



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen
Faculté De Technologie
Département De Télécommunications

*Mémoire Pour l'obtention du diplôme
Master en Télécommunications
Réseaux et Télécommunications*

Présenté par :

- *Fares Zerradi*
- *Salah Mohammed Tighezza*

Thème :

Etude et simulation d'un système MIMO-Massif pour 5G

Soutenu en 06 septembre 2020 devant le Jury composé de :

Président : BORSALI Ahmed Riad	Professeur Université de Tlemcen
Examineur : BENADDA Belkacem	Professeur Université de Tlemcen
Encadreur : BAHRI Sidi Mohammed	MCB Université de Tlemcen

Remerciement

Avant tout, nous tenons particulièrement à remercier Allah le tout puissant, ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.

Nous remercions tout particulièrement notre encadreur Monsieur Bahri sidi Mohammed, Maitre de conférences à l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, d'avoir nous guidés dans l'élaboration de ce travail, pour son aide consistante, et ses conseils judicieux.

Nous profitons de cette opportunité pour exprimer notre gratitude à tous les enseignants qui ont contribué par leur collaboration, disponibilité et sympathie, à notre formation. et tous les personnels du département de télécommunications.

Nous tenons à remercier notre famille de nous avoir soutenu, nous ne serons jamais assez reconnaissants envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tous ce qu'on entreprend.

Enfin, nous tenons remercier toute personne qui nous a aidées de près ou de loin durant notre travail et en particulier tous nos collègues de la promotion RT.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, en première lieu, aux êtres qui me sont les plus chers; Mes parents qui ont toujours aimé me voir réussir et qui n'ont pas cessés de m'encourager, Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous.

A ma très chère sœur : que dieu te procure bonne santé et long vie.

A mes chers amis : Salah, Abdelillah, Mohammed.

Aux personnes Qui m'ont aidé, encouragé, soutenu, pour mener à bien ce projet de fin d'étude.

FARES ZERRADI.

Dédicace

A mes parents.

A toute ma famille

A mes amis et à toute la promotion RT.

SALAH TIGHEZZA.

Résumé

Un débit de données des réseaux cellulaires beaucoup plus élevé est nécessaire dans les futurs réseaux, en plus d'une augmentation considérable du volume de trafic, une augmentation aussi d'appareils qui sont appelés à être connectés (plus de 29 milliards d'ici 2022 selon Ericsson) oblige à entièrement repenser les technologies de communication mobile.

De nouvelles technologies de systèmes doivent être développées afin de proposer une solution adéquate à cette évolution.

La technologie Massive MIMO peut apporter au moins dix fois plus de débit pour la 5G en augmentant l'efficacité spectrale (bit/s/Hz/cellule), tout en utilisant la même bande passante et la même densité de stations de base que dans les réseaux actuels. Ces gains extraordinaires sont réalisés en équipant les stations de base de réseaux d'une centaine d'antennes pour permettre le multiplexage spatial de dizaines de terminaux utilisateurs.

L'objectif principal de ce travail est de déterminer les paramètres clés dans lesquels l'efficacité spectrale sera améliorée pour les systèmes MIMO massifs, tout en passant par une introduction générale sur les systèmes d'antenne 5G et MIMO actuels et la transition vers de nouveaux systèmes et leurs caractéristiques.

Abstract

A much higher cellular network data rate is needed in future networks, in addition to a considerable increase in traffic volume, an increase also in devices which are called to be connected (more than 29 billion by 2022 according to Ericsson) forces to completely rethink mobile communication technologies.

New systems technologies must be developed in order to offer an adequate solution to this evolution.

Massive MIMO technology can provide at least ten times more throughput for 5G by increasing spectral efficiency (bit / s / Hz / cell), while using the same bandwidth and the same density of base stations as in current networks. These extraordinary gains are achieved by equipping base stations with networks of around 100 antennas to allow the spatial multiplexing of dozens of user terminals.

The main objective of this work is to determine the key parameters in which the spectral efficiency will be improved for massive MIMO systems, while going through a general introduction on the current 5G and MIMO antenna systems and the transition to new ones. systems and their characteristics.

Table des Matière

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Résumé.....	iv
Table des matières.....	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Listes des acronymes et abréviations	xii

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre 1 La 5G de réseau mobile.....3

1.1 Introduction	4
1.2 Evolution de communications mobiles	4
1.3 Réseaux cellulaires.....	5
1.4 Applications affichées pour le réseau de 5G	7
1.5 Objectifs de la 5G	8
1.6 : 5G New Radio	9
1.6.1 Scénarios de déploiement :	10
1.6.2 Numéologies de NR :.....	11
1.6.3 Structure de trame de NR :.....	12
1.6.4 NR Resource Block :.....	13
1.6.5 Bande passante du canal NR :.....	14
1.7 CONCLUSION :.....	15

Chapitre 2 Technologie MIMO massif.....16

2.1 Introduction	17
2.2 MIMO traditionnel.....	17
2.3 Principes du MIMO	17

2.4 Types de MIMO.....	18
2.4.1 SISO (Single Input Single Output)	18
2.4.2 SIMO (Single Input Multiple Output) :.....	19
2.4.3 MISO (Multiple Input Single Output).....	20
2.4.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output)	20
2.5 Massive MIMO.....	22
2.6 Caractéristiques de Massive MIMO	23
2.6.1 Propagation favorable :	23
2.6.2 Un réseau d'antennes BS massif n'a pas besoin d'être physiquement grand.	23
2.6.3 Fonctionnement TDD:	23
2.6.4 Traitement Lineaire	24
2.7 Avantages des systèmes Massive MIMO	24
2.8 Types Massive MIMO.....	25
2.8.1 Single-User MIMO:	25
2.8.2 Multi-User Massive MIMO (MU-MIMO) :	25
2.9 Comparaison entre massive MIMO et traditionnel MIMO :	26
2.10 Modèle du système :.....	27
2.11 Techniques de pré-codage linéaire :	28
2.11.1 Introduction de pre-codage :	28
2.11.2 pre-codage lineaire pour les system MU-MIMO :.....	28
2.11.3 Matched Filter (MF) :.....	29
2.11.4 Zéro Forcing (ZF) :.....	29
2.11.5 RZF/MMSE :.....	29
2.11.6 Truncated Polynomial Expansion (TPE) :	30
2.12 Défis de Massive MIMO :	30
2.13 Efficacité spectrale (SE) :	31
2.13.1 Model de system :	31
2.13.2 Efficacité spectrale obtenu en liaison montante :	32
2.14 Conclusion	32
Chapitre 3 Simulation Et Resultat.....	33
3.1 Introduction :	34
3.2 Language utilisé	34

3.3 Environnement de simulation	34
3.4 Discussion des résultats de simulation	35
3.4.1 L'amélioration de SNR :	35
3.4.2 Obtenez le gain d'antenne	37
3.4.3 Pré-codage :	42
3.4.4 l'interférence intra-cellulaire :	44
3.5 Conclusion	46
Conclusion Generale	47
ANNEXE	48
BIBLIOGRAPHIE	50

Liste des Figures

Chapitre 1 La 5G de réseau mobile :

Figure 1.1 : Évolution des réseaux mobiles.....	4
Figure 1.2 : un réseau cellulaire de base.....	5
Figure 1.3 : Applications affichées pour le réseau de 5G.....	8
Figure 1.4 : Objectifs de la technologie 5G.....	9
Figure 1.5 : Architecture de déploiement pour NR.....	10
Figure 1.6 : Structure de sous-trame de NR.....	13
Figure 1.7 : Longueur des slots pour chaque numérolgie.....	13
Figure 1.8 : Espacement des sous-porteuses.....	14
Figure 1.9 : Canal 5G-NR.....	15

Chapitre 02 La Technologie MIMO massif :

Figure 2.1: SISO - Single Input Single Output.	18
Figure 2.2: SIMO - Single Input Multiple Output.....	19
Figure 2.3: MISO - Multiple Input Single Output.....	20
Figure 2.4 : MIMO- Multiple Input Multiple Output.....	21
Figure 2.5 : Une illustration de MIMO massive et de beamforming.....	22
Figure 2.6 : Les régions de possibles (M, K) dans les systèmes TDD et FDD, pour un intervalle de cohérence de 200 symboles.....	24
Figure 2.8 : Single User MIMO.....	25
Figure 2.9 : Multi-User MIMO.....	26
Figure 2.10 : Le modèle du système MIMO massif.....	28

Chapitre 03 Simulation et Résultat :

Figure 3.1 : Illustration de la notion des signaux UL désirés et interférents dans un réseau à deux cellules.....34

Figure 3.2 : SE moyenne en fonction du SNR pour $\bar{\beta} \in \{-10, -30\}$ dB, et différents modèles de canaux.....36

Figure 3.3 : La fonction $g(\varphi_0^0, \varphi_1^0)$ dans (3.5) qui détermine le niveau d'interférence dans un scénario LoS.....38

Figure 3.4 : CDF du gain d'interférence relatif³ en utilisant l'échelle logarithmique sur l'axe horizontal.....40

Figure 3.5 : SE moyenne en fonction du nombre d'antennes BS (M) pour différents modèles de canaux. $\text{SNR}_0 = 0$ dB et $\bar{\beta} = -10$ dB.....41

Liste des tableaux

Chapitre 1 La 5G de réseau mobile :

Tableau 1.1 : Numérolgies de transmission prises en charge12

Chapitre 02 La Technologie MIMO massif :

Tableau 2.1 Comparaison entre le Massive MIMO et MIMO Traditionnel.....27

Listes des acronymes et abréviations

3GPP	G énération P artnership P roject
5G	C inquième G eneration
AR	A ugmented R eality
AWGN	A dditive W hite G aussian N oise
BER	B it E rror R ate
BS	B ase S tation
CDMA	C ode D ivision M ultiple A ccess
CP	C yclic P refix
CSI	C hannel S tate I nformation
DL	D ownlink
EE	E nergy E fficiency
EDGE	E nhanced D ata R ates for G SM E volution
eNB	e volved N ode B
eMBB	E nhanced M obile B road B and
EPC	E volved P acket C ore
FDD	F requency -D ivision D uplex
IA	I ntelligence A rtificielle
gNB	N ext G eneration N ode B
GSM	G lobal S ystem for M obile C ommunications
ICI	I nterferences entre porteuses
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics E ngineers
IoT	I nternet O f T hings
ISI	I nterference inter- S ymbols
LoS	L ine of S ight
LTE	L ong T erm E volution

LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
mMTC	Massive Machine Type Communications
mMIMO	Multiple-Input Multiple-Output
M2M	Machine to M achine
MIMO	M ulti I nput M ulti O utput
MISO	M ulti I nput S ingle O utput
M-MMSE	M ulticell M inimum M ean- S quared E rror
MR	M aximum R atio
MU-MIMO	M ulti- U ser M IMO
NB-IoT	N arrowband I nternet of T hings
NFFT	N on- E quispaced F ast F ourier T ransform
NGMN	N ext G eneration M obile N etworks
NOMA	N on- O rthogonal M ultiple A ccess
NR	N ew R adio
OFDM	O rthogonal F requency- D ivision M ultiplexing
RB	R esource B lock
RF	R adio F requency
RZF	R egularized Z ero- F orcing
S/N	Signal-to-Noise ratio
SE	S pectral E fficiency
SIMO	S ingle I nput M ulti O utput
SISO	S ingle I nput S ingle O utput
SMS	S hort M essage S ervice
SNR	S ignal-to- N oise R atio
SU-MIMO	S ingle U ser M IMO
SVD	S ingular V alue D ecomposition
TDD	T ime- D ivision D uplex
VR	Virtual Reality
UE	U ser E quipment

UL	Up Link
UMTS	Universal Mobile Télécommunications System
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency
UT	User erminal
WLAN	Wireless Local Area Network
ZF	Zero Forcing

Introduction générale

La téléphonie cellulaire mobile a apporté une révolution dans la façon dont les communications se déroulent à travers le monde depuis la première génération 1G à la 4G LTE-A actuelle.

La demande croissante de trafic de données mobiles et la prolifération d'applications nécessitant des débits de données élevés ont soulevé un intérêt significatif pour la définition de la nouvelle génération mobile 5G.

La cinquième génération 5G de communication mobile est la prochaine évolution des réseaux cellulaires qui devrait améliorer les débits de données jusqu'à 10 Gbit/s et réduire la latence en dessous de 1 ms. Il a été largement admis que la capacité des systèmes de communication sans fil 5G devrait atteindre 100 à 1000 fois plus que le système de communication sans fil de quatrième génération (4G). Long Term Evolution (LTE) / LTE-Advanced (LTE-A), qui sont déjà proches de la limite de Shannon dans les systèmes de communication point à point.

La limitation des performances de tout réseau sans fil se situera toujours au niveau de la couche physique, car fondamentalement, la quantité d'informations pouvant être transférées entre deux emplacements est limitée par la disponibilité du spectre, les lois de la propagation électromagnétique et les principes de la théorie de l'information.

L'efficacité spectrale (SE) est généralement l'une des mesures les plus importantes pour sélectionner les technologies candidates pour les systèmes de communication sans fil de prochaine génération.

Il existe trois façons fondamentales pour améliorer l'efficacité d'un réseau sans fil : 1. déployer les points d'accès de manière plus dense, 2. utiliser plus de spectre, et 3. augmenter l'efficacité spectrale, c'est-à-dire le nombre de bits qui peuvent être transmis par seconde dans chaque unité de bande passante.

L'utilisation d'antennes multiples, également connue sous le nom de technologie à entrées multiples et sorties multiples (MIMO), est la seule approche fiable pour une amélioration substantielle de l'efficacité spectrale. MIMO a été déployé dans un certain nombre de systèmes de communication sans fil avancés tels que WiMax et LTE.

Afin d'intensifier ces gains du MIMO traditionnel, le concept MIMO massif associé aux terminologies des systèmes d'antennes à grande échelle, très grand MIMO, très grand MU-MIMO, MIMO pleine dimension, hyper MIMO selon Thomas L Marzetta [49]. Plus explicitement, le MIMO massif fait référence au système qui utilise des centaines d'antennes pour desservir simultanément des dizaines d'UE.

Les résultats théoriques et de mesure indiquent que le MIMO massif est capable d'améliorer de manière significative la SE. En conséquence, le MIMO massif est considéré comme une technique candidate pour les systèmes de communication sans fil de nouvelle génération conçus pour améliorer à la fois leur SE et l'efficacité énergétique (EE).

L'objectif de notre travail est l'étude et l'analyse de méthodes qui permettent l'amélioration d'efficacité spectrale pour la 5G.

Dans le premier chapitre nous décrivons une présentation générale sur la 5G et le réseau cellulaire en définissant les évolutions des générations précédentes et les objectifs de la 5G, et pour finir nous expliquons les modifications clés pour le new radio et comment ça marche.

Dans le 2ème chapitre nous présentons le MIMO traditionnel ainsi qu'une étude sur les techniques de transmission MIMO avec ces différentes configurations SISO, SIMO, MISO et MIMO. Nous proposons ensuite une présentation de technologie Massif MIMO tout en donnant leurs types et caractéristiques.

Dans le troisième chapitre nous étudions par une analyse graphique l'impact des paramètres du système sur l'efficacité spectrale de ce dernier.

A la fin nous concluons notre travail.

CHAPITRE 1

La 5G de Resaux Mobile

Sommaire

1.1 Introduction	4
1.2 Evolution de communications mobiles	4
1.3 Réseaux cellulaires.....	5
1.4 Applications affichées pour le réseau de 5G	7
1.5 Objectifs de la 5G.....	8
1.6 : 5G New Radio	9
1.7 CONCLUSION :.....	15

1.1 Introduction

Depuis l'avènement de la première génération de communications mobiles analogiques dans les années 1980, une nouvelle génération de systèmes de communication mobile est apparue à peu près tous les 10 ans. Le développement de chaque génération a été motivé soit par le service, soit par les exigences technologiques. Par exemple, lorsque le système analogique 1G est passé au système numérique 2G, la technologie numérique qui peut prendre en charge plus d'utilisateurs de voix a été la force motrice avec sa cible principale étant toujours le même service vocal que dans 1G. De la 2G à la 3G, le service de données a joué un rôle majeur dans le changement, mais avec le taux de données limité. En fait, cette transition de génération en génération a été motivée par un nouveau paradigme centré sur la téléphonie vidéo et les contenus mobiles. De la 3G à la 4G, cependant, l'augmentation du taux de données était un objectif de conception essentiel, en particulier par l'émergence des téléphones intelligents, qui nécessite un taux de données de plusieurs Mbps pour le haut débit mobile (MBB) Internet, en soutenant la navigation ininterrompue sur le Web et sans coupure vidéo en streaming. Comme la réalité virtuelle (VR).

Dans le Forum 5G, la vision 5G initiale a été représentée par '1Gbps /utilisateur n'importe quand n'importe où avec l'hyper-connectivité dans les années 2020, vers des services multi-gigabit pour l'hologramme, l'internet des objets, etc... Ce chapitre a pour étude et 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

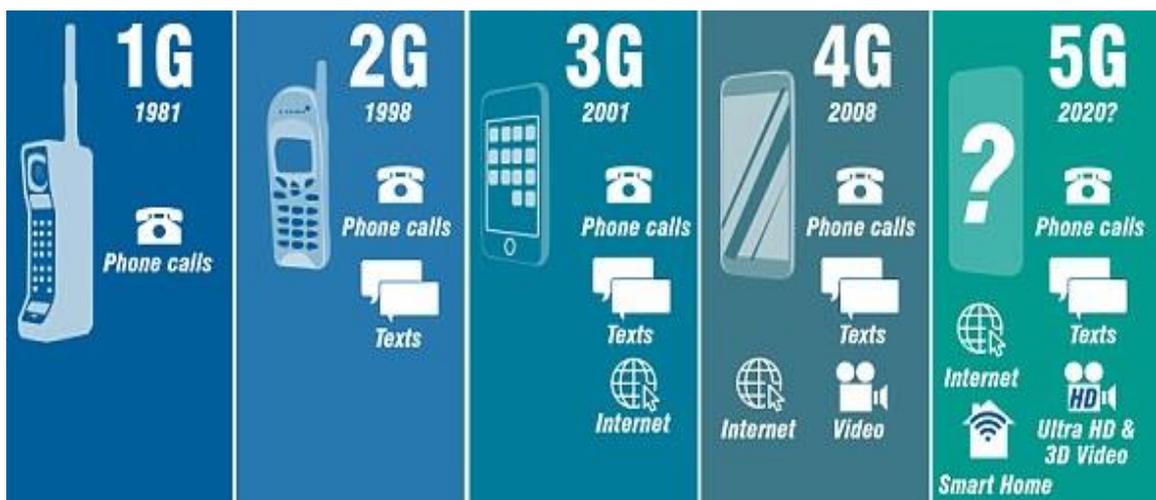


Figure 1.1. Évolution des réseaux mobiles.

La technologie dans le domaine de la téléphonie mobile n'a pas cessé de se développer depuis ces 10 dernières années. En effet, en quelques décennies, la qualité des signaux a connu de grands changements en passant de la 2G à la 5G. Le **réseau de première génération (1G)** a été mis en place dans les années 70 aux États-Unis et en France. Ce réseau qui fonctionne sur un système de communication analogique n'a pas connu le succès espéré à cause de certains problèmes de communication et de la qualité des téléphones mobiles de l'époque. L'arrivée du réseau **2G** dans les années 80 a sonné la révolution de la téléphonie mobile. Cette technologie repose sur l'utilisation d'un **système numérique par onde électromagnétique**, une innovation qui a amélioré la qualité des communications tout en permettant l'intégration de nouveau moyen de communication comme les **SMS** dans les années 90. L'année 2000 a marqué le basculement des téléphones mobiles **GSM** vers les **smartphones**. Le déploiement de la **3G** a permis aux périphériques mobiles de se connecter sur internet. Cette évolution a été accentuée par l'arrivée du premier iPhone d'Apple en 2007.

La 3G utilise une bande passante d'une fréquence variant de **1,6 à 2 GHz**. À partir de 2010, la 3G a été remplacée progressivement par la **4G** qui est actuellement le réseau standard dans les grandes villes. Il s'agit d'un réseau qui utilise une fréquence allant de **2 à 8 GHz** et qui offre un débit pouvant atteindre les **100 Mb/s à 1 Gb/s**.

Les opérateurs de téléphonie mobile sont actuellement en train de mettre en place le réseau **5G**. Le déploiement de ce dernier est prévu pour **2020**. Cette technologie permettra de profiter d'une **vitesse de connexion de 5 Go/s** sur une fréquence de **28 GHz**. Grâce à une telle performance, la 5G sera utilisée dans différents domaines comme l'automobile, la **domotique**, les objets connectés ainsi que pour le visionnage de **vidéo 4K**.

1.3 Réseaux cellulaires

Un réseau cellulaire est un ensemble d'équipements d'utilisateur (UE) connecté à un ensemble de stations de base (BS) dans une zone géographique bien définie appelé cellule. Chaque UE est connectée à l'une des BS, qui lui fournit des services [1].

Le concept cellulaire consiste à diviser la zone de couverture en un certain nombre de cellules desservies chacune par sa propre radio BS. Les cellules sont regroupées en clusters. Chaque cluster utilise l'intégralité du spectre radio disponible. La raison du regroupement est que les cellules adjacentes ne peuvent pas utiliser le même spectre de fréquences à cause des interférences. Le BS communique avec le UE via l'interface radio sans fil et avec l'infrastructure filaire via des protocoles filaires [2].

Les signaux envoyés par les stations de base à leurs utilisateurs respectifs prendre La liaison descendante down-link (DL), tandis que la liaison montante up-link (UL) fait référence aux transmissions des UE à leurs BS respectives. La communication entre les terminaux et BS est bidirectionnelle. Comme illustré à la Figure 1.2. En général le TDD et le FDD sont les modes de transmission utilisés en duplex.

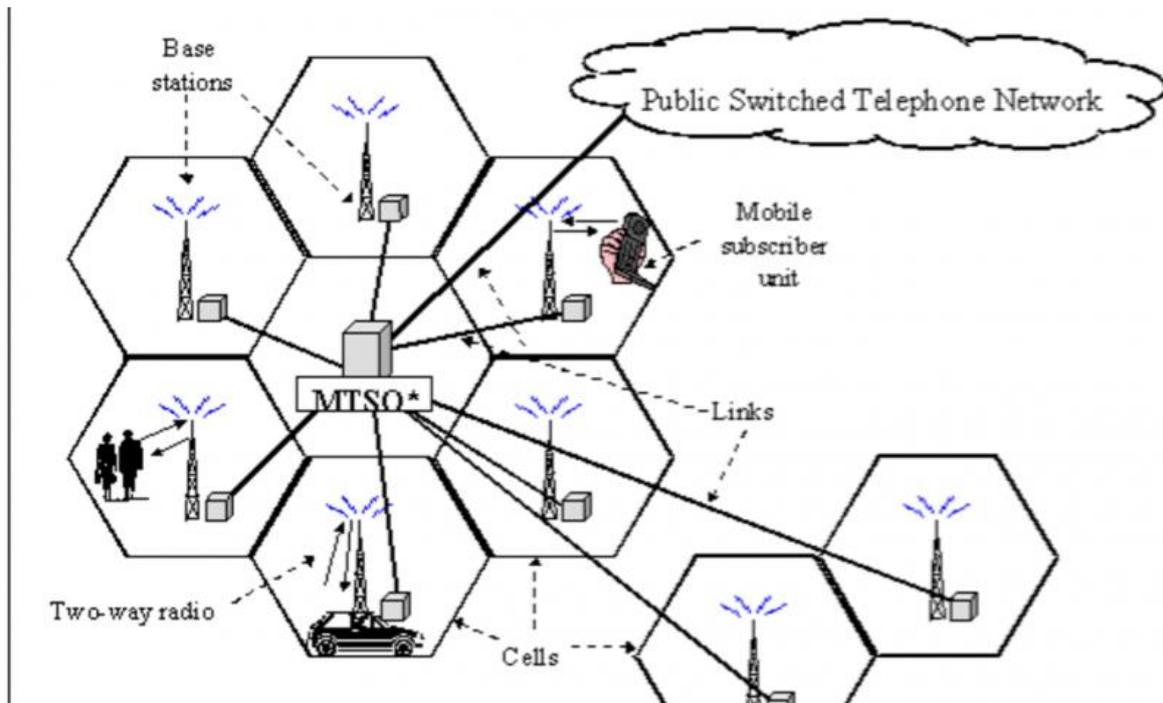


Figure 1.2 : un réseau cellulaire de base.

Plusieurs branches des technologies sans fil sont actuellement utilisées dans les réseaux cellulaires, comme GSM / EDGE / UMTS / LTE mobiles. [1] [3]

Le débit surfacique d'un réseau sans fil est mesuré en $[\text{bit/s/km}^2]$ et peut être modélisé comme suit :

Débit surfacique (bit/s/km^2) = Bande passante (Hz) x Densité cellulaire (cellules/km^2) x Efficacité spectrale (bit/s/Hz/cellule) (1.1)

Pour obtenir un flux de zone plus élevé il y a donc 3 métriques qui peuvent être améliorées :

- Plus de bande passante peut être allouée.
- Améliorée l'efficacité des transmissions de données SE.
- Densification de réseaux (plus de cellules et de BS).[1]

Le débit de la zone dans les générations de réseaux précédentes a toujours été amélioré en allouant plus de bande passante et en densifiant les cellules. Dans les environnements urbains, où les réseaux contemporains sont confrontés aux demandes de trafic les plus élevées, On peut densifier plus de cellules mais les réseaux deviennent de plus en plus saturés. De plus, les bandes de fréquences les plus précieuses sont inférieures à 6 GHz, car ces fréquences peuvent fournir une bonne couverture réseau et une bonne qualité de service, mais pour $f > 6 \text{ GHz}$ ne peuvent fonctionner correctement que dans des conditions de visibilité réduites à courte portée.

D'un autre côté, l'efficacité spectrale (SE) n'a connu aucune amélioration majeure dans les générations de réseau précédentes. Par conséquent, cela pourrait être un facteur qui peut être considérablement amélioré pour atteindre un débit de données plus élevé dans les futurs réseaux 5G et atteindre une vitesse plus élevée. [4]

1.4 Applications affichées pour le réseau de 5G

La croissance rapide de l'Internet mobile et de l'Internet des objets a propulsé la formation de concepts et la recherche sur les systèmes de communications sans fil 5G qui doivent être normalisés vers 2020. Divers scénarios d'application seront attendus pour les réseaux 5G afin d'améliorer la qualité de vie des utilisateurs finaux, notamment la mobilité intelligente, le commerce numérique, les réseaux sociaux et les soins de santé.

Pour les applications pilotées par la 5G, nous mettons en évidence cinq domaines qui peuvent bénéficier d'une intégration étroite avec la 5G et l'infrastructure cyber physique de prochaine génération. [5] [6]

➤ **Smart Mobility**

L'équilibrage du trafic, un routage efficace, la prévention des accidents, les économies d'énergie, la réduction des coûts et des émissions [7]

➤ **Smart Energy**

Améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes électriques et énergétiques et assurer une distribution intelligente, tout en garantissant la sécurité et la confidentialité des liaisons. [8]

➤ **Smart Health**

Parallèlement à l'avancée des appareils intelligents, les applications de cette catégorie ont couvert la surveillance et le diagnostic de l'état sur mobile, l'inspection de la qualité de l'environnement. Avec plus de données collectées à partir de capteurs déployés sur des appareils portables, la santé intelligente aura une influence positive sur les systèmes médicaux et de santé. [9]

➤ **Industrial Applications**

Des applications qui représentent la prochaine génération de services cyber-physiques en termes de fabrication, de communication machine à machine (M2M), d'impression 3D et de construction assistée par l'intelligence artificielle (IA). L'impact de ces applications industrielles s'étendra au-delà des usines, bénéficiant directement à la société. Les exigences clés de la 5G incluent une fiabilité extrêmement élevée, une latence ultra faible, la prise en charge d'un déploiement massif, la sécurité et la confidentialité. [6]

➤ **Consumer Applications**

Les applications émergentes mobiles incluent le streaming mobile ultra HD (4K / 8K), la technologie financière basée sur la block Chain (FinTech), les jeux omniprésents (comme

Pokémon GO 1), la réalité augmentée (AR)/ réalité virtuelle (VR) mobile mixte des services de réalité pris en charge par les véhicules aériens sans pilote et les technologies holographiques [10][11].

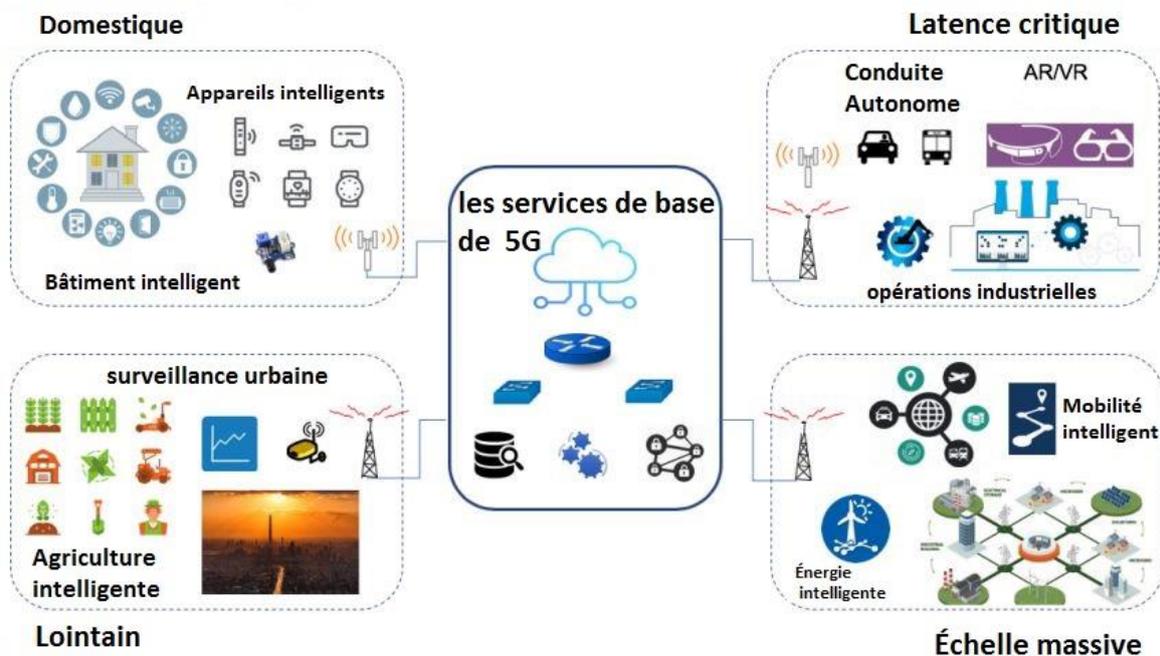


Figure 1.3 Applications affichées pour le réseau de 5G

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) :

- Amélioration Haut débit de mobile (eMBB) : fournit des vitesses plus élevées pour des applications telles que le navigateur web, le streaming et la vidéoconférence.
- Ultra-fiable et faible latence de Communications (URLLC) : l'automatisation industrielle, de nouvelles applications médicales, et la conduite autonome qui nécessitent des temps de traversée réseau très court.
- Massive Machine Type Communications (mMTC) : étend les capacités LTE , IoT pour soutenir un grand nombre d'appareils avec une couverture améliorée et une longue durée de vie de la batterie.[12]

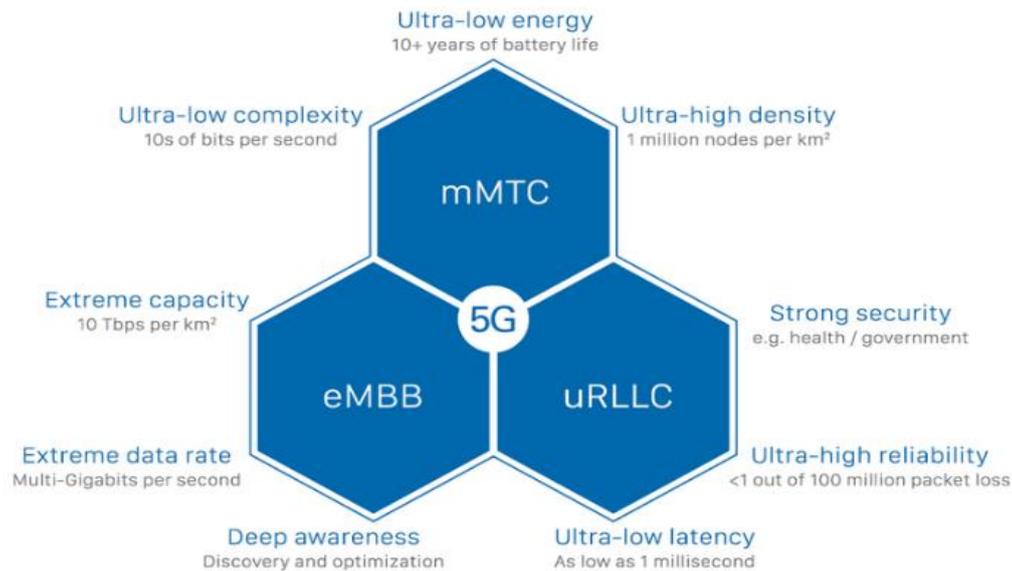


Figure 1.4 Objectifs de la technologie 5G [13]

1.6 : 5G New Radio

Les réseaux sans fil devront correspondre aux avancées en réseau fixe en termes de qualité délivrée de service, de fiabilité et de sécurité. C'est attendu que la conception du système 5G prendra en charge trois des ordres de grandeur : plus grande capacité par km², un débit de données cent fois plus élevé, latence inférieure de 1 ms sur la liaison d'accès radio, une centaine fois plus de connexions (liens) et trois commandes de consommation d'énergie de magnitude inférieure à la génération actuelle de réseau sans fil. [14] Pour cela, de nombreuses nouvelles technologies seront utilisées afin d'atteindre de nouveaux réseaux radio 5G haute performance et d'améliorer l'efficacité spectrale. Ainsi faciliter l'utilisation de nouvelles technologies potentielles comme [4]:

- Communications à ondes millimétriques.
- Entrée multiple sortie multiple massif (mMIMO).
- Accès multiple non orthogonal (NOMA).
- Communications sans fil full-duplex. [15].

1.6.1 Scénarios de déploiement :

Les cellules LTE / LTE-A et NR peuvent avoir une couverture différente ou identique. Pour assurer une interaction et une compatibilité étroites, une architecture NR (Figure 1.5.a) doit être définie. Pour la, les cellules LTE / LTE-A et NR (Figure) peuvent être déployées selon les scénarios. [16]

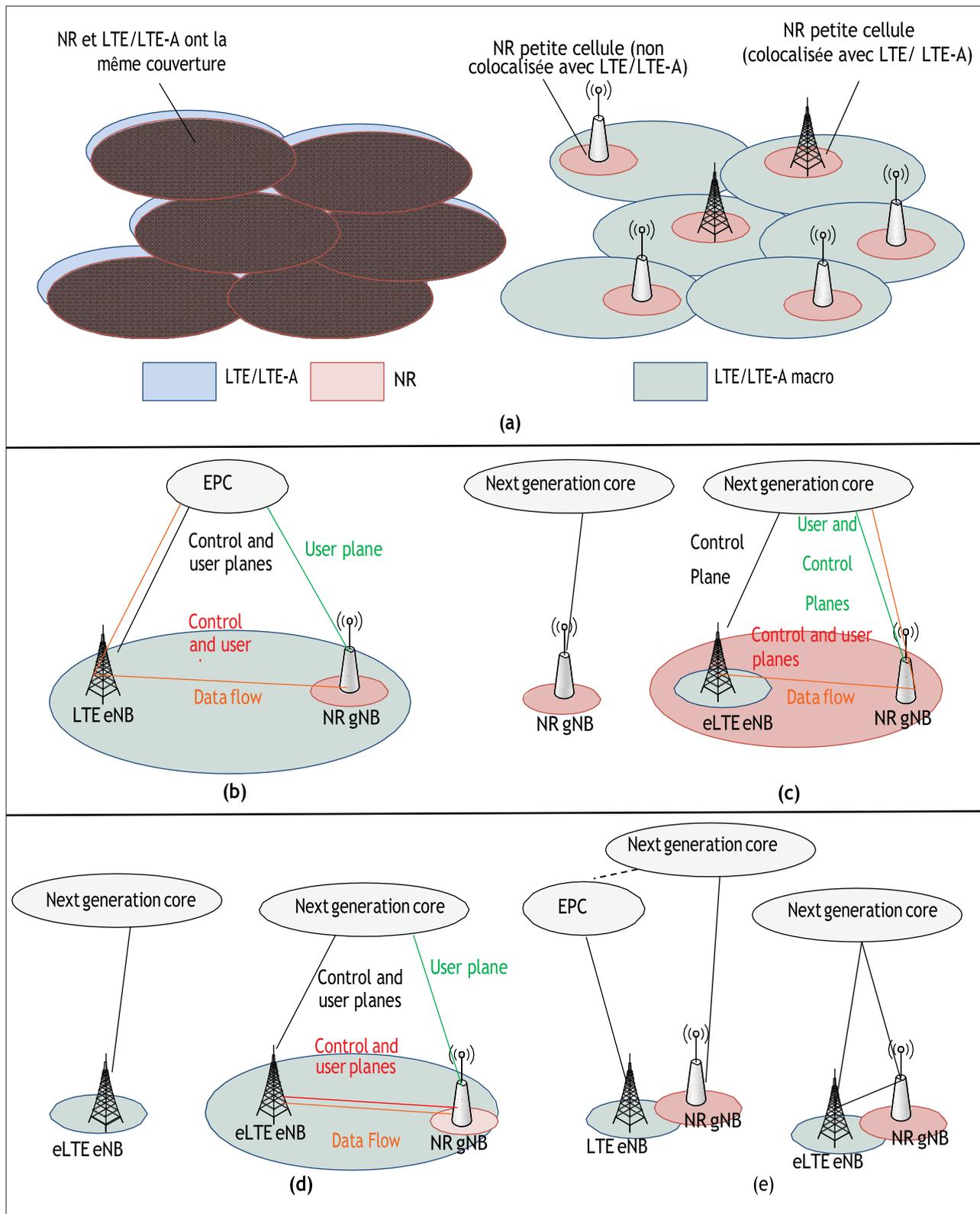


Figure 1.5 Architecture de déploiement pour NR [16]

1. *Le LTE / LTE-A eNB est un nœud maître* : un LTE / LTE-A eNB offre un porte-ancre (à la fois dans les plans de contrôle et dans les plans d'utilisation), tandis qu'un NR gNB propose un rehausseur. Le flux de données agrège à travers un eNB et un gNB via Le noyau de paquets évolué (EPC) (Figure 1.5.b).
2. *NR gNB est un nœud maître* : un NR gNB autonome offre des services sans fil (dans les plans de contrôle et d'utilisateur) via le noyau de nouvelle génération. Un eNB LTE amélioré colocalisé (eLTE) peut fournir des porteuses d'amplificateur pour les connexions doubles (figure 1.5.c).
3. *eLTE eNB est un nœud maître* : un eLTE eNB autonome offre des services sans fil (dans les plans de contrôle et d'utilisateur) via le noyau de nouvelle génération, ou un NR gNB colocalisé est en mesure de fournir des transporteurs d'appoint (figure 1.5.d).
4. *Transfert inter-radio (RAT) entre (LTE / LTE-A / eLTE eNB) et (NR gNB)* : un LTE / LTE-A eNB se connecte à l'EPC et un NR gNB se connecte au cœur de la prochaine génération pour prendre en charge le transfert entre eNB et gNB.
5. *Un eLTE eNB* peut également se connecter au cœur de la prochaine génération, et le transfert entre eNB et gNB peut être entièrement géré via le cœur de la prochaine génération. (Figure 1.5.e). [16]

1.6.2 Numéologies de NR :

Les scénarios précédents exposent le déploiement hétérogène de NR avec une couverture différente. Prenons en considération que de la vitesse de (UE) jusqu'à 500 km/h, plusieurs longueurs de préfixe cyclique (CP) devraient être adoptées dans NR. En pratique, la largeur de bande de la sous-porteuse et la fréquence de la porteuse peuvent également affecter la longueur de CP adoptée. Par conséquent, plusieurs paramètres physiques peuvent être combinés dans NR, tels que des durées de symboles de multiplexage par répartition orthogonale en fréquence (OFDM) et des espacements de sous-porteuses, des longueurs de CP, etc. Ces paramètres de transmission physique sont collectivement appelés numéologies dans NR.

En NR, les émetteurs et les récepteurs peuvent bénéficier d'une bande passante plus large dans les bandes haute fréquence. Dans ce cas, l'espacement des sous-porteuses peut être étendu (supérieur à 15 kHz tel qu'adopté par LTE/LTE-A, et potentiellement jusqu'à 960 kHz). De plus, les hautes fréquences porteuses sont également vulnérables à l'effet Doppler, et un grand espacement entre les sous-porteuses peut faciliter l'atténuation des interférences entre porteuses. D'un autre côté, NR devrait également prendre en charge un petit espacement de sous-porteuses, tel que 3,75 kHz, pris en charge par l'Internet des

objets à bande étroite (NB-IoT), pour profiter d'une meilleure efficacité énergétique dans les bandes de basses fréquences. Par conséquent, les espacements de sous-porteuses dans NR sont évolutifs en tant que sous-ensemble ou sur-ensemble de 15 kHz.

Les espacements de sous-porteuses possibles peuvent être de $15 \text{ kHz} \times 2^m$, où m 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 d'interférence inter-symboles (ISI) à différentes fréquences de porteuse et mobilité. [16]

Espacement des sous-porteuses évolutif

$$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 \text{ kHz} \quad (1.2)$$

Paramètres définissant une numérologie :

- Espacement des sous-porteuses (c'est-à-dire paramètre μ)
- Préfixe cyclique (c.-à-d. Normal / Élargie) [17]
 $\mu=5$ Spécifié mais non pris en charge dans Rel- 15

μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 \text{ kHz}$	Préfixe cyclique (CP)
0	15 KHz	Normal
1	30 KHz	Normal
2	60 KHz	Normal,Élargie
3	120 KHz	Normal
4	240 KHz	Normal
5	480 KHz	Normal

Tableau 1 Numérologies de transmission prises en charge [17]

1.6.3 Structure de trame de NR :

la durée d'une trame en liaison montante et descendante est 10 ms, chacune divisée en dix sous-trames de 1 ms.

- Dans le domaine temporel, la longueur de sous-trame de NR est de 1 ms, qui est composée de 14 symboles OFDM utilisant un espacement de sous-porteuse de 15 kHz et un CP normal. [16]
- la longueur de slot Balance avec l'espacement des sous-porteuses
- Longueur de slot = $1 \text{ ms} / 2^\mu$

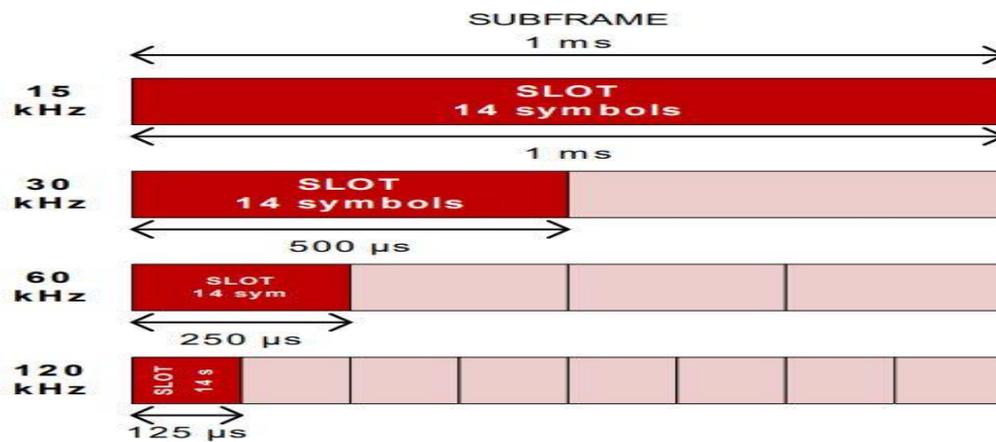


Figure 1.6. Structure de sous-trame de NR [17]

Les slots sont numérotés :

$$\text{dans une sous-trame : } n_s^u \in \{0, \dots, N_{\text{slot}}^{\text{subframe},\mu} - 1\} \tag{1.3}$$

$$\text{dans une trame : } n_{n,f}^\mu \in \{0, \dots, N_{\text{slot}}^{\text{frame},\mu} - 1\} \tag{1.4}$$

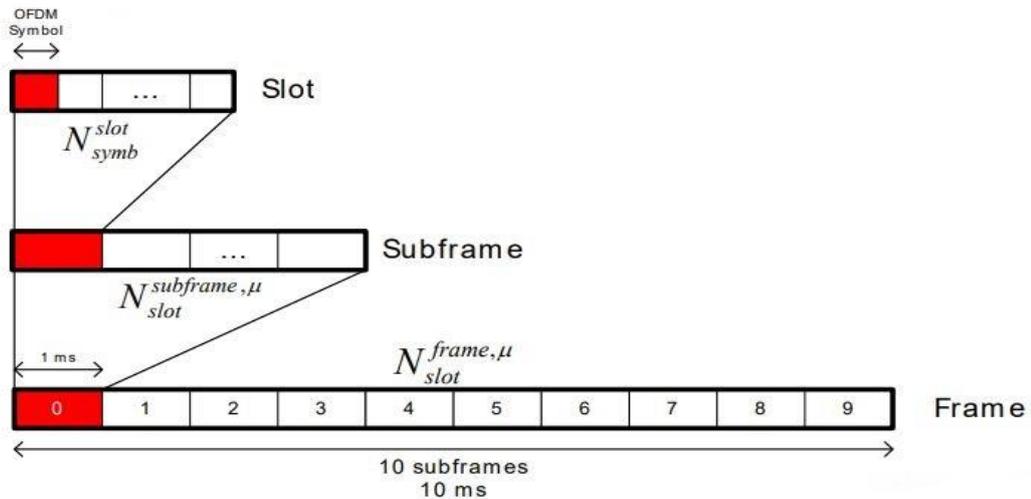


Figure 1.7. Longueur des slots pour chaque numérogie [17]

1.6.4 NR Resource Block :

Le bloc de ressources (RB) de (NR) contient 14 symboles dans le domaine temporel et 12 sous-porteuses dans le domaine fréquentiel. En bande de fréquence 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 montre les espacements des SP pour chaque numérogie. [18]

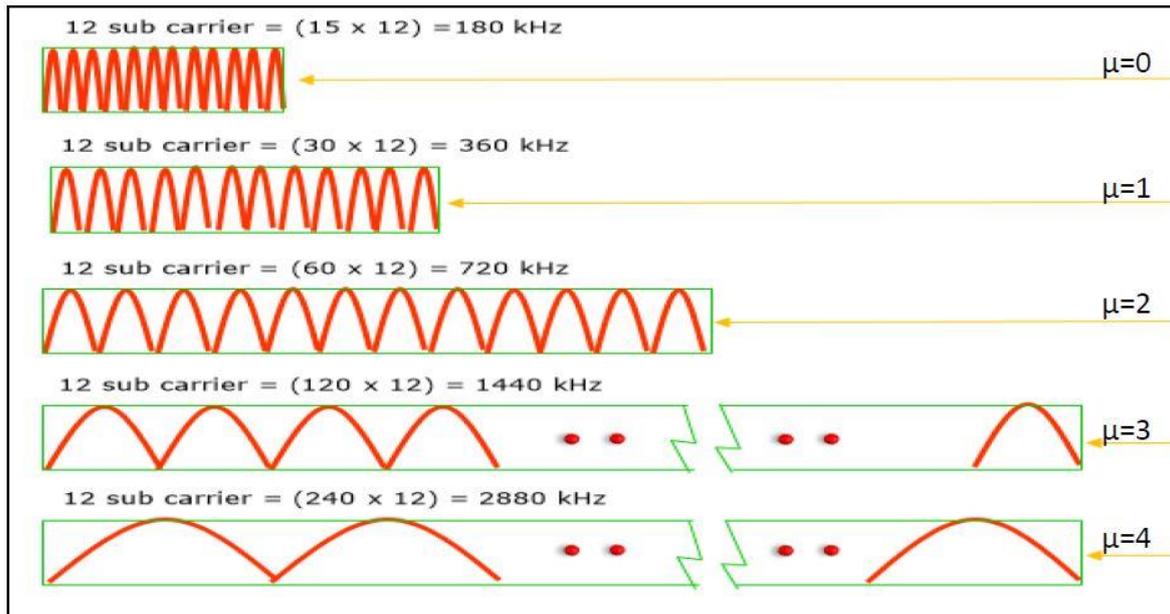


Figure 1.8 Espacement des sous-porteuses [18]

1.6.5 Bande passante du canal NR :

Dans NR, il existe deux gammes de fréquences (FR) principales définies dans la Rel-15 :

- FR1 : 410 MHz-7,125 GHz, généralement dénommé sous-6 GHz
- FR2 : 24,25 GHz – 52,6 GHz, généralement appelé ondes millimétriques.

La largeur de canal est 100 Mhz pour les bandes inférieures <6 GHz et 400 Mhz dans la plage des ondes millimétriques, et l'espacement des sous-porteuses est de 15 à 30 KHz peuvent être utilisés uniquement en <6 GHz et 120 KHz pour ondes millimétriques.

Certains espacements de sous-porteuses 60Khz peuvent être utilisés à la fois en sous 6 GHz et à gamme d'onde millimétrique. [20] [19]

Il est possible de calculer la bande passante du canal tel que :

$$CBW = N_{RB} \times N_{SP} \times \Delta f + 2x BG \quad (1.5)$$

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 [21]
- Δf : Espacement des sous-porteuses évolutif

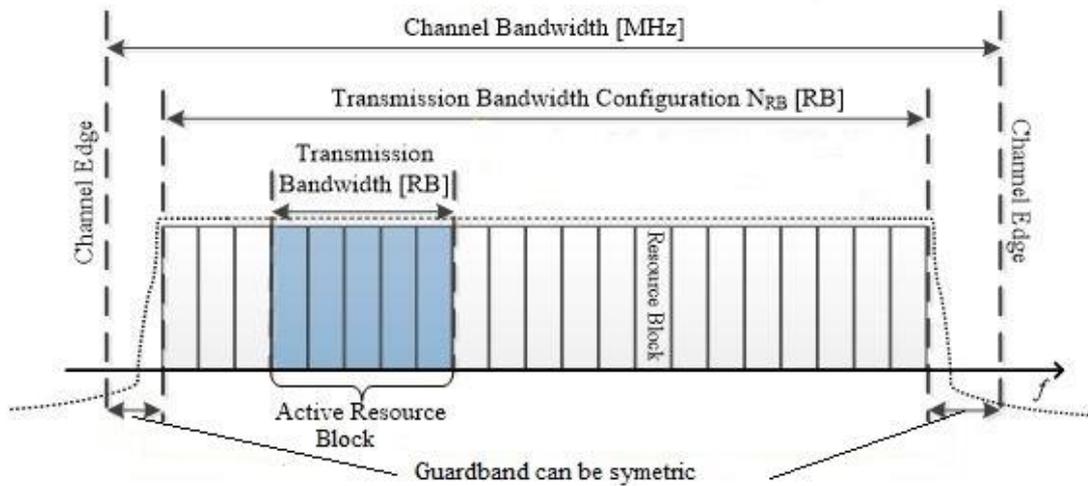


Figure 1.9 Canal 5G-NR [19]

1.7 CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre l'évolution des générations de communication mobile, ainsi qu'un aperçu général sur la nouvelle génération 5G et les principales améliorations qui peuvent être établies sur les limites des réseaux cellulaires actuels comme l'efficacité spectrale, en donnant l'architecture de New Radio et ses fonctionnalités qui donne la flexibilité pour le déploiement de nouveaux réseaux hétérogènes, ce dernier prend en charge les exigences de capacité et de vitesse des futures générations mobiles et qui facilite l'utilisation de nouvelles technologies comme le MIMO Massif.

CHAPITRE 2

La Technologie MIMO massif

Sommaire

2.1 Introduction.....	17
2.2 MIMO traditionnel.....	17
2.3 Principes du MIMO	17
2.4 Types de MIMO	18
2.5 Massive MIMO	22
2.6 Caractéristiques de Massive MIMO	23
2.7 Avantages des systèmes Massive MIMO	24
2.8 Types Massive MIMO	25
2.9 Comparaison entre massive MIMO et traditionnel MIMO :.....	26
2.10 Modèle du système	27
2.11 technique de pre-codage lineaire	28
2.12 Défis de Massive MIMO	30
2.13 Efficacité spectrale (SE) :	31
2.14 Conclusion	32

2.1 Introduction

Une société mobile et connectée émerge dans un avenir proche, caractérisée par une croissance considérable de la connectivité, du volume de trafic et d'une gamme beaucoup plus large de scénarios d'utilisation. Le MIMO (Massive Multiple-Input Multiple-Output) est une technologie multi-utilisateurs MIMO (multi-input multiple output) qui peut fournir un service uniformément bon aux terminaux sans fil dans les environnements à forte mobilité. car il offre plusieurs ordres de débit et des gains d'efficacité énergétique sur les réseaux LTE et LTE-Advanced actuels.[22][23]

Le concept clé est d'équiper les stations de base de réseaux de nombreuses antennes, qui sont utilisées pour desservir plusieurs terminaux simultanément, dans la même ressource temps-fréquence. Le mot «massif» fait référence au nombre d'antennes et non à la taille physique.[48]

Ce chapitre explique les motivations de base et la théorie de la communication derrière la technologie MIMO et Massive MIMO, et fournit des directives de conception liées à la mise en œuvre.

2.2 MIMO traditionnel

Les systèmes MIMO peuvent être définis comme l'utilisation de plusieurs antennes aux extrémités d'émission et de réception d'un réseau de communication sans fil.[24] MIMO se réfère spécifiquement à une technique pratique pour envoyer et recevoir plus d'un signal de données simultanément sur le même canal radio en exploitant la propagation par trajets multiples.

Le spectre sans fil est une ressource précieuse et limitée, afin de répondre à une demande croissante de capacité supérieure, MIMO a déjà été introduit dans les normes sans fil communes telles que IEEE 801.11n, WiMax et LTE. La technologie MIMO permet une capacité et une fiabilité accrues sans alimentation ni bande passante supplémentaires. [25]

2.3 Principes du MIMO

L'idée principale derrière MIMO est que, les signaux échantillonnés dans le domaine spatial à la fois à l'émetteur et au récepteur sont combinés de sorte qu'ils forment de multiples flux de données spatiales parallèles efficaces qui augmentent le débit de données. L'occurrence de la diversité améliore également la qualité qui est le taux d'erreur sur les bits (BER) de la communication. [26]

Lors de l'utilisation de la technologie MIMO, plusieurs antennes de réception et d'émission sont utilisées pour augmenter la capacité grâce au multiplexage spatial sans puissance ni bande passante supplémentaire.

La capacité évolue linéairement avec le nombre minimum d'antennes utilisées au niveau de l'émetteur ou du récepteur. Avec le pré codage du signal, il est également possible d'étaler les flux sur toutes les antennes d'émission pour obtenir un gain de réseau supplémentaire du signal et / ou simplifier le récepteur. Dans un canal à évanouissement, la diversité spatiale entre les antennes peut également être utilisée pour augmenter la capacité moyenne et réduire la probabilité d'interruption [27].

2.4 Types de MIMO

Selon le nombre d'antennes existant dans les différents dispositifs d'antennes, nous pouvons distinguer plusieurs configurations (SISO, SIMO, MISO, et MIMO) (systèmes). Cependant, ces architectures utilisent des différentes fonctions pour traiter le signal telles que la technique de combinaison, le codage spatio-temporel, le multiplexage spatial etc..., dont le but est d'achever la meilleure performance possible du dispositif antenne. [28]

2.4.1 SISO (Single Input Single Output)

Dans le type d'antenne SISO, il n'y a qu'une seule émission à l'extrémité émettrice et une antenne réceptrice à l'extrémité réceptrice. Cela rend SISO le plus simple à mettre en œuvre et le plus facile à concevoir parmi les quatre types d'antennes disponibles. Voici le schéma fonctionnel du système SISO.

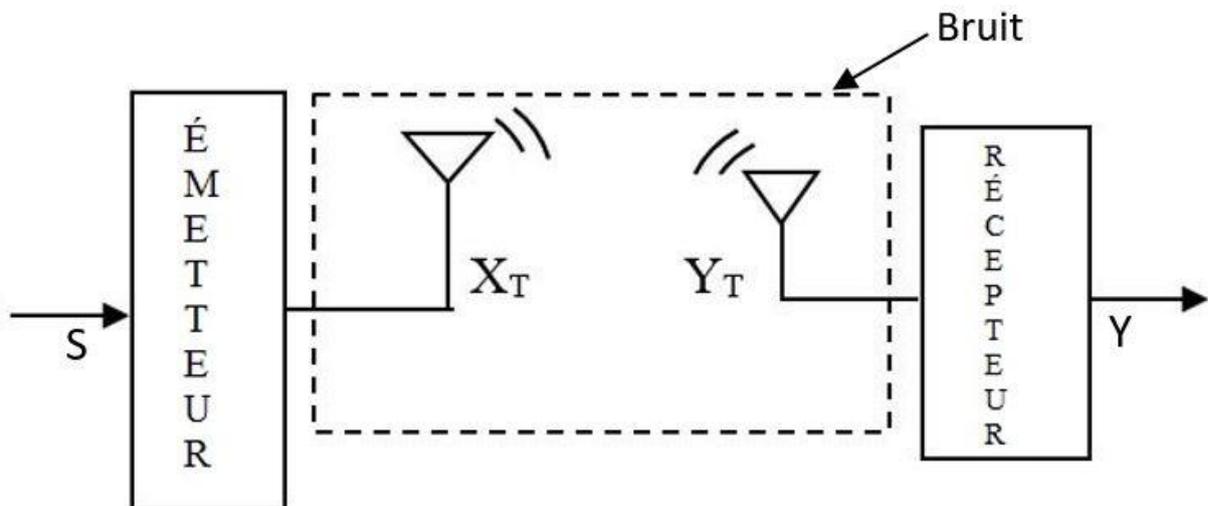


Figure 2.1 SISO - Single Input Single Output

Dans le schéma ci-dessus,

S : entrée

Y : sortie

X_T : antenne d'émission

Y_T : antenne de réception

Du bruit est introduit dans le système lorsque le signal est en cours de traitement de X_T à Y_R (et les atténuations du signal dans cette région pendant qu'il est traité) comme indiqué dans le Diagramme Au-dessus. [29]

2.4.2 SIMO (Single Input Multiple Output) :

Dans la technique SIMO, il n'y a qu'une seule antenne d'émission et plusieurs antennes de réception ; cela aide à augmenter la diversité de réception par rapport à SISO [30]. Voici le schéma de principe du système SIMO avec une antenne d'émission et deux antennes de réception pour l'analyse (dans ce cas, seulement deux, plus de deux également possibles)

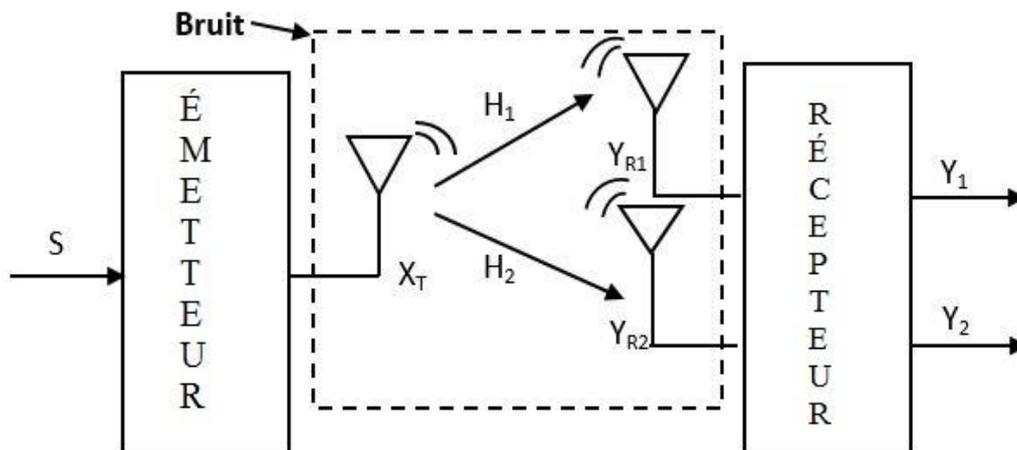


Figure 2.2. SIMO - Single Input Multiple Output.

Dans le diagramme ci-dessus

S : entrée,

Y_1 & Y_2 : deux sorties de deux antennes de réception

X_T : antenne d'émission

Y_{R1} & Y_{R2} : deux antennes de réception (les deux antennes de réception auront des coefficients d'évanouissement différents).

SIMO aide à améliorer la diversité de réception de l'antenne car il donne une diversité plus forte que SISO, mais il n'y a pas d'augmentation de l'observateur dans la capacité du canal [29]

2.4.3 MISO (Multiple Input Single Output)

Dans MISO, il peut y avoir plusieurs antennes d'émission à partir desquelles le signal peut être envoyé, et il n'y a qu'une seule antenne de réception pour recevoir les signaux provenant de plusieurs antennes d'émission, ce qui signifie qu'il y a différentes sources disponibles mais qu'il n'y a qu'une seule destination disponible [30]. Voici le schéma de principe du système MISO avec deux (dans ce cas seulement deux, plus de deux également possibles) antenne d'émission et une antenne de réception pour analyse.

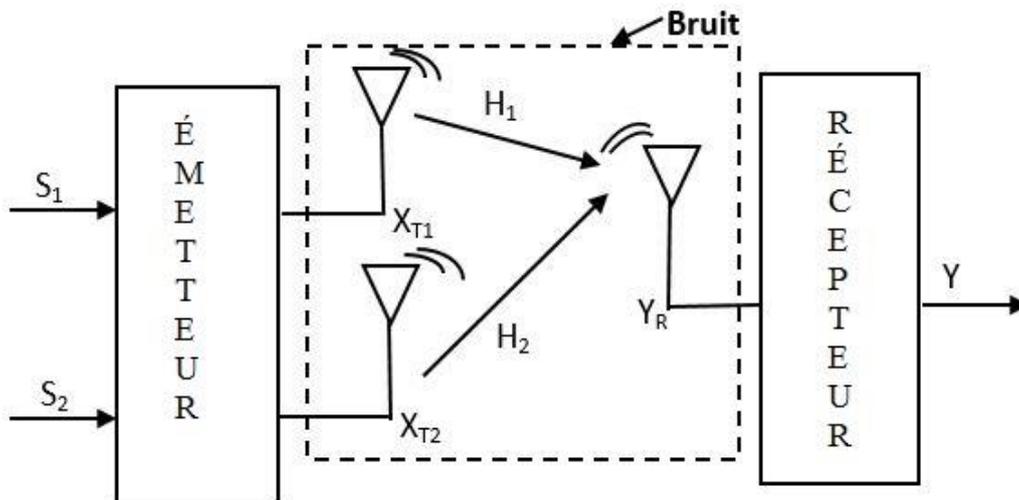


Figure 2.3. MISO - Multiple Input Single Output

Dans le diagramme ci-dessus :

S_1 et S_2 : deux entrées de deux antennes d'émission

Y : sortie d'antenne de réception.

X_{T1} et X_{T2} : deux antennes d'émission (les deux antennes d'émission auront des coefficients d'atténuation différents)

Y_R : deux antennes de réception.

Ce schéma d'antenne permet de récupérer le signal d'origine à l'extrémité de réception avec une perte de trajet moindre que SISO et SIMO, et l'effet de l'évanouissement par trajets multiples est également moindre que les deux techniques ci-dessus car il y a deux antennes à l'extrémité de transmission [30].

2.4.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Dans MIMO, il peut y avoir plusieurs antennes d'émission à partir desquelles le signal peut être envoyé, et il existe également plusieurs antennes de réception à travers lesquelles le signal peut être reçu. Dans MIMO, comme il peut y avoir plusieurs antennes d'émission, le signal peut être transmis par n'importe quelle antenne et donc le signal peut suivre n'importe quel chemin pour atteindre l'extrémité de réception et ce chemin suivi par le

signal dépend de la position de l'antenne, c'est-à-dire si nous déplaçons l'antenne par petite position, le trajet sera modifié [30].

L'évanouissement introduit dans le signal provenant de plusieurs trajets peut être qualifié d'évanouissement à trajets multiples. Voici le schéma de principe du système MIMO avec N (dans ce cas seulement deux considérés pour l'analyse pratique, plus de deux également possibles) antenne d'émission et M (dans ce cas seulement deux considérés pour l'analyse pratique, plus de deux également possibles) antenne de réception pour analyse.

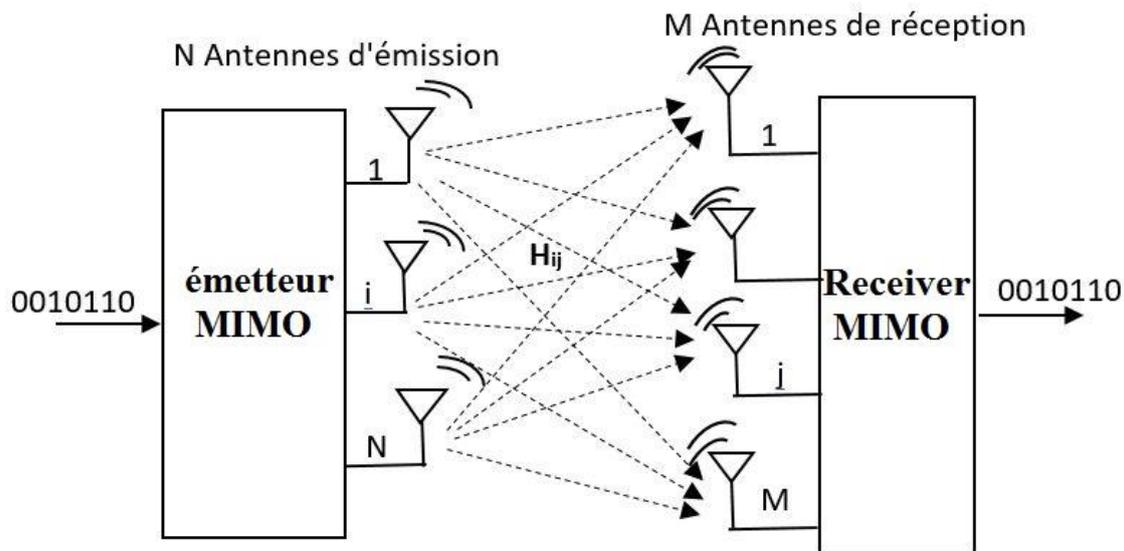


Figure 2.4. MIMO- Multiple Input Multiple Output

Le canal MIMO est traduit par une matrice H de taille dite matrice de canal

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{NR_1} & h_{NR_2} & \dots & h_{NR_Nt} \end{pmatrix}$$

Un signal MIMO peut être défini par :

$$Y = H X + \eta \tag{2.4}$$

Où :

X : la séquence émit.

Y : la séquence reçue.

N : représente le bruit qui corrompt le signal lors de la traversée du canal.[28].

2.5 Massive MIMO

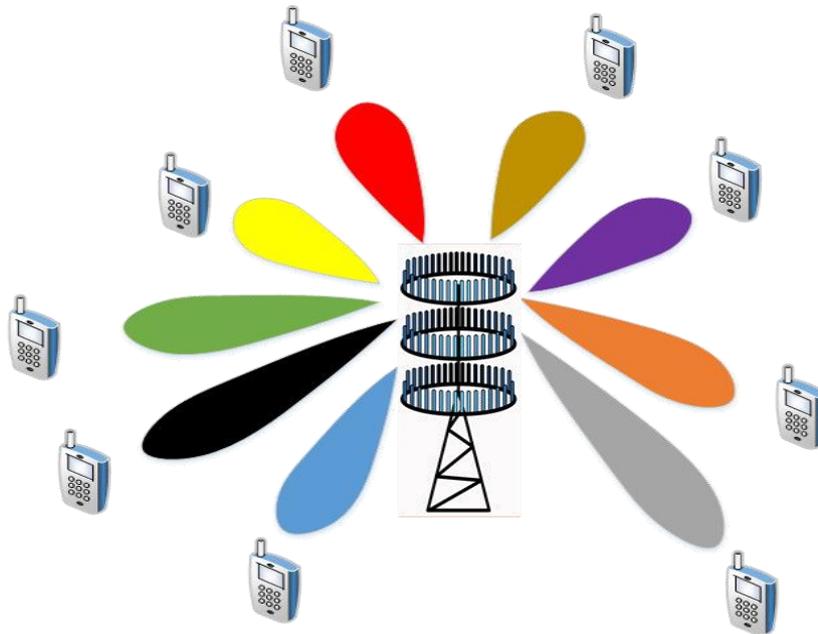


Figure 2.5 Une illustration de MIMO massive et de beamforming.[31]

Un système Massive MIMO, est un système comprenant un nombre d'antennes relativement élevé ($M > 10$) contrôlé numériquement au niveau de la station de base. Ce grand nombre d'éléments rayonnants, va permettre un contrôle fin du rayonnement global de la station de base.

Bien que tout à fait adaptée à des transmissions point-à-point, cette particularité fait que cette solution est souvent associée à des techniques multi-utilisateurs comme MU-MIMO en raison de son potentiel à concentrer l'énergie vers plusieurs emplacements particuliers de l'espace par le Beamforming.

Cette caractéristique est mise en œuvre par le processus de précodage, dont le rôle est d'exploiter une certaine connaissance du canal de propagation pour cibler plusieurs utilisateurs et les servir simultanément. Chacun d'eux peut alors bénéficier de toute la bande passante et obtenir un gain de débit. [33]

La technologie massive MIMO peut offrir certains avantages spécifiques par rapport au système de communication sans fil précédent. Deux avantages importants du MIMO massif sont :

- ✓ Augmentation de la capacité du système, de l'efficacité spectrale et de l'efficacité énergétique.
- ✓ Composants économiques et économes en énergie (faible consommation d'énergie).[34].

2.6 Caractéristiques de Massive MIMO

Dans la technologie Massive MIMO, des centaines ou des milliers d'antennes BS desservent simultanément des dizaines ou des centaines d'utilisateurs par cellule dans la même ressource de fréquence. Les principales propriétés de Massive MIMO sont :

2.6.1 Propagation favorable :

Une propagation favorable signifie que la matrice de canaux entre le réseau d'antennes BS et les utilisateurs est bien conditionnée. Dans le MIMO massif, dans certaines conditions, la propriété de propagation favorable tient en raison de la loi des grands nombres.

2.6.2 Un réseau d'antennes BS massif n'a pas besoin d'être physiquement grand.

Par exemple, considérons un réseau cylindrique avec 128 antennes, comprenant quatre cercles de 16 éléments d'antenne à double polarisation. À 2,6 GHz, la distance entre les antennes adjacentes est d'environ 6 cm, ce qui correspond à une demi-longueur d'onde. Par conséquent, ce réseau n'occupe qu'une taille physique de 28 cm × 29 cm.

2.6.3 Fonctionnement TDD :

Avec FDD, la surcharge d'estimation de canal dépend du nombre d'antennes BS, M . En revanche, avec TDD, la surcharge d'estimation de canal est indépendante de M . Dans MIMO massif, M est grand, et par conséquent, le fonctionnement TDD est préférable. Par exemple, supposons que l'intervalle de cohérence est $T = 200$ symboles (correspondant à une largeur de bande de cohérence de 200 kHz et un temps de cohérence de 1 ms). Ensuite, dans les systèmes FDD, le nombre d'antennes 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 $2K < 200$. **La figure 2.6** montre les régions de faisable (M , K) dans les systèmes FDD et TDD. Nous pouvons voir que la région FDD est beaucoup plus petite que la région TDD. Avec TDD, l'ajout d'antennes n'affecte pas les ressources nécessaires à l'estimation du canal.

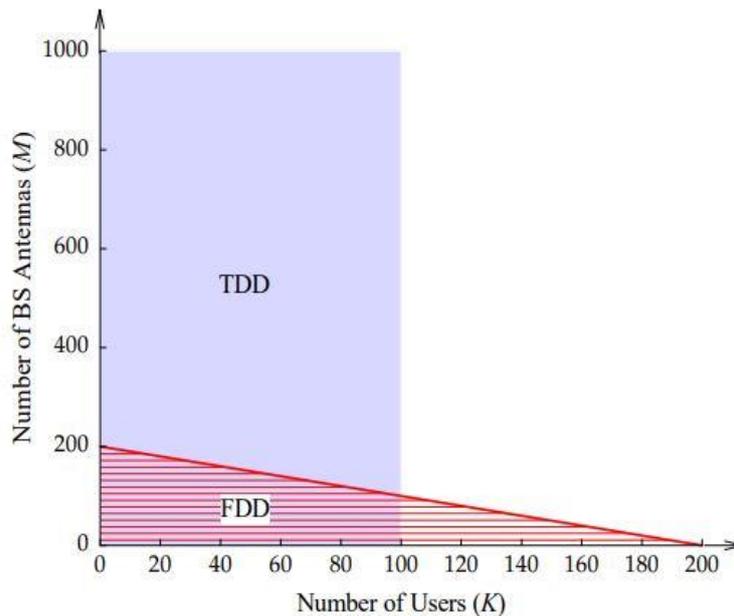


Figure 2.6: Les régions de possibles (M, K) dans les systèmes TDD et FDD, pour un intervalle de cohérence de 200 symboles.

2.6.4 Traitement linéaire:

étant donné que le nombre d'antennes BS et le nombre d'utilisateurs sont importants, le traitement du signal aux extrémités des terminaux doit traiter des matrices / vecteurs de grandes dimensions. Ainsi, un traitement de signal simple est préférable.

Dans Massive MIMO, le traitement linéaire (schémas de précodage linéaire dans la liaison montante et schémas de précodage linéaire dans la liaison descendante) est presque optimal.[35]

2.7 Avantages des systèmes Massive MIMO

- Augmenter la capacité 10 fois ou plus et simultanément, améliorer l'efficacité énergétique rayonnée de l'ordre de 100 fois
- Construit avec des composants peu coûteux et de faible puissance
- Une réduction significative de la latence sur l'interface air.
- Simplifie la couche à accès multiple.
- Augmente la robustesse à la fois aux interférences artificielles involontaires et aux brouillages intentionnels.

2.8 Types Massive MIMO

2.8.1 Single-User MIMO:

Single-User MIMO ou le MIMO point à point c'est la forme la plus simple de MIMO c'est une station de base équipée d'un ensemble des antennes servir un terminal équipé d'un ensemble des antennes aussi, voir la figure 2.8, En raison de la gêne physique des terminaux, le nombre d'antennes sur le terminal est inférieur à M, et on peut également mentionner que l'expression de gain:

$$G = \sqrt{B}.H \tag{2.5}$$

Avec β le facteur d'atténuation moyen en espace libre, et La matrice du canal $H \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1N_t} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N_r,1} & H_{N_r,2} & \cdots & H_{N_r,N_t} \end{bmatrix}$$

Et On peut alors écrire l'équation de canal du signal reçu : [36][37]

$$r = \sqrt{B}.Hx + n \tag{2.6}$$

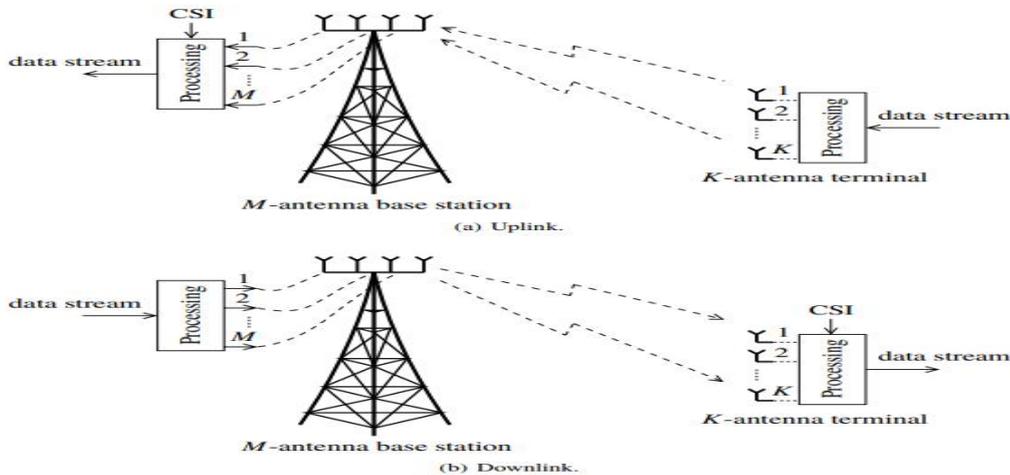


Figure2.8:Single User MIMO

2.8.2 Multi-User Massive MIMO (MU-MIMO) :

Multi-utilisateurs MIMO ou MU-MIMO est une forme améliorée de la technologie MIMO . L'idée de Multi user MIMO pour une station de base BS peut communiquer séparément

avec plusieurs utilisateurs comme illustrer sur la figure 2.9, et l'utilisation de MU-MIMO fournit un gain de multiplexage de capacité et un débit plus élevé lorsque le rapport signal / bruit est élevé.[38].En effet, Le Multi user MIMO est obtenu à partir de la configuration point à point MIMO en décomposant le terminal d'antenne K en plusieurs terminaux.

On Va considérer un terminal composé d'une antenne et K utilisateurs dans la cellule, A l'inverse au système SU-MIOMO le facteur d'atténuation en espace libre β va varier en fonction de l'utilisateur visé et nous allons utiliser $D\beta$ pour défini l'équation :

$$\mathbf{G} = \mathbf{D}_B^{1/2} \mathbf{H} \tag{2.7}$$

Et On peut alors écrire l'équation du canal du signal reçu :

$$\mathbf{r} = \mathbf{D}_B^{1/2} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{2.8}$$

et de $D\beta \in \mathbb{C}^{K \times M}$ la matrice contenant les pertes en espace libre.[38]

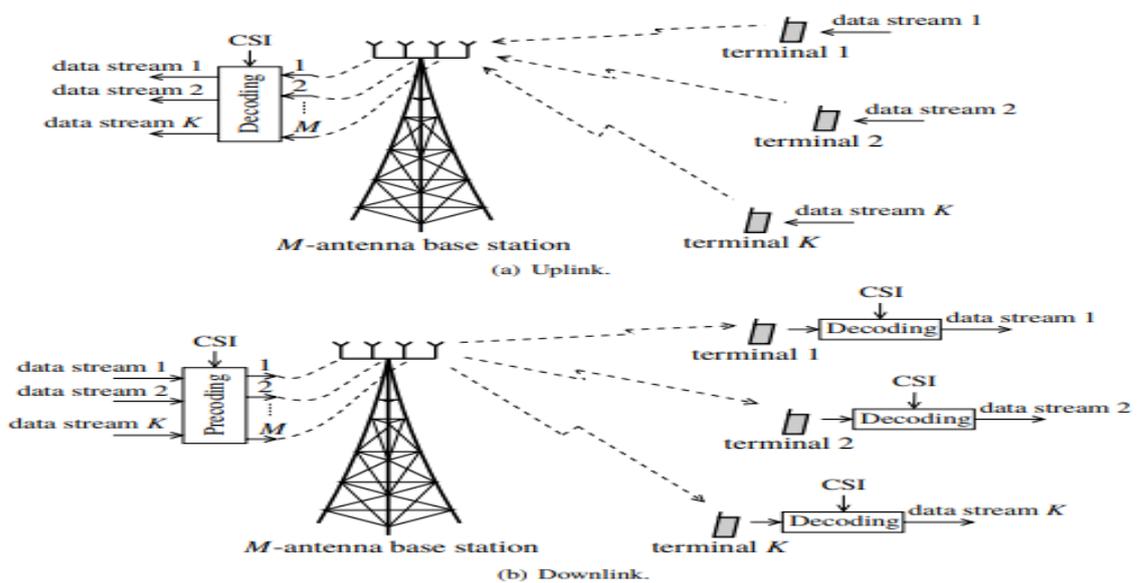


Figure 2.9 : Multi User MIMO.

2.9 Comparaison entre massive MIMO et MIMO traditionnel:

Le Massive MIMO Comprend beaucoup plus d'avantages que le MIMO traditionnel, Le tableau ci-dessous résume ces avantages :

Contenu technique MIMO	traditionnel	MIMO Massive
Le nombre d'antennes	≤ 8	≤ 100
Incertitude de l'angle de canal	Un certain	s le champ de matrice se développe pour former une fonction déterministe
Matrice de canal faible	Faible demande	forte demande
Capacité du canal	faible	élevé
Gain de diversité	Faible	Élevé
Stabilité des liaisons	Faible	Élevé
résister au bruit	Faible	Élevé
Corrélation d'antenne	Faible	Élevé
Couplage bas haut	Faible	Élevé
Pollution des pilotes	non	oui
SER	Faible	Élevé

Tableau 2 Comparaison entre le Massive MIMO et MIMO Traditionnel [39]

2.10 Model de system :

Les systèmes MIMO massifs consiste à un grand nombre d'antennes d'une station de base. On considère un modèle de system MIMO massifs d'une station de base avec un M antennes ($M \gg K$) pour servir un nombre d'utilisateurs K dans la liaison montante et descendante. Le modèle de ce système est illustré dans la figure (2.10) :

Liaison montante :

1. Utilisé le codage pour préparer les données à la transmission.
2. Les séquences pilotes et les séquences de données sont transmises avec le même canal pour chaque utilisateur.
3. La BS reçoit la somme des flux de données de tous les utilisateurs et estime le canal de transmission.
4. Les opérations de décodage et de détection produisent des flux de données individuels en utilisant le CSI estimé.

Liaison descendante :

1. Beamforming : Les flux de données sont transmis de BS aux utilisateurs désirés, où les différents flux de données peuvent occuper le même canal de transmission (multiplexage en division spatiale).
2. Précodage : L'opération précédente est effectuée en connaissant la réponse fréquentielle du canal de propagation (ou CSI).[40]

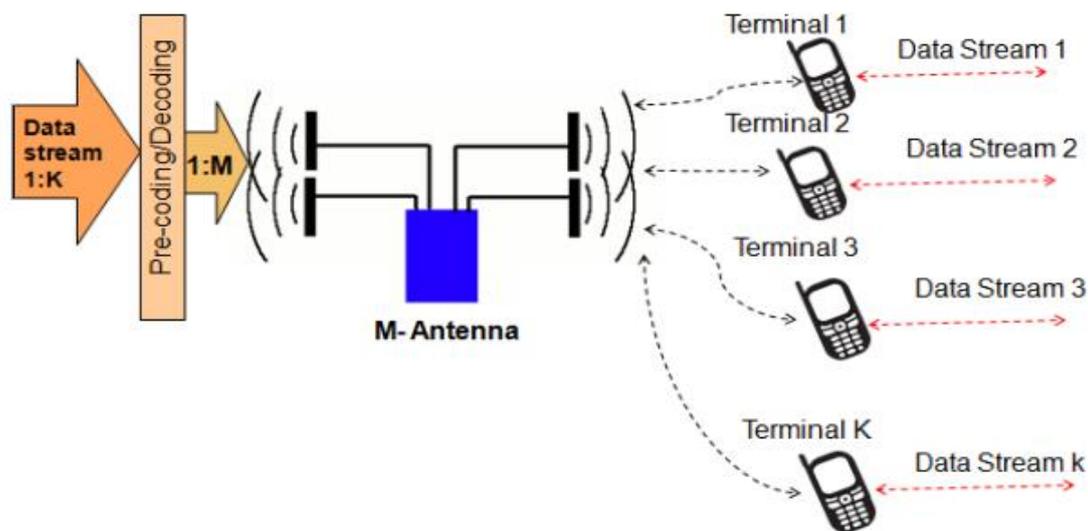


Figure 2.10 Le modèle du système MIMO massif

2.11 Techniques de pré-codage linéaire :

2.11.1 introduction de pré-codage :

Le pré-codage de canal et d'une façon générale c'est une technique qui exploite la diversité de transmission en pondérant le flux d'informations, qu'envoie les informations codées vers le récepteur pour obtenir une connaissance préalable du canal, on note que :

Le signal reçu au niveau du récepteur sera : $r = (h/h_{est}) * s + n$

r : Le signal reçu

h : le canal

h_{est} : le canal prévu

S : l'information

n : bruit .

Si $h_{est} = h$ donc on peut dire que notre prédiction est parfaite, et il se révèle être le problème de détection dans les canaux de Gauss qui est simple $r = s + n$

On conclue que Cette technique permettra de réduire l'effet corrompu du canal de communication.[41]

2.11.2 Pré-codage linéaire pour les system MU-MIMO :

Le pré-codage linéaire peut être interprété comme trouver l'équilibre optimal entre la réalisation de gain de signal fort et de limiter les interférences entre utilisateurs, Et pour ça on va voir différentes approche pour le pré-codage dans le contexte OFDM MU-MIMO : [41][42]

2.11.3 Matched Filter (MF) :

Le pré-codeur MF aussi appelé le rapport maximal (MR), Le pré-codeur du filtre apparié (MF) est tout simplement la transposer conjuguée de la matrice du canal de liaison descendante, c'est-à-dire :

$$\mathbf{w}_{MF} = \sqrt{\alpha} \mathbf{H}^* \quad (2.14)$$

Et $(.)^*$: c'est le Opérateur conjugué complexe.

Où α est un facteur d'échelle pour normaliser la puissance du signal. Le vecteur de signal reçu est alors donné par :

$$\mathbf{y}_{MF} = \sqrt{p\alpha} \mathbf{H}^T \mathbf{H}^* \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2.15)$$

Et $(.)^T$: Opérateur de transposition.

Le pré-codeur MF est maximise le gain de signal à l'utilisateur visé, Il est la contrepartie du rapport maximal combinant récepteur pour le lien de liaison montante.

Avec l'augmentation des antennes des **BTS**, les vecteurs de canal en \mathbf{H} se rapprochent mutuellement orthogonal. En conséquence, le terme $\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*$ s'approche d'une matrice diagonale , conduisant à la solution optimale.

Par conséquent, le pré codage MF est presque optimal, tant que le nombre d'antennes des BTS est beaucoup plus élevé que le nombre d'utilisateurs terminaux. .

2.11.4 Zéro Forcing (ZF) :

Le Pré-codage forçage à zéro (ZF) est un autre type de technique de pré-codage de base, qui élimine l'interférence en transmettant le signal vers l'utilisateur visé tout en annulant dans les directions d'autres utilisateurs. Le précodeur ZF est obtenu par :

$$\mathbf{w}_{ZF} = \sqrt{\alpha} \mathbf{H}^* (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*)^{-1} \quad (2.16)$$

et le vecteur de signal reçu correspondant est :

$$\mathbf{y}_{ZF} = \sqrt{\alpha} \mathbf{H}^T \mathbf{H}^* (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*)^{-1} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2.17)$$

Le terme $\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*$ forme une matrice appelé la matrice Gram dont les éléments diagonales dénotent le déséquilibre de puissance entre les canaux, tandis que les éléments hors diagonale caractérisent les corrélations mutuelles entre les canaux. Lorsqu'il existe des canaux fortement corrélés, ZF pré-code les canaux au prix de la perte de capacité du canal. Il s'agit d'un système de pré-codage optimal en l'absence de bruit additif ; Lorsque le bruit additif est présent, cette technique de pré-codage pourrait amplifier l'effet bruit. .[43]

2.11.5 RZF/MMSE :

C'est une forme régularisée de pré-codage ZF (RZF), a été considéré comme le pré-codeur de pointe pour les systèmes de communications sans fil MIMO pour sa capacité à échanger les avantages des pré-codeur MF et ZF Sa popularité est également reflétée par

ses noms Alternatifs tels que le rapport signal-bruit virtuel (SINR) basé sur l'évaluation de la valeur de faisceau maximisant le filtre Wiener et le rapport signal-à-fuite-bruit (SINR) maximisant la formation de faisceau Selon et la matrice de pré-codeur RZF est administrée par :

$$\mathbf{w}_{RZF} = \sqrt{\alpha} \mathbf{H}^* (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^* + \mathbf{X} + \lambda \mathbf{I}_k)^{-1} \quad (2.18)$$

Qui est un pré-codeur ZF régularisé par une matrice hermitienne non négative X et un facteur de régularisation λ . Le vecteur de signal reçu correspondant est : [43]

$$\mathbf{y}_{RZF} = \sqrt{\rho \alpha} \mathbf{H}^T \mathbf{H}^* (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^* + \mathbf{X} + \lambda \mathbf{I}_k)^{-1} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2.19)$$

2.11.6 Truncated Polynomial Expansion (TPE) :

Le pré-codage à base d'expansion polynomiale tronquée (TPE) est une technique récemment proposée pour réduire la complexité computationnelle du pré-codeur RZF tout en maintenant des performances similaires. Cette technique remplace l'inversion de matrice dans le pré codage RZF par une expansion polynomiale, qui est ensuite tronquée. La matrice de pré codage TPE est donnée par :

$$\mathbf{W}_{TPE} = \sum_{j=0}^{J-1} \mathbf{w}_j (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*)^j \mathbf{H}^T \quad (2.20)$$

Où \mathbf{w}_j est le coefficient du pré-codeur polynomial de l'ordre J, Une sélection appropriée de J permet une transition en douceur. [43]

2.12 Défis de Massive MIMO :

Modulation :

Pour une BS avec un grand nombre d'antennes, Les amplificateurs RF efficaces sont nécessaires.

Low-cost Hardware :

Un grand nombre de canaux RF, Un convertisseur analogique-numérique et Un convertisseur numérique-analogique sont nécessaires.

Contamination des Pilots :

Problème de contamination des pilotes pour massive MIMO, les utilisateurs des cellules voisines peuvent utiliser des pilotes non orthogonaux qui entraînent une contamination du pilote. Cela provoque un problème d'interférence intercellulaire qui se développe encore avec l'augmentation de nombre d'antennes BS.

Estimation du canal :

Donc il faut qu'évaluer l'information sur l'état du canal, Ce que l'on appelle (Channel State Acquisition ou CSI). [44]

Le model de Déploiement d'antennes :

La Stratégies de déploiement des antennes dans la station de base c'est important et cause certaine défie tel que :

Les Effets de l'espacement des antennes et du couplage mutuel sur le système

- Large nombre d'antennes pour assurer une QoS.
- **L'allocation de ressources.**
- **L'Efficacité spectrale et énergétique.** [45]

2.13 Efficacité spectrale (SE) :

MIMO massive est une exilent technique pour améliore l'efficacité spectrale SE des réseaux cellulaires, On peut définir que l'efficacité spectrale c'est le rapport de nombre de bits pouvant être transmis par unité de la bande passante, à travers L'efficacité spectrale on peut conclue la bonne ou la mauvaise utilisation de la bande passante du canal. Elle se mesure par :

$$SE = \frac{D}{Bp} \quad (2.21)$$

SE : l'efficacité spectrale (bits/s/Hz).

D : Débit de la source (bits/s).

BP : Bande passante du canal en Hz

2.13.1 Model de system :

On prendre comme considération un modèle de réseau cellulaire où les données utilisées transmis dans des temps et fréquences réutilisé. Chaque cellule est assigné d'un index dans l'ensemble \mathcal{L} , et Chaque station de base de chaque cellule est équipée d'un réseau de M antennes qui communiquent avec K utilisateurs à simple antenne simultanément, sur un ensemble de K_{max} utilisateurs, où M et K_{max} sont larges et fixes, avec une demande illimité de données au niveau des utilisateurs.[46]

On va étudie l'efficacité spectrale SE dans la liaison montant :

Le signal reçu Liaison Montant : Le signal reçu $y_j \in C^M$ à la station de base \mathcal{L} est donné par :

$$y_j = \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k=1}^K \sqrt{p_{lk}} h_{jkl} x_{kl} + n_j \quad (2.22)$$

Est le symbole transmis par le terminal dans la cellule.

$x_{lk} \in C$: est le symbole transmis par le terminal k dans la cellule L, normalisé en $E\{|x_{lk}|^2\} = 1$.

n_j : Le bruit additif que est ϵC^M définit par $n_j \sim \text{CN}(0, \delta^2, I_M)$, ou δ^2 est la variance du bruit.

2.13.2 Efficacité spectrale obtenu en liaison montante :

On suppose que la station de base j est utilisé une applique une combinaison linéaire de vecteur de réception $g_{jk} \in C^M$ au signal reçu $g_{jk}^h y_j$ pour amplifier le signal venant du k^{ieme} terminal et éliminer l'interférence venant des autres terminaux.

Donc on peut écrire L'efficacité spectrale ergodique pour un terminal k d'une cellule J est donné par :[47]

$$SE_{jk}^{(ul)} = \zeta^{(ul)} \left(1 - \frac{B}{S}\right) E_{\{z\}} \{ \text{Log}_2(1 + SINR_{jk}^{ul}) \} (\text{bit/s/Hz}) \quad (2.23).$$

2.14 Conclusion

Les systèmes Massive MIMO fournit un débit et une efficacité spectrale beaucoup plus élevée par rapport aux systèmes MIMO traditionnels. C'est grâce à l'utilisation de nombreuses antennes $M > 10$ à la BS.

Dans ce chapitre, nous avons décrit le passage d'un système MIMO à un système Massive MIMO tout en donnant leurs techniques d'émissions et de réceptions et la différence entre ces deux systèmes.

Le chapitre qui suit, sera consacré à la présentation des résultats des simulations de l'antenne conçue au cours de ce travail.

CHAPITRE 3

Simulation ET Résultat

Sommaire

3.1 Introduction :	34
3.2 Language utilisé	34
3.3 Environnement de simulation	34
3.4 Discussion des résultats de simulation	35
3.5 Conclusion	46

3.1 Introduction :

L'efficacité spectrale est le facteur le plus important pouvant être amélioré pour les futurs réseaux 5G. dans ce chapitre nous étudions différentes approches possibles pour montrer lesquelles sont les plus prometteuses pour l'améliorer. en comparant les différents simulations Matlab. Ainsi qu'une discussion des différents résultats.

3.2 Language utilisé

Le succès de tout projet de programmation dépend de certains facteurs clés tels que : la puissance de compilation, la disponibilité de plusieurs fonctionnalités et la communication avec d'autres environnements, la facilité d'utilisation, etc.

Afin de réaliser les différentes simulations de notre étude, nous avons utilisé les outils du logiciel MATLAB®.

MATLAB signifie MATrix LABoratory. C'est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un logiciel interactif pour réaliser des calculs numériques, le développement d'algorithmes, de visualisation et d'analyse de données.

3.3 Environnement de simulation

Dans le scénario UL représenté sur la figure, les UE de la cellule 0 transmettent à leur BS qu'il dessert, tandis que les signaux UL des UE de la cellule 1 fuient dans la cellule 0 sous forme d'interférence.

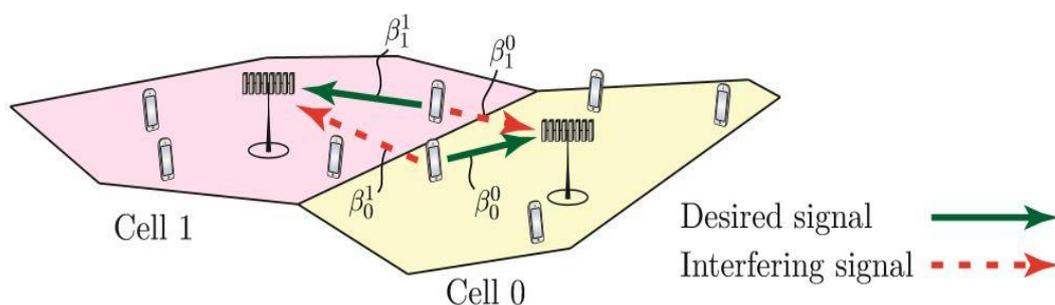


Figure 3.1 Illustration de la notion de signaux UL désirés et interférents dans un réseau à deux cellules.

Les signaux brouilleurs de UE dans la cellule 1 ont un gain de canal moyen de β_1^0 .

Les signaux brouilleurs de UE dans la cellule 0 ont un gain de canal moyen de β_0^1 .

Nous supposons que : $\beta_0^0 = \beta_1^1$ et $\beta_1^0 = \beta_0^1$.

On peut alors définir le rapport $\bar{\beta}$ entre les gains des canaux inter-cellules et intracellulaires comme :

La force de l'interférence entre les cellules :

$$\bar{\beta} = \frac{\beta_1^0}{\beta_0^0} = \frac{\beta_0^1}{\beta_0^0} = \frac{\beta_1^1}{\beta_1^0} = \frac{\beta_0^1}{\beta_1^1} \quad (3.1)$$

Nous avons généralement $0 \leq \bar{\beta} \leq 1$, où $\bar{\beta} \approx 0$ correspond à une interférence intercellulaire négligeable et $\bar{\beta} \approx 1$ signifie que l'interférence intercellulaire est aussi forte que les signaux souhaités. [1]

3.4 Discussion des résultats de simulation

3.4.1 Influence du SNR sur l'efficacité spectrale :

L'efficacité spectrale (SE) fait référence au débit d'information qui peut être transmis sur une bande passante donnée, elle dépend naturellement de la force du signal désiré reçu, représenté par le SNR moyen¹. Dans cette simulation nous allons augmenter la puissance de transmission et étudier son influence sur la (SE).

Nous considérons un modèle de propagation directe (LoS) et un modèle de propagation sans visibilité directe (NLoS), tel que :

Dans le cas LoS : SE pour l'UE souhaité donnée par :

$$SE_0^{los} = \log_2 \left(1 + \frac{1}{\bar{\beta} + \frac{1}{SNR_0}} \right) \quad (3.2)$$

Dans le cas NLoS avec ($\bar{\beta} \neq 1$) :

$$SE_0^{Nlos} = E \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{p|h_0^0|^2}{p|h_0^0|^2 + \delta^2} \right) \right\} \\ = \frac{e^{\frac{1}{SNR_0}} E_1\left(\frac{1}{SNR_0}\right) - e^{\frac{1}{SNR_0\bar{\beta}}} E_1\left(\frac{1}{SNR_0\bar{\beta}}\right)}{\log_2(2)(1-\bar{\beta})} \quad (3.3)$$

Avec : $E_1(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xu}}{u}$

Les résultats de simulation sont présentés par la figure suivante :

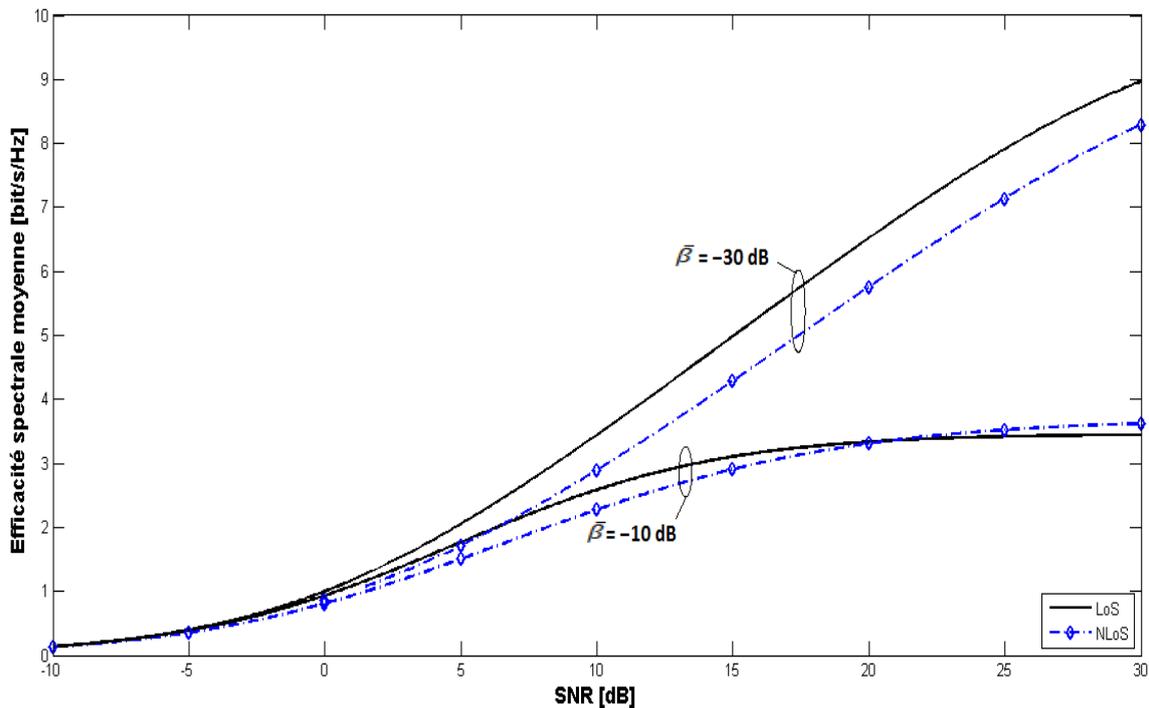


Figure 3.2: SE moyenne en fonction du SNR pour $\bar{\beta} \in \{-10, -30\}$ dB, et différents modèles de canaux.

La figure 3.1 montre la variation SE en fonction du SNR, Nous considérons deux forces différentes de l'interférence intercellulaire : $\bar{\beta} = -10$ dB et $\bar{\beta} = -30$ dB.

La SE converge rapidement vers la limite LoS $\log_2(1 + \frac{1}{\bar{\beta}}) \approx 3,46$ bit/s/Hz et le NLoS vers la limite $\log_2(\frac{1}{1-\bar{\beta}}) \approx 3,69$ bit/s/Hz dans le premier cas, car l'interférence n'est que de 10 dB plus faible que le signal souhaité.

Pour $\bar{\beta} = -30$ dB, la convergence vers la limite LoS = 8,99 bit/s/Hz et la limite NLoS = 8,3 bit/s/Hz est moins visible dans la plage SNR considérée, car l'interférence est plus faible et le logarithme rend le SE croît lentement.

Pour la plupart des SNR on remarque que la SE est légèrement inférieure au cas NLoS que LoS en raison des fluctuations aléatoires de la grandeur au carré $|h_0^0|^2$ du canal.

Le caractère aléatoire se transforme en un petit avantage à SNR élevé, où la limite est légèrement plus élevée dans NLoS car l'interférence peut être beaucoup plus faible que le signal pour certaines réalisations de canal. Ce comportement est observé pour $\bar{\beta} = -10$ dB sur la figure 3.1, tandis qu'il se produit à des SNR plus élevés pour $\bar{\beta} = -30$ dB.

D'après ces résultats, l'augmentation du SNR en utilisant plus de puissance de transmission améliore la SE, mais l'effet positif pousse rapidement le réseau dans un régime limité en interférences où aucune SE extraordinaire ne peut être obtenue. Ceci est essentiellement dû au manque de degrés de liberté à la BS, qui ne peut pas séparer le signal souhaité du brouillage d'une seule observation.

3.4.2 Diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes

Dans cette simulation nous allons étudier le fait d'avoir différents nombres d'antennes dans la station de base de réception.

Pour cela, Appliquons le précodage MR au signal reçu.

L'efficacité spectrale SE pour l'UE souhaité dans le cas LoS est :

$$SE_0^{los} = \log_2 \left(1 + \frac{M}{\beta g(\varphi_0^0, \varphi_1^0) + \frac{1}{SNR_0}} \right) \quad (3.4)$$

Où la fonction $g(\varphi, \psi)$ est définie comme :

$$g(\varphi \cdot \psi) = \begin{cases} \frac{\sin^2(\pi d_H M (\sin(\varphi) - \sin(\psi)))}{M \sin^2(\pi d_H (\sin(\varphi) - \sin(\psi)))}, & \text{si } \sin(\varphi) \neq \sin(\psi) \\ M, & \text{si } \sin(\varphi) = \sin(\psi) \end{cases} \quad (3.5)$$

La fonction d'interférence $g(\varphi_0^0, \varphi_1^0)$ est représentée sur la figure 3.2 pour un UE souhaité à l'angle fixe $\varphi_0^0 = 30^\circ$, tandis que l'angle de l'UE brouilleur varie entre -180° et 180° . L'espacement d'antenne est $d_H=1/2$.

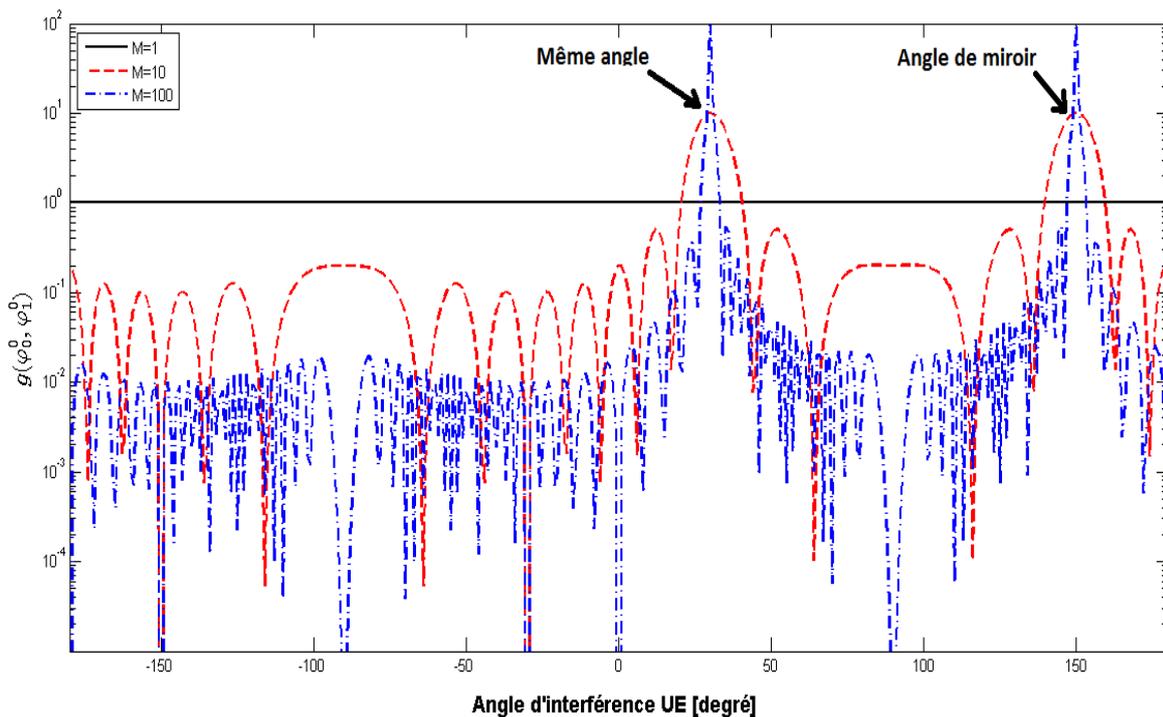


Figure 3.3 La fonction $g(\varphi_0^0, \varphi_1^0)$ dans (3.5) qui détermine le niveau d'interférence dans un scénario LoS.

Dans le cas d'une seule antenne, nous avons $g(\varphi_0^0, \varphi_1^0) = 1$ quels que soient les angles. Ce qui est conforme à l'étude précédente.

Lorsque la BS a plusieurs antennes, $g(\varphi_0^0, \varphi_1^0)$ dépend fortement des angles individuels de l'UE. Il y a des pics d'interférence lorsque les deux UE ont le même angle ($\varphi_1^0 = 30^\circ$) et lorsque les angles sont les réflexions des miroirs l'un de l'autre ($\varphi_1^0 = 180^\circ - 30^\circ = 150^\circ$).

La fonction est égale à M à ces pics, car le signal brouilleur est combiné de manière cohérente par la combinaison MR (tout comme le signal souhaité).

Lorsque l'antenne peut résoudre les UE individuels, le niveau d'interférence diminue plutôt rapidement et devient généralement plus petit lorsque M augmente. Dans ces cas, le niveau d'interférence oscille lorsque l'angle d'interférence de l'UE est varié, mais est environ $1/M$ fois plus faible que dans le cas d'une seule antenne.

Cette simulation montre que les multiples antennes BS aident à supprimer les interférences, tant que les angles UE sont suffisamment différents.

L'efficacité spectrale pour L'UE désiré dans le cas NLoS (avec $\bar{\beta} \neq 1$) est :

$$SE_0^{NLoS} = \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{1}{\bar{\beta}}\right)^M} - 1 \right) \frac{e^{\frac{1}{SNR_0 \bar{\beta}}} E_1\left(\frac{1}{SNR_0 \bar{\beta}}\right)}{\log_e(2)} + \sum_{m=1}^M \sum_{l=0}^{M-m} \frac{(-1)^{M-m-l+1}}{\left(1 - \frac{1}{\bar{\beta}}\right)^m} \frac{\left(e^{\frac{1}{SNR_0}} E_1\left(\frac{1}{SNR_0}\right) + \sum_{n=1}^l \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{1}{j! SNR_0^j}\right)}{(M-m-l)! SNR_0^{M-m-l} \bar{\beta} \log_e(2)} \quad (3.6)$$

Une borne inférieure sur la SE donné par :

$$SE_0^{NLoS} = E \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{p \|h_0^0\|^2}{p \frac{|(h_0^0)^H h_1^0|^2}{\|h_0^0\|^2} + \delta^2} \right) \right\} \geq \log_2 \left(1 + \frac{M-1}{\bar{\beta} + \frac{1}{SNR_0}} \right) \quad (3.7)$$

La puissance d'interférence en (3.7) est indépendante de M, contrairement au cas LoS en (3.4) où elle diminue en $1/M$.

Donc il faut étudier la propagation favorable entre LoS et NLoS.

Pour déterminer la propagation la plus favorable entre le LoS et le NLoS la figure 1.13 montre la fonction de distribution cumulative (CDF) du gain d'interférence relatif qui détermine dans quelle mesure l'interférence est supprimée par la combinaison MR. Considère le cas LoS avec M = 10 et M = 100, et montre le CDF sur différents angles UE uniformément répartis entre 0 et 2π .

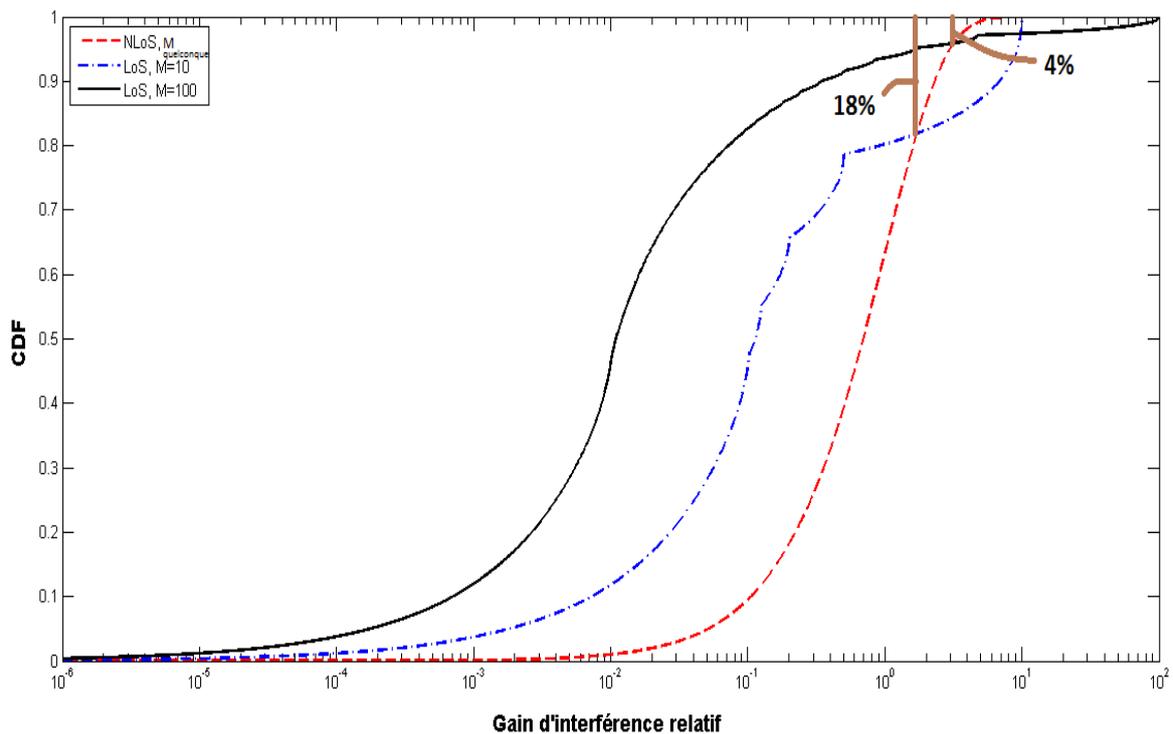


Figure 3.4: CDF du gain d'interférence relatif³ en utilisant l'échelle logarithmique sur l'axe horizontal.

La figure 3.4 montre que les canaux LoS fournissent souvent plusieurs gains d'interférence de plusieurs ordres de grandeur inférieurs aux canaux NLoS, mais cela ne s'applique qu'à la majorité des réalisations d'angles aléatoires. Il y a une faible probabilité que le gain d'interférence soit plus grand en LoS qu'en NLoS ; cela se produit dans 18% des réalisations avec $M = 10$ et 4% des réalisations avec $M = 100$.

Cela correspond aux cas où $\sin(\varphi_0^0) \approx \sin(\varphi_1^0)$ de sorte que l'antenne ne peut pas résoudre et séparer les angles UE. Cela se produit moins fréquemment pour les nœuds aléatoires à mesure que M augmente, car l'ouverture du réseau augmente et obtient ainsi une meilleure résolution spatiale. Néanmoins, pour tout M fini, il y aura un petit intervalle angulaire autour de φ_0^0 où les interférences entrantes seront amplifiées uniquement en fonction du signal souhaité.

D'après les deux figures précédentes 3.2, 3.3 l'augmentation du nombre d'antennes BS améliore la SE, Cela est dû au fait que la BS peut traiter son signal reçu sur l'antenne pour augmenter sélectivement le gain de signal sans collecter plus d'interférences. En revanche, l'augmentation de la puissance de transmission augmentera à la fois le signal et les interférences et donnera une limite SE supérieure.

Le concept de propagation favorable fournit un moyen pour quantifier la capacité de séparer les canaux UE à un BS avec de nombreuses antennes.

Les canaux h_i^0 et h_k^0 assureraient une propagation asymptotiquement favorable si :

$$\frac{h_j^0 h_k^0}{\sqrt{E\{\|h_i^0\|^2\}E\{\|h_k^0\|^2\}}} \xrightarrow{0, M \rightarrow \infty} 0 \quad (3.8)$$

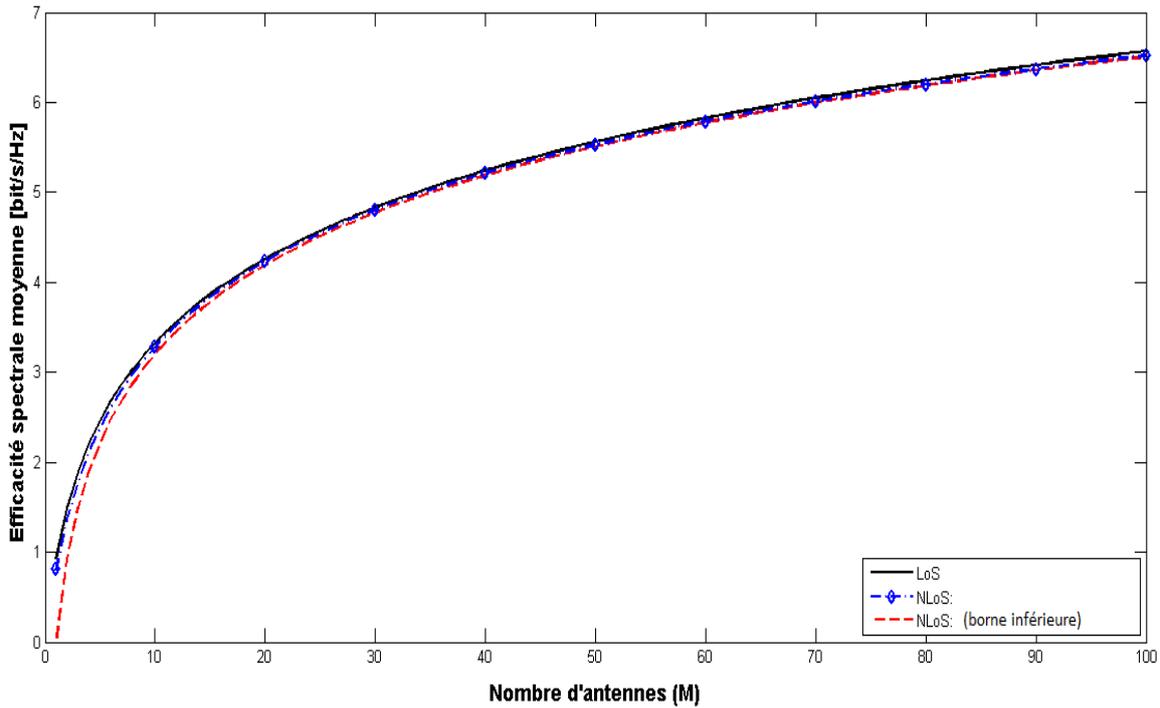


Figure 3.5: SE moyenne en fonction du nombre d'antennes BS (M) pour différents modèles de canaux. $SNR_0 = 0$ dB et $\bar{\beta} = -10$ dB.

La figure 3.5 montre la SE moyenne en fonction du nombre d'antennes BS lorsque le SNR de l'UE souhaité est fixé à $SNR_0 = 0$ dB et que la force de l'interférence inter-cellules est $\bar{\beta} = -10$ dB.

La figure 3.5 montre qu'en passant de $M = 1$ à $M = 10$ antennes, on peut améliorer la SE de 0,8 bit/s/Hz à 3,3 bit/s/Hz, Malgré les conditions de SNR et d'interférence plutôt médiocres. Ceci est réalisé grâce au gain de réseau fourni par la combinaison MR.

Nous remarquons que la borne inférieure du SE avec propagation NLoS dans (3.7) est très serrée pour $M > 10$.

La SE augmente en fonction de M et croît sans limite comme $M \rightarrow \infty$, contrairement au cas (Figure 3.2) où la SE est saturé dans le régime de SNR élevé. Ceci est dû à la combinaison

MR, qui collecte sélectivement plus d'énergie de signal à partir du réseau, sans collecter plus d'énergie d'interférence.

La différence entre LoS et NLoS est négligeable sur la figure 3.5 car la décoloration du canal a progressivement moins d'impact sur les informations mutuelles entre les données transmises et reçus lorsque de nouvelles antennes sont ajoutées.

3.4.3 L'accès multiple à répartition dans l'espace dans la voie montante :

L'accès multiple par répartition dans l'espace (SDMA) gère les interférences entre utilisateurs dans une cellule en utilisant plusieurs antennes au niveau de la station de base pour rejeter les interférences par traitement spatial.

Dans les deux simulations suivante, il y a une claire augmentation du SE en augmentant le nombre d'antennes (M) au (BS) . La différence est apparue de type de précodage utilisé pour réduire l'interférence.

Une somme UL réalisable SE [bit / s / Hz / cellule] dans le cas LoS est :

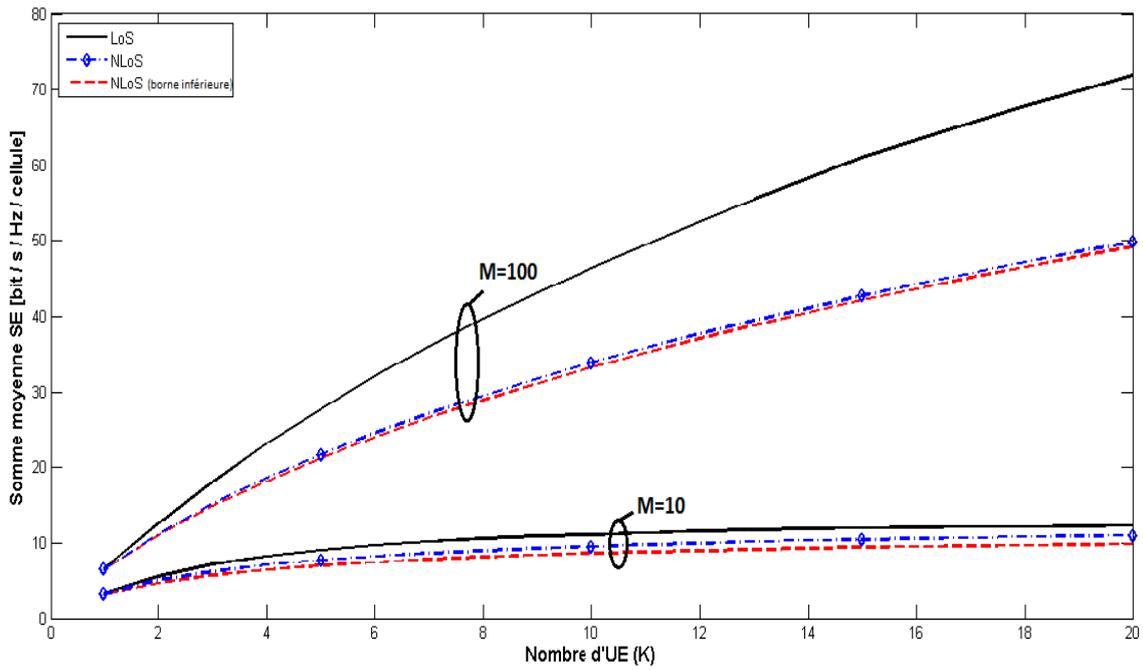
$$SE_0^{LoS} = \sum_{k=1}^k \log_2 \left(1 + \frac{M}{\sum_{i=1, i \neq k}^k g(\varphi_{0k}^0, \varphi_{0i}^0) + \bar{\beta} \sum_{i=1}^k g(\varphi_{0k}^0, \varphi_{1i}^0) + \frac{1}{SNR_0}} \right) \quad (3.9)$$

Avec les canaux NLoS, une somme UL réalisable SE [bit / s / Hz / cellule] :

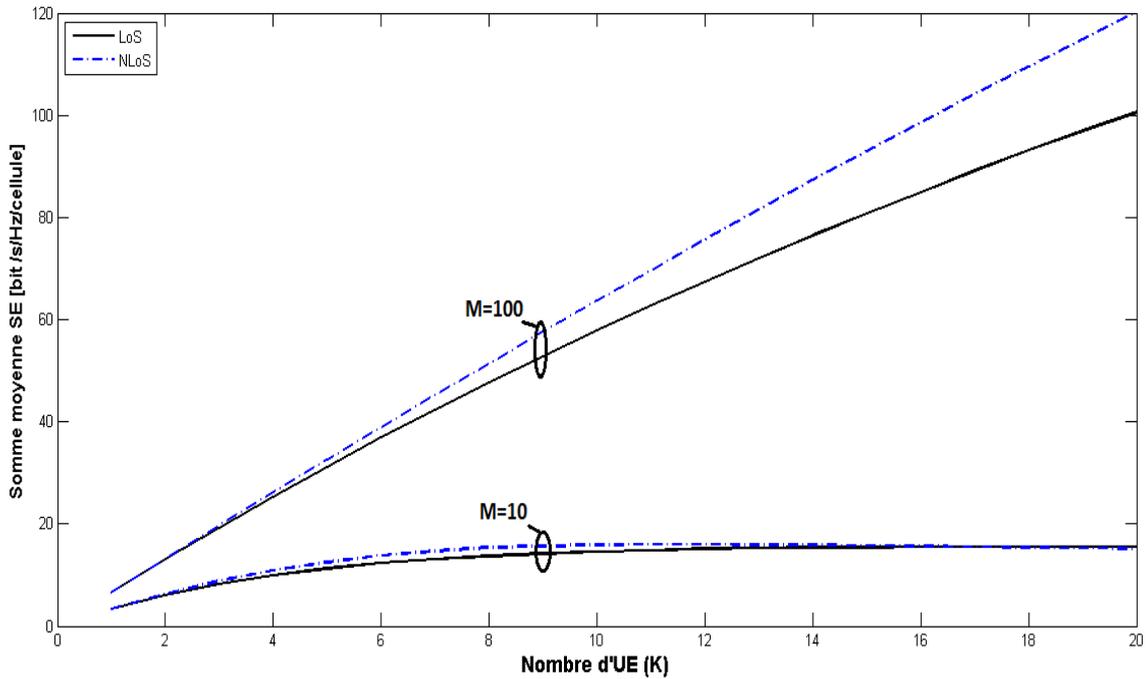
$$SE_0^{NLoS} = \sum_{k=1}^k E \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{p \|h_{0k}^0\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^k p \frac{|(h_{0k}^0)^H h_{0i}^0|^2}{\|h_{0k}^0\|^2} + \sum_{i=1}^k p \frac{|(h_{0k}^0)^H h_{1i}^0|^2}{\|h_{0k}^0\|^2} + \delta^2} \right) \right\} \geq k \log_2 \left(1 + \frac{M-1}{(K-1) + K\bar{\beta} + \frac{1}{SNR_0}} \right) \quad (3.10)$$

La figure 3.6 montre la somme moyenne SE en fonction du nombre d'UE par cellule, pour M = 10 ou M = 100 antennes. La somme SE avec le précodage MR est montrée sur la figure 3.6a sur la base des formules précédentes, tandis que les simulations Monte-Carlo⁴ sont utilisées pour le précodage M-MMSE⁵ sur la figure 3.6b.

Dans les deux cas, le SNR₀ fixé à 0dB et $\bar{\beta} = -10$ dB. L'espacement des antennes est d_H = 1/2 dans le cas LoS et les résultats sont moyennés sur différents angles UE indépendants, tous étant uniformément répartis de 0 à 2π.



(a) Précodage MR



(b) Précodage M-MMSE.

Figure 3.6 : la Somme d'efficacité spectrale uplink moyenne en fonction du nombre d'utilisateurs par cellule pour différents schémas de précodage, différents modèles de canaux et $M = 10$ ou $M = 100$ antennes BS.

La figure 3.6 montre que la somme SE est une fonction qui augmente lentement de K dans le cas de $M = 10$, car la BS n'a pas suffisamment de degrés de liberté spatiale pour séparer les UE, ni par MR ni par combinaison M-MMSE.

Le comportement est complètement différent lorsque $M = 100$ antennes sont utilisées car la réponse de canal de chaque UE est alors un vecteur à 100 dimensions

Mais il n'y a que jusqu'à 20 UE par cellule, de sorte que les canaux UE ne couvrent qu'une petite partie des dimensions spatiales le BS peut résoudre.

On remarque que la somme SE est considérablement plus faible avec NLoS qu'avec LoS lors de l'utilisation de le précodage MR, tandis que nous obtenons le résultat inverse lors de l'utilisation de le précodage M-MMSE.

La raison en est que chaque UE est affectée par les interférences de nombreux UE dans le cas NLoS, alors que seuls quelques UE avec des angles similaires provoquent de fortes interférences dans le cas LoS. Si l'interférence est ignorée, comme avec la combinaison MR, la SE est plus faible dans le cas NLoS en raison de la puissance d'interférence somme plus élevée.

Nous constatons qu'il est plus facile pour le précodage M-MMSE de rejeter les interférences dans NLoS que dans LoS, où il peut y avoir quelques UE avec des canaux qui sont presque parallèles au canal de l'UE souhaité. C'est pourquoi le SE est plus élevé dans le NLoS lors de l'utilisation de M-MMSE.

3.4.4 l'interférence intracellulaire :

Pour contrôler l'interférence entre utilisateurs qui augmente avec K et étudier les meilleurs possibilité pour réduire son effet sur l'efficacité spectrale nous allons simuler la variation de SE obtenue par précodage M-MMSE, en fonction de K pour différents rapports antenne-UE : $M/K \in \{1, 2, 4, 8\}$.

Nous considérons maintenant les cas dans lesquels M est augmenté proportionnellement à K .

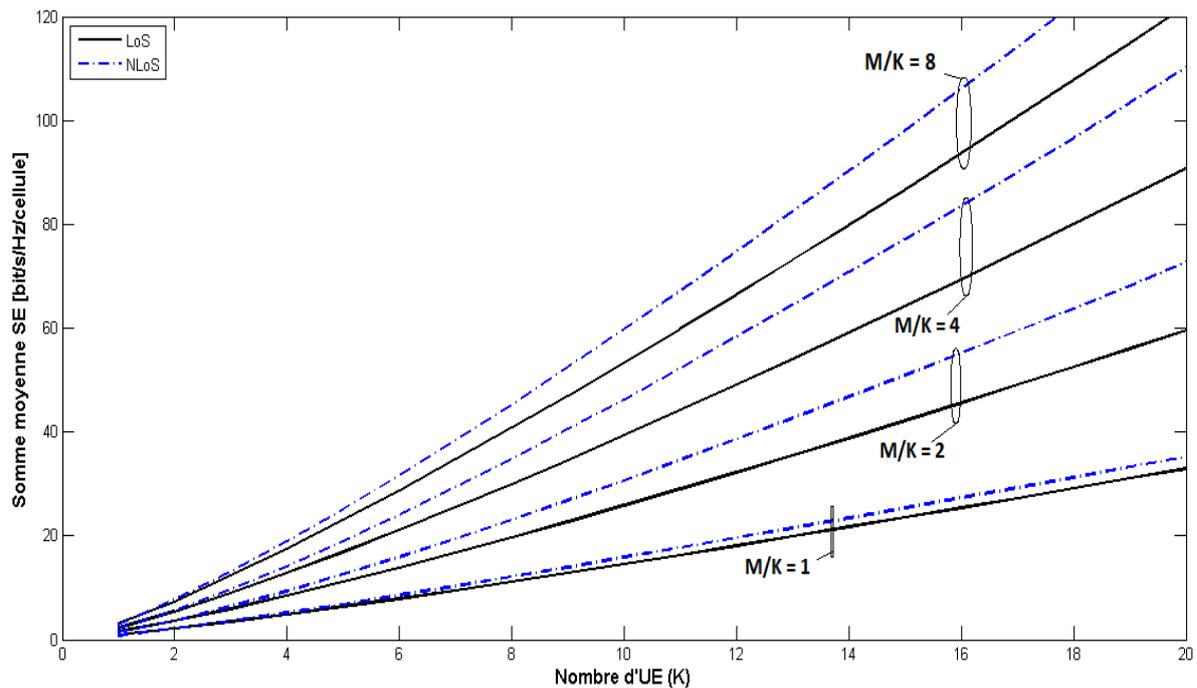


Figure 3.7 : Somme SE moyenne avec précodage de M-MMSE en fonction du nombre d'UE par cellule, avec différents rapports antenne-UE fixes M / K .

Le SE croît presque linéairement avec K dans les quatre cas, comme prévu dans la première simulation. La pente des courbes augmente à mesure que M/K augmente, car il devient plus facile de supprimer les interférences lorsque $M \gg K$. En regardant le cas NLoS avec $K = 10$, le premier doublement du nombre d'antennes (de $M/K = 1$ à $M/K = 2$) donne un gain de 94% en SE, tandis que le deuxième doublement donne un autre gain de 51% et le troisième doublement donne encore un autre gain de 29%. Étant donné que les améliorations relatives se dégradent, nous disons que $M/K \geq 4$ est le régime de fonctionnement préféré pour le MIMO multi-utilisateur.

D'après la figure 3.7 on constate que la transmission UL SDMA peut augmenter la somme SE par cellule de plus d'un ordre de grandeur. Ceci est réalisé en desservant K UE simultanément et en augmentant le nombre d'antennes BS pour obtenir un gain de réseau qui contre l'interférence accrue. Cela conduit à un régime de fonctionnement avec un rapport antenne-UE $M/K \geq c$, pour une valeur de préférence grande c , où nous pouvons fournir des gains multipliés par K en somme SE.

La somme SE croît linéairement avec K tant que M/K reste grand. M-MMSE rejette les interférences plus efficacement que MR.

4. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié l'impact de différents facteurs sur l'efficacité spectrale d'un système MIMO massif. Nous constatons d'après les résultats obtenus que :

L'augmentation des BS améliore la somme des gains SE, et elle est réalisable avec les canaux LoS et NLoS, en utilisant soit le précodage MR qui maximise le gain du réseau, soit le précodage M-MMSE qui supprime également les interférences pour maximiser la SE, tout en en prenant en considération la valeur de M/K rapports antenne-UE.

Conclusion Générale

La demande fulgurante de débit de transmission de données pour les futurs réseaux cellulaires a imposé la nécessité d'améliorer les réseaux actuels pour atteindre des niveaux de performance plus élevés.

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

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

Dans le premier chapitre, on a présenté une introduction sur la cinquième génération (5G) et les solutions principales aux limites des réseaux cellulaires actuels, comme l'architecture New Radio qui propose une flexibilité accrue pour le déploiement des nouveaux réseaux hétérogènes.

Nous avons ensuite décrit, dans le deuxième chapitre l'évolution observée des systèmes antennaires. En allant du cas classique (SISO) vers le (MIMO) qui mène au constat de la nécessité des systèmes MIMO massif qui s'adaptent mieux aux besoins actuels dans les réseaux mobiles.

MIMO massif est une évolution du système MU-MIMO, avec des avantages majeurs par rapport aux autres systèmes antennaires ; basant sur le grand nombre d'antennes ($M > 10$) qui aident à augmenter le degré de liberté permettant l'isolation d'interférences et l'augmentation de débit et l'efficacité du spectre. Ainsi l'utilisation des techniques de précodage évoluées qui permettent de focaliser l'énergie émise dans la direction de la réception (beamforming) et réduire les pertes pour les ressources radio, afin d'obtenir des gains substantiels pour la 5G.

Dans le troisième chapitre, en utilisant des simulations MATLAB pour analyser l'influence des différents paramètres de système MIMO massif sur l'efficacité spectrale. On peut conclure que l'augmentation de nombre des antennes dans la BS améliore l'efficacité spectrale. La somme SE croît linéairement avec K et M tant que M/K reste grand.

Le précodage M-MMSE rejette les interférences plus efficacement que MR. D'où les techniques de précodage linéaire ont présenté une relation inverse entre complexité et efficacité spectrale.

ANNEXE

- On définit le SNR moyen¹ comme :

$$\text{SNR} = \frac{p\mathbb{E}\{|h|^2\}}{\sigma^2}$$

- $\mathbb{E}\{|h|^2\}$: le gain de canal moyen β_i^0
- P désigne la puissance d'émission de l'UE
- σ^2 est la puissance de bruit
- Rapport maximal (MR maximum ratio) combinant, défini comme :

$$v_0 = h_0^0$$

Exemple : Ce vecteur est multiplié par le signal reçu :

$$\mathbf{v}_0^H \mathbf{y}_0 = \underbrace{\mathbf{v}_0^H \mathbf{h}_0^0 s_0}_{\text{Desired signal}} + \underbrace{\mathbf{v}_0^H \mathbf{h}_1^0 s_1}_{\text{Interfering signal}} + \underbrace{\mathbf{v}_0^H \mathbf{n}_0}_{\text{Noise}}.$$

- Quand $\sin(\varphi_0^0) \neq \sin(\varphi_1^0)$ la puissance d'interférence $\bar{\beta} g(\varphi_0^0, \varphi_1^0)$ dans (1.27) peut être borné comme :

$$\bar{\beta} g(\varphi_0^0, \varphi_1^0) \leq \frac{\bar{\beta}}{M} \frac{1}{\sin^2(\pi d_H (\sin(\varphi_0^0) - \sin(\varphi_1^0)))}$$

- $\sin(\varphi_0^0) = \sin(\varphi_1^0)$ a deux solutions uniques $\varphi_0^0 = \varphi_1^0$ et la réflexion du miroir $\varphi_0^0 = \pi - \varphi_1^0$
- Nous pouvons utiliser le fait que $\sin(\pi z) \approx \pi z$ pour $|z| < 0,2$

$$\begin{aligned} g(\varphi, \psi) &= \frac{\sin^2(\pi d_H M (\sin(\varphi) - \sin(\psi)))}{M \sin^2(\pi d_H (\sin(\varphi) - \sin(\psi)))} \\ &\approx \frac{(\pi d_H M (\sin(\varphi) - \sin(\psi)))^2}{M (\pi d_H (\sin(\varphi) - \sin(\psi)))^2} = M \end{aligned}$$

$$\text{Si } d_H M |\sin(\varphi) - \sin(\psi)| < 0.2$$

- La fonction de distribution cumulative (CDF) du gain d'interférence relatif³ :

$$\frac{1}{\beta_1^0} \frac{|(\mathbf{h}_0^0)^H \mathbf{h}_1^0|^2}{\|\mathbf{h}_0^0\|^2}$$

- Cette fonction est égale à $g(\varphi_0^0, \varphi_1^0)$ in (1.28) pour les canaux LoS, qui est fonction de M et des angles UE. Pour NLOS cette fonction est indépendante de M .

- Le tableau d'antenne ne peut pas résoudre et séparer les angles UE quand : $dH_M |\sin(\varphi_0^0) - \sin(\varphi_1^0)| < 0,2$

- Exemple de combinaison MR :

- La BS dans la cellule 0 peut utiliser la connaissance de la réponse de son k^{ième} UE pour adapter un vecteur de combinaison de réception $\mathbf{v}_{0k} \in \mathbb{C}_M$ à ce canal UE. Ce vecteur est multiplié par le signal reçu en pour obtenir :

$$\mathbf{v}_{0k}^H \mathbf{y}_0 = \underbrace{\mathbf{v}_{0k}^H \mathbf{h}_{0k}^0 s_{0k}}_{\text{Desired signal}} + \underbrace{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{v}_{0k}^H \mathbf{h}_{0i}^0 s_{0i}}_{\text{Intra-cell interference}} + \underbrace{\sum_{i=1}^K \mathbf{v}_{0k}^H \mathbf{h}_{1i}^0 s_{1i}}_{\text{Inter-cell interference}} + \underbrace{\mathbf{v}_{0k}^H \mathbf{n}_0}_{\text{Noise}}$$

- L'objectif de la combinaison est de créer un signal souhaité beaucoup plus fort que la somme des signaux et du bruit parasites. MR combiné avec

$$\mathbf{v}_{0k} = \mathbf{h}_{0k}^0$$

- La conception de combinaison de réception pour MIMO multi-utilisateur est analytiquement similaire à la détection multi-utilisateur en accès multiple par répartition en code (CDMA)
- Le vecteur combinant l'erreur quadratique moyenne minimale multicellulaire (M-MMSE⁵) est donné par la formule suivante :

$$\mathbf{v}_{0k} = p \left(p \sum_{i=1}^K \mathbf{h}_{0i}^0 (\mathbf{h}_{0i}^0)^H + p \sum_{i=1}^K \mathbf{h}_{1i}^0 (\mathbf{h}_{1i}^0)^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M \right)^{-1} \mathbf{h}_{0k}^0$$

- M-MMSE est le schéma de combinaison de réception linéaire qui maximise le SE.
- La combinaison M-MMSE maximise le SINR en trouvant le meilleur équilibre entre l'amplification du signal souhaité et la suppression des interférences dans le domaine spatial.
- Monte-Carlo⁴ : Les méthodes de Monte Carlo, ou expériences de Monte Carlo, sont une large classe d'algorithmes de calcul qui reposent sur un échantillonnage aléatoire répété pour obtenir des résultats numériques. Les méthodes de Monte-Carlo utilisent des nombres pseudo aléatoires (générés par un algorithme) pour simuler des phénomènes comportant une ou plusieurs variables aléatoires.
- L'accès multiple par répartition dans l'espace (SDMA) est une méthode d'accès aux canaux basée sur la création de tuyaux spatiaux parallèles (faisceaux de signaux focalisés) utilisant une technologie d'antenne avancée à côté de tuyaux de plus grande capacité grâce au multiplexage spatial et / ou à la diversité

BIBLIOGRAPHIE

- [1] 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.
- [2] *Networking Fundamentals: Wide, Local and Personal Area Communications* Kaveh Pahlavan and Prashant Krishnamurthy © 2009 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-99289-0
- [3] Edenalisoa RAKOTOMANANA Association optimale d'utilisateurs dans un réseau cellulaire hétérogène , THÈSE doctorat ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
- [4] Trinh Van Chien and Emil Björnson Part of: *5G Mobile Communications*, Ed. Wei Xiang, Kan Zheng, Xuemin (Sherman) Shen, 2017, pp. 77-116. ISBN: 978-3-319-34206-1
- [5] *Application Scenarios and Enabling Technologies of 5G* YUAN Yifei, ZHU Longming Next-generation Wireless Innovation Program, ZTE, 19 Huayuan Dong Road, Haidian District, Beijing 100191 P.R.China China Communications • November 2014
- [6] Aaron Yi Ding, Marijn Janssen *5G Applications: Requirements, Challenges, and Outlook* Delt University of Technology, Netherlands
- [7] Benevolo, C., Dameri, R. P., & D'Auria, B. (2015). *Smart Mobility in Smart City. Empowering Organizations*, 13–28. doi:10.1007/978-3-319-23784-8_2
- [8] Wang, W., & Lu, Z. (2013). *Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges. Computer Networks*, 57(5), 1344-1371. doi:10.1016/j.comnet.2012.12.017
- [9] Akpakwu, G. A., Silva, B. J., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2018). A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges. *IEEE Access*, 6, 3619–3647. doi:10.1109/access.2017.2779844
- [10] [En ligne]. 1- <https://www.pokemongo.com/en-us/>
- [11] [En ligne]. 2- <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>
- [12] Asif, Saad Z. *5G mobile communications : concepts and technologies*, LCCN 2018008690 | ISBN 9781498751551 (hardback : acid-free paper) | ISBN 9780429466342 (e-book)
- [13] Antonelli, C., Cassioli, D., Franchi, F., Graziosi, F., Marotta, A., Pratesi, M., ... Santucci, F. (2018). *The City of L'Aquila as a Living Lab: the INCIPICT Project and the 5G Trial. 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*. doi:10.1109/5gwf.2018.851708
- [14] *5G: New Air Interface and Radio Access Virtualization* HUAWEI WHITE PAPER April 2015 https://www.huawei.com/minisite/has2015/img/5g_radio_whitepaper.pdf

[15] Hajri, Salah Eddine. L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs. Université Paris-Saclay, 2018.

[16] 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.

[17] Javier Campos NR Physical Layer Architect RAN1 Delegate , Understanding the 5G NR Physical Layer keysight technologies.

[18] 5G/NR-FrameStructure[Enligne].
https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure.html [consulté le 19 Avril 2020]

[19] NR Resource Block Definition and RBs Calculation. [En ligne].
<http://www.techplayon.com/nr-resource-block-definition-and-rbs-calculation/> [consulté le 27 Mai 2020]

[20] Lin, X., Grovlen, A., Werner, K., Li, J., Baldemair, R., Cheng, J.-F. T.,Falahati, S. (2019). 5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology. IEEE Communications Standards

[22] W. Xiang et al. , 5G Mobile Communications book, SBN 978-3-319-34206-1 ISBN 978-3-319-34208-5 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-34208-5

[23] Naga Raghavendra Surya Vara Prasad Koppiseti B.Tech., Massive MIMO for 5G Wireless Networks: An Energy Efficiency Perspective By Indian Institute of Technology Bhubaneswar, India, 2012

[24] Afriyie Abraham Kwabena Multiple Input Multiple Output (MIMO),(thèse bachelor). Operation Principles Helsinki Metropolia University of Applied Sciences

[26] Emil Björson, Björn Ottersten. A framework for training-based estimation in arbitrary correlated Rician MIMO channels with Rician disturbance. IEEE transaction on signal processing 2010;58(3)1807.

[27] Rundstedt, Karl. "Measurements and Channel Modelling of Microwave Line-of-Sight MIMO Links." (2015).

[28] DEHEMCHI MARWA BOUHAFER ASMA (thèse de master)Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs

Pour la 5G

[29] Nimay Ch Giri, Anwasha Sahoo, J. R. Swain, P. Kumar, A. Nayak, P. Debogswami, Lecturer, Department of ECE,B.Tech Scholar, Centurion University of Technology and Management, Odisha, India, Capacity & Performance Comparison of SISO and MIMO System for Next Generation Network (NGN), International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 3 Issue 9, September 2014

[30] Kritika Sengar, Nishu Rani, Ankita Singhal, Dolly Sharma, Seema Verma, Tanya Singh, Banasthali University, Newai, India, Amity Institute of Information and Technology

University, Noida, India, Study and Capacity Evaluation of SISO, MISO and MIMO RF Wireless Communication Systems, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 9 Number 9 - Mar 2014.

[31] [EN LIGNE] <https://itnspotlight.com/massive-mimo/>

[32] [EN LIGNE] <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO> consulté [02/05/2020]

[33] Antoine Roze (thèse doctorat) Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques .

[34] N. H. M. Adnan, I. M. Rafiqul and A. H. M. Z. Alam, "Massive MIMO for Fifth Generation (5G): Opportunities and Challenges," *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)*, Kuala Lumpur, 2016, pp. 47-52, doi: 10.1109/ICCCCE.2016.23.

[35] Hien Quoc Ngo , Massive MIMO: Fundamentals and System Designs , ISBN 978-91-7519-147-8 ISSN 0345-7524

[36] Antoine Roze (thèse doctorat) Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques .

[37] fondamentale of massive book Thomas L. Marzetta,Erik G. Larsson,Hong Yang

[38] ETUDE ET SIMULATION DU SYSTEME MIMO et MIMO massive Présenté Par Bessayah Rahma Bessaci Asma.

[39] [EnLigne] https://www.researchgate.net/figure/Traditional-MIMO-and-massive-MIMO-performance-comparison_tbl2_322889689 consulté [07/05/2020]

[40] Hassan, N., & Fernando, X. (2017). Massive MIMO Wireless Networks: An Overview. *Electronics*, 6(3), 63. doi:10.3390/electronics6030063

[41] Precoding_in_Simple_Words [En ligne] consulté [11/05/2020]

https://en.wikipedia.org/wiki/Precoding#Precoding_in_Simple_Words.

[42] Jérôme Le Masson ,(thèse doctorat) Systèmes de transmission avec pré-codage linéaire et traitements ,université Bretagne-Sud.

[43] N. Fatema, G. Hua, Y. Xiang, D. Peng and I. Natgunanathan, "Massive MIMO Linear Precoding: A Survey," in *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3920-3931, Dec. 2018, doi: 10.1109/JSYST.2017.2776401.

[44] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," in *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, pp. 11-22, 2015, doi: 10.15325/BLTJ.2015.2407793.

[45] En ligne : https://fr.wikipedia.org/wiki/MIMO_massif consulté [22/05/2020]

[46] EVALUATION DE PERFORMANCE D'UN SYSTEME MIMO MASSIF EN TERMES D'EFFICACITE SPECTRALE Présenté par : RANDRIAMIADANA Zakasoa Arilova.

[47] Massive MIMO for Maximal Spectral Efficiency: How Many Users and Pilots Should Be Allocated? Emil Bjornson, " Member, IEEE, Erik G. Larsson, Senior Member, IEEE, and Merouane Debbah, ' Fellow, IEEE.

[48]En ligne : <https://ma-mimo.ellintech.se/what-is-massive-mimo/> consulté [08/06/2020]

[49] T. Marzetta, Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. IEEE Trans. Wirel. Commun. 9(11), 3590–3600 (2010)