pilotes UL

τ_u Signaux de données UL

τ_d Signaux de données DL

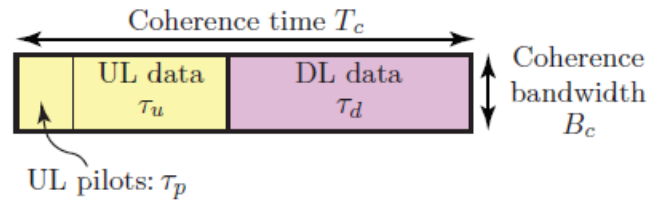


Figure 2.13. Block de cohérence.

2.14 Conclusion

MIMO signifie Multiple-Input/Multiple-Output ; en français, « entrées multiples/sorties multiples ». Cette technologie est devenue essentielle pour les systèmes de communication WLAN, LTE et 5G. Elle 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. Contrairement à un système possédant une seule entrée et une seule sortie (SISO), l'utilisation de la technologie MIMO peut accroître sensiblement la capacité de liaison des systèmes WLAN, LTE et 5G [23]. 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.

CHAPITRE 3 SIMULATION ET RÉSULTAT

3.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, nous exposons les résultats graphiques de simulation, obtenus par le logiciel Matlab, et ces explications. Les simulations présentent l'impact de différents paramètres sur l'efficacité spectrale d'un système MIMO massif.

3.2 Amélioration de SNR

L'objectif d'un système de communication sans fil est de servir autant d'utilisateurs que possible avec le débit de données le plus élevé possible, compte tenu de contraintes telles que la limite de puissance de rayonnement et le budget de fonctionnement. Pour améliorer le débit de données, la clé est d'améliorer le rapport signal sur bruit (SNR).

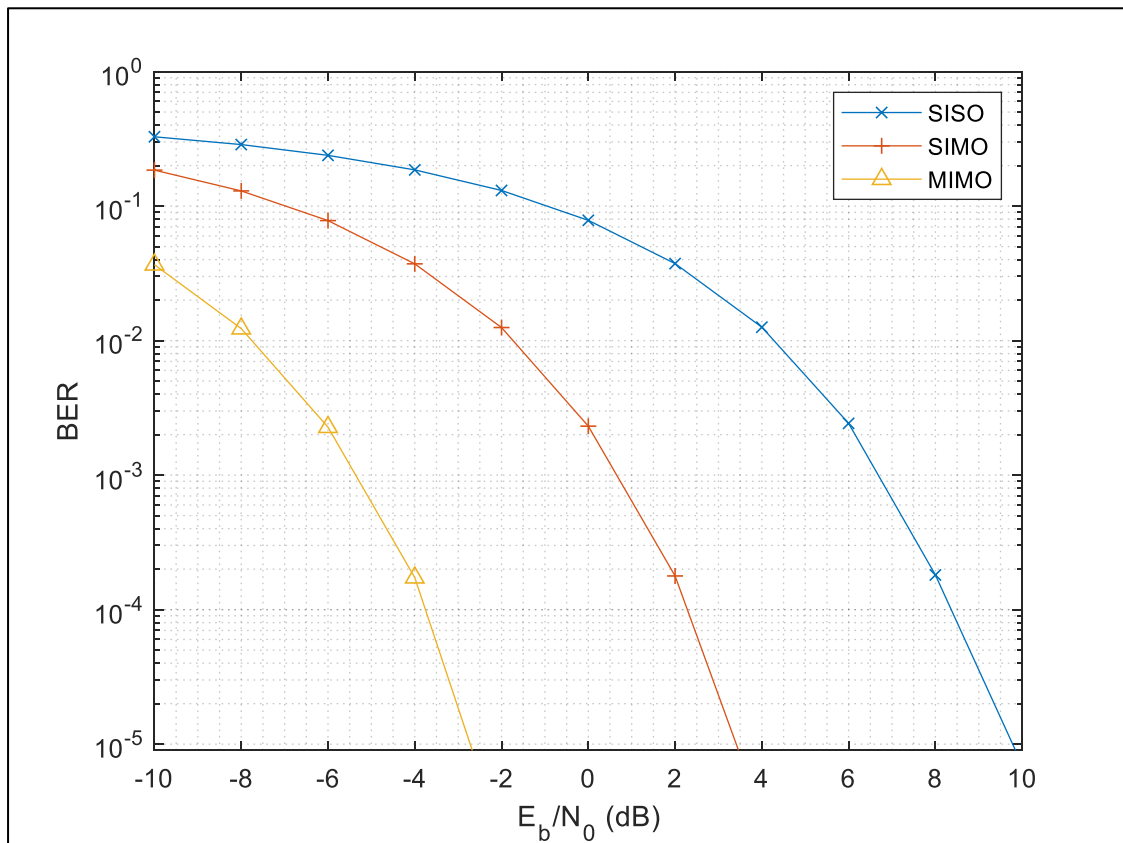


Figure 3.1. BER en fonction de SNR pour différent type de MIMO

La figure 3.1 présente la variation de taux d'erreur BER en fonction de rapport signal sur bruit pour des systèmes dotés par des antennes SISO (1x1), SIMO (1x4) et MIMO (4x4), dans le canal sans fil le plus simple a une propagation en visibilité directe (LOS). Cette figure montre comment l'adoption de réseaux d'antennes peut aider à améliorer le SNR et la capacité d'une liaison sans fil.

E_b / N_0 (The energy per bit to noise power spectral density ratio) est un paramètre important dans la communication numérique ou la transmission de données. Il s'agit d'une mesure normalisée de SNR, également appelée "SNR par bit". 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.

3.3 Capacité de canal

La figure ci-après présente la variation de capacité de canal en fonction du rapport signal/bruit pour différent matrice d'antennes MIMO massif, avec une estimation de canal de Rayleigh.

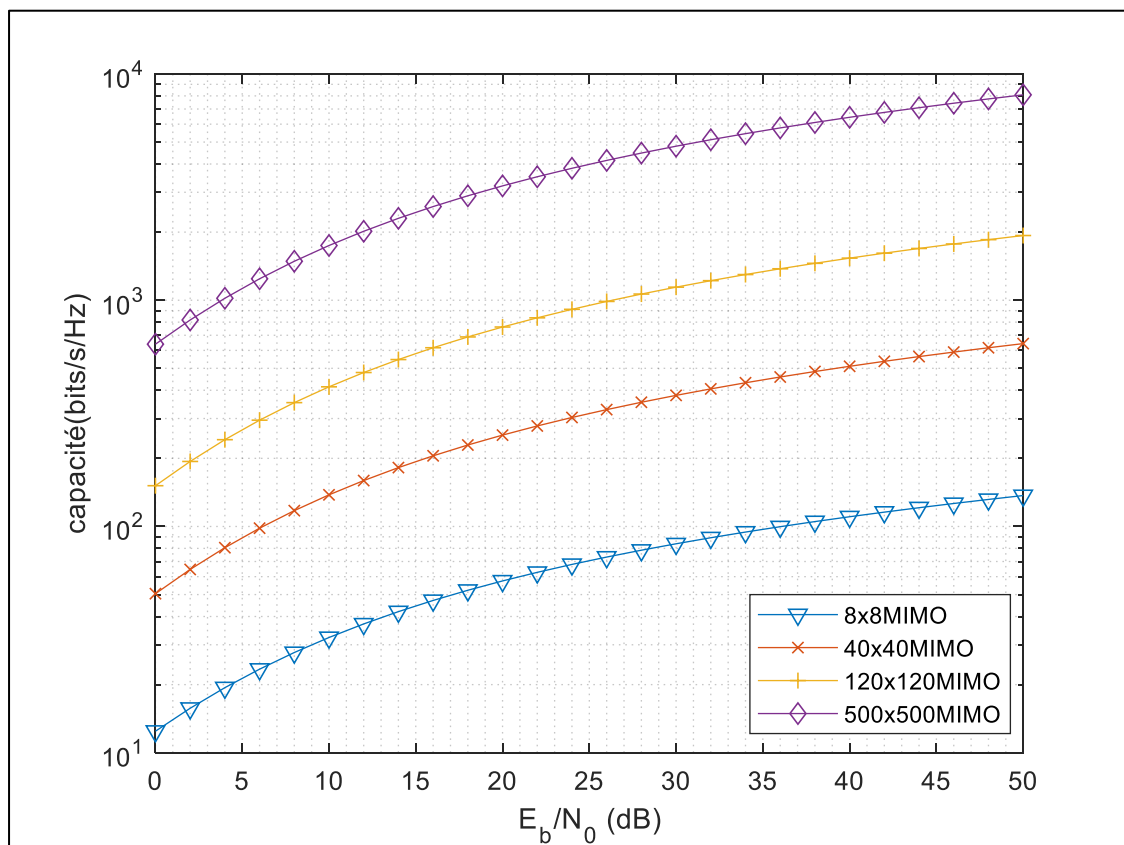


Figure 3.2. Capacité du canal en fonction de SNR pour différente M

La figure 3.2 montre la comparaison de la capacité du système entre plusieurs implantations d'antennes MIMO massif. Le résultat confirme que l'augmentation de nombre d'antenne dans le système donne une meilleure capacité en améliorant le rapport SNR.

3.4 TDD et FDD

La Figure 3.3 compilé pour une transmission en liaison descendante avec $K = 10$ utilisateurs, un SNR= 5 dB, des canaux à atténuation de Rayleigh non corrélés et un schéma de pré-codage ZF. Cette simulation compare la SE obtenue avec CSI parfait à la performance lorsque CSI est estimée avec des séquences pilotes de longueur τ_p . La SE est représentée en fonction du nombre d'antennes M de BS, et nous comparons le mode TDD pour $\tau_p = K = 10$ avec le mode FDD pour $\tau_p = 10, \tau_p = M$ ou $\tau_p = \min(M; 50)$ [4].

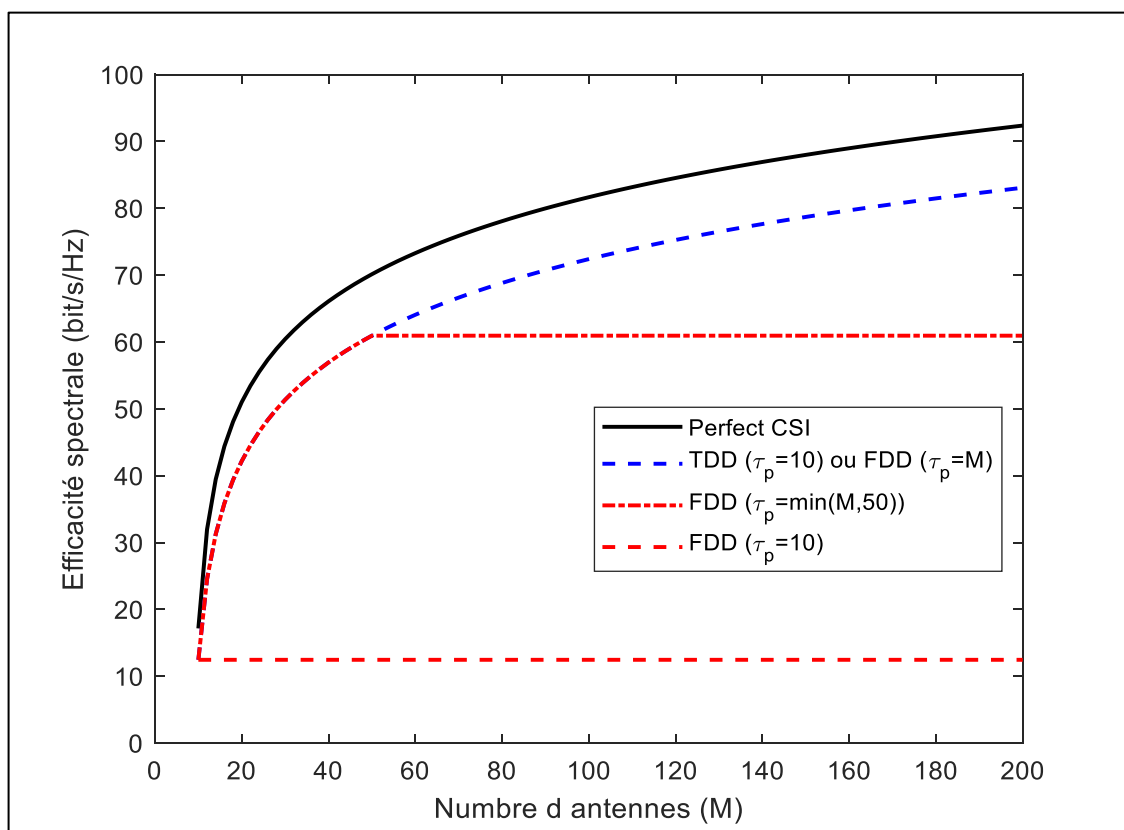


Figure 3.3. L'efficacité spectral sur la liaison descendante en fonction de nombre d'antennes M de BS par différentes techniques de transmission

En mode TDD, la figure 3.3 présente une perte de performance visible par rapport à un CSI parfait. La perte de performance pour le pré-codage ZF, due aux erreurs d'estimation qui rendent la suppression des interférences plus difficile. Nous

notons que les pertes de performance sont sensiblement constantes quel que soit le nombre de BS antennes, les systèmes TDD bénéficient donc toujours de l'ajout de nouvelles antennes. En revanche, les systèmes FDD ne bénéficient de l'ajout d'antennes supplémentaires que si les séquences pilotes sont également rallongées

3.5 Pré-codage

Dans les cas suivants, il y a une nette augmentation du SE en augmentant le nombre d'antennes (M). La différence est apparue de type de traitement utilisé pour réduire l'interférence.

3.5.1 Liaison montante (UL)

Nous allons maintenant comparer les différents schémas de combinaison de réception. Dans cette simulation, nous considérons $K = 10$ UE par cellule et un nombre variable d'antennes BS.

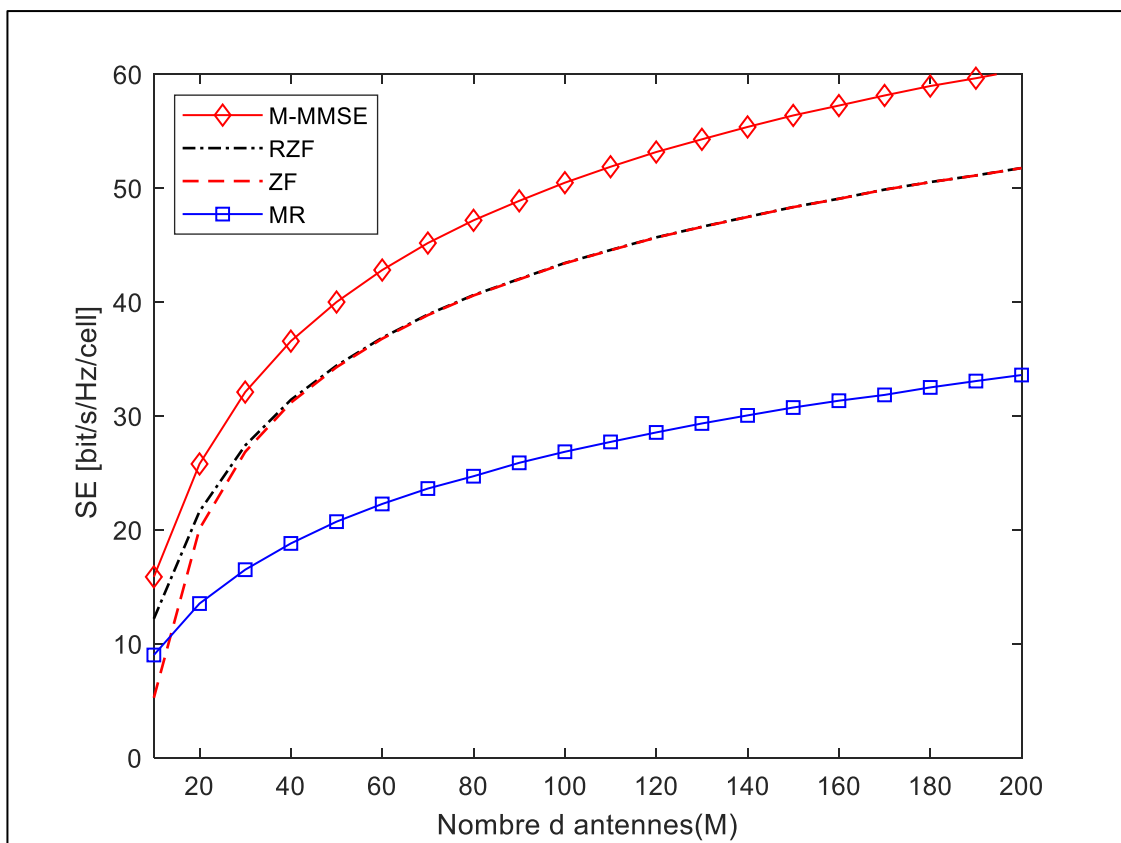


Figure 3.4. L'efficacité spectrale de liaison montante en fonction de nombre d'antennes M de BS pour des différents pré-codages

La Figure 3.4 montre la somme de la moyenne SE des liaisons montantes en fonction du nombre d'antennes BS pour la réutilisation universelle de pilote avec $f = 1$. M-MMSE donne la plus grande SE de la Figure 3.4. La SE réduit un peu avec chaque approximation faite pour obtenir un schéma moins complexe que M-MMSE. Notez que RZF et ZF donnent essentiellement la même efficacité spectrale dans la gamme $M \geq 20$ 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 annulant également une grande partie du signal souhaité. 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.

3.5.2 Liaison descendante (DL)

Nous allons maintenant comparer la SE obtenue avec différents schémas de pré-codage. Nous considérons le même scénario que dans la simulation UL, ce qui signifie que $K = 10$ UE par cellule et un nombre variable d'antennes BS [3].

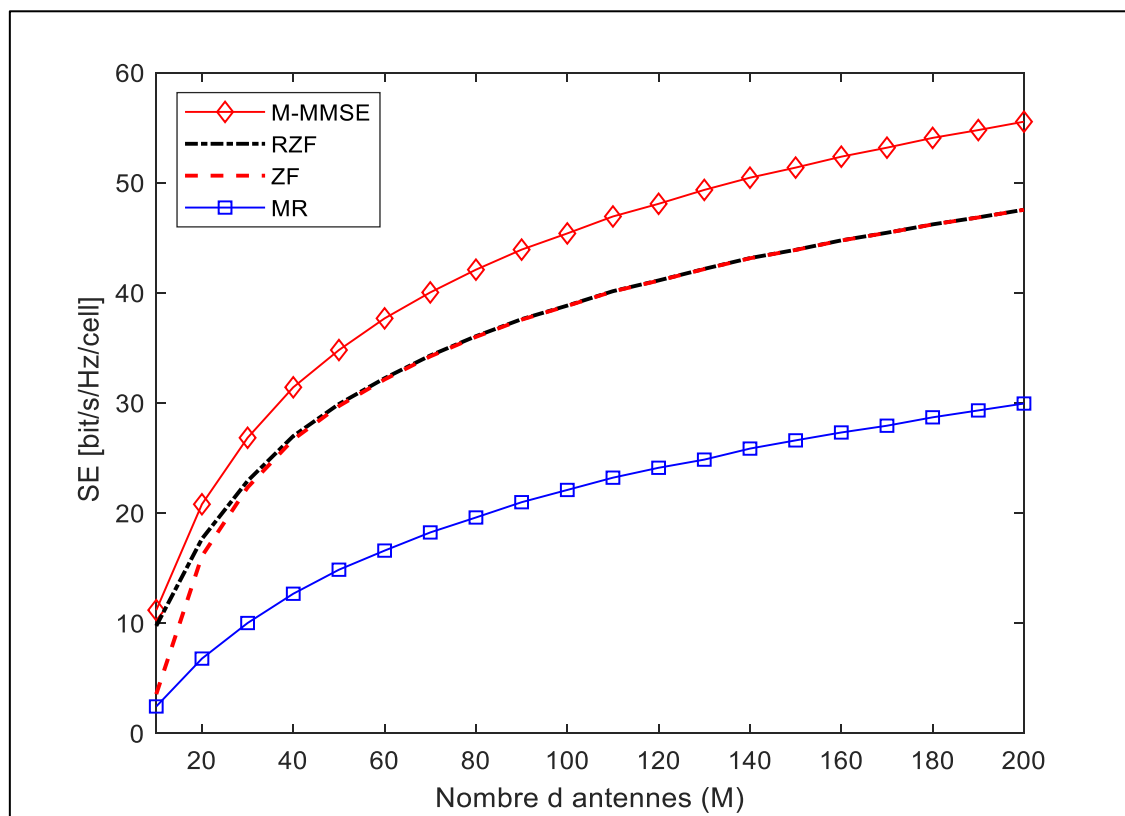


Figure 3.5. L'efficacité spectrale de liaison descendante en fonction de nombre d'antennes M de BS pour des différents pré-codages

La figure 3.5 montre la somme moyenne SE de liaison descendante avec $f = 1$. Nous considérons le pré-codage M-MMSE, RZF, ZF et MR. Ces schémas de pré-codage se comportent de la même manière qu'à la liaison montante. Le M-MMSE fournit le SE le plus élevé pour un nombre quelconque d'antennes. RZF et ZF fournissent presque le même SE, sauf que ZF pose des problèmes de robustesse pour $M < 20$ antennes. Enfin, MR fournit le SE le plus bas parmi tous les schémas.

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 entre une mise en œuvre pratique.

3.6 Réutilisation du pilote

Pour avoir un aperçu de l'effet de la réutilisation pilote, La Figure 3.6 présente l'efficacité spectrale en tenant compte du nombre d'utilisateurs et du facteur de réutilisation pilote pour le schéma de détection ZF. Elle montre comment l'efficacité spectrale du système se dégrade avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs et du facteur de réutilisation pilote.

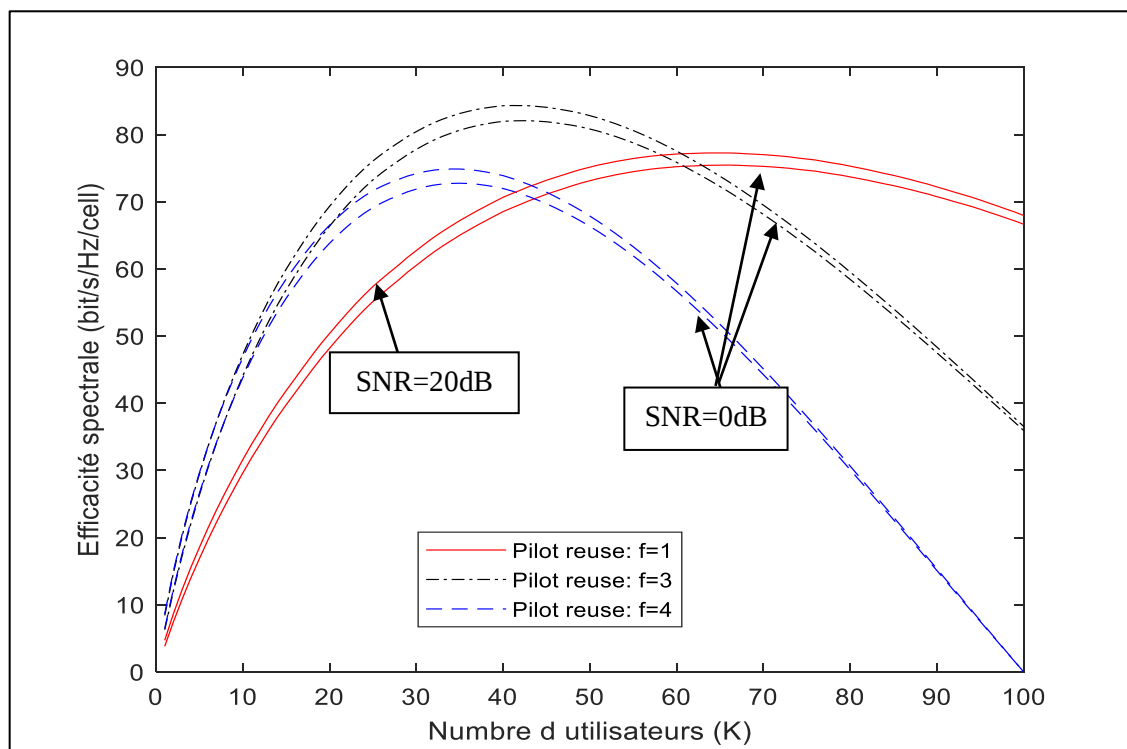


Figure 3.6. L'efficacité spectrale en fonction de nombre d'utilisateurs, avec différents facteurs de réutilisation pilotes. Pour SNR =0dB et SNR=20dB

La première observation de la figure est que les deux niveaux de SNR = 0 dB et 20 dB, donnent presque les mêmes performances. Cela montre que Massive MIMO fonctionne aussi bien avec des SNR élevés que faibles. Ensuite, nous remarquons que différents facteurs de réutilisation des pilotes sont souhaitables pour différentes charges. Une réutilisation pilote de $f = 3$ est souhaitée à faible charge, tandis que $f = 1$ est nécessaire lorsque K est grand. En sélectionnant correctement f , corespand aux sommets des courbes de la figure , Massive MIMO peut fournir un SE élevé sur un large interval de charge d'utilisateurs.

3.7 Optimisation de SE en fonction de M et K

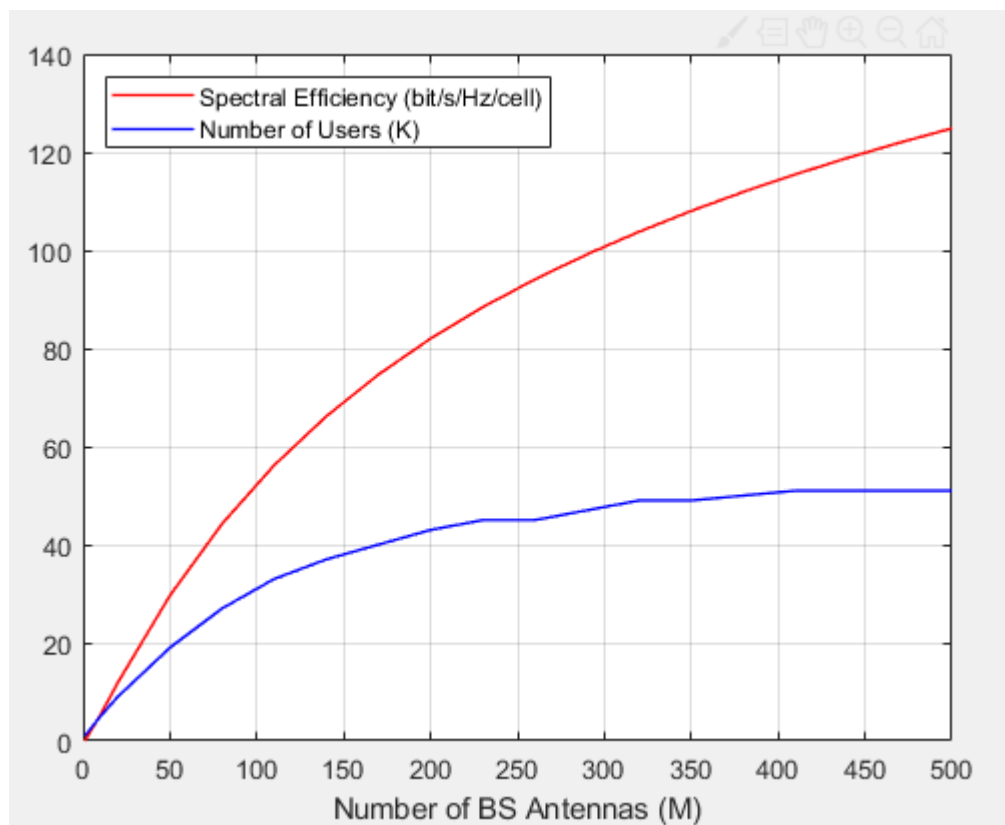


Figure 3.7. L'efficacité spectrale en fonction de nombre d'antennes M de BS et le nombre d'utilisateurs optimal pour un SE le plus élevé.

La Figure 3.7 montre le SE en fonction du nombre d'antennes M de BS. Fixant le facteur de réutilisation à $f=3$ et un pré-codage ZF est utilisé pour augmenter le nombre d'antennes avec un SNR= 0 dB. Le nombre d'utilisateurs actifs est optimisé pour chaque M afin d'obtenir l'efficacité spectrale le plus élevé. Les nombres d'utilisateurs optimaux sont également indiqués sur la figure.

Il est important de noter que le nombre d'utilisateurs actifs augmente parallèlement au SE de la Figure 3.7. Si l'on divise la courbe supérieure par la courbe du bas, cela donne le SE par utilisateur.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre l'impact de différents paramètres sur l'efficacité spectrale d'un système MIMO massif est présenté. D'où on peut conclure que : l'augmentation de nombre des antennes dans la BS et un pré-codage linéaire comme le RZF, améliore le SE. Le mode TDD est le meilleur choix pour les systèmes MIMO massif, et que la bonne gestion de différents facteurs de réutilisation des pilotes peut fournir un SE élevé sur un large interval de charge d'utilisateurs k .

Conclusion générale

Le besoin d'accueillir plus d'utilisateurs à des débits de données plus élevés avec une meilleure fiabilité tout en consommant moins d'énergie a imposé la naissance d'une nouvelle génération de communication mobile la 5G basant, parmi autre, sur la technique MIMO massif. Ce mémoire est consacré à l'étude de l'efficacité spectrale de système MIMO massif pour la 5G.

De manière générale, il présente au chapitre 1 un aperçu introductif de la technologie 5G Mobile et de ses projets en cours ; Les systèmes de communication de la prochaine génération, évoluent vers une flexibilité accrue dans différents aspects. Une flexibilité accrue est la clé pour répondre aux diverses exigences. La flexibilité de 5G NR offre trop d'opportunités de recherche ouvertes par rapport aux générations précédentes de communications cellulaires.

Ensuite, au chapitre 2, un focus particulier sur les systèmes MIMO massifs a été présenté. Passer en revue les avantages et les défis de cette technologie. Massive MIMO marque une rupture nette avec la pratique actuelle en utilisant un excès important des antennes de service sur les terminaux actifs. Des antennes supplémentaires permettent de concentrer l'énergie dans des régions de plus en plus petites afin d'améliorer considérablement le débit et l'efficacité énergétique rayonnée. Bien que la technologie MIMO massive supprime de nombreux problèmes de recherche traditionnels, Il reste encore des défis à relever pour concrétiser tout le potentiel de la technologie, notant la complexité de calcul, la réalisation d'algorithmes de traitement distribué, le problème d'interférence inter et intra-cellulaire et la contamination des pilotes.

Le chapitre 3 présente l'analyse des résultats de simulation de l'efficacité spectrale en fonction des variétés de paramètres des systèmes MIMO massif d'où on peut garantir que l'augmentation de nombre des antennes dans la BS améliore le SE. Le mode duplex par répartition dans le temps TDD assure une bonne performance en ajoutant de nouvelles antennes. les techniques de précodage linéaire ont présenté une relation inverse entre complexité et efficacité spectrale . En outre, une bonne gestion de différents facteurs de réutilisation des pilotes peut fournir un SE élevé sur un large interval de charge d'utilisateurs .

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] HUANG, H., PAPADIAS, C. B., VENKATESAN, S. MIMO Communication for cellular Networks. Springer Science & Business Media, 2011.
- [3] Björnson, Emil, Jakob Hoydis, and Luca Sanguinetti. "Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency." *Foundations and Trends® in Signal Processing* 11.3-4 (2017): 154-655.
- [4] Xiang, Wei, Kan Zheng, and Xuemin Sherman Shen, eds. 5G mobile communications. Springer, 2016.
- [5] Bisognin, Aimeric. Évaluation de technologies organiques faibles pertes et d'impression plastique 3D afin de contribuer au développement de solutions antennaires innovantes dans la bande 60 GHz–140GHz. Université Nice Sophia Antipolis, 2015.
- [6] Hajri, Salah Eddine. L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs. Université Paris-Saclay, 2018.
- [7] LIEN, Shao-Yu, SHIEH, Shin-Lin, HUANG, Yenming, et al. 5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access. IEEE communications magazine, 2017, vol. 55, no 6, p. 64-71.
- [8] 5G Frame Structure. AUGUST 7, 2018[En ligne]. <http://spectracells.com/2018/08/07/5g-frame-structure/> [consulté le 20 Mai 2019].
- [9] 5G NR Terminologies – Subcarrier Spacing, Fram-Subframe, Slot and Symbol. JUNE 10, 2018. [En ligne]. <http://www.techplayon.com/understanding-basic-5g-nr-terminologies-subcarrier-spacing-frame-and-subframe-slot-and-ofdm-symbols/> [consulté le 20 Mai 2019].
- [10] 5G/NR-FrameStructure[Enligne]. https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure.html [consulté le 20 Mai 2019].
- [11] NR Resource Block Definition and RBs Calculation. April 24,2019 [En ligne]. <http://www.techplayon.com/nr-resource-block-definition-and-rbs-calculation/>[consulté le 27 Mai 2019].

- [12] CHALLITA, Frédéric, MARTINEZ-INGLES, Maria-Teresa, LIÉNARD, Martine, et al. Line-of-Sight Massive MIMO Channel Characteristics in an Indoor Scenario at 94 GHz. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, p. 62361-62370.
- [13] Study Paper on: Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technology
- [14] NASRI Amel; BENFETIMA Amel. Study and Simulation of the Transmit Diversity Technique in LTE Systems. 2017. <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/handle/123456789/3904>
- [15] Rozé, Antoine. *Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques*. Diss. INSA de Rennes, 2016.
- [16] The Role of Massive MIMO in 5G. Michael Wang. Oct 23, 2018 [Enligne]. <https://medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61>[consulté le 03 Avril 2019].
- [17] Abboud, Ahmad. Interference mitigation in 5G mobile networks: Uplink pilot contamination in TDD massive MIMO scheme. Diss. Limoges, 2017.
- [18] HAJRI, Salah Eddine. (Thèse de doctorat 2018). L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs. Université Paris-Saclay.
- [19] Sun, Diwei. (Thèse doctorat 2017). Spectral Efficiency and Energy Efficiency in Massive MIMO Systems.
- [20] Fu, Hua. *Spectral resource optimization for MU-MIMO systems with partial frequency bandwidth overlay*. Diss. INSA de Rennes, 2015.
- [21] Luo, Fa-Long, and Charlie Zhang, eds. Signal processing for 5G: algorithms and implementations. John Wiley & Sons, 2016.
- [22] Zhao, Long, et al. *Massive MIMO in 5G Networks: Selected Applications*. Springer International Publishing, 2018.
- [23] Jaouadi, Randa. *Compromis efficacité énergétique et efficacité spectrale pour les objets communicants autonomes*. Diss. Nantes, 2017.