
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohammed Boudiaf à M'sila

Faculté de Technologie

Département d'Électronique



Mémoire de Master

Domaine : Systèmes des Télécommunications

Spécialité : Télécommunications

Thème

Les MIMO massifs - Au-delà de la 4G et une base
pour la 5G

Présenté par :

- ABELLAH Ahmed Yahia

- REGGANI Ahmed

Sujet proposé et dirigé par :

- Dr. BENMAHMOUD Slimane

Devant le jury composé de :

.....

Dr. BENMAHMOUD Slimane

.....

Président

Encadreur

Examineur

Projet N : / 2020

DÉDICACES

This thesis is dedicated to my parents, for their endless love, support and encouragement.

Karizma

جميل أن يجني المرء ثمار كده وتعبه والأجمل أن يهديها عن طيبة لغيره بغية تقاسم
طعم النجاح جميعا.

وقطوف علمي أهديها بحب خالص للوالدين الكريمين متمنيا لهما دوام الصحة
والعافية.

إلى الذي علمني حب العلم أبي الحبيب وغرس فيا روح المسؤولية والصبر اقول لهم
أنتم وهبتموني الحياة على شغف الاطلاع والمعرفة.

إلى كافة أفراد عائلتي إلى اخوتي الأعزاء وبانلخصوص اخي العزيز عبد الرحمن .

إلى أعز أصدقائي واحبابي (رفقاء الدرب) إلى زملائي في الدراسة وبانلخصوص
أخي الذي لم تده امي أحمد يحيى اعبله الذي رافقني في المشوار الثانوي و
الجامعي .

وفي الاخير اهدي عملي بمنتهى الاعتزاز إلى نفسي عازما على المزيد من الجد
والمثابرة واملا في بلوغ مرام التوفيق ونبيل الدرجات العلى وراجيا من المولى عز
وجل أن أجد القبول والنجاح.

رقاني أحمد

REMERCIEMENTS

First and foremost, I have to thank my parents for their love and support throughout my life.

Thank you both for giving me strength to reach for the stars and chase my dreams.

To my brothers Moha, Ghanino and my princess Samah : thank you for being there.

To the person who supported me in my darkest time, for being a friend, a sister and everything I could wish for, sorry for not being the same person to you and make it difficult to be on my side, I wish someday I could show you my true me, until that day , be well.

To my friends Achraf and Zaki, thank you for being my brothers.

To all my friends and teachers in M'sila, thank you for not making me fell like a stranger between you guys. Thank you for being my second family.

Karizma

قال تعالى: "لئن شكرتم لأزيدنكم" صدق الله العظيم قال رسول الله صلى الله عليه وسلم
:"من صنع إليكم معروفا فكافئوه فإن لم تجدوا ماتكافونه فادعوا له حتى تروا أنكم قد
كافأتموه" لقد أمرنا الله جل في علاه أن نشكره على نعمه التي انعمها علينا وفضلنا بها
على خلقه الا وهي نعمة طلب العلم، وان اعاننا على أداء هذا الواجب ووفقنا لإنجاز
هذا العمل. نتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى كل من ساعدنا من قريب أو بعيد
على إتمام هذا العمل. الشكر موصول للدكتور سليمان بن محمود على قبوله الإشراف
على المذكرة المتواضعة. ومساعدته لنا على إعداد هذا العمل الشكر والتقدير إلى زميلي
في اعداد هذا العمل ومثمننا مجهوداته الجبارة في سبيل إتمام هاته المذكرة.

جزاكم الله عنا خير الجزاء

رقاني أحمد

SOMMAIRE

Introduction générale	1
1 Introduction aux communications mobiles cellulaires	3
1.1 Introduction	4
1.2 Les communications mobiles cellulaires : un guide	5
1.2.1 L'évolution des technologies mobiles	5
1.3 La 5G : Technologie, spectre et facteurs conducteurs	12
1.3.1 Les facteurs conducteurs	13
1.3.2 Les technologies 5G	14
1.3.3 Le spectre 5G et la bande des ondes millimétriques	19
1.4 La conception des formes d'ondes pour la 5G	20
1.5 Les techniques d'accès multiple : de la 1G à la 5G	21
1.6 Conclusion	23
2 Les systèmes MIMO massifs	24
2.1 Les systèmes MIMO conventionnels	25
2.1.1 Modèle de canal MIMO	25
2.2 Les systèmes MIMO multi-utilisateurs	26
2.2.1 Modèle de système et hypothèses	26
2.2.2 La transmission uplink	27
2.2.3 La transmission downlink	28
2.2.4 Le traitement linéaire (Linear Processing)	29
2.2.5 Estimation du canal	33

2.3	Les systèmes MIMO massifs	34
2.3.1	Comment-ils fonctionnent les systèmes MIMO massifs? . .	36
2.3.2	Pourquoi les systèmes MIMO massifs?	37
2.3.3	Les challenges dans les systèmes MIMO massifs?	38
3	Simulations et Résultats	39
3.1	Méthodologie	40
3.2	Résultats des simulations	40
	Conclusion générale	45

TABLE DES FIGURES

1.1	1G network architecture block diagram.	7
1.2	Communications downlink (DL) et uplink (UL).	22
2.1	Modèle générique d'un canal MIMO.	25
2.2	Systèmes MIMO multi-utilisateurs.	27
2.3	Schéma fonctionnel de la détection linéaire à la BS.	30
2.4	Protocole de transmission de TDD Massive MIMO.	36
3.1	Limites inférieures et valeurs évaluées numériquement de l'efficacité spectrale vs. M (nombres d'antennes de la BS) avec des traitements MRC, ZF et MMSE pour les cas CSI parfaite et imparfaite.	41
3.2	Efficacité spectrale vs. M (nombres d'antennes de la BS) avec des traitements MRC, ZF et MMSE pour les cas CSI parfaite et imparfaite ($p_u = E_u/M$ et $p_u = E_u/\sqrt{M}$).	42
3.3	La même que la Figure 3.2 , mais avec $E_u = 5$ dB.	43

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des dernières années, le trafic de données (mobile et fixe) a augmenté de façon exponentielle en raison de la croissance spectaculaire des smartphones, tablettes, ordinateurs portables et de nombreux autres appareils consommateurs de données sans fil. La demande de trafic de données sans fil sera encore plus à l'avenir. Il y aura une demande énorme pour le trafic de données mobiles et le nombre d'appareils connectés. Le trafic mondial de données mobiles est passé à 15,9 exaoctets par mois en 2018, soit une multiplication par 6 par rapport à 2014. En outre, le nombre d'appareils mobiles et de connexions devrait augmenter considérablement au cours des prochaines années. De nouvelles technologies sont nécessaires pour répondre à cette demande. Lié au trafic de données sans fil, le paramètre clé à considérer est le débit sans fil (the wireless throughput) (bits/s).

Dans la communication sans fil, les signaux transmis sont atténués par l'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples et par l'ombrage dû aux grands obstacles entre l'émetteur et le récepteur, ce qui représente un défi fondamental pour une communication fiable. La transmission avec des antennes à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) est une technique de diversité bien connue pour améliorer la fiabilité de la communication. En outre, avec plusieurs antennes, plusieurs flux peuvent être envoyés et par conséquent, nous pouvons

obtenir un gain de multiplexage qui améliore considérablement la capacité de communication. Les systèmes MIMO ont attiré une attention considérable au cours des dernières décennies, et sont maintenant intégrés dans plusieurs normes sans fil de nouvelle génération (par exemple, LTE-Advanced, 802.16m).

Massive MIMO est une technologie candidate prometteuse pour les systèmes sans fil de nouvelle génération. Récemment, il y a eu un grand intérêt pour cette technologie. dans ce mémoire, nous étudions les principes fondamentaux de Massive MIMO, y compris les aspects de propagation favorables, l'efficacité spectrale,... etc.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. On a introduit dans **le premier chapitre** (qui est commun avec celui du mémoire intitulé "*Les modulations multi-porteuses à base de bancs de filtres (FBMC)*" préparé par notre collègue : *Dilmi Zakarya*) les systèmes de communication mobiles cellulaires.

Dans **le deuxième chapitre**, on révèle en détails les secrets des systèmes MIMO massifs.

Dans **le troisième chapitre**, on étudie la performance des systèmes MIMO massifs où on concentre sur l'efficacité spectrale.

Finalement, la conclusion synthétise notre travail et présente des nouvelles perspectives de recherche dans le domaine.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION AUX COMMUNICATIONS MOBILES CELLULAIRES

1.1 Introduction

En 3 avril 1973, Martin Cooper¹ a effectué la première conversation au monde sur un téléphone cellulaire portatif [1] :

I'm calling you from a cell phone, a real handheld portable cell phone.

L'appareil mobile utilisé lors de cette conversation était un Motorola DynaTAC pesant environ 2.5 livres (c-à-d., 1.34 kgs) et coûtant 9000 dollars américains. Cet événement historique a déclenché un mouvement qui allait changer la vie de tant de gens. Ce changement de vie va bien au-delà de la prise en charge des utilisateurs mobiles, il a fait boule de neige² pour créer des appareils très complexes (actuellement appelés *smart phones*) qui nous aident à rester connectés au monde. Ces appareils répondent non seulement à nos besoins de communication vocale et de données, mais ils prennent également en charge un très large éventail d'applications telles que la tenue de nos amis informés sur les réseaux sociaux, la concurrence avec les jeux en ligne, la consommation et la production de contenu vidéo, la réalisation de mesures médicales. , en utilisant des services géo-localisés, etc.

Les technologies mobiles cellulaires ont pu rester un point focal pour introduire des fonctionnalités et des avantages nouveaux et passionnants pour l'utilisateur final.

On aborde ici les technologies conductrices derrière la conception des systèmes *new radio* (NR) 5G, qui se concentre sur des solutions pour prendre en charge les nouveaux services 5G dans les transmissions de liaison montante (uplink (UL), *en Anglais*) avec des exigences telles que la faible latence, la haute fiabilité, et l'économie d'énergie.

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Martin_Cooper_\(inventor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Martin_Cooper_(inventor))

2. Faire boule de neige = provoquer la croissance exponentielle d'un événement, d'un phénomène.

1.2 Les communications mobiles cellulaires : un guide

1.2.1 L'évolution des technologies mobiles

Dans cette section, nous allons présenter les technologies d'accès radio mobile (mobile radio access technologies (MRAT), *en Anglais*) et comprendre leurs avantages évolutifs.

Le spectre est très précieux pour les opérateurs et reste nécessaire pour augmenter le débit du système et des utilisateurs. Il existe une tendance à l'échelle de l'industrie non seulement pour utiliser le spectre sous licence, mais aussi pour embrasser le spectre sans licence (traditionnellement utilisé par les appareils WiFi) et le spectre partagé chaque fois que cela est possible.

A. Les systèmes cellulaires de la 1G :

Le système cellulaire mobile de la première génération (1G) a été créé pour permettre les communications vocales et prendre en charge les utilisateurs mobiles lorsqu'un appel vocal se transfère vers une autre station de base (base station (BS), *en Anglais*) lorsque l'utilisateur mobile traverse physiquement l'environnement cellulaire. La technologie utilisée était la modulation de fréquence analogique (FM) et le spectre était divisé en segments de 30 kHz, appelés canaux. Un seul utilisateur a utilisé l'intégralité du canal pendant la durée de son appel. Ce système est appelé services de téléphonie mobile avancés (advanced mobile phone services, (AMPS), *en Anglais*) et est appelé le système cellulaire de la 1G [2].

Afin de prendre en charge une large zone de couverture, une technique de réutilisation des fréquences a été introduite où les mêmes canaux de fréquence pouvaient être réutilisés par d'autres utilisateurs, en même temps, tant que la distance était suffisamment grande pour causer des interférences minimales. Cette interférence est appelée interférence co-canal.

Afin d'augmenter la capacité globale du système, une nouvelle technologie appelée AMPS à bande étroite (narrowband (N)-AMPS, *en Anglais*) a été introduite où l'espacement des canaux a été réduit à 10 kHz. De même, dans le but d'introduire des services de données (qui n'étaient pas pris en charge dans la AMPS), la tech-

nique des données de paquets numériques cellulaires (cellular digital packet data (CDPD), *en Anglais*) ont été proposées qui utilisaient des canaux de fréquence lorsque les utilisateurs vocaux n'étaient pas présents. Cependant, il a été rapidement déterminé qu'un réseau sans fil intégré (voix et données) était nécessaire pour fournir efficacement ces services. Des détecteurs discriminatoires simples et robustes ont été utilisés qui étaient réalisables, mais sensibles aux ondes FM aléatoires et aux évanouissements profonds dus aux trajets multiples observés dans l'environnement radio [3],[4].

Le modèle de base d'un réseau cellulaire de la 1G est représenté sur la figure 1.1. Afin d'augmenter la capacité du réseau, les cellules peuvent être divisées en cellules plus petites appelées des secteurs. Le bureau de commutation de téléphonie mobile (the mobile telephone switching office (MTSO), *en Anglais*) se connecte aux stations d'émetteur-récepteur de base (the base transceiver stations (BTS), *en Anglais*) et au réseau téléphonique public commuté (the public switched telephone network (PSTN), *en Anglais*). Il contrôle également les transferts intercellulaires, l'acheminement, l'enregistrement, l'authentification des appels, etc. Il s'agit d'un réseau à commutation de circuits (a circuit switched (CS)-based network, *en Anglais*). Le réseau utilise un spectre sous licence pour fournir les services vocaux.

Les normes cellulaires analogiques 1G déployées à l'échelle mondiale sont répertoriées ci-dessous. Notez qu'il n'existait pas de norme globale unique.

- *Advanced mobile phone services (AMPS)*- Les Etats Unis.
- *Nordic mobile telephone (NMT)*-Les pays nordiques.
- *Total access communication system (TACS)*- La Grande-Bretagne.

B. Les systèmes cellulaires de la 2G :

Les systèmes cellulaires mobiles de la deuxième génération (2G) ont été créés pour étendre la capacité vocale de l'utilisateur et offrir une capacité de service de données intégrée. La technologie est passée de la modulation analogique à la modulation numérique. Ce passage aux techniques numériques a permis :

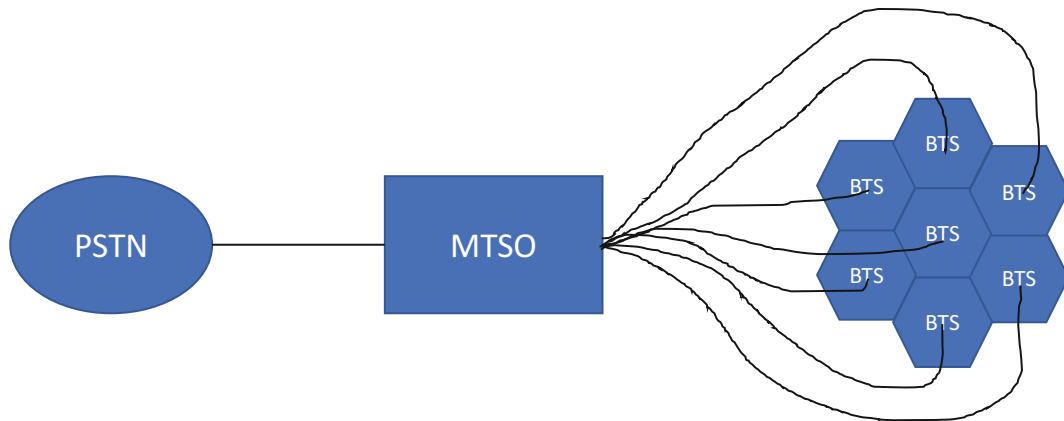


FIGURE 1.1 – 1G network architecture block diagram.

- d'avoir des communications vocales de meilleure qualité via l'utilisation de codeurs vocaux (vocodeurs).
- de supporter des services de données, initialement par l'utilisation des services de messagerie courts (SMS).
- de soutenir la sécurité via le cryptage.
- et d'augmenter la capacité du système.

Cette génération a créé un passage du FDMA au TDMA et au CDMA. La communauté européenne soutenait le système mondial de communications mobiles (global system for mobile communications (GSM), *en Anglais*), tandis que les États-Unis étaient aux prises avec deux normes concurrentes : IS-54 (renommé plus tard IS-135) basé sur TDMA et IS-95 (rebaptisé plus tard CDMA-One) basé sur CDMA. Ces trois normes cellulaires avaient toutes un mérite technique.

Afin d'augmenter la capacité du système, non seulement la bande de fréquences a été divisée en canaux, mais le temps a également été divisé en tranches de temps pour TDMA. Dans le cas de CDMA, les informations de chaque utilisateur ont été mélangées et étalées par une séquence pseudo-aléatoire (PN); et tous les utilisateurs pouvaient transmettre leurs informations en même temps sur l'ensemble du canal.

Ces normes utilisaient le spectre sous licence acheté par les opérateurs de réseau auprès de l'organe directeur du spectre local. La complexité du récepteur augmentait de façon exponentielle, surtout si l'on considère les débits de données, le schéma de modulation et le nombre accru d'antennes impliquées.

Les normes cellulaires numériques 2G déployées à l'échelle mondiale sont répertoriées ci-dessous. Notez qu'il n'existait pas de norme globale unique.

- *GSM*- une norme unique en Europe.
- *IS-54 (also called IS-136)*- une norme aux États-Unis.
- *IS-95 (also called CDMA-One)*-une norme aux États-Unis et en Corée.

Ces normes étaient toutes des réseaux à commutation de circuits (CS), qui avec le temps, ont eu des extensions (par exemple, l'évolution de 2G → 2,5G → 2,75G) qui ont permis l'interfaçage avec des réseaux à commutation de paquets (PS). En raison des économies d'échelle, des coûts de déploiement, des politiques en matière de brevets et du soutien mondial, le GSM détenait la plus grande part de marché cellulaire. L'appétit des utilisateurs a augmenté, forçant ainsi la 2G à prendre des mesures évolutives incrémentielles telles que 2,5G (GPRS) et 2,75 (EDGE). Les deux ont été créés pour augmenter le débit de données des utilisateurs au-delà de la capacité GSM de base ainsi que pour ajouter des capacités de services par paquets. Ces systèmes sont très utilisés aujourd'hui [5].

C. Les systèmes cellulaires de la 3G :

Le système cellulaire numérique de troisième génération (3G) a été créé pour augmenter la capacité des utilisateurs et satisfaire l'appétit croissant du débit de données.

Cette génération a permis aux utilisateurs de surfer sur Internet et de bénéficier simultanément de services voix et données. Il a également été le catalyseur de l'écosystème pour introduire des applications vidéo sur les appareils des utilisateurs cellulaires. À ce stade, dans l'évolution cellulaire, l'accès mobile à Inter-

net devenait de plus en plus important. La technique d'accès multiple (MA) est passée de l'utilisation à la fois du TDMA et du CDMA à la normalisation du CDMA. CDMA-One a évolué en CDMA2000, et GSM/IS-136 évolué en CDMA large bande (WCDMA).

CDMA est une technique d'accès multiple où plusieurs utilisateurs sont séparés par des codes PN et transmettent en même temps sur toute la bande passante allouée. Il est bien connu que plus d'utilisateurs transmettent, les interférences intra-cellulaires se multiplient, appelées interférences d'accès multiples. Un mécanisme de contrôle de puissance était utilisé dans le système non seulement pour améliorer les performances dans un environnement à évanouissements par trajets multiples, mais également pour contrôler les interférences introduites par chaque utilisateur supplémentaire dans le système.

Les normes cellulaires 3G déployées dans le monde sont énumérées ci-dessous. Notez qu'il n'existe pas de norme cellulaire mondiale unique.

- *WCDMA (également appelé UMTS) :*
 - Modulation numérique (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, etc.), FDD / TDD duplex.
 - Bande passante du canal = 5 MHz (avec un débit de puce = 3,84 Mcps).
 - Durée de la trame = 10 ms.
 - Durée du créneau horaire = 0,667 ms (15 créneaux horaires / trame).
 - Débits de données jusqu'à 1 Mbps.
 - Défini par l'organisme de normalisation 3GPP.
- *CDMA2000 :*
 - Modulation numérique (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), duplex FDD.
 - Bande passante du canal = 1.25 MHz x 3.
 - Durée de la trame = 10 ms.
 - Durée du créneau horaire = 0,667 ms (15 créneaux horaires / trame).
 - Débits de données jusqu'à 1 Mbps.
 - Défini par les normes 3GPP2.

D. Les systèmes cellulaires de la 4G :

Ce système cellulaire numérique de quatrième génération (4G) a été créé pour prendre en charge la capacité exponentielle du système et l'appétit du débit de données. Des débits de données beaucoup plus élevés étaient nécessaires pour permettre l'accès mobile à Internet et les applications vidéo. L'évolution à long terme (LTE) est également connue sous le nom de 4G et prend uniquement en charge les réseaux PS. La norme évolue également pour utiliser des options de spectre sous licence, sans licence et partagées, le tout dans le but commun d'augmenter le débit de données utilisateur, d'augmenter la capacité du système, de réduire la latence et d'améliorer l'expérience utilisateur. L'UIT a fourni des objectifs 4G sous la forme d'exigences IMT-2010.

À ce stade de l'évolution cellulaire, l'industrie a convergé vers un seul standard, le LTE. Le système cellulaire LTE est basé sur l'OFDMA où le TTI a été réduit de 2 ms (utilisé dans le système cellulaire 3G) à 1 ms. Cette réduction TTI a amélioré les performances en étant capable de réagir plus rapidement aux conditions changeantes des canaux, ce qui permet d'utiliser des algorithmes de planification plus efficaces. Le TTI réduit a également permis de réduire la latence de bout en bout. Les options de bande passante de fréquence ont également augmenté : 1,4, 3, 5, 10, 15 et 20 MHz pour fournir des déploiements de bande passante flexibles. Pour prendre en charge efficacement l'accès multiple FDMA, l'OFDMA (via la transformation de Fourier rapide inverse (iFFT) et les opérations FFT) a été choisi, ce qui a divisé la bande de fréquences en sous-canaux (ou sous-porteuses) d'espacement de 15 kHz. Pour réduire au minimum la complexité du traitement du signal du récepteur, il était souhaitable que l'espacement des sous-porteuses soit inférieur à la largeur de bande de cohérence du canal sans fil. Pour fournir des services à un débit de données plus élevé, la prise en charge MIMO est obligatoire pour accueillir plusieurs couches via le multiplexage spatial [?].

Rappelons qu'avec un système TDMA, l'augmentation du débit de données (ou la diminution de la durée du temps de symbole) a amené le récepteur à utiliser un égaliseur pour lutter contre les interférences entre symboles (ISI). Les débits de données plus élevés, la modulation d'ordre supérieur et les étalages de retard plus longs ont entraîné une augmentation significative de la complexité de l'égaliseur. Avec un système WCDMA, l'augmentation du débit de données (ou

la diminution de la durée de temps de la puce) obligeait le récepteur à utiliser la diversité temporelle du canal sans fil, mais nécessitait un gain de traitement important pour lutter de manière adéquate contre l'ISI. Avec WCDMA, la motivation était d'avoir une bande passante de transmission plus grande que la bande passante de cohérence du canal sans fil; cependant, pour l'OFDM, le contraire est vrai. L'OFDM répond à la demande de débit de données plus élevé en générant de nombreux canaux à bande étroite, où chaque canal à bande étroite peut être vu comme subissant une perturbation plate en fréquence. Cette observation, couplée au fait que le traitement du signal dans le domaine fréquentiel est possible, a fait de l'OFDM une technique multi-porteuse très intéressante pour atténuer un environnement d'évanouissement sélectif en fréquence.

L'OFDM présente certains inconvénients qui devraient être traités dans les futurs systèmes, tels que :

- **CP overhead** : la nécessité d'ajouter le CP introduit une redondance dans le transmise et entraîne ainsi une perte d'efficacité spectrale. Cette perte est plus importante lorsque le CP long est utilisé ou lorsque l'espacement des sous-porteuses (SCS) est petit.
- **Sensibilité aux décalages de fréquence et de synchronisation** : Afin de conserver l'orthogonalité en OFDM, l'émetteur et le récepteur doivent avoir exactement la même fréquence de référence. Tout décalage de fréquence ruinerait l'orthogonalité, provoquant une fuite de sous-porteuse connue sous le nom d'interférence inter-porteuse (ICI).
- **Émission hors bande (OOB) élevée** : l'OFDM suppose une impulsion rectangulaire dans le domaine temporel qui équivaut à sinc dans le domaine fréquentiel qui a une largeur de bande infinie théoriquement et qui provoque des émissions relativement élevées (OOB). L'absence de mise en forme spectrale (filtrage ou fenêtrage) crée de grands lobes latéraux spectraux dans le spectre d'émission.

En termes de bande passante occupée, le 3GPP n'a spécifié aucune technique de mise en forme spectrale en LTE et chaque fournisseur d'équipement et de dispositif met en œuvre sa propre solution. Les sous-porteuses OFDM sont traitées comme $\sin(x)/x$, donc l'application de la mise en forme spectrale aidera à produire une forme d'onde plus efficace spectralement avec un impact minimal ou

nul sur les performances d'orthogonalité. Ces lobes latéraux spectraux ont une puissance relativement élevée en raison de la forme rectangulaire supposée. Ces lobes latéraux hauts nécessitent une large bande de garde pour réduire les interférences hors bande. L'application de techniques de mise en forme spectrale, telles que les bancs de filtres multi-porteuses, les multi-porteuses filtrées universelles, etc., aidera à réduire les lobes latéraux. L'autre composant peut être trouvé lors de la visualisation de symboles OFDM transmis adjacents dans le domaine temporel; il y aura des discontinuités de phase qui provoquent également des émissions spectrales.

Le problème de puissance de crête à moyenne de l'OFDM peut être considéré comme une somme pondérée de sinusoides, ce qui aide à expliquer le grand PAPR du symbole OFDM généré (aussi élevé que 12 dB). Un PAPR élevé peut être problématique si la forme d'onde rencontre des non linéaires. La réduction du facteur de crête est une technique utilisée pour réduire le PAPR et une technique utilisée pour compenser la distorsion non linéaire est la pré-distorsion numérique. La forme d'onde de liaison montante LTE utilise la méthode FDMA à porteuse unique (SC-FDMA) pour réduire l'impact du PAPR sur les appareils portables.

1.3 La 5G : Technologie, spectre et facteurs conducteurs

Les éléments de base de la 5G comprennent les éléments suivants :

- Fonction de gestion des accès et de la mobilité (AMF) : assure le chiffrement et la protection de l'intégrité, la gestion de la mobilité, l'authentification et l'autorisation, etc.
- Fonction de gestion de session (SMF) : effectue l'attribution et la gestion d'adresses IP UE, la sélection et le contrôle de l'UPF, l'itinérance, etc.
- Gestion unifiée des données (UDM) : effectue la gestion des abonnements, des données utilisateur, des inscriptions et de la gestion de la mobilité, etc.

- Fonction de contrôle de politique (PCF) : exécute des règles de politique pour les fonctions du CP, etc.
- Fonction de plan utilisateur (UPF) : effectue le point d'interconnexion externe au réseau de données, la gestion de la qualité de service de UP, etc.
- Fonction d'application (AF) : interagit avec le cadre politique pour le contrôle politique, etc.

1.3.1 Les facteurs conducteurs

Les systèmes cellulaires 5G doivent faire un bond significatif en termes de fonctionnalités et de performances par rapport à LTE, car des améliorations incrémentielles ne sont pas souhaitées et ne justifient pas les investissements en capital importants dont les opérateurs doivent s'engager pour déployer les services 5G. Il est important de noter que nous avons maintenu une seule norme cellulaire mondiale. Les facteurs moteurs de la 5G sont [6] :

- Augmentation du débit de données utilisateur
- Augmentation de la capacité du système
- Nombre massif de connexions
- Réduction de la latence de bout en bout
- Mélange hétérogène de services
- Déploiements flexibles de la bande passante
- Flexibilité du réseau
- Passer à des communications plus écoénergétiques.

La 5G NR prendra en charge les modes de déploiement non autonomes et autonomes. Le déploiement de la NSA utilisera LTE pour fournir une couverture étendue, des plans de contrôle et de données et une connexion à un EPC en évolution. Les services 5G fourniront des données à haut débit via un scénario de double connectivité. Le déploiement autonome fournira des plans de contrôle et de données ainsi qu'une connexion à un CN 5G.

L'UIT a publié un diagramme pour identifier les services 5G. Les trois cas d'utilisation significatifs (coins du triangle) sont destinés à encapsuler les usages attendus de la 5G à l'avenir :

- Haut débit mobile amélioré (eMBB)
- Communication massive de machine à machine (mMTC)
- Communications ultra-fiables à faible latence (URLLC).

Ces cas d'utilisation de la 5G vont de la maison intelligente, des drones connectés, de la cybersanté, de l'énergie connectée, des voitures autonomes, des jeux de réalité virtuelle/réalité augmentée en temps réel, etc. dans la préparation des services 5G très variés [6].

Le système cellulaire 5G devrait prendre en charge ces scénarios d'utilisation en utilisant les technologies suivantes :

- **Déploiements de spectre flexibles** : spectre sous licence, sans licence et partagé, bande passante plus grande et contiguë, multi-RAT, etc.
- **Architecture réseau améliorée** : prise en charge de la tendance cloud de l'industrie des TIC, SDN / NFV, découpage de réseau, informatique de périphérie multi-accès, latence plus faible, etc.
- **Numérologie flexible** : prend en charge une grande variété de cas d'utilisation et de déploiements spectraux (bandes inférieures et supérieures à 6 GHz), intervalles de temps flexibles et bandes passantes de transmission, etc.
- **Modulation et codage** : la modulation QAM continue de fournir un compromis raisonnable entre le spectre et l'efficacité énergétique, les codes de correction d'erreurs polaires et autres.
- **Techniques avancées** : NOMA, full-duplex, mise en forme spectrale, etc.

1.3.2 Les technologies 5G

Devant être commercialisés vers 2021, les réseaux mobiles 5G font l'objet d'intenses activités de portée et de développement. Par rapport aux réseaux mobiles 4G actuels, les réseaux 5G devraient prendre en charge une énorme capacité système, beaucoup moins de latence et environ 1000 fois plus d'appareils par kilomètre carré, entre autres exigences. Pour répondre à ces exigences, plusieurs nouvelles technologies ont été proposées et sont en cours de développement pour les

réseaux 5G. Ces technologies incluent, mais sans s’y limiter : MIMO massif, mise en réseau définie par logiciel (software-defined networking), mm-Wave, réseau d’accès radio cloud (cloud-RAN), accès multiple non orthogonal, communications M2M, informatique de périphérie mobile (mobile edge computing), mise en cache sans fil, réseaux ultra-denses et communication full-duplex. Dans ce qui suit, nous décrivons brièvement certaines de ces technologies.

A. Les MIMO Massifs :

En discutant le MIMO massif, abordons d’abord le terme «massif». Il est utilisé pour désigner le grand nombre d’éléments d’antenne qui sont utilisés dans le traitement du signal reçu. Le nombre d’antennes à considérer comme massives doit être supérieur à 64 éléments. Massive MIMO s’appuie sur la loi des grands nombres pour s’assurer que les imperfections du canal et du matériel (par exemple, le bruit, les évanouissements et le matériel) sont en moyenne lorsque les signaux d’un grand nombre d’antennes sont combinés dans l’air ensemble [7].

Les antennes multiples offrent deux options dans lesquelles les antennes peuvent être utilisées : La première consiste à fournir un gain de réseau en focalisant l’énergie dans les directions souhaitées et en annulant les directions de signal non souhaitées (formant un faisceau). Deuxièmement, il s’agit de fournir un gain de multiplexage spatial en envoyant des flux de données indépendants sur chaque antenne. L’une ou l’autre technique peut être utilisée pour augmenter le débit de données global de l’utilisateur ou du système.

Tout d’abord, envisagez d’utiliser le MIMO massif pour la formation de faisceaux ; ici, les réseaux d’antennes peuvent être disposés en réseaux linéaires, rectangulaires ou circulaires qui peuvent également être empilés. Massive MIMO sera déployé pour la 4G et la 5G ; en fait, les bandes haute fréquence conduisent à des réseaux d’antennes plus compacts et à grande échelle en raison de la plus petite longueur d’onde. Massive MIMO peut être déployé dans les méthodes duplex FDD ou TDD, les systèmes TDD permettent aux utilisateurs d’invoquer le théorème de réciprocité pour appliquer ce qui est observé sur l’UL au DL.

Ensuite, envisagez d'utiliser le MIMO massif pour le multiplexage spatial, qui a été largement utilisé pour la 4G et se poursuivra dans les déploiements 5G. Le multiplexage spatial peut être réalisé à condition que le rang de la matrice de canal entre les antennes d'émission et de réception soit supérieur à 1. En fait, pour un système MIMO 4×4 , la pleine capacité n'est observée que si le rang de la matrice de canal est plein (dans ce cas, une valeur de 4).

En raison du succès du multiplexage spatial en LTE, il serait logique de supposer que cela continue pour la 5G et à plus grande échelle. Ceci est vrai ; cependant, il devrait venir avec un avertissement. Plus la dimension MIMO est grande, moins il y a de chances que la personne obtienne un rang complet. Cela signifie concevoir un tableau MIMO 256×256 et s'attendre à envoyer 256 couches à un seul utilisateur, tout le temps est une hypothèse difficile à faire. C'est l'une des raisons pour lesquelles la 5G va limiter le nombre de couches DL par utilisateur à 8. La complexité de mise en oeuvre impliquée dans la mise en oeuvre du MIMO massif dans le domaine numérique est importante. La formation de faisceaux hybride a été proposée pour fournir un compromis entre performance/capacité et complexité.

Cela soulève une question intéressante : en supposant un nombre maximum de couches de 8, que peut-on faire avec les degrés de liberté restants ? Certains peuvent être utilisés pour créer (ou former) des faisceaux et certains peuvent être utilisés pour multiplexer d'autres utilisateurs sur le réseau d'antennes. Ce dernier est connu sous le nom de MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO). Ici, plusieurs utilisateurs émettent et leurs transmissions collectives sont traitées comme si elles provenaient d'une seule source de multiplexage. Les poids de formation de faisceaux peuvent créer une poutre dans les directions azimutale et d'élévation.

Lors de l'examen de la formation de faisceaux, le gain du réseau peut être utilisé de différentes manières. Il peut être utilisé pour étendre la zone de couverture, réduire la puissance de transmission des appareils sur l'UL, améliorer le rapport signal sur interférence plus bruit (SINR) résultant en un débit utilisateur élevé et réduire la puissance d'émission sur le DL, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale.

Le nombre d'éléments d'antenne nécessaires dépend de quelques éléments :

- Gain de matrice (zone de couverture, décharge de puissance, etc.)
- Couches de multiplexage nécessaires
- Les multi-utilisateurs devraient être servis
- Bande de fréquence utilisée (facteur de forme, etc.)
- Complexité du traitement du signal (estimation CSI, domaine analogique vs numérique, etc.)
- Gains de performance du système (SINR, capacité, débit de données, etc.).

L'un des avantages de l'utilisation de techniques d'antennes multiples, pour l'émission ou la réception, est la réduction significative de la variation de canal. Cette réduction est essentielle pour lutter contre les évanouissements par trajets multiples, et avoir au moins 64 antennes dans le réseau d'antennes réduit considérablement les variations de canal. Plusieurs scénarios de déploiement 5G proposés par 3GPP ont des cas d'utilisation variés pour les services eMBB, URLLC et mMTC. Dans ces scénarios de déploiement, le nombre maximum d'antennes DL est de 256 et le nombre maximum d'antennes UL est de 32.

B. Le software-defined networking :

La virtualisation des fonctions réseau (Network functions virtualization (NFV)) et la mise en réseau définie par logiciel (software-defined networking (SDN)) soutiennent le passage à un réseau centré sur le logiciel (a software-centric network). Ces capacités offrent de grandes améliorations techniques (sous la forme de performances système) et financières aux opérateurs de réseau. Cette approche apporte aux opérateurs de réseaux d'énormes avantages tels que : un moyen plus gérable de surveiller le réseau, une meilleure prise en charge des déploiements de nouvelles fonctionnalités, la délocalisation du réseau, etc. Cependant, il ouvre également les portes à de nouveaux acteurs du marché (comme les géants des services Internet, les fournisseurs de services de câbles, etc.) qui souhaitent établir une présence sur le réseau sans fil. L'adoption a consisté à virtualiser initialement les fonctions les moins critiques en matière de synchronisation, comme dans l'EPC (également appelé vEPC), puis à effectuer une transition vers le bas de la pile logicielle de protocole vers la couche physique [8].

Le passage à un réseau SDN permet aux opérateurs de réseau de devenir agiles dans les déploiements de divers cas d'utilisation. L'un des avantages est le découpage du réseau. Ici, le réseau sera capable de rassembler dynamiquement les fonctions d'accès et de cœur de réseau nécessaires pour répondre aux exigences d'un cas d'utilisation spécifique (latence, bande passante, etc.). Nous avons vu une tendance qui a commencé dans la 4G où un ensemble diversifié de services ont émergé, et le 3GPP répond à cette demande dans le cadre de l'évolution du LTE. Nous nous attendons à ce que cette demande augmente et continue de créer des exigences diverses. L'architecture du réseau LTE (à sa conception) a été qualifiée de monolithique et doit être plus flexible et évolutive à mesure que nous introduisons les services 5G. Le découpage de réseau est une technique proposée pour prendre en charge cette grande variété de cas d'utilisation.

Le découpage de réseau crée des architectures de réseau virtuel basées sur les principes SDN et NFV. Ces réseaux virtuels (ou tranches) sont créés au-dessus d'une infrastructure physique partagée commune et peuvent être «optimisés» pour répondre aux besoins des applications, des services ou des opérateurs. Les réseaux virtuels sont constitués d'un ensemble de fonctions réseau instancié pour fournir un réseau logique (ou virtuel) de bout en bout complet pour répondre aux exigences de performances ciblées. Par exemple, les communications mMTC reposent sur la capacité de l'utilisateur et pas nécessairement sur une faible latence, tandis que les voitures autonomes reposent sur une faible latence et pas nécessairement sur les services eMBB à débit le plus élevé.

C. La norme MEC (Multi-access Edge Computing) :

Pour prendre en charge les demandes de latence plus faible, les optimisations de l'interface aérienne de la 5G à elles seules ne sont pas suffisantes, nous devons également optimiser le réseau. Le Multi-access edge computing (MEC) est une méthode permettant de rapprocher les fonctions centrées du réseau central ou du centre de données du bord du réseau (vers l'antenne) où les données seront exploitées. Il a été démontré en utilisant ce principe de réinstallation ; la latence de bout en bout de l'utilisateur peut être considérablement réduite. De plus, le trafic de liaison peut également être réduit puisque le trafic «aller-retour» a été considérablement minimisé par cette approche [9].

D. L'architecture RAN (Radio Access Network) split) :

La technologie fronthaul traditionnelle et la plus couramment déployée est basée sur la fibre en utilisant le protocole CPRI (Common Public Radio Interface). CPRI transporte les échantillons IQ entre le RAN et RRHs [10]. Les capacités du CPRI sont mises en avant pour prendre en charge l'évolution du LTE, en particulier lorsque des déploiements de CA et de MIMO massifs sont nécessaires. Ce stress est dû à la plus grande bande passante requise pour transporter les échantillons de forme d'onde IQ vers le RRH, et ne devient plus problématique que lorsque la 5G entre dans l'image. Par conséquent, une technologie de transport frontal de nouvelle génération est nécessaire pour prendre en charge les services 5G attendus [11].

1.3.3 Le spectre 5G et la bande des ondes millimétriques

Le LTE a une largeur de bande maximale de 20 MHz, comme indiqué précédemment, les débits de données utilisateur ont augmenté en raison de l'utilisation de HOM, de couches spatiales MIMO et de techniques CA. Bien que les solutions actuelles prennent en charge jusqu'à 5 CA, il convient de mentionner que les spécifications 3GPP LTE peuvent prendre en charge jusqu'à 32 opérateurs. Cela signifie que si nous sacrifions la complexité afin de prendre en charge de nombreux transporteurs, on peut augmenter encore les débits de données. Dans de nombreux cas, les opérateurs doivent regrouper le spectre sous licence et sans licence (via un accès assisté par licence) pour atteindre les débits de données de Gbit/s. En fait, la bande numéro 46 (B46), dont la gamme spectrale est comprise entre 5,15 et 5,925 GHz. est défini pour cette intention [12].

La 5G va avoir une bande passante maximale de 100 MHz pour les bandes de fréquences inférieures à 6 GHz. Notez qu'une large bande passante offre des débits de données élevés, mais qu'une bande passante plus faible peut également fournir des services 5G. Ceci, couplé avec les attributions de bandes spectrales fragmentées, est une raison pour soutenir le besoin de flexibilité dans les paramètres OFDMA. Outre l'utilisation traditionnelle du spectre sous licence et sans licence (5–5,9, 64–71 GHz), il est également possible d'utiliser le spectre du service radio à large bande (CBRS) des citoyens. La gamme de fréquences CBRS

s'étend de 3,55 à 3,7 GHz (pour une largeur de bande totale de 150 MHz) et elle est régie par un cadre d'autorisation de spectre à trois niveaux pour accueillir les utilisateurs sur une base partagée avec les utilisateurs fédéraux et non fédéraux titulaires de cette bande.

Un point qui mérite d'être mentionné, dans ces nouvelles bandes de fréquences, est que la disponibilité du spectre apparié pour prendre en charge le mode FDD est minime, ce qui obligera l'industrie à se concentrer davantage sur les déploiements TDD. Par conséquent, non seulement nous nous attendons à ce que la disponibilité de la bande passante varie dans les bandes de fréquences basses (<1 GHz), moyennes (<6 GHz) et élevées (> 6 GHz), mais nous devons également nous attendre à ce que la méthode duplex varie également.

Certains opérateurs se concentrent sur l'accès sans fil fixe pour fournir des services 5G haut débit (environ 1 Gbit / s) à la place des déploiements câble / fibre en tant que déploiements 5G initiaux dans les bandes mm-Wave au lieu de, et en plus, prendre en charge les applications haut débit mobiles. Cette approche contribuera à développer un écosystème basé sur des ondes millimétriques qui rendra possible les technologies 5G qui doivent être utilisées pour les appareils fonctionnant sur batterie.

Les utilisations hétérogènes du spectre discutées jusqu'à présent supposent que le spectre sous licence est toujours utilisé ; il existe une initiative pour soutenir les services qui n'utilisent que le spectre sans licence (comme le WiFi aujourd'hui). L'alliance MulteFire permet à la technologie LTE (et 5G) d'être exclusivement utilisée (de manière autonome) dans un spectre partagé et sans licence pour permettre des services privés, une architecture de réseau hôte neutre, des réseaux industriels, etc.

1.4 La conception des formes d'ondes pour la 5G

Le CP-OFDM a certaines limitations qui en font pas la forme d'onde la plus appropriée pour toutes les applications 5G. Cependant, en raison de ses avantages et pour des raisons de rétrocompatibilité, l'OFDM restera la forme d'onde principale des systèmes 5G. En revanche, en raison de ses limites, certaines modifi-

cations ont été proposées dans la littérature pour la rendre adaptée à une application 5G. Parmi ces limitations, le SCS fixe (en 4G LTE), le surcoût du CP et les émissions OOB élevées sont les plus importants. Avant d'énumérer ces nouvelles formes d'onde, dans ce qui suit, nous discutons ces limitations une par une.

L'Internet des objets (IoT) est l'un des principaux contributeurs à la croissance exponentielle des utilisateurs de la 5G. Les appareils IoT, par exemple les capteurs, envoient généralement de courts paquets de données sporadiques et ont une puissance limitée. D'autre part, pour eMBB, un grand volume de données doit être transmis dans un court laps de temps. Ces caractéristiques variables des burst à être transporté fait du CP-OFDM avec un SCS fixe une forme d'onde inefficace. Pour les applications IoT, la forme d'onde 5G est nécessaire pour prendre en charge un mode de transmission avec une latence d'interface radio très faible activée par des trames très courtes [13]. Pour permettre des transmissions à faible latence, des TTI très courts sont nécessaires, pour des communications écoénergétiques en minimisant les temps de dispositifs à faible coût. L'émission OOB peut être réduite en appliquant un fenêtrage dans le domaine temporel qui lisse la transition d'un symbole à un autre.

Pour réduire les émissions OOB, diverses solutions de filtrage et de fenêtrage sont appliquées à l'OFDM [23]. OFDM filtré (Filtered OFDM (F-OFDM)), OFDM fenêtré (également appelé chevauchement et ajout pondéré ou WOLA-OFDM), OFDM filtré universel (universal filtered OFDM (UF-OFDM)), banque de filtres multi-porteuse (filter bank multi-carrier (FBMC)) et d'autres candidats ont été suggérés pour de nouvelles forme d'onde en 5G et au-delà.

1.5 Les techniques d'accès multiple : de la 1G à la 5G

Rappelons les techniques d'accès multiple déployées jusqu'à présent dans les systèmes cellulaires. Dans la première génération, les systèmes cellulaires utilisaient le FDMA où la bande de fréquences était divisée en canaux de fréquence et les utilisateurs se voyaient attribuer des canaux. Dans la deuxième génération, TDMA et CDMA ont été utilisés et dans les deux cas, la bande de fréquences a été divisée en canaux de fréquences plus petits. En TDMA, la nouvelle dimension du temps a été utilisée comme ressource (intervalle de temps), et en CDMA,

la nouvelle dimension dans le domaine de code (séquence PN) a été utilisée. La complexité du récepteur TDMA a augmenté de façon exponentielle à mesure que le débit de données augmentait, l'ordre de modulation augmentait et le nombre d'antennes augmentait. Dans la troisième génération, CDMA a été déployé qui utilisait une plus grande bande passante et, plus important encore, a introduit le concept d'un canal partagé. Ici, les ressources physiques allouées aux utilisateurs sont : les plages horaires et les codes PN. La complexité de la technologie CDMA augmentait à mesure que le débit de données augmentait. La largeur de bande étalée résultante de la WCDMA nécessitait un gain de traitement plus important pour avoir des capacités raisonnables de suppression des interférences entre les trajets.

La quatrième génération de systèmes cellulaires a déployé l'OFDMA et a conservé le concept de canal partagé. Ici, les ressources physiques étaient des tranches de temps et des sous-porteuses de fréquence. La technologie OFDMA a maintenu la flexibilité des ressources et maintenu la bande passante d'information disponible à la valeur souhaitée. En raison de l'utilisation du préfixe cyclique et du traitement du signal dans le domaine fréquentiel, la complexité du récepteur est gérable. C'est aussi une des raisons pour lesquelles la cinquième génération a décidé de continuer avec l'OFDMA.

Nous aimerions discuter brièvement les différences entre les liaisons de communication downlink (DL) et uplink (UL); ceci est illustré à la Fig.1.2 Le DL com-

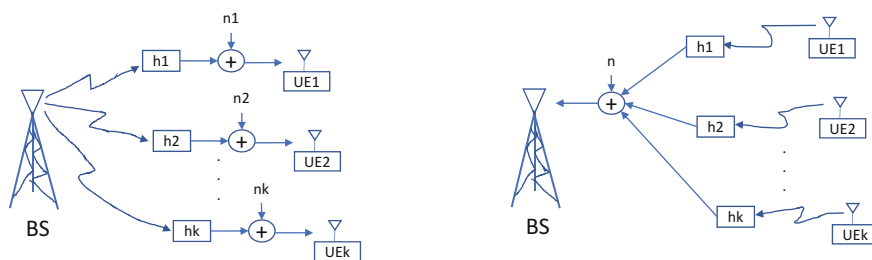


FIGURE 1.2 – Communications downlink (DL) et uplink (UL).

mence par un signal commun transmis qui se compose de la somme agrégée de tous les UE dans cette cellule. Chaque UE est physiquement situé dans une position de cellule différente et subit ainsi différents évanouissements par trajets multiples, désignés par h_i . Chaque UE a son propre bruit additif, noté n_i . La liai-

son montante commence par des transmissions de signaux individuelles qui rencontrent des évanouissements différents, en raison des emplacements physiques dans la cellule. Ces signaux individuels sont additionnés au niveau de l'antenne de réception de la station de base, où la station de base ajoute son bruit additif.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue l'évolution des réseaux cellulaires 1G vers 5G. Un accent particulier a été mis sur les techniques d'accès multiple et les architectures de réseau dans différentes générations de technologies cellulaires. Les exigences IMT-2020 pour la 5G, y compris le haut débit mobile amélioré. Les communications ultra-fiables et à faible latence ont été discutées et les modifications possibles telles que l'OFDM flexible, nécessaires pour répondre à ces exigences, ont été brièvement examinées. Quelques composants techniques clés du réseau sans fil 5G, notamment le MIMO massif, le cloud-RAN et le SDN, ont été traités. Les avantages et les problèmes du CP-OFDM ont été répertoriés et les orientations possibles pour la nouvelle conception de formes d'onde ont été décrites. On a aussi parlé des techniques d'accès multiple.

CHAPITRE 2

LES SYSTÈMES MIMO MASSIFS

2.1 Les systèmes MIMO conventionnels

La technique de transmission à entrées multiples et sorties multiples (Multiple-input Multiple-output (MIMO), *en Anglais*) ou à antennes multiples peut considérablement améliorer les performances et/ou l'efficacité des systèmes de communication sans fil. Depuis leur introduction au milieu des années 1990 [14, 15], les techniques de transmission MIMO sont un domaine de recherche active et ont trouvé des applications dans divers systèmes sans fil. Il existe déjà une riche littérature sur les communications sans fil MIMO. Plusieurs livres ont été publiés sur ce sujet général (voir, par exemple, [16]). Dans cette section, nous fournissons un aperçu général des premiers résultats sur la transmission MIMO, en nous concentrant sur les liaisons point à point où l'émetteur et le récepteur ont plusieurs antennes. L'objectif principal est de démontrer l'énorme potentiel des techniques MIMO en termes de gain de diversité spatiale et du gain de multiplexage spatial.

2.1.1 Modèle de canal MIMO

Considérons une liaison point à point où l'émetteur possède M_t antennes et le récepteur possède M_r antennes, comme le montre la fig. 2.1. Nous supposons que le canal de la $j^{\text{ème}}$ antenne d'émission vers la $i^{\text{ème}}$ antenne de réception subit un évanouissement plat en fréquence, avec un gain de canal complexe h_{ij} , modélisé comme des variables aléatoires complexes gaussiennes indépendantes et distribuées de manière identique. Donc, le signal reçu sur la $i^{\text{ème}}$ antenne de réception est donné par

$$y_i = h_{i1}x_1 + h_{i2}x_2 + \dots + h_{iM_t}x_{M_t} + n_i \quad (2.1)$$

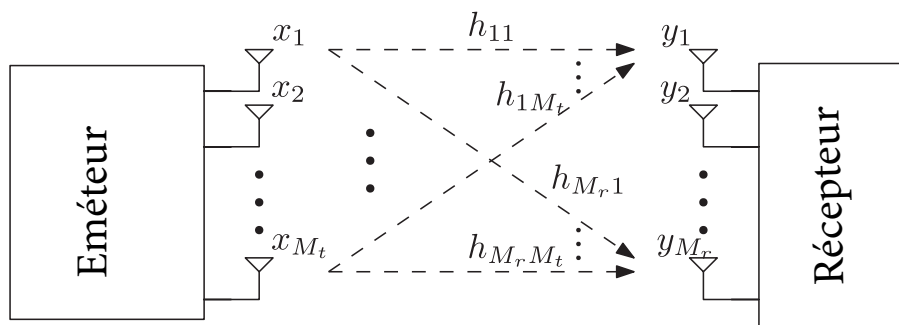


FIGURE 2.1 – Modèle générique d'un canal MIMO.

où x_j est le symbole transmis par la $j^{\text{ème}}$ antenne d'émission et n_i est le bruit gaussien indépendant de moyenne nulle et de variance $\sigma^2 = N_0/2$. Le modèle de canal MIMO à temps discret peut être réécrit sous forme de matricielle comme suit

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{M_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M_t} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r1} & h_{M_r2} & \cdots & h_{M_rM_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{M_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{M_r} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

ou en notation matricielle comme

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.3)$$

Le degré de liberté spatiale inhérent au système MIMO ci-dessus peut être exploité à la fois pour le gain de multiplexage spatial et le gain de diversité.

2.2 Les systèmes MIMO multi-utilisateurs

Massive MIMO est un système cellulaire MIMO multi-utilisateurs (multiuser (MU)-MIMO, *en Anglais*) où le nombre d'antennes au niveau de la station de base (BS) et le nombre d'utilisateurs sont importants. Dans cette section, nous fournirons le contexte de base des systèmes cellulaires MU-MIMO en termes de schémas de communication et de détection de signal, pour la liaison montante (Uplink) et la liaison descendante (Downlink). Par souci de simplicité, nous limitons nos discussions aux systèmes monocellulaires.

2.2.1 Modèle de système et hypothèses

Nous considérons un système MU-MIMO qui se compose d'une seule BS et de K utilisateurs actifs. La BS est équipé de M antennes, tandis que chaque utilisateur possède une seule antenne. En général, chaque utilisateur peut être équipé de plusieurs antennes. Cependant, pour simplifier l'analyse, nous nous limitons aux systèmes avec des utilisateurs à antenne unique.

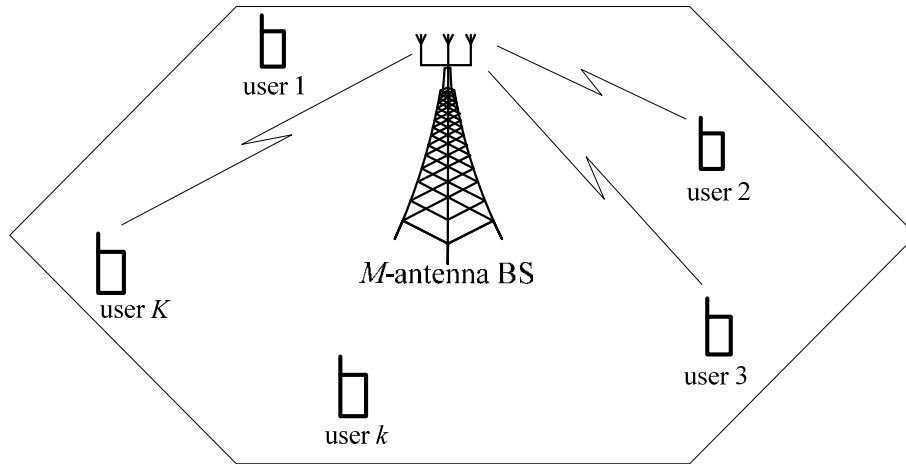


FIGURE 2.2 – Systèmes MIMO multi-utilisateurs.

Voir la figure 2.2. Nous supposons que tous les utilisateurs K partagent la même ressource temps-fréquence. De plus, nous supposons que la BS et les utilisateurs ont des informations d'état de canal (channel-state information (CSI), *en Anglais*) parfaites. Les canaux sont acquis au niveau de la BS et au niveau des utilisateurs lors de la phase d'entraînement. Les schémas d'entraînement spécifiques dépendent des protocoles du système (frequency-division duplex (FDD) or time-division duplex (TDD)).

Soit $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ la matrice de canal entre les K utilisateurs et l'ensemble de M antennes de la BS, où la $k^{\text{ème}}$ colonne de \mathbf{H} , notée \mathbf{h}_k , représente le vecteur de canal $M \times 1$ entre le $k^{\text{ème}}$ utilisateur et le BS. En général, l'effet du canal de propagation est modélisé par des évanouissements à grande échelle et des évanouissements à petite échelle. Mais dans ce chapitre, nous ignorons les évanouissements à grande échelle et nous supposons en outre que les éléments de \mathbf{H} sont des v.a Gaussiennes indépendantes et identiques (independent and identically distributed (i.i.d), *en Anglais*) avec une moyenne nulle et une variance unitaire.

2.2.2 La transmission uplink

La transmission en liaison montante (ou liaison retour) est le scénario dans lequel les K utilisateurs transmettent des signaux à la BS. Soit s_k , où $\mathbb{E} \{ |s_k|^2 \} = 1$, le signal émis par le $k^{\text{ème}}$ utilisateur. Puisque K utilisateurs partagent la même ressource temps-fréquence, le vecteur de signal reçu $M \times 1$ au niveau de la BS est

la combinaison de tous les signaux émis par tous les K utilisateurs :

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{ul} &= \sqrt{p_u} \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k s_k + \mathbf{n} \\ &= \sqrt{p_u} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (2.4)$$

où p_u est le rapport signal sur bruit (SNR) moyen, $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ est le vecteur de bruit additif, et $\mathbf{s} = [s_1 \dots s_K]^T$. Nous supposons que les éléments de \mathbf{n} sont des variables aléatoires gaussiennes (RV) indépendantes et de distribution identique avec une moyenne nulle et une variance unitaire, et indépendantes de \mathbf{H} .

A partir du vecteur de signal reçu \mathbf{y}_{ul} avec la connaissance du CSI, la BS détectera de manière cohérente les signaux transmis par les K utilisateurs. Le modèle de canal dans l'équation 2.4 est le canal à accès multiple qui a la capacité somme (*the sum-capacity*) suivant [17]

$$C_{ul, \text{sum}} = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_K + p_u \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \quad (2.5)$$

La capacité somme susmentionnée peut être obtenue en utilisant la technique d'annulation des interférences successives (*the successive interference cancellation (SIC) technique*) [18]. Avec le SIC, après qu'un utilisateur est détecté, son signal est soustrait du signal reçu avant que l'utilisateur suivant soit détecté.

2.2.3 La transmission downlink

La liaison descendante (ou liaison directe) est le scénario dans lequel la BS transmet des signaux à tous les K utilisateurs. Soit $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, où $\mathbb{E} \{ |x|^2 \} = 1$, le vecteur de signal transmis depuis le réseau d'antennes BS. Ensuite, le signal reçu au k^{ime} utilisateur est donné par

$$\mathbf{y}_{dl, k} = \sqrt{p_d} \mathbf{h}_k^T \mathbf{x} + z_k \quad (2.6)$$

où p_d est le SNR moyen et z_k est le bruit additif au k^{ime} utilisateur. Nous supposons que z_k est distribué gaussien avec une moyenne nulle et une variance unitaire. Collectivement, le vecteur de signal reçu des K utilisateurs peut être écrit comme suit

$$\mathbf{y}_{dl} = \sqrt{p_d} \mathbf{H}^T \mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (2.7)$$

où $\mathbf{y}_{\text{dl}} = [y_{\text{dl},1} \ y_{\text{dl},2} \ \dots \ y_{\text{dl},K}]^T$ et $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_K]^T$. Le modèle de canal dans l'équation 2.7 est le canal de diffusion dont la capacité somme est donnée par

$$C_{\text{sum}} = \max_{\{q_k\}} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_M + p_d \mathbf{H}^* \mathbf{D}_q \mathbf{H}^T \right) \quad (2.8)$$

where \mathbf{D}_q is the diagonal matrix whose k th diagonal element is q_k . The sum-capacity in equation 2.9 can be achieved by using the dirty-paper coding (DPC) technique.

2.2.4 Le traitement linéaire (Linear Processing)

Pour obtenir des performances optimales, des techniques complexes de traitement du signal doivent être mises en œuvre. Par exemple, dans la liaison montante, la détection multi-utilisateur à maximum de vraisemblance (maximum-likelihood (ML)) peut être utilisée. Avec la détection multi-utilisateur ML, le BS doit rechercher tous les vecteurs de signaux transmis possibles *boldsymbols*, et choisir le meilleur comme suit :

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\mathbf{s} \in \mathcal{S}^K} \|\mathbf{y}_{\text{ul}} - \sqrt{p_u} \mathbf{H} \mathbf{s}\|^2 \quad (2.9)$$

où \mathcal{S} est l'alphabet fini de s_k , $K = 1, 2, \dots, K$. Le problème (2.9) est un problème des moindres carrés (least squares (LS)) avec une contrainte d'alphabet fini. Le BS doit rechercher sur des vecteurs $|\mathcal{S}|^K$, où $|\mathcal{S}|$ désigne la cardinalité de l'ensemble \mathcal{S} . Par conséquent, le ML a une complexité exponentielle en fonction du nombre d'utilisateurs.

La BS peut utiliser des schémas de traitement linéaire (récepteurs linéaires sur la liaison montante et pré-codeurs linéaires sur la liaison descendante) pour réduire la complexité du traitement du signal. Ces schémas ne sont pas optimaux. Cependant, lorsque le nombre d'antennes BS est grand, il est montré dans [19, 20] que le traitement linéaire est presque optimal. Par conséquent, dans ce mémoire, nous considérerons le traitement linéaire. Les détails des techniques de traitement linéaire sont présentés dans les sections suivantes.

A. Récepteurs linéaires (dans la liaison montante)

Avec des schémas de détection linéaire à la BS, le signal reçu \mathbf{y}_{ul} est séparé en K flux en le multipliant par une matrice de détection linéaire $M \times K$, \mathbf{A} :

$$\tilde{\mathbf{y}}_{ul} = \mathbf{A}^H \mathbf{y}_{ul} = \sqrt{p_u} \mathbf{A}^H \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{A}^H \mathbf{n} \quad (2.10)$$

Chaque flux est ensuite décodé indépendamment. Voir la figure 2.3. La complexité est de l'ordre de $K|\mathcal{S}|$.

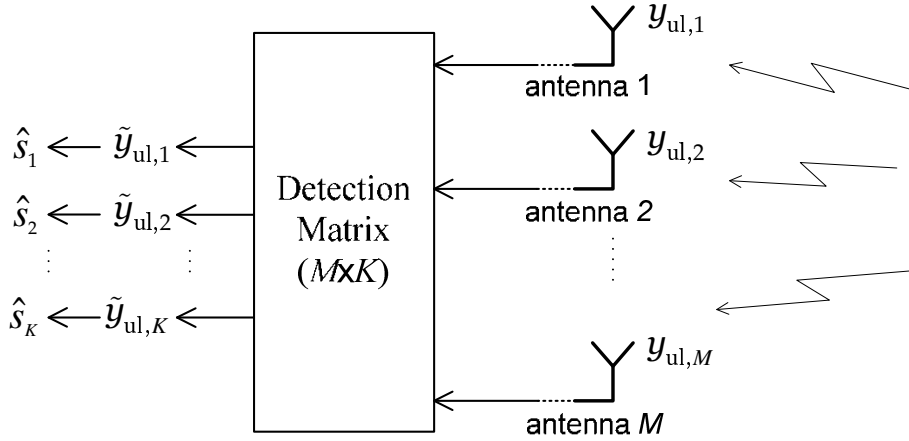


FIGURE 2.3 – Schéma fonctionnel de la détection linéaire à la BS.

A partir de (2.10), le k^{ime} flux (élément) de $\tilde{\mathbf{y}}_{ul}$, est utilisé pour décoder s_k , est donné par

$$\tilde{y}_{ul,k} = \underbrace{\sqrt{p_u} \mathbf{a}_k^H \mathbf{h}_k s_k}_{\text{signal désiré}} + \underbrace{\sqrt{p_u} \sum_{k' \neq k}^K \mathbf{a}_k^H \mathbf{h}_{k'} s_{k'}}_{\text{interference entre utilisateur}} + \underbrace{\mathbf{a}_k^H \mathbf{n}}_{\text{bruit}} \quad (2.11)$$

où \mathbf{a}_k désigne la k^{ime} colonne de \mathbf{A} . L'interférence plus le bruit est traité comme un bruit effectif, et par conséquent, le rapport signal sur interférence plus bruit (signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR)) du k^{ime} flux est donné par

$$\text{SINR}_k = \frac{p_u |\mathbf{a}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{p_u \sum_{k' \neq k}^K |\mathbf{a}_k^H \mathbf{h}_{k'}|^2 + \|\mathbf{a}_k\|^2} \quad (2.12)$$

Nous passons maintenant en revue quelques récepteurs multi-utilisateurs linéaires conventionnels.

1) Récepteur combiné à rapport maximal (*Maximum-Ratio Combining receiver*) :

Avec un MRC, la BS vise à maximiser le rapport signal sur bruit (SNR) reçu de chaque flux, en ignorant l'effet des interférences multi-utilisateurs. D'après (2.11), la k^{ime} colonne de la matrice \mathbf{A} du récepteur MRC est :

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{\text{mrc},k} &= \operatorname{argmax}_{\mathbf{a}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}} \frac{\text{puissance}(\text{signal désiré})}{\text{puissance}(\text{bruit})} \\ &= \operatorname{argmax}_{\mathbf{a}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}} \frac{p_u |\mathbf{a}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{\|\mathbf{a}_k\|^2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Puisque

$$\frac{p_u |\mathbf{a}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{\|\mathbf{a}_k\|^2} \leq \frac{p_u \|\mathbf{a}_k\|^2 \|\mathbf{h}_k\|^2}{\|\mathbf{a}_k\|^2} = p_u \|\mathbf{h}_k\|^2,$$

et l'égalité est valable lorsque $\mathbf{a}_k = \text{const} \times \mathbf{h}_k$, le récepteur MRC est : $\mathbf{a}_{\text{mrc},k} = \text{const} \times \mathbf{h}_k$. Le SINR reçu du k^{ime} flux pour MRC peut alors être donné par

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{\text{mrc},k} &= \frac{p_u \|\mathbf{h}_k\|^4}{p_u \sum_{k' \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_{k'}|^2 + \|\mathbf{h}_k\|^2} \\ &\rightarrow \frac{\|\mathbf{h}_k\|^4}{\sum_{k' \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_{k'}|^2}, \text{ as } p_u \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (2.14)$$

2) Récepteur de forçage à zéro (*Zero-Forcing (ZF) Receiver*) :

Contrairement au MRC, les récepteurs à forçage à zéro (ZF) prennent en compte l'interférence inter-utilisateur, mais négligent l'effet du bruit. Avec ZF, l'interférence multi-utilisateur est complètement annulée en projetant chaque flux sur le complément orthogonal de l'interférence inter-utilisateur. Plus précisément, la k^{ime} colonne de la matrice du récepteur ZF satisfait :

$$\begin{cases} \mathbf{a}_{\text{zf},k}^H \mathbf{h}_k \neq 0 \\ \mathbf{a}_{\text{zf},k}^H \mathbf{h}_{k'} = 0, \quad \forall k' \neq k \end{cases} \quad (2.15)$$

La matrice du récepteur ZF, qui satisfait (2.15) pour tout k , est le pseudo-inverse de la matrice de canal \mathbf{H} . Avec ZF, on a

$$\tilde{\mathbf{y}}_{\text{ul}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{y}_{\text{ul}} = \sqrt{p_u} \mathbf{s} + (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{n} \quad (2.16)$$

Ce schéma nécessite que $M \geq K$ (pour que la matrice $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ soit inversible). Nous pouvons voir que chaque flux (élément) de $\tilde{\mathbf{y}}_{\text{ul}}$ dans (2.16) est exempt d'interférences multi-utilisateurs. Le k^{ime} flux de $\tilde{\mathbf{y}}_{\text{ul}}$ est utilisé pour détecter s_k :

$$\tilde{y}_{\text{ul},k} = \sqrt{p_u} s_k + \tilde{n}_k \quad (2.17)$$

où \tilde{n}_k désigne le k^{ime} élément de $(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H n$. Ainsi, le SINR du k^{ime} flux est donné par

$$\text{SINR}_{2f,k} = \frac{p_u}{\left[(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \right]_{kk}} \quad (2.18)$$

- **Avantage** : le traitement du signal est simple et le ZF fonctionne bien dans les scénarios à interférences limitées. Le SINR peut être rendu aussi élevé que souhaité en augmentant la puissance d'émission.
- **Inconvénient** : puisque le ZF néglige l'effet du bruit, il fonctionne mal dans des scénarios à bruit limité. De plus, si le canal n'est pas bien conditionné, alors le pseudo-inverse amplifie le bruit de manière significative et, par conséquent, les performances seront très mauvaises. Comparé au MRC, le ZF a une complexité de mise en œuvre plus élevée en raison du calcul de la pseudo-inverse de la matrice de gain de canal.

3) Récepteur à erreur quadratique moyenne minimale (Minimum Mean-Squared Error Receiver (MMSE)) :

Le récepteur MMSE vise à minimiser l'erreur quadratique moyenne entre l'estimation $\mathbf{A}^H \mathbf{y}_{ul}$ et le signal émis \mathbf{s} . Plus précisément,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{mmse}} &= \arg \min_{\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times K}} \mathbb{E} \left\{ \left\| \mathbf{A}^H \mathbf{y}_{ul} - \mathbf{s} \right\|^2 \right\} \\ &= \arg \min_{\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times K}} \sum_{k=1}^K \mathbb{E} \left\{ \left| \mathbf{a}_k^H \mathbf{y}_{ul} - s_k \right|^2 \right\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

où \mathbf{a}_k est la k^{ime} colonne de \mathbf{A} . Par conséquent, la k^{ime} colonne de la matrice de récepteur MMSE est

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{\text{mmse},k} &= \arg \min_{\mathbf{a}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}} \mathbb{E} \left\{ \left| \mathbf{a}_k^H \mathbf{y}_{ul} - s_k \right|^2 \right\} \\ &= \text{cov}(\mathbf{y}_{ul}, \mathbf{y}_{ul})^{-1} \text{cov}(s_k, \mathbf{y}_{ul})^H \\ &= \sqrt{p_u} \left(p_u \mathbf{H} \mathbf{H}^H + \mathbf{I}_M \right)^{-1} \mathbf{h}_k \end{aligned} \quad (2.20)$$

où $\text{cov}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \mathbb{E} \{ \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2^H \}$.

On sait que le récepteur MMSE maximise le SINR. Par conséquent, parmi les récepteurs MMSE, ZF et MRC, le récepteur MMSE est le meilleur. Nous pouvons voir à partir de (2.20) que pour un SNR élevé (p_u élevé), ZF s'approche du MMSE, tandis que pour un SNR bas, le MRC fonctionne aussi bien que le MMSE. De plus,

en substituant (2.20) dans (2.12), le SINR pour le récepteur MMSE est donné par

$$\text{SINR}_{\text{mase},k} = p_u \mathbf{h}_k^H \left(p_u \sum_{i \neq k}^K \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + \mathbf{I}_M \right)^{-1} \mathbf{h}_k \quad (2.21)$$

B. Pré-codeurs linéaires (dans la liaison descendante)

2.2.5 Estimation du canal

Nous avons supposé jusqu'à présent que la BS et les utilisateurs ont un CSI parfait. Cependant, en pratique, ce CSI doit être estimé. Selon le mode de duplexage du système (TDD ou FDD), les schémas d'estimation de canal sont très différents.

A. Estimation des canaux dans les systèmes TDD

Dans un système TDD, les transmissions de liaison montante et de liaison descendante utilisent le même spectre de fréquences, mais des intervalles de temps différents. Les canaux de liaison montante et de liaison descendante sont réciproques.

- Pour la transmission montante : la BS a besoin de CSI pour détecter les signaux transmis par les K utilisateurs. Ce CSI est estimé au BS. Plus précisément, les utilisateurs K envoient K séquences pilotes orthogonales à la BS sur la liaison montante. Ensuite, la BS estime les canaux sur la base des signaux pilotes reçus.
- Pour la liaison descendante : la BS a besoin de CSI pour pré-coder les signaux transmis, tandis que chaque utilisateur a besoin du gain de canal effectif pour détecter les signaux désirés. En raison de la réciprocité de canal, le canal estimé au niveau de la BS dans la liaison montante peut être utilisé pour pré-coder les symboles d'émission. Pour obtenir la connaissance du gain de canal effectif, la BS peut former des pilotes, et chaque utilisateur peut estimer les gains de canal effectifs sur la base des signaux pilotes reçus.

A. Estimation des canaux dans les systèmes FDD

Dans un système FDD, les transmissions de liaison montante et de liaison descendante utilisent un spectre de fréquences différent, et par conséquent, les canaux de liaison montante et de liaison descendante ne sont pas réciproques.

- Pour la transmission en liaison descendante : la BS a besoin de CSI pour précoder les symboles avant de transmettre aux K utilisateurs. Les M antennes de la BS transmettent M séquences pilotes orthogonales à K utilisateurs. Chaque utilisateur estimera le canal en fonction des pilotes reçus. Ensuite, il renvoie ses estimations de canal (estimations de canal M) à la BS via la liaison montante.
- Pour la transmission montante : la BS a besoin de CSI pour décoder les signaux transmis par les K utilisateurs. Un moyen simple est que les K utilisateurs transmettent K séquences pilotes orthogonales à la BS. Ensuite, la BS estimera les canaux sur la base des signaux pilotes reçus.

2.3 Les systèmes MIMO massifs

Massive MIMO est une forme de systèmes MU-MIMO où le nombre d'antennes BS et le nombre d'utilisateurs sont importants. Dans Massive MIMO, des centaines ou des milliers d'antennes BS desservent simultanément des dizaines ou des centaines d'utilisateurs dans la même ressource de fréquence. Quelques points principaux de Massive MIMO sont :

- **Fonctionnement TDD** : avec le FDD, l'opération d'estimation de canal dépend du nombre d'antennes BS, M . En revanche, avec le TDD, elle est indépendante de M . Dans Massive MIMO, M est grand, et par conséquent, le fonctionnement TDD est préférable. Par exemple, supposons que l'intervalle de cohérence soit $T = 200$ symboles (correspondant à une largeur de bande de cohérence de 200 kHz et un temps de cohérence de 1 ms). Ensuite, dans le mode FDD, le nombre d'antennes de la BS et le nombre d'utilisateurs sont contraints par $M + K < 200$, tandis que dans les systèmes TDD, la contrainte sur M et K est de $2K < 200$.

- **Traitement linéaire** : puisque le nombre d'antennes de la BS et le nombre d'utilisateurs étant importants, le traitement du signal aux extrémités des terminaux doit traiter des matrices/vecteurs de grandes dimensions. Ainsi, un traitement simple du signal est préférable. Dans Massive MIMO, le traitement linéaire (schémas de peignage linéaire dans la liaison montante et schémas de pré-codage linéaire dans la liaison descendante) est presque optimal.
- **Propagation favorable** : une propagation favorable signifie que la matrice canal entre le réseau d'antennes BS et les utilisateurs est bien conditionnée. Dans Massive MIMO, dans certaines conditions, la propriété de propagation favorable tient en raison de la loi des grands nombres.
- Le réseau d'antennes BS n'a pas besoin d'être physiquement volumineux. Par exemple, considérons un réseau cylindrique avec des antennes à 128, comprenant quatre cercles d'éléments d'antenne à double polarisation de 16. À 2.6GHz, la distance entre les antennes adjacentes est d'environ 6cm, ce qui correspond à une demi-longueur d'onde, et par conséquent, cette matrice n'occupe qu'une taille physique de 28cm × 29cm [21].
- Massive MIMO est évolutif : dans Massive MIMO, la BS apprend les canaux via un apprentissage de liaison montante, en mode de fonctionnement TDD. Le temps requis pour l'estimation de canal est indépendant du nombre d'antennes BS. Par conséquent, le nombre d'antennes BS peut être rendu aussi grand que souhaité sans augmentation de la surcharge d'estimation de canal. En outre, le traitement du signal chez chaque utilisateur est très simple et ne dépend pas de l'existence d'autres utilisateurs, c'est-à-dire qu'aucun traitement de signal de multiplexage ou de dé-multiplexage n'est effectué chez les utilisateurs. L'ajout ou la suppression de certains utilisateurs du service n'affecte pas les activités des autres utilisateurs.
- Toute la complexité est au niveau de la BS.

2.3.1 Comment-ils fonctionnent les systèmes MIMO massifs ?

Dans Massive MIMO, le fonctionnement TDD est préférable. Pendant un intervalle de cohérence, il y a trois opérations : l'estimation de canal (y compris l'apprentissage de liaison montante et l'apprentissage de liaison descendante), la transmission de données de liaison montante et la transmission de données de liaison descendante. Un protocole TDD Massive MIMO est illustré à la fig.2.4.

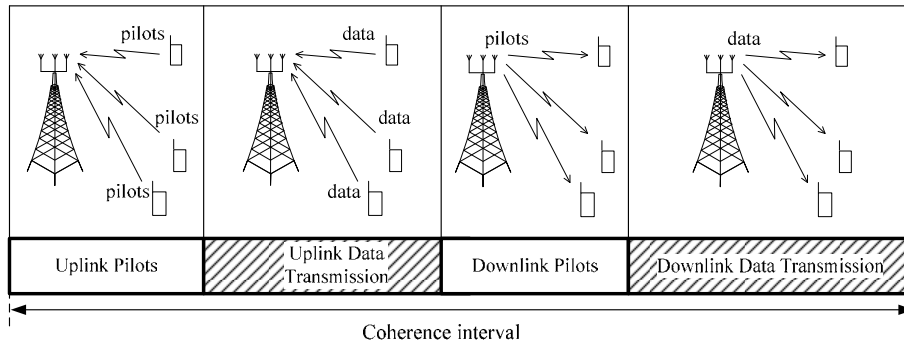


FIGURE 2.4 – Protocole de transmission de TDD Massive MIMO.

A. L'estimation du canal :

La BS a besoin du CSI pour détecter les signaux transmis par les utilisateurs dans la liaison montante, et pour précoder les signaux dans la liaison descendante. Ce CSI est obtenu grâce à la phase du training sur la liaison montante. Chaque utilisateur se voit attribuer une séquence pilote orthogonale et envoie cette séquence pilote à la BS. Puisque la BS connaît les séquences pilotes transmises par tous les utilisateurs, elle peut estimer les canaux sur la base des signaux pilotes reçus.

De plus, chaque utilisateur peut avoir besoin d'une connaissance partielle de CSI pour détecter de manière cohérente les signaux émis par la BS. Ces informations peuvent être acquises par apprentissage de liaison descendante ou par un algorithme d'estimation de canal aveugle. Puisque la BS utilise des techniques de précodage linéaire pour former en faisceau les signaux vers les utilisateurs, l'utilisateur n'a besoin que du gain de canal efficace (qui est une constante scalaire) pour détecter ses signaux désirés. Par conséquent, la BS peut passer un peu de temps à former des pilotes sur la liaison descendante pour l'acquisition CSI chez les utilisateurs.

B. La transmission uplink des données :

Une partie de l'intervalle de cohérence est utilisée pour la transmission de données en liaison montante. Dans la liaison montante, tous les K utilisateurs transmettent leurs données à la BS dans la même ressource temps-fréquence. La BS utilise ensuite les estimations de canal conjointement avec les techniques de combinaison linéaire pour détecter les signaux transmis par tous les utilisateurs.

B. La transmission downlink des données :

Dans la liaison descendante, la BS transmet des signaux à tous les K utilisateurs dans la même ressource temps-fréquence. Plus précisément, la BS utilise ses estimations de canal en combinaison avec les symboles destinés aux K utilisateurs pour créer M signaux précodés qui sont ensuite fournis à M antennes.

2.3.2 Pourquoi les systèmes MIMO massifs ?

La demande sur le débit sans fil et la fiabilité des communications ainsi que la densité d'utilisateurs augmenteront toujours. Les futures communications sans fil nécessite de nouvelles technologies dans lesquelles de nombreux utilisateurs peuvent être servis simultanément avec un débit très élevé. Massive MIMO peut répondre à ces exigences. Considérez la transmission de liaison montante (le même argument peut être utilisé pour la transmission en liaison descendante.) À partir de (2.5), dans les conditions de propagation favorable (les vecteurs de canal entre les utilisateurs et la BS sont orthogonaux par paires), la capacité somme de la transmission en liaison montante est

$$C_{\text{sum}} = \log_2 \det (\mathbf{I}_K + p_u \mathbf{M} \mathbf{I}_K) = K \log_2 (1 + M p_u) \quad (2.22)$$

Nous pouvons voir que, nous pouvons obtenir une efficacité spectrale et une efficacité énergétique énormes lorsque M et K sont grands. Sans augmentation de la puissance émise par terminal, en augmentant K et M , nous pouvons simultanément servir plus d'utilisateurs dans la même bande de fréquences. Dans le même temps, le débit par utilisateur augmente également. De plus, en doublant le nombre d'antennes BS, on peut réduire la puissance d'émission de 3 dB, tout en conservant la qualité de service d'origine.

2.3.3 Les challenges dans les systèmes MIMO massifs ?

Malgré les énormes avantages de Massive MIMO, de nombreux problèmes doivent encore être résolus. Les principaux défis de Massive MIMO sont énumérés comme suit :

A. La contamination des pilotes :

Dans les sections précédentes, nous avons examiné les configurations à cellule unique. Cependant, les réseaux cellulaires pratiques se composent de nombreuses cellules. En raison de la limitation du spectre de fréquences, de nombreuses cellules doivent partager les mêmes ressources temps-fréquence. Ainsi, les configurations multicellulaires doivent être envisagées. Dans les systèmes multicellulaires, nous ne pouvons pas attribuer des séquences pilotes orthogonales pour tous les utilisateurs dans toutes les cellules, en raison de la limitation de l'intervalle de cohérence de canal. Les séquences pilotes orthogonales doivent être réutilisées de cellule à cellule. Par conséquent, l'estimation de canal obtenue dans une cellule donnée sera contaminée par des pilotes transmis par des utilisateurs dans d'autres cellules. Cet effet, appelé «contamination pilote», réduit les performances du système [22].

L'effet de la contamination pilote est une limitation inhérente majeure de Massive MIMO. Il ne disparaît pas même lorsque le nombre d'antennes BS croît sans limite. Des efforts considérables ont été faits pour réduire cet effet.

A. La propagation défavorable :

Massive MIMO fonctionne dans des environnements de propagation favorables. Cependant, en pratique, il peut y avoir des environnements de propagation où les canaux ne sont pas favorables. Par exemple, dans des environnements de propagation où le nombre de diffuseurs est petit par rapport au nombre d'utilisateurs, ou les canaux des différents utilisateurs vers la BS partagent des diffuseurs communs, le canal n'est pas favorable [23]. Une possibilité pour résoudre ce problème est de distribuer les antennes BS sur une grande surface.

CHAPITRE 3

SIMULATIONS ET RÉSULTATS

3.1 Méthodologie

Nous considérons une cellule hexagonale avec un rayon (du centre au sommet) de 1000 mètres. Les utilisateurs sont situés uniformément au hasard dans la cellule et nous supposons qu'aucun utilisateur n'est plus proche de la BS que $r_h = 100$ mètres. L'évanouissement à grande échelle est modélisée via $\beta_k = z_k / (r_k / r_h)^\nu$ où z_k est une variable aléatoire log-normale avec un écart-type σ_{shadow} , r_k est la distance entre l'utilisateur k^{th} et le BS, et ν est l'exposant de perte de chemin (the path loss exponent, *en Anglais*). Pour tous les exemples, nous choisissons $\sigma_{shadow} = 8$ dB et $\nu = 3,8$.

Nous supposons que les données transmises sont modulées avec OFDM. Ici, nous choisissons des paramètres qui ressemblent à ceux de la norme LTE : une durée de symbole OFDM de $T_s = 71,4\mu s$ et une durée de symbole utile de $T_u = 66,7\mu s$. Par conséquent, la longueur de l'intervalle de garde est $T_g = T_s - T_u = 4,7\mu s$. Nous choisissons le temps de cohérence du canal pour être $T_c = 1ms$. Ensuite, $T = \frac{T_c}{T_s} \frac{T_u}{T_g} = 196$, où $\frac{T_c}{T_s} = 14$ est le nombre de symboles OFDM dans un intervalle de cohérence $1ms$, et $\frac{T_u}{T_g} = 14$ correspond à l'intervalle de régularité de fréquence [8].

3.2 Résultats des simulations

Nous menons d'abord une expérience pour valider l'étanchéité des limites de capacité. La figure 3.1 montre l'efficacité spectrale simulée et les limites analytiques proposées pour les récepteurs MRC, ZF et MMSE avec CSI parfait et imparfait à $p_u = 10$ dB. Dans cet exemple, il y a $K = 10$ utilisateurs. Pour l'estimation du CSI à partir des pilotes de liaison montante, nous choisissons des séquences pilotes de longueur $\tau = K$. De toute évidence, toutes les limites sont très serrées, en particulier en gros M . Par conséquent, dans ce qui suit, nous utiliserons ces bornes pour toutes les simulations suivantes.

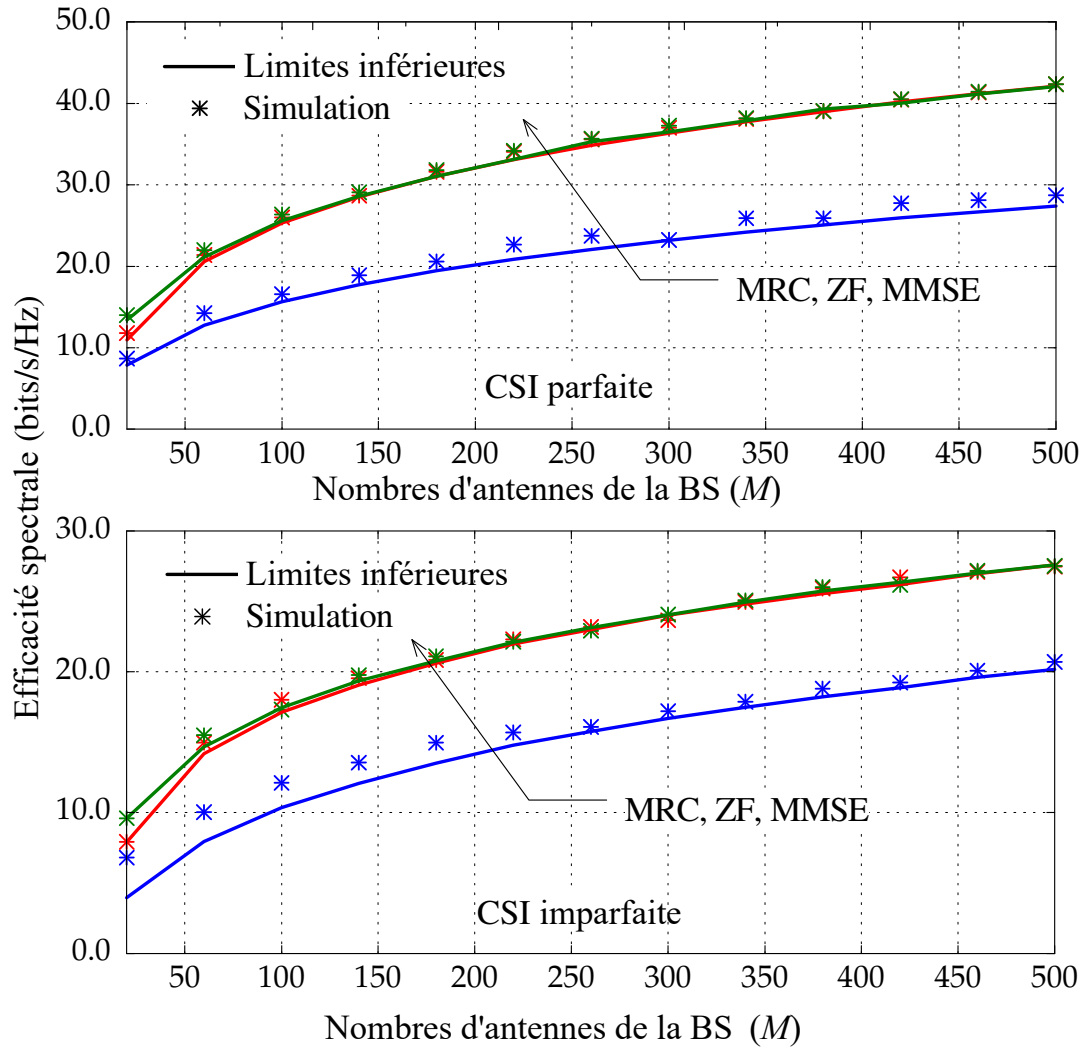


FIGURE 3.1 – Limites inférieures et valeurs évaluées numériquement de l'efficacité spectrale vs. M (nombres d'antennes de la BS) avec des traitements MRC, ZF et MMSE pour les cas CSI parfaite et imparfaite.

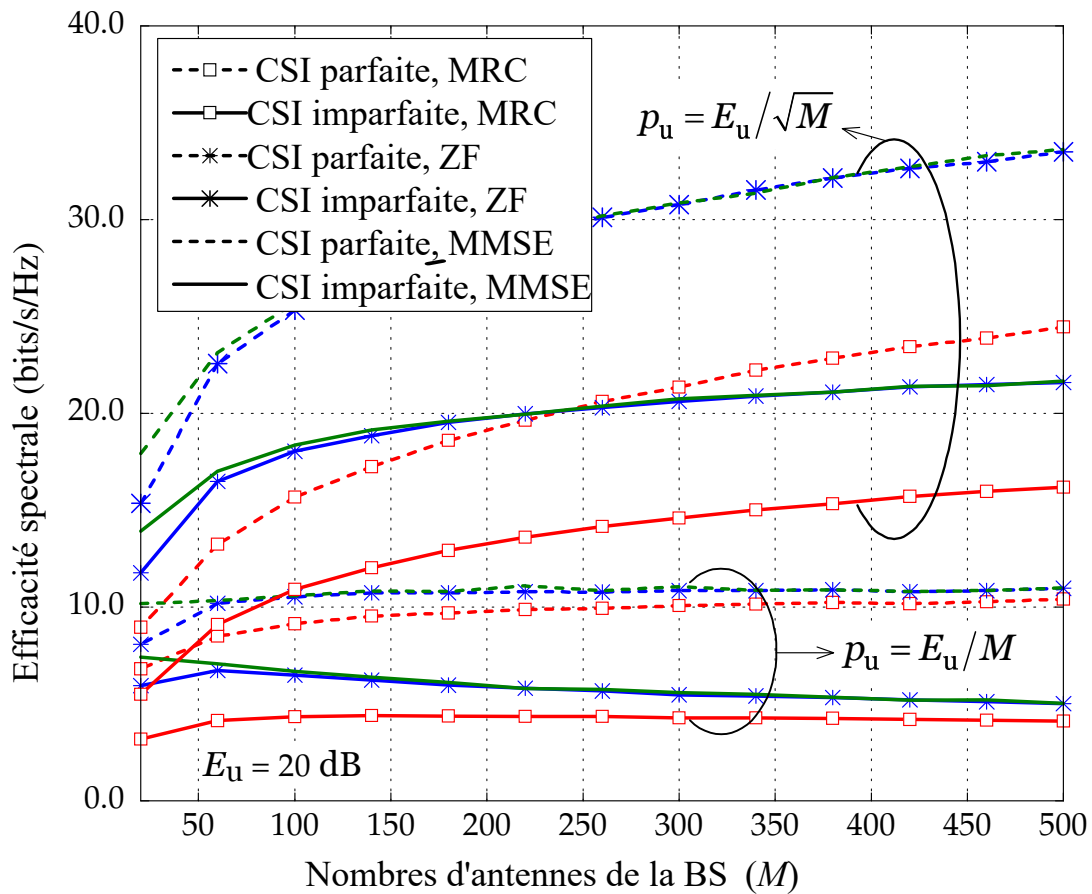


FIGURE 3.2 – Efficacité spectrale vs. M (nombres d’antennes de la BS) avec des traitements MRC, ZF et MMSE pour les cas CSI parfaite et imparfaite ($p_u = E_u / M$ et $p_u = E_u / \sqrt{M}$).

La figure 3.2 montre l’efficacité spectrale sur la liaison montante en fonction du nombre d’antennes de la BS pour $p_u = E_u / M$ et $p_u = E_u / \sqrt{M}$ avec un récepteur où le CSI est parfaite et dans le cas où elle n’est pas parfaite aussit, et avec un traitement MRC, ZF et MMSE, respectivement. Ici, nous choisissons $E_u = 20$ dB. A ce SNR, l’efficacité spectrale est de l’ordre de 10-30 bits/s/Hz, correspondant à une efficacité spectrale par utilisateur de 1-3 bits/s/Hz.

Ces points de fonctionnement sont raisonnables d’un point de vue pratique. Par exemple, une modulation 64-QAM avec un code de canal à débit 1/2 correspondrait à 3 bits/s/Hz. Comme prévu, avec $p_u = E_u / M$, lorsque M augmente, l’efficacité spectrale se rapproche d’une valeur constante pour le cas d’un CSI parfait, mais diminue à 0 pour le cas d’un CSI imparfait. Cependant, avec $p_u = E_u / \sqrt{M}$, dans le cas d’un CSI parfait, l’efficacité spectrale augmente sans limite (loga-

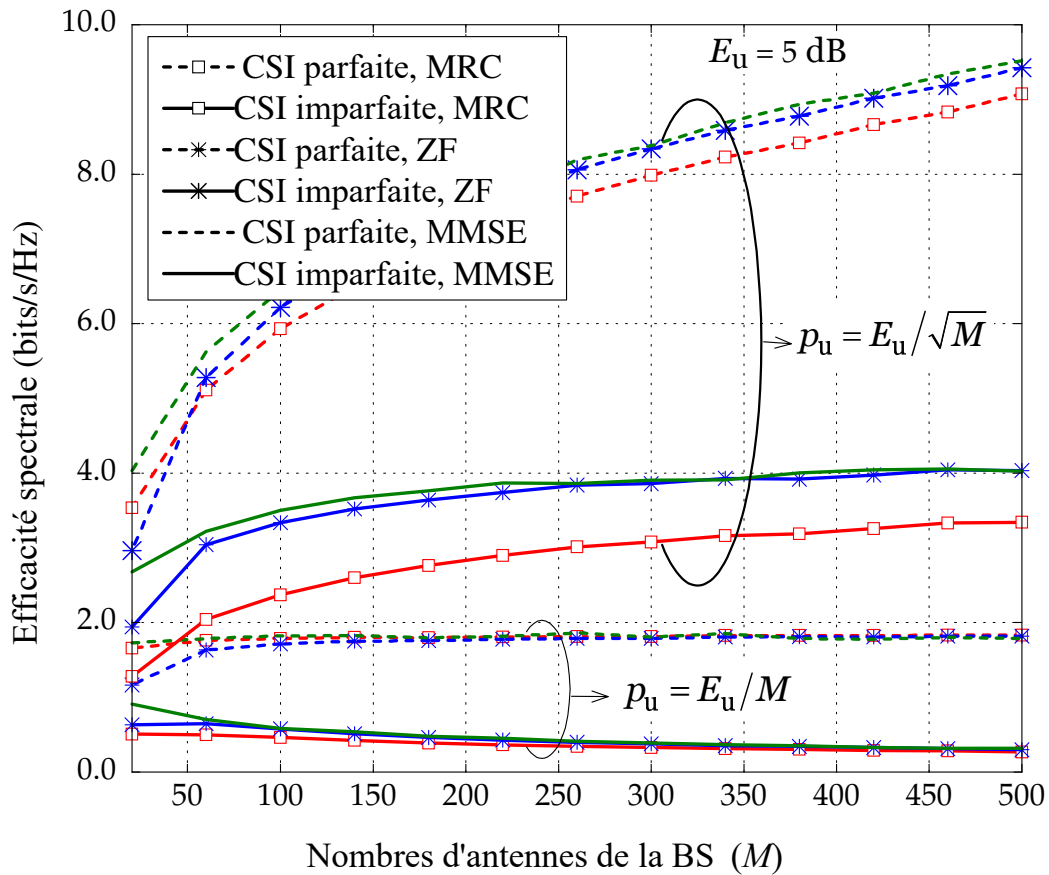


FIGURE 3.3 – La même que la Figure 3.2 , mais avec $E_u = 5$ dB.

rithmiquement rapide avec M) lorsque $M \rightarrow \infty$ et avec CSI imparfait, l'efficacité spectrale converge vers une limite non nulle comme $M \rightarrow \infty$. Ces résultats confirment que nous pouvons réduire la puissance transmise de chaque utilisateur en E_u/M pour le cas CSI parfait et en E_u/\sqrt{M} pour le cas CSI imparfait lorsque M est grand.

Typiquement ZF est meilleur que MRC à SNR élevé, et vice versa à SNR faible [13]. MMSE a toujours les meilleures performances sur toute la gamme SNR. En comparant MRC et ZF dans la figure 3.2, nous voyons qu'ici, lorsque la puissance transmise est proportionnelle à $1/\sqrt{M}$, la puissance n'est pas assez faible pour que MRC fonctionne aussi bien que ZF. Mais lorsque la puissance transmise est proportionnelle à $1/M$, MRC fonctionne presque aussi bien que ZF pour les gros M . De plus, comme nous pouvons le voir sur la figure, MMSE est toujours meilleur que MRC ou ZF, et ses performances sont très proches de ZF.

Dans la figure 3.3, nous considérons les mêmes paramètres que dans la figure 3.2, mais nous choisissons $E_u = 5$ dB. Cette figure fournit les mêmes informations que la figure 3.2. L'écart entre les performances de MRC et celles de ZF (ou MMSE) est réduit par rapport à la figure 3.2. Cela est dû au fait que l'effet relatif aux interférences entre utilisateurs par rapport au bruit thermique est plus faible ici que sur la figure 3.2.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail de recherche, de brèves études sur MIMO multi-utilisateur et MIMO massifs ont été effectuées. Tout d'abord, on a étudié les fondamentaux de Massive MIMO. Les performances des systèmes Massive MIMO sont analysées en termes d'efficacité spectrale. Le dernier chapitre présente les apports spécifiques de ce mémoire.

Ce travail met en évidence la puissance des systèmes MIMO massifs qui demeure un sujet de recherche.

Malgré la contribution faite dans ce mémoire et dans d'autres travaux sur les systèmes MIMO massifs, plusieurs problèmes restent à résoudre. En effet, quelqu'un peut considérer par exemple le problème de contamination des pilotes, le problème d'acquisition d'informations sur l'état des canaux (Channel state information acquisition).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] The story behind the first cell phone call ever made (Online). <https://www.bloomberg.com/news/articles/2015-04-24/the-story-behind-the-first-cell-phone-call-ever-made>.
- [2] V.H. McDonald. The cellular concept. 1979.
- [3] W. Lee. *Mobile Communications Engineering*. (McGraw-Hill), 1982.
- [4] J.G. Proakis. *Digital Communications*. (McGraw-Hill), 2001.
- [5] J. Melero J. Romero, T. Halonen. *GSM, BPRS and EDGE Performance : Evolution Towards 3G/UMTS*. (Wiley), 2002.
- [6] IMT Vision – framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond M series mobile , radiodetermination , amateur and related satellite services. 2015.
- [7] Thomas L. Marzetta, Erik G. Larsson, Hong Yang, and Hien Quoc Ngo. *Fundamentals of Massive MIMO*. Cambridge University Press, 2016.
- [8] Mojtaba Vaezi and Ying Zhang. *Cloud Mobile Networks : From RAN to EPC*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st edition, 2017.
- [9] H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A. Aghvami, and V. C. M. Leung. Network slicing based 5g and future mobile networks : Mobility, resource management, and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(8) :138–145, 2017.

- [10] Zhang Y. Vaezi M. *Radio Access Network Evolution. In : Cloud Mobile Networks.* (Wireless Networks. Springer), 2017.
- [11] (Online). The 38 series of technical specification (ts) for 5g-nr.
- [12] H. Sarkissian B.Ayvazian. Spectrum strategies for 5g. wireless 20/20 report (online). 2017.
- [13] F. Schaich and T. Wild. Waveform contenders for 5g — ofdm vs. fbmc vs. ufmc. In *2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, pages 457–460, 2014.
- [14] Nakibe T. Uzgören. The asymptotic development of the distribution of the extreme values of a sample. 2013.
- [15] M. K. Simon and M.-S. Alouini. *Digital Communications Over Generalized Fading Channels.* 2004.
- [16] M. Win and J. Winters. Virtual branch analysis of symbol error probability for hybrid selection/maximal-ratio combining in rayleigh fading. *IEEE Trans. Communications*, 49 :1926–1934, 2001.
- [17] A. Goldsmith, S. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath. Capacity limits of mimo channels. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 21 :684–702, 2003.
- [18] David Tse and Pramod Viswanath. *Fundamentals of Wireless Communications.* 2005.
- [19] T. Marzetta. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9 :3590–3600, 2010.
- [20] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. Larsson, T. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson. Scaling up mimo : Opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30 :40–60, 2013.
- [21] Christoph Studer and E. Larsson. Par-aware large-scale multi-user mimo-ofdm downlink. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31 :303–313, 2013.

- [22] J. Jose, A. Ashikhmin, T. Marzetta, and S. Vishwanath. Pilot contamination and precoding in multi-cell tdd systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10 :2640–2651, 2011.
- [23] H. Ngo and E. Larsson. Blind estimation of effective downlink channel gains in massive mimo. *2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 2919–2923, 2015.

Abstract

The past two decades have seen massive growth in the number of connected wireless devices. Billions of devices are connected and managed by wireless networks. At the same time, each device needs high bit rate to support applications like voice, real-time video, movies and games. Wireless speed demands and the number of wireless devices will always increase. In addition, the energy consumption of wireless communication systems is of increasing concern.

Thus, future wireless systems must meet three main requirements : i) have a high speed; (ii) simultaneously serving many users; and iii) have less energy consumption.

Massive MIMO technology, where a base station (BS) equipped with a very large number of antennas (co-located or distributed) is used to serve many users in the same time-frequency resource, can meet the above requirements , and therefore, it is a promising candidate technology for the next generations of wireless systems.

In this work, we studied the performance of a massive MIMO system in terms of spectral efficiency.

Keywords: Massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), Multi-user (MU)-MIMO, Base station (BS), spectral efficiency. 5G.

Résumé

Les deux dernières décennies ont vu une croissance massive du nombre d'appareils sans fil connectés. Des milliards d'appareils sont connectés et gérés par des réseaux sans fil. Dans le même temps, chaque appareil a besoin d'un débit élevé pour prendre en charge des applications telles que la voix, la vidéo en temps réel, les films et les jeux. Les demandes de débit sans fil et le nombre d'appareils sans fil augmenteront toujours. En outre, la consommation d'énergie des systèmes de communication sans fil est de plus en plus préoccupante.

Ainsi, les futurs systèmes sans fil doivent répondre à trois exigences principales :
i) avoir un débit élevé ; ii) desservant simultanément de nombreux utilisateurs ;
et iii) avoir moins de consommation d'énergie.

La technologie Massive MIMO, où une station de base (BS) équipée d'un très grand nombre d'antennes (co-localisées ou distribuées) est utilisée pour servir de nombreux utilisateurs dans la même ressource temps-fréquence, peut répondre aux exigences ci-dessus, et par conséquent, c'est une technologie candidate prometteuse pour les prochaines générations de systèmes sans fil.

Dans ce travail, on a étudié la performance d'un système MIMO massif en termes d'efficacité spectrale.

ملخص:

شهد العقدان الماضيان نمواً هائلاً في عدد الأجهزة اللاسلكية المتصلة. يتم توصيل مليارات الأجهزة وإدارتها بواسطة شبكات لاسلكية. في الوقت نفسه ، يحتاج كل جهاز إلى معدل بت مرتفع لدعم التطبيقات مثل الصوت والفيديو في الوقت الفعلي والأفلام والألعاب. ستزداد متطلبات السرعة اللاسلكية وعدد الأجهزة اللاسلكية دائماً. بالإضافة إلى ذلك ، فإن استهلاك الطاقة لأنظمة الاتصالات اللاسلكية يشكل مصدر قلق متزايد.

وبالتالي ، يجب أن تفي الأنظمة اللاسلكية المستقبلية بثلاثة متطلبات رئيسية: (1) سرعة عالية ؛ (2) خدمة العديد من المستخدمين في نفس الوقت ؛ و (3) استهلاك أقل للطاقة.

تقنية Massive MIMO ، حيث يمكن لمحطة قاعدة (BS) تجهيز عدد كبير جداً من الهوائيات (في نفس الموقع أو موزعة) لخدمة العديد من المستخدمين في نفس مورد التردد الزمني ، أن تلي المتطلبات المذكورة أعلاه ، وبالتالي ، فهي تقنية مرشحة وواعدة للأجيال القادمة من أنظمة الاتصالات اللاسلكية.

في هذا العمل ، درسنا أداء نظام Massive MIMO من حيث الكفاءة الطيفية.