



Annulation des interférences inter-cellulaires pour les systèmes MIMO massif dans les réseaux hétérogènes 5G

Mémoire

Marwa Chouk

Maîtrise en génie électrique - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Annulation des interférences inter-cellulaires pour les systèmes MIMO massif dans les réseaux hétérogènes 5G

Mémoire

Marwa Chouk

Sous la direction de:

Prof. Paul Fortier
Prof. Dominic Grenier

Résumé

De nos jours, le nombre des utilisateurs mobiles est en train d’exploser et cela va de même pour la demande en débit. En effet, cette demande croissante ainsi que le nombre considérable 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 nouveaux systèmes doivent être développés afin de proposer une solution aux nouveaux usages qui vont naître de cette évolution.

Le MIMO massif est une nouvelle technologie caractéristique de la 5G. Au lieu de mettre en place une seule antenne réceptrice-émettrice, le MIMO massif combine plusieurs antennes à la fois afin de renforcer le signal et réduire les interférences. Un tel système est très souvent étudié pour des transmissions multi-utilisateurs grâce à son potentiel à focaliser l’énergie. Parmi les nombreuses technologies caractéristiques de la 5G, nous considérons comme un bon candidat un système fonctionnant à des longueurs d’onde millimétriques afin de satisfaire le besoin du débit élevé sur des petites zones cibles. Cependant, plusieurs difficultés de conception apparaissent à une telle échelle de fréquence. Particulièrement, l’utilisation d’un nombre élevé de chaînes RF en parallèle semble plus compliquée. Pour remédier à ce problème, des systèmes dits hybrides ont vu le jour et ils sont identifiés comme des solutions pertinentes afin de contourner ces difficultés.

Malgré les avantages apportés par les systèmes MIMO massifs à ondes millimétriques, il est important de comprendre ces innovations d’un point de vue d’évolution de l’architecture des réseaux. De nos jours, l’architecture moderne des réseaux cellulaires devient de plus en plus hétérogène, pour de bonnes raisons. Dans ces réseaux hétérogènes, les stations de base sont souvent augmentées avec un grand nombre de petites cellules. Ces dernières consistent en de petites stations de base, utilisées pour améliorer la couverture dans des environnements denses et pour augmenter la capacité du réseau. Cependant, plusieurs problèmes techniques naissent du déploiement dense de ces petites cellules. Particulièrement, leur coexistence avec les réseaux traditionnels et les différents niveaux de puissance de transmission peuvent être la source de fortes interférences entre les cellules.

Le travail de ce mémoire se concentre sur la gestion des interférences intercellulaires dans un réseau hétérogène à spectre partagé. Ces interférences sont dues principalement au fait que

les utilisateurs sont forcés de s'associer aux petites cellules en présence de macrocellules avoisinantes. Par conséquent, nous proposons une nouvelle architecture d'un réseau hétérogène comprenant plusieurs petites cellules qui coexistent avec une macrocellule équipée d'un grand nombre d'antennes au niveau de la macro station de base (MBS). L'objectif est de concevoir un nouveau schéma de précodage hybride permettant d'annuler les interférences intercellulaires sur le lien descendant (DL). Nous proposons d'appliquer uniquement un contrôle de phase pour coupler les sorties de la chaîne RF aux antennes d'émission, en utilisant des déphaseurs RF économiques. Un précodage numérique est ensuite effectué à la station de base pour gérer les interférences intercellulaires et multi-utilisateurs en s'appuyant sur l'espace nul des canaux d'interférences. Enfin, des résultats de simulations démontrant l'efficacité spectrale de l'approche proposée sont présentées et comparées avec diverses techniques de précodage.

Abstract

Nowadays, the number of mobile users and the demand for bandwidth are exploding. Indeed, this growing demand and the considerable number of devices to be connected (more than 29 billion by 2022 according to Ericsson) requires a complete rethink of the mobile communication technologies. New systems must be developed in order to provide a solution to the new uses that will emerge from this evolution.

Massive MIMO is a new technology characteristic of 5G. Instead of implementing a single transmitting/receiving antenna, massive MIMO system combines several antennas to reinforce the signal and reduce the interference. Such a system is very often studied for multi-user transmissions thanks to its potential to focus energy. Among the many characteristic technologies of 5G, we consider as good candidates, those operating at millimetre wavelengths to satisfy the need for high throughput in small targeted areas. However, several design difficulties occur at such a frequency scale. In particular, the use of a large number of RF chains in parallel is more complicated. To remedy this problem, hybrid systems have emerged and are identified as relevant solutions to overcome these difficulties.

Despite the benefits of massive MIMO systems and millimetre wave, it is important to understand these innovations from the perspective of network architecture evolution. Nowadays, the modern architecture of cellular networks is becoming more and more heterogeneous, for good reasons. In these heterogeneous networks, base stations are often augmented with a large number of small cells. It consists of small base stations, used to improve coverage in dense environments and increase network capacity. However, several technical problems arise from the dense deployment of these small cells. In particular, their coexistence with traditional networks and the different levels of transmission power can be the source of strong interferences between cells.

In this thesis, we focus on the intercellular interference management in a heterogeneous shared spectrum network. This interference is mainly due to the fact that users are forced to be associated with small cells in the presence of surrounding macrocells. Therefore, we propose a new architecture of a heterogeneous network comprising several small cells that coexist with a macrocell equipped with a large number of antennas at the macro base station (MBS). The goal is to design a new hybrid precoding scheme to cancel intercellular interference on the downlink

transmissions (DL). We propose to apply only phase control to couple the outputs of the RF chain to the transmitting antennas, using economical RF phase shifters. Digital precoding is then performed at the base station to manage intercellular and multi-user interference based on the null space of the interference channels. Finally, simulation results demonstrating the spectral efficiency of the proposed approach are presented and compared with various precoding techniques.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Table des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des abréviations	x
Liste des symboles	xiii
Remerciements	xvi
Introduction	1
1 Revue des concepts de base et des travaux existants	9
1.1 Introduction	9
1.2 Caractéristiques générales d'un système MIMO massif	9
1.2.1 TDD vs FDD pour le MIMO massif	10
1.2.2 Principales limitations d'un système MIMO massif	11
1.2.3 Estimation du canal et contamination de pilotes	12
1.3 Longueurs d'onde millimétriques (mmWave)	15
1.3.1 Généralités	16
1.3.2 Application aux systèmes MIMO massifs	16
1.4 Précodage et beamforming	17
1.4.1 Les différents précodeurs linéaires	18
1.4.2 Précodage hybride	22
1.5 Gestion des interférences dans les HetNets	25
1.5.1 Association de cellules	27
1.5.2 Coordination d'interférences intercellulaires (ICIC)	27
1.5.3 CoMP (Coordinated Multi-Point)	29
1.5.4 Approche de contrôle de puissance	31
1.5.5 Récepteur avancé	32
1.5.6 Approche cognitive	32
1.6 Gestion d'interférence pour les HetNets MIMO massif	33
1.7 Conclusion	35

2	Approche proposée d’annulation d’interférences dans un réseau hétérogène MIMO massif	36
2.1	Introduction	36
2.2	Modèle du système	36
2.3	Modèle du canal	40
2.4	Technique de précodage hybride pour l’annulation des interférences à la MBS MIMO massive	41
2.5	Technique de précodage pour l’annulation des interférences à la SBS	44
2.6	Conclusion	45
3	Résultats et discussions	46
3.1	Introduction	46
3.2	Environnement de simulation	46
3.3	Discussion des résultats de simulation	47
3.3.1	Impact de la variation du SNR	47
3.3.2	Impact de la variation du nombre d’antennes	51
3.3.3	Impact de la variation du nombre d’utilisateurs	52
	Conclusion générale	54
	Bibliographie	56

Liste des figures

0.1	Principe du MIMO massif.	3
0.2	Réseau hétérogène composé d'une macrocellule et plusieurs petites cellules permettant de soulager le trafic de données de la macrocellule.	6
1.1	Modèle MIMO massif - M antennes et K utilisateurs.	10
1.2	Positionnement de symboles pilotes dans une trame.	13
1.3	Structure simplifiée d'un intervalle de temps.	13
1.4	Contamination de pilotes.	15
1.5	Le spectre de fréquence 5G.	15
1.6	Précodeur Zero-Forcing.	21
1.7	Précodage hybride.	23
1.8	Architecture hybride entièrement connectée.	25
1.9	Architecture hybride partiellement connectée.	26
1.10	Principe de l'expansion de rayon de cellule (ERC).	28
1.11	La transmission conjointe.	30
1.12	Coordinated Beamforming / Coordinated Scheduling.	30
2.1	Réseau hétérogène MIMO massif. Les lignes rouges interrompues désignent les interférences intercellulaires.	37
2.2	Architecture de précodage hybride pour la transmission MBS-MUE.	38
3.1	Architecture du réseau hétérogène MIMO massif avec 4 petites cellules dans la couverture de la macrocellule.	47
3.2	Efficacité spectrale vs SNR lorsque $N_t = 100$, $M = 25$ et $L = 10$	48
3.3	Efficacité spectrale vs SNR lorsque $N_t = 100$, $M = 25$ et $L = 10$ pour les différents techniques de précodage.	49
3.4	Efficacité spectrale vs SNR lorsque $N_t = 100$ et $M = 25$	50
3.5	Efficacité spectrale vs SNR lorsque $N_t = 100, 144$ et 196 , $M = 25$ et $L = 10$	51
3.6	Efficacité spectrale vs N_t lorsque $SNR = 10$ dB, $M = 25$ et $L = 10$	52
3.7	Efficacité spectrale vs M lorsque $SNR = 10$ dB, $N_t = 25$ et $L = 10$	53

Liste des abréviations

3GPP	Third Generation Partnership Project
5G	5ème génération
ABS	Almost Blank Subframe
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
BD	Block Diagonalization
BS	Base Station
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CB	Conjugate Beamforming
CC	Component Carriers
CLPS	Closed-Loop Power Setting
CoMP	Coordinated Multipoint
COTS	Commercial Off-The-Shelf
CSIT	Channel State Information at the Transmitter
CS	Coordinated Scheduling
DBS	Digital Beamsteering
DL	Lien Descendant
DoF	Degrees of Freedom
EGT	Equal Gain Transmission
ERC	Expansion de rayon de cellule
ES	Efficacité spectrale
FDD	Frequency Division Duplex
HetNet	Heterogeneous Network
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IMT Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced

JSDM	Joint Spatial Division and Multiplexing
JT	Joint Transmission
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
LTE-B	Long Term Evolution Broadcast
LOS	Line-Of-Sight
MBS	Macro Base Station
MF	Matched Filter
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMSE	Minimum Mean Square Error
MRC	Maximal Ratio Combining
MRT	Maximum Ratio Transmission
MU-MIMO	Multi User MIMO
MUE	Macro User Equipment
NLOS	Non-Line-Of-Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLPS	Open Loop Power Setting
PLL	Phase Locked Loop
RF	Radio Frequency
RRH	Remote Radio Heads
RTDD	Reverse Time Division Duplexing
SBS	Small Base Station
SC	Small Cell
SDMA	Spatial Division Multiple Access
SINR	Signal-to-Interference plus Noise Ratio
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SUE	Small User Equipment
SVD	Singular Value Decomposition
TDD	Time-Division Duplex
UE	User Equipment
UL	Uplink
ULA	Uniform Linear Array
UPA	Uniform Planar Array

Wi-Fi Wireless Fidelity

WIMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

ZF Zero Forcing

Liste des symboles

$*,^H,+$	Opérateurs conjugaison, transposition-conjugaison et pseudo-inverse de Moore-Penrose
\mathbb{C}	Ensemble des nombres complexes
η	Facteur de normalisation
\mathbb{E}	Espérance mathématique
Tr	Trace d'une matrice
σ	Variance du bruit
n_k	Bruit blanc gaussien additif (AWGN) d'un utilisateur k
d_k	Distance entre l'utilisateur k et la station de base massive
β_k	Pertes en espace libre entre l'utilisateur k et la station de base massive
\mathbf{D}_β	Matrice diagonale contenant les pertes en espace libre
\mathbf{u}	Partie utile du signal reçu
\mathbf{i}	Partie interférente du signal reçu
d	Espacement entre les antennes ou distance parcourue
L	Nombre de chemins
$\phi_{k,m}$	Déphasage introduit par le canal entre l'utilisateur k et l'antenne m
λ	Longueur d'onde
T_c	Temps de cohérence
B_c	Bande de cohérence
T_{est}	Temps alloué à l'estimation de canal
T_{slot}	Intervalle de temps durant lequel le canal doit être statique
T_{data}	Intervalle de temps alloué à la transmission de données
N_t	Nombre d'antennes de la MBS
N_{RF}	Nombre de chaînes radio-fréquence de la MBS
S	Nombre de petites cellules
K_M	Nombre de MUE dans la MBS

N_c	Nombre d'antennes de la SBS
K_s	Nombre de SUE dans une petite cellule
M	Nombre total des utilisateurs actifs dans le réseau
\mathcal{K}_M	Ensemble des MUE
\mathcal{K}_s	Ensemble des SUE dans la petite cellule s
\mathbf{F}_{RF}	Matrice de précodage analogique
\mathbf{F}_{BB}	Matrice de précodage numérique
\mathbf{H}^M	Matrice de canal entre la MBS et les MUE
\mathbf{h}_k^M	Une ligne de \mathbf{H}^M
x_k	Information transmise par la MBS au MUE k
$g_{s,k}$	Vecteur du canal entre la SBS s et le MUE k
\mathbf{w}_s	Vecteur de précodage à la SBS s
\mathbf{H}^P	Matrice de canal entre la SBS et le SUE
$\mathbf{h}_{s\ell}$	Une ligne de \mathbf{H}^P
\mathbf{j}_s	Vecteur du canal entre la MBS s et le SUE
y_k	Signal reçu au MUE k
$y_{s,l}$	Signal reçu au SUE (s, l)
\mathcal{X}_k^{MUE}	Somme d'interférences entre les MUE
$\mathcal{X}_{s,l}^{SUE}$	Somme d'interférences entre les SUE
$\mathcal{X}_{s,l}^{MBS}$	Somme d'interférences provoquées par la MBS
\mathcal{X}_k^{SBS}	Somme d'interférences provoquées par une SBS
L	Nombre de trajets observés par chaque utilisateur
$SINR_k$	Rapport signal sur interférences plus bruit d'un MUE k
$SINR_{s,l}$	Rapport signal sur interférences plus bruit d'un SUE (s, l)
R_k	Débit d'information du MUE k
$R_{s,l}$	Débit d'information du SUE (s, l)
$\alpha_{k,l}$	Gain de trajet l observé par l'utilisateur k
\mathbf{a}_{UE}	Ensemble de vecteurs de réponse à l'émission
\mathbf{a}_{BS}	Ensemble de vecteurs de réponse à la réception
$\theta_{k,l}^{UE}$	Angle en azimut d'arrivée
$\phi_{k,l}^{UE}$	Angle en élévation d'arrivée
$\theta_{k,l}^{BS}$	Angle en azimut de départ
$\phi_{k,l}^{BS}$	Angle en élévation de départ

$\Phi_{i,j}$	Phase de l'élément (i, j) de la transposée conjuguée de la matrice du canal \mathbf{H}^M
Σ	Matrice des valeurs singulières
\mathbf{V}_{int}	Matrice de projection basée sur l'espace nul du canal d'interférences
\mathbf{H}_{eq}	Canal équivalent de la MBS
\mathbf{J}_{int}	Canal d'interférences intercellulaires de la MBS aux SUE
\mathbf{G}_{int}	Canal d'interférences intercellulaires de la SBS aux MUE
\mathbf{J}_{eq}	Canal équivalent d'interférences
$\hat{\mathbf{V}}_{eq}$	Espace nul de la matrice d'interférence de la MBS
$\hat{\mathbf{V}}_s$	Espace nul de la matrice d'interférence de la SBS
\mathbf{T}^M	Matrice de précodage finale à la MBS
\mathbf{T}^P	Matrice de précodage finale à la SBS

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche Prof. Paul Fortier pour m'avoir accueillie dans le laboratoire LRTS et qui se montrait toujours à l'écoute et présent avec sa patience et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire. Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans son encouragement. Ses conseils m'ont été d'une très grande aide tout au long de ce mémoire. Aussi, je remercie Prof. Dominique Grenier de son implication dans le projet à travers ses commentaires qui m'ont aidé à résoudre beaucoup de défis tout au long de mes travaux de recherche. Je le remercie également de son soutien financier pour que je puisse mener à bien ce projet.

Je ne peux pas passer sans avoir exprimé tout mon amour, ma joie et ma gratitude pour mon mari Hamza qui m'a toujours entouré et soutenu dans les moments difficiles. Tu étais d'un appui indéfectible et tu m'as toujours encouragé pour avancer et aller au delà de mes rêves. Un grand merci à mes parents qui me suivent de loin et qui ne cessent jamais d'être fiers de moi et de me souhaiter la réussite et le bonheur. C'est grâce à votre confiance que je me défis à chaque fois de bien réussir, votre bonheur compte beaucoup pour moi.

Introduction

Contexte du travail

Le volume de données mobiles n'a cessé de croître de manière exponentielle au cours des dernières années suite à la diffusion massive des dispositifs connectés et la demande exhaustive des ressources radio. Par conséquent, malgré l'accélération du déploiement des systèmes mobiles sans fil à haut débit de la quatrième génération, les recherches se dirigent maintenant vers les réseaux de 5ème génération (5G) et au delà, où le défi consistera à surmonter les limites fondamentales des réseaux cellulaires existants. Le but est de garantir des services de haute qualité et un débit élevé à un nombre croissant d'utilisateurs ayant une disponibilité limitée de ressources. Les technologies de communication sans fil 5G devraient atteindre 1000 fois plus de volume de données mobiles par unité de surface, 10 à 100 fois plus de périphériques connectés et de débits de données par utilisateur, une durée de vie de la batterie de l'appareil 10 fois plus élevée et une réduction de la latence d'un facteur cinq. Les réseaux 5G sont basés sur l'intégration de systèmes évolués, tels que LTE-A et LTE-B, Wi-Fi et d'autres nouvelles technologies. La satisfaction de la qualité de service, la connectivité omniprésente, l'utilisation écologique, l'optimisation des ressources et la rentabilité représentent les principaux objectifs de la 5G. Cela signifie que les activités de recherche devront se concentrer sur les technologies et les solutions avancées qui permettront de relever ces défis.

Pour faire face à ces défis, un nouveau concept de réseau hétérogène (HetNet) a été adopté [1], [2]. Ces réseaux denses de petites cellules sont considérés comme une solution rentable pour faire face à la croissance rapide du trafic de données et le nombre massif de périphériques connectés, également appelé défi de données 1000x. La densification est une solution prometteuse pour augmenter la capacité du réseau et son efficacité spectrale (ES) en réutilisant spatialement les ressources du spectre. Une petite cellule est une station de base peu coûteuse et de faible puissance, utilisée pour réduire la distance entre l'émetteur et l'équipement utilisateur (UE). Par conséquent, elle réduit la consommation d'énergie et les pertes de propagation. Le réseau HetNet déploie différents types de cellules (macrocellules et petites cellules), afin d'améliorer la performance du réseau et remédier aux problèmes de zones à faible couverture.

Cependant, dans les HetNets denses, les communications souffrent d'interférences dues à la

réutilisation agressive du spectre et à l'emplacement aléatoire de petites stations de base (SBS) particulièrement en cas de déploiement à l'intérieur. Ces interférences affectent la qualité de signal offerte aux usagers et résultent donc en une dégradation des performances du réseau HetNet.

Une façon très prometteuse pour améliorer l'efficacité spectrale est communément appelée MIMO massif ou MIMO à grande échelle. L'idée est d'augmenter considérablement le nombre d'antennes à la station de base (de l'ordre de centaines ou de milliers) [3]. Cette technologie est basée sur l'invocation des effets statistiques à grande échelle qui (dans des conditions optimales) éliminent les évanouissements rapides, les interférences ainsi que le bruit du système de communication. En plus, cette technique concentre l'énergie transmise seulement à la cible visée, augmentant alors grandement l'efficacité spectrale globale.

Récemment, la combinaison de MIMO massif et HetNet a beaucoup attiré l'attention [4], [5]. Dans cette architecture de réseau, plusieurs petites cellules (SC) coexistent avec une macrocellule dont sa station de base (MBS) est équipée d'un grand nombre d'antennes. En raison de l'insuffisance de spectre dans les réseaux cellulaires, les petites cellules devraient partager la même bande de spectre avec la macrocellule, ce qui entraînera des interférences entre les niveaux. Bien que la gestion des interférences dans une architecture HetNet régulière se concentre principalement sur l'allocation de ressources dans le domaine temporo-fréquentiel [6], les caractéristiques spatiales de MIMO massif peuvent être exploitées pour atténuer les interférences dans ce type de réseaux.

L'étude menée dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre des communications à grand nombre d'antennes pour les futurs systèmes sans fil, connu sous les appellations : "large MIMO", "MIMO massif" ou "large scale antenna systems". Nous nous intéressons particulièrement au problème de gestion des interférences intercellulaires dans les réseaux hétérogènes.

Évolution des réseaux d'accès mobile et l'utilisation de MIMO massif

Les systèmes MIMO, maintenant largement répandus dans de nombreux standards (p. ex. releases 8-11 du standard LTE, WiFi 802.11n, etc.) permettent d'améliorer considérablement la qualité de transmission grâce à l'exploitation de la dimension spatiale. Afin d'augmenter la capacité et le débit de système de communication, l'utilisation d'antennes multiples MIMO a été introduite dans les réseaux 3G. Les techniques multi-antennes MIMO se sont imposées dans les standards de télécommunications sans fil les plus récents (IEEE 802.11a/c/n, WiMAX, LTE, LTE-Advanced) grâce aux performances qu'elles offrent en termes de débit. En effet, le critère majeur est alors la robustesse du lien radio, le débit étant nécessaire pour les applications non vitales (services aux clients). Les techniques MIMO ont un grand potentiel

pour accroître simultanément le débit et la robustesse du lien radio sans augmentation de la puissance émise. Le MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO) et les techniques de coordination sont introduits dans la 4G. Ces techniques (standardisées) ne permettent cependant que des gains modestes en débit.

Les systèmes MIMO massifs dans le contexte 5G

En suivant cette stratégie d'exploitation de la dimension spatiale, les systèmes dits MIMO massifs ont été introduits très récemment par Marzetta en 2010 [3]. Ces systèmes se basent sur l'utilisation d'un nombre d'antennes d'un ordre de grandeur largement supérieur, au moins d'un facteur 100, aux systèmes MIMO et MU-MIMO traditionnels. Les premières études théoriques montrent que ces systèmes peuvent espérer atteindre des niveaux de capacité 10 fois supérieurs aux systèmes classiques, tout en permettant d'améliorer l'efficacité énergétique d'un ordre de 100. On comprend alors que l'approche MIMO massif est très prometteuse pour les systèmes 5G.

Dans les systèmes de radiocommunications cellulaires, le MIMO massif est une extension du MU-MIMO dans lequel une station de base (BS) desservant une cellule où circulent K utilisateurs mobiles, est équipée d'un réseau composé de M antennes ; M est supérieur à K et de l'ordre d'une ou plusieurs centaines. Les K terminaux utilisent alors un même bloc de ressources temps-fréquence. Le principe de MIMO massif est illustré à la figure 0.1.

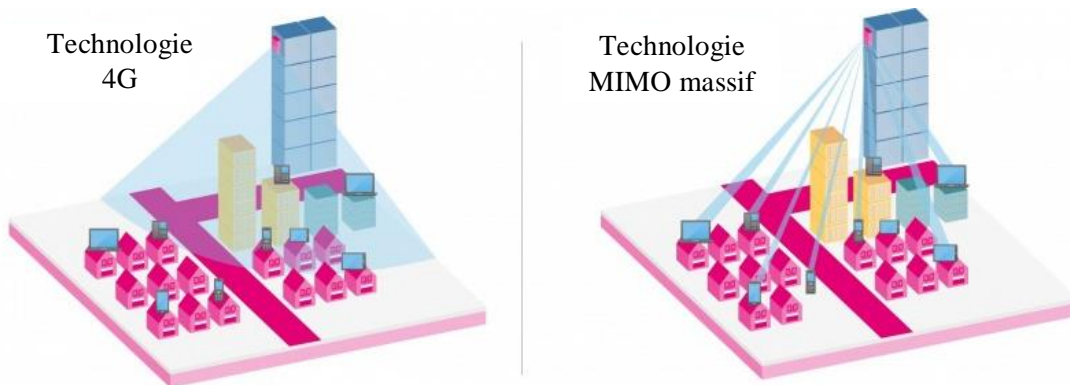


FIGURE 0.1 – Principe du MIMO massif.

Le système massif permet de focaliser l'énergie émise dans un espace limité proche de chaque terminal, ce qui résulte à une amélioration significative des performances du lien descendant. En effet, la focalisation s'améliore avec l'augmentation de M . À la réception, une combinaison linéaire des signaux reçus par la station de base permet de discriminer les signaux émis par chacun des K terminaux. Les performances en matière d'efficacité spectrale, de tolérance au bruit ou aux interférences dépendent des algorithmes utilisés tant à la réception qu'à l'émission.

À la réception, les terminaux doivent connaître le gain du canal : il peut être obtenu par des informations explicites transmises par la station de base ou bien estimé à l'aveugle à partir des données reçues [7].

Une efficacité spectrale très supérieure à celle de la 4G

Dans le MIMO massif, les ondes émises par les antennes se combinent positivement dans les zones où sont supposés se trouver les terminaux et s'annulent dans les autres zones grâce au schéma de précodage. Cette focalisation vers les zones denses donne au MIMO massif à la fois de très bonnes performances en matière d'efficacité spectrale et d'efficacité énergétique. Il a été démontré dans des travaux théoriques antérieurs que l'on pouvait attendre du MIMO massif une efficacité spectrale par cellule 20 fois plus élevée que celle de l'IMT Advanced (International Mobile Telecommunications Advanced) [8]. Un exemple de prototypage réalisé par les universités de Bristol et de Lund a permis d'effectuer une mesure de l'efficacité spectrale. L'environnement de test comportait un réseau de 128 antennes et des utilisateurs prototypes : la bande de fréquences utilisée est celle des 3,5 GHz et les utilisateurs se partagent une bande de 20 MHz. Une efficacité spectrale par cellule de 79 bit/s/Hz a été mesurée avec 12 utilisateurs et 145 bit/s/Hz avec 22. Les mesures confirment une amélioration de l'efficacité spectrale d'un facteur 20 par rapport à la 4G. L'objectif de la 4G était d'améliorer la couverture des données et la capacité des transmissions. Une efficacité spectrale maximale de 15 bit/s/Hz et un fonctionnement recommandé dans les canaux radioélectriques jusqu'à 100 MHz ont été exigés pour assurer la qualité des transmissions, ce qui donne un débit théorique de 1,5 Gbit/s [9].

Une efficacité énergétique également améliorée

Un autre avantage important du système MIMO massif est son efficacité énergétique. En effet, l'augmentation du nombre d'antennes permet une diminution linéaire de la puissance d'émission. Cependant, plusieurs paramètres peuvent avoir un impact négatif sur l'efficacité énergétique comme le nombre d'utilisateurs, le nombre d'antennes, les algorithmes employés, le problème de contamination des pilotes... Cela a été démontré dans [10] à travers des simulations montrant aussi que l'efficacité énergétique peut atteindre plusieurs dizaines de Mbit/J dans une cellule. Il semble que l'efficacité optimale soit atteinte pour des nombres d'antennes M de l'ordre de 100 à 150 et des nombres d'utilisateurs par cellule K de 80 à 100. Cependant, le fonctionnement multicellulaire et la contamination de pilotes qui en résulte dégradent l'efficacité énergétique à un peu plus de 7 Mbit/J. En outre, les résultats précédents ont montré que la puissance rayonnée par une BS augmente avec M , mais que celle rayonnée par chaque antenne de la BS diminue avec l'augmentation de M .

Le réseaux hétérogène (NetHet)

Pour mieux répondre aux besoins de la 5G, plusieurs caractéristiques importantes doivent être abordées [11], [12]. Parmi celles-ci, le déploiement des réseaux hétérogènes présente un intérêt particulier.

Les HetNet introduisent une nouvelle notion d'hétérogénéité pour les réseaux cellulaires en introduisant le concept de petite cellule (small cell) qui consiste à mettre en place des antennes à faible puissance d'émission. Ainsi, le réseau est composé de plusieurs couches (tiers) qui se chevauchent, incluant la couverture traditionnelle macrocellulaire, les picocellules, les femtocellules, et les relais. Outre les améliorations des couvertures radio en environnements intérieurs, les petites cellules permettent d'augmenter la capacité du système par une meilleure utilisation du spectre en rapprochant l'utilisateur de son point d'accès.

La petite cellule

De nos jours, un réseau hétérogène est souvent associé aux cellules dites petites cellules [13]. Une telle cellule a la particularité de posséder un rayon de couverture réduit et d'offrir ainsi un débit élevé à ses utilisateurs, découlant directement du fait que moins de terminaux se partagent la ressource temps/fréquence. Elle peut alors aisément être complémentaire d'une cellule à plus large couverture, mais au débit moindre (macrocellule). On parle d'ailleurs d'offloading des données lorsque la transmission d'informations est attribuée à la petite cellule au lieu de la macrocellule. La densification des réseaux avec ces petites cellules rentre pleinement dans les problématiques 5G, tant pour améliorer l'efficacité énergétique (grâce au simple fait de diminuer la taille des cellules [14]) que pour supporter les futurs besoins en débit [15].

Une telle densification va également nécessiter un *backhaul* (câble, fibre optique ou radio acheminant les données aux stations de base) qui peut supporter ces forts débits. Ces liens sont illustrés sur la figure 1.2 entre la macrocellule et les petites cellules, les RRH (Remote Radio Heads) et les relais. L'utilisation du MIMO massif comme *backhaul* sans fil est une solution attrayante [16]. Ainsi, la station de base de la macrocellule pourra ne consacrer son activité qu'à la signalisation (ce terme décrit les échanges de données de contrôle telles que, par exemple, la position des utilisateurs, les indices de qualité des transmissions, etc.) et au *backhaul* alors que le transfert de données sera effectué par les petites cellules. Tout cela est plus amplement décrit dans [13], document résumant les directions prises par le 3GPP pour la release 12 de la norme LTE.

Motivations

Dans les futurs réseaux cellulaires sans fil 5G, les systèmes de communication mobile subissent une croissance constante en termes de nombre d'abonnés. De plus, ces usagers exigent toujours une meilleure qualité de service et une vaste couverture caractérisée par un fort signal,

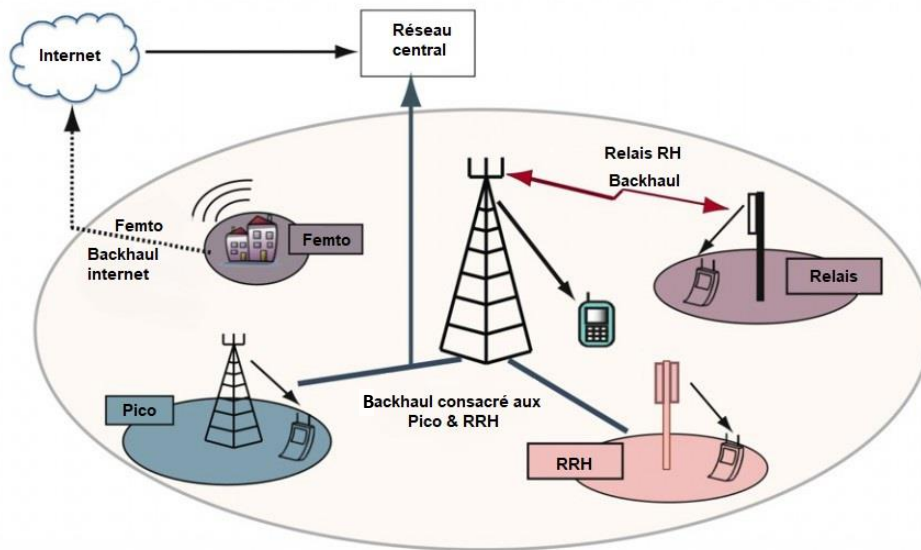


FIGURE 0.2 – Réseau hétérogène composé d’une macrocellule et plusieurs petites cellules permettant de soulager le trafic de données de la macrocellule.

notamment dans les zones à faible couverture. Par conséquent, plusieurs solutions doivent être mises en places.

Parmi ces solutions, celles qui attirent le plus d’attention pour la 5G sont le déploiement massif de petites cellules amenant à l’intense densification des réseaux ainsi que l’augmentation du nombre d’antennes de la station de base (MIMO massif). Ces deux technologies constituent le cœur de la 5G alors que la densification des réseaux à l’aide de petites cellules se distingue par son coût, sa facilité et sa flexibilité. Ces petites cellules de tailles variées, déployées par l’opérateur ou l’utilisateur lui-même, permettront d’apporter une couverture réseau dans des zones non atteignables par les stations de base classiques, et permettront d’augmenter considérablement la capacité du réseau grâce à la réutilisation du spectre ainsi qu’une meilleure qualité de service grâce à la proximité des utilisateurs avec leur point d’accès [7].

Cependant, plusieurs problèmes techniques naissent du déploiement dense de ces petites cellules. Particulièrement leur coexistence avec les réseaux traditionnels et les différents niveaux de puissance de transmission peuvent être la source de fortes interférences entre les cellules de ces deux différentes couches. En outre, le déploiement massif de ces cellules peut aussi causer des interférences entre les petites cellules avoisinantes lorsque leurs zones de couverture se chevauchent. Cette problématique est d’autant plus dramatique que les bandes de fréquence disponibles pour les communications mobiles sont limitées et que la demande en termes de débits et donc de bande passante est grandissante.

La technique MIMO massif suscite actuellement un fort intérêt puisqu'elle laisse présager un gain considérable en efficacité spectrale. En effet, avec l'augmentation du nombre des antennes des stations de base, les effets du bruit additif, les évanouissements et les interférences intracellulaires ainsi que l'énergie de transmission requise par bit diminuent. En outre, de simples approches de traitement de signal linéaire, comme le précodage par filtre adapté, peuvent être utilisées pour atteindre ces avantages. Donc, l'utilisation d'un grand nombre d'antennes en mode MIMO massif est une piste qui semble solide. Cela permettra aussi d'être plus "vert" en abaissant la consommation énergétique. Cette technologie est basée sur l'invocation des effets statistiques à grande échelle qui (dans des conditions optimales) éliminent les évanouissements rapides, les interférences, et le bruit du système de communication. Bien que la gestion de l'interférence dans un réseau hétérogène régulier se concentre principalement sur l'allocation des ressources dans le domaine temps-fréquence [17], les caractéristiques spatiales du MIMO massif peuvent être exploitées pour atténuer les interférences dans ce type de réseau "moderne".

Objectifs et contributions

Notre travail se concentrera sur le design du MIMO massif et plus particulièrement sur la partie de gestion des interférences intercellulaires dans les réseaux hétérogènes. L'interférence reste un problème de fond des réseaux. L'utilisation du MIMO massif ne dérogera pas à la règle; son introduction, notamment dans les réseaux hétérogènes, apportera un lot de défis. C'est sur ces défis et les verrous associés que nous proposons de travailler.

Nous proposons une nouvelle architecture d'un réseau hétérogène comprenant plusieurs petites cellules qui coexistent avec une macrocellule équipée d'un grand nombre d'antennes au niveau de la macro station de base (MBS). L'objectif est de concevoir un nouveau schéma de précodage hybride permettant d'annuler les interférences intercellulaires sur le lien descendant (DL) qui affectent les utilisateurs des cellules voisines, plus particulièrement quand un utilisateur apparaît dans la zone de couverture d'une autre cellule dans un réseau hétérogène à spectre partagé.

Organisation du document

Le présent chapitre consiste en une introduction décrivant le contexte général du travail, l'objectif et les contributions, les motivations ainsi que et l'organisation du document. Le premier chapitre comporte deux parties. La première partie est une revue des concepts de base ou nous décrivons l'architecture du réseau hétérogène, ses composants ainsi que le concept général d'une petite cellule. Nous présentons le contexte 5G dans lequel s'inscrit ce type de réseau afin de permettre d'appréhender les problématiques soulevées par la suite. Cette partie couvre aussi les notions et les techniques fondamentales d'un système MIMO massif. La seconde partie est une revue de littérature sur l'état de l'art des différentes approches de gestion

des interférences dans un réseau hétérogène MIMO massif. Une comparaison qualitative entre les différentes approches est fournie dans ce chapitre. Le deuxième chapitre décrit le modèle du système et la technique d'annulation d'interférences proposée. Dans le troisième chapitre, nous présentons l'environnement de simulation et nous analysons les résultats obtenus. Nous présentons enfin une conclusion qui résume le travail réalisé.

Chapitre 1

Revue des concepts de base et des travaux existants

1.1 Introduction

L'une des techniques les plus efficaces pour améliorer la couverture et accroître le débit dans les réseaux cellulaires sans fil est de réduire la taille de la cellule (p. ex. fractionnement de cellule) et la portée de transmission. Par conséquent, le concept de déploiement de petites cellules dans les macrocellules a récemment attiré l'intérêt de l'industrie. Divers défis techniques vers un déploiement de masse de petites cellules ont été abordés dans la littérature récente. La gestion d'interférences entre les petites cellules voisines et entre les petites cellules et la macrocellule est considérée comme un défi majeur dans les réseaux hétérogènes puisque les petites cellules partagent le même spectre de fréquence avec les macrocellules. Dans ce chapitre, nous enquêtons sur les différents états de l'art des approches de gestion d'interférences dans les réseaux hétérogènes.

1.2 Caractéristiques générales d'un système MIMO massif

Le MIMO massif est une technologie de pointe qui s'appuie sur l'exploitation de la dimension spatiale, créant ainsi plusieurs degrés de liberté et stimulant le principe de la transmission simultanée par multiplexage spatial. Servir différents utilisateurs dans la même ressource temps-fréquence peut être considéré comme un élément-clé pour la 5G de réseaux mobiles en raison de l'épuisement du spectre de fréquence et pour répondre aux contraintes d'efficacité spectrale. Cette technologie consiste à équiper une station de base par un nombre élevé M d'antennes pour servir un nombre d'utilisateurs K sous la supposition $M \gg K$. Le modèle du système MIMO massif est illustré à la figure 1.1.

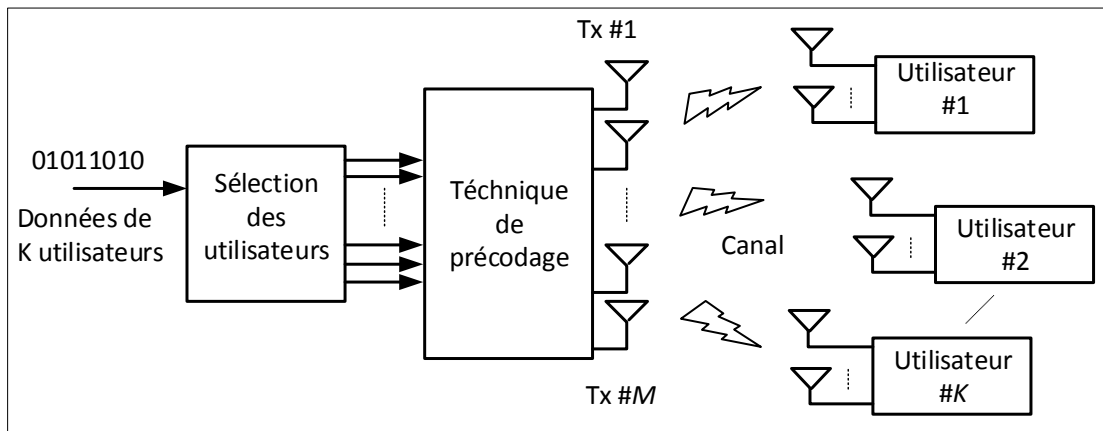


FIGURE 1.1 – Modèle MIMO massif - M antennes et K utilisateurs.

1.2.1 TDD vs FDD pour le MIMO massif

Le MIMO massif s'appuie en principe sur un mode de duplexage par répartition dans le temps TDD (Time Division Duplexing) dans lequel les canaux montants et descendants se partagent dans le temps la même ressource en fréquences. Les canaux physiques de propagation montants et descendants ont alors les mêmes caractéristiques ; on les dit réciproques : il suffit d'évaluer le sens montant pour permettre à la station de base d'élaborer les paramètres à appliquer pour le précodage du signal descendant et à la combinaison des signaux reçus pour extraire le signal émis par chaque terminal. Pour ce faire, les terminaux émettent périodiquement une séquence de pilotes : ces K séquences sont en principe orthogonales.

Si l'on veut appliquer les principes du MIMO massif au mode de duplexage par répartition en fréquences, FDD, où les sens montants et descendants utilisent des bandes de fréquences distinctes, il faut effectuer l'évaluation des canaux radio à la fois dans le sens montant et dans le sens descendant : les résultats des mesures effectuées par les terminaux doivent être retournés à la BS. Les travaux effectués sur ce sujet ont montré que le domaine d'efficacité du MIMO massif se trouvait notablement réduit et que son intérêt se trouvait limité à des scénarios particuliers, de faible mobilité et de basse fréquence [18].

Mais la limitation du MIMO massif au mode de duplexage TDD peut constituer une contrainte à son usage dans la mesure où l'ingénierie de beaucoup de réseaux est fondée sur le FDD. Pour le moment, les travaux menés sur ce thème ont montré que moyennant certaines hypothèses la contrainte propre au FDD pourrait être levée, mais on ne sait pas si ces hypothèses sont réalistes. On en retiendra que l'utilisation de MIMO massif reste pour l'heure liée au mode TDD.

1.2.2 Principales limitations d'un système MIMO massif

De nombreuses études théoriques traitent les performances des systèmes MIMO massifs [19, 20, 21] et les résultats sont souvent très encourageants de par l'amélioration flagrante de l'efficacité énergétique et de la capacité de la cellule. Cependant les hypothèses prises sont souvent fortes et nous allons décrire dans cette partie les deux aspects les plus problématiques qui sont souvent négligés et leur impact sur les performances, à savoir les imperfections apportées par les composants matériels et la connaissance imparfaite du canal de propagation.

Imperfections matérielles

Un système MIMO massif est par définition un système comprenant un très grand nombre d'antennes ($M > 100$). Il est donc évident qu'une telle solution va nécessiter des composants à faibles coûts (appelés COTS pour Commercial Off-The-Shelf) pour être économiquement viable et l'impact de leurs imperfections dans le cas d'une exploitation massive est étudiée.

Toute action de précodage, permettant la focalisation de l'énergie et donc un accès SDMA (Spatial Division Multiple Access), nécessite une certaine connaissance du canal de transmission. C'est pourquoi dans la plupart des études menées autour de ces systèmes [19], on considère un système fonctionnant en TDD. En effet, cela permet de reporter toute la complexité des traitements numériques au niveau de la BS massive grâce à l'exploitation de la réciprocité du canal de transmission.

Dans un tel système à grand nombre d'antennes et chaînes RF, on ne peut en revanche pas considérer le canal estimé comme réciproque [8]. En effet, bien que le canal de propagation puisse toujours être considéré comme réciproque, le canal de transmission, comprenant le canal de propagation et les étages RF, est celui que l'on estime et utilise pour les différents traitements en bande de base. Malheureusement, certains composants ou fonctions constituant la chaîne RF ne sont pas réciproques (comme les PLL (boucle à verrouillage de phase)) et l'addition de toutes ces petites imperfections (provenant par exemple de l'utilisation de nombreux composants COTS) va invalider l'hypothèse générale de réciprocité du canal de transmission. Une caractérisation et une calibration du système vont donc être nécessaires pour pallier ces défauts et rétablir cette hypothèse. Les études décrites dans [22] prennent directement en compte ces imperfections pour former des faisceaux sans passer par l'étape de calibration, l'intérêt de ces traitements étant de prendre en compte ces imperfections pour pallier les rotations de phases induites par ces défauts.

Dans [20] les simulations montrent qu'un palier apparaît avec un certain niveau d'imperfections matérielles du côté de l'utilisateur limitant ainsi la capacité totale de la cellule. Ce palier ne peut pas être modifié en augmentant le SNR ou le nombre d'antennes de la BS massive. Il est également possible d'effectuer un compromis en attribuant une seule chaîne RF par groupe d'antennes. Par exemple dans [23] il est fait mention d'un patch de 32 antennes avec

seulement 4 chaînes RF permettant de bénéficier du gain de beamforming correspondant aux 32 éléments. Bien évidemment le résultat n'est pas aussi performant car le diagramme de rayonnement n'est plus du tout aussi malléable. En effet, grouper 8 antennes derrière une chaîne RF va simplement simuler le fonctionnement d'une antenne directive de gain de 9 dB dans la direction définie par l'architecture du réseau de 8 antennes (dépointage du faisceau via déphasage entre antennes ou non). En dehors de cette direction, on va rapidement subir de fortes atténuations si l'on s'en écarte trop. Il semble cependant qu'un tel système, appelé système hybride numérique et analogique, parvienne à obtenir de bonnes performances.

1.2.3 Estimation du canal et contamination de pilotes

L'estimation du canal de transmission est un point clé des communications numériques, permettant d'améliorer considérablement les échanges grâce à la connaissance de celui-ci. En MIMO massif, cette information est très importante car elle permet d'effectuer les traitements dits de précodage dont le rôle est de former des faisceaux focalisant l'énergie vers, ou autour, des utilisateurs de la cellule. Une mauvaise estimation va donc provoquer une dégradation non négligeable de la capacité d'un tel système à focaliser l'énergie. On retrouve dans [24] une étude analytique de l'impact d'une mauvaise estimation sur la capacité et l'efficacité énergétique du système.

Généralités

La notion de temps de cohérence T_c , permet de connaître la durée pendant laquelle la réponse du canal ne varie pas de façon significative. Il faut donc estimer le canal avec une fréquence d'au moins $1/T_c$. En d'autres termes, plus le canal contient d'éléments mobiles, plus l'estimation de canal devra être réalisée souvent. On parle également de *Channel Aging* pour exprimer la nature instable du canal [25]. Notons également que le temps alloué à cette estimation (T_{est}) augmente proportionnellement avec le nombre d'utilisateurs. L'estimation du canal peut être faite au niveau des terminaux utilisateurs qui remontent ensuite les informations de leurs canaux vers la BS massive ou alors directement au niveau de la BS massive, au travers de l'envoi de symboles pilotes des utilisateurs vers la BS massive. Par exemple, si l'on prend un système OFDM (p. ex. en LTE) les symboles pilotes sont répartis en temps et en fréquence.

Sur la figure 1.2, on observe un système à trois utilisateurs où les pilotes sont répartis en temps et en fréquence de manière à respecter un espacement des pilotes inférieur au temps de cohérence sur l'axe temporel et à la bande de cohérence (B_c) sur l'axe fréquentiel. Une fois les coefficients de canal estimés, la BS massive peut reconstituer celui-ci sur l'ensemble des sous-porteuses et sur chaque durée symbole grâce à des techniques classiques d'interpolation. Pour des systèmes multi-utilisateurs, le nombre de canaux à estimer par terminal est proportionnel à M . Il est alors plus judicieux de réaliser cette opération au niveau de la BS massive où la puissance de calcul est disponible. C'est une des raisons pour laquelle un système MIMO

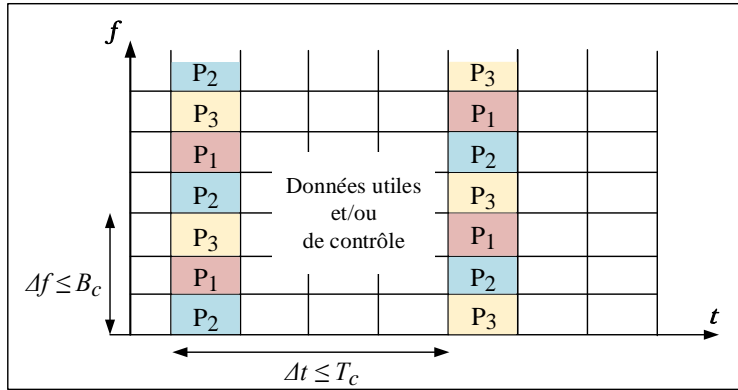


FIGURE 1.2 – Positionnement de symboles pilotes dans une trame.

massif n'est actuellement viable qu'avec un mode d'accès TDD. Parmi ces traitements sont compris le précodage, permettant de diriger l'énergie d'un réseau d'antennes intelligemment, et l'allocation de puissance. L'étude [3] souligne que pour effectuer cette estimation dans un laps de temps restreint, les séquences pilotes orthogonales, qui permettent à la BS d'estimer les canaux de tous les utilisateurs simultanément, sont peu nombreuses et sont également réutilisées dans chacune des cellules adjacentes. Cela provoque :

- Une réduction de la capacité causée par la réduction de temps de transmission de données utiles. En effet, plus le nombre d'utilisateurs augmente, plus le temps alloué à l'estimation des canaux (T_{est}) augmente. La capacité globale de la cellule est alors pondérée par un facteur $(1 - \frac{T_{est}}{T_{slot}})$ qui peut vite devenir pénalisant pour des canaux à forte mobilité (T_c faible). T_{slot} , représenté à la figure 1.3, correspond à l'intervalle de temps durant lequel le canal doit être statique, donc respectant $T_{slot} \leq T_c$.

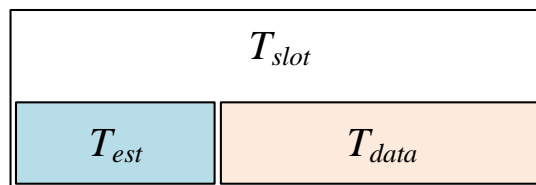


FIGURE 1.3 – Structure simplifiée d'un intervalle de temps.

- De fortes interférences intercellulaires. Ce phénomène appelé contamination de pilotes [26] provient de la nécessité de réutiliser les mêmes séquences pilotes dans les cellules adjacentes.

Contamination de pilotes

Ce phénomène devient particulièrement problématique en MIMO massif [27] car il fait apparaître une borne maximale qui limite les performances du système. En effet, en considérant un nombre d’antennes très élevé à la BS ($M \rightarrow \infty$), la focalisation spatiale devient suffisamment précise (beamforming) pour considérer toutes les interférences intracellulaires comme négligeables [19]. En revanche, les interférences intercellulaires proviennent de la nature des BS des cellules adjacentes à également focaliser l’énergie. Ainsi, augmenter leur nombre d’antennes ne fait qu’accroître leur potentiel à interférer. Ce comportement est illustré sur la figure 1.4. Posons j la cellule considérée et ($l \neq j$) les cellules adjacentes exploitant les mêmes ressources temporelles et fréquentielles. Sous l’hypothèse d’un M très grand ($M \rightarrow \infty$), le rapport signal sur interférences (SIR) en réception des pilotes au niveau de la BS massive ne dépend plus que du rapport entre les pertes en espace libre de l’utilisateur ciblé, représenté par $\beta_k^{(j)}$ pour l’utilisateur K de la cellule j , et la somme des pertes en espace libre des cellules adjacentes [19] :

$$SIR_k^{(j)} \xrightarrow{M \rightarrow \infty} \frac{\beta_k^{(j)}}{\sum_{l \neq j} \beta_k^{(l)}} \quad (1.1)$$

En effet, la BS massive de la cellule j va recevoir une somme de pilotes identiques (figure 1.4), chacun pondéré par sa propre atténuation en espace libre. Le précodage permettant la focalisation du faisceau vers l’utilisateur va alors percevoir l’utilisateur comme étant à plusieurs endroits différents et va répartir l’énergie vers l’ensemble. Cela a pour conséquence directe une perte d’énergie utile et la création d’interférences au niveau des utilisateurs des cellules adjacentes.

Lorsque le nombre d’antennes à la BS est supérieur au nombre d’utilisateurs ($M > K$), [28] montre que le nombre de degrés de liberté (DoF) du système n’augmente pas avec M mais avec le nombre d’antennes en réception (plus d’énergie captée). En revanche cela décuple la complexité d’un système MIMO massif. Une analyse complémentaire est effectuée dans [8] où il est considéré intéressant de visualiser ces DoF comme directement liés au nombre d’antennes. L’exploitation de K parmi M DoF permet d’effectuer la transmission et laisse les ($M - K$) degrés restant pour être exploités à des fins énergétiques et autres besoins dépendant des scénarios. Une étude intéressante sur l’impact du nombre de degrés de liberté nécessaires à un utilisateur pour atteindre un pourcentage des performances théoriques maximales, dans certains scénarios particuliers, a été menée dans [21]. Les auteurs montrent que le nombre d’antennes requis pour dépasser un certain seuil dépend du type de précodeur utilisé. En effet, les précodeurs linéaires simples de type filtre adapté (cf. CB, EGT et DBS) requièrent plus d’antennes que des précodeurs à inversion matricielle, plus complexes (cf. ZF et MMSE). Il y est également montré que plus la contamination de pilotes est forte, moins les précodeurs complexes sont efficaces par rapport aux précodeurs simples, ce qui rend l’utilisation des filtres adaptés plus intéressante dans ce genre de scénario.

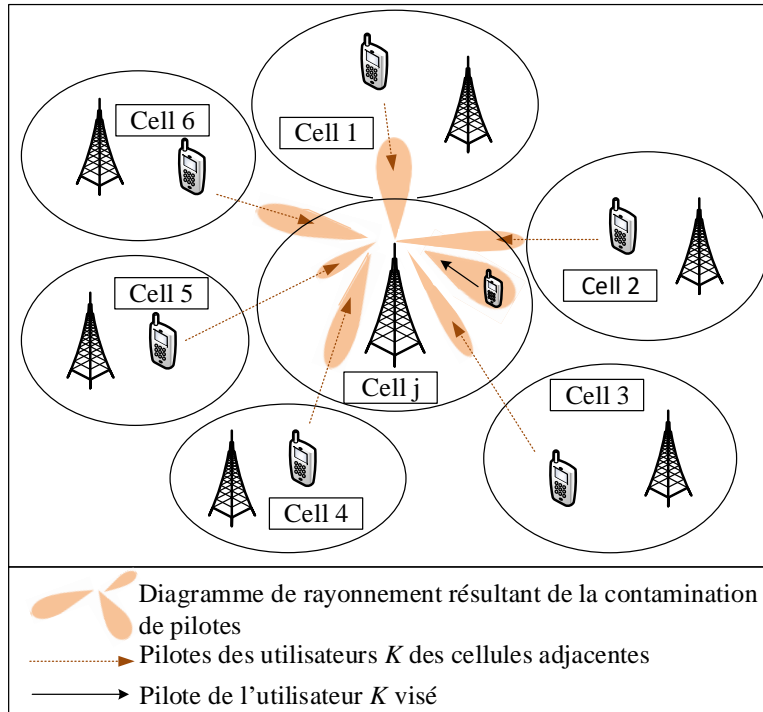


FIGURE 1.4 – Contamination de pilotes.

1.3 Longueurs d'onde millimétriques (mmWave)

Les systèmes aux longueurs d'onde millimétriques (mmWave) sont envisagés comme une solution prometteuse pour de futures communications sans fil (figure 1.5). Ces systèmes se caractérisent par une large bande passante disponible. Cela permet donc d'intégrer un nombre important d'antennes sur une station de base. Par conséquent, la combinaison des technologies mmWave et MIMO massif présente une solution aux problèmes des réseaux denses et hétérogènes pour les futures communications.

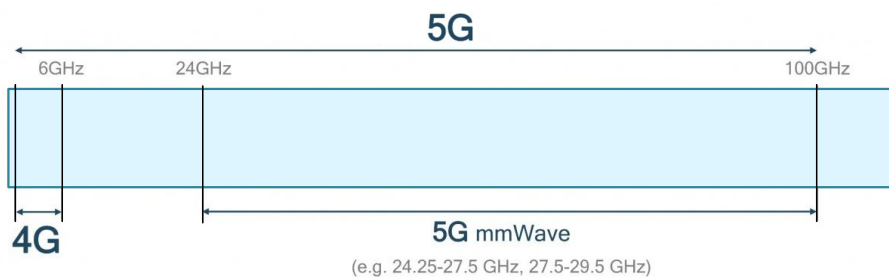


FIGURE 1.5 – Le spectre de fréquence 5G.

1.3.1 Généralités

La restriction du spectre alloué aux applications grand public tel que les bandes allouées à la téléphonie, à la télévision ou à l'Internet sans fil (TV, Bluetooth, WiFi, 2G, 3G, 4G, etc...), ainsi que la forte augmentation du nombre de terminaux exigent une exploitation la plus efficace possible du spectre. Cela complique la réalisation des objectifs visés pour la 5G en termes de débits pour les prochaines années. De plus, l'augmentation continue du nombre d'utilisateurs mobiles va de même influencer la consommation énergétique des futurs systèmes qui constitue un élément essentiel à prendre en compte lors de leur conception. Ainsi, l'apparition de nouvelles bandes exploitables, plus larges, et qui supportent cette augmentation, serait également avantageuse et favorable et permet de répondre à plusieurs problématiques. En effet, les bandes disponibles sont beaucoup plus larges et les fortes pertes en espace libre leur permettent d'être des candidates parfaites pour les réseaux hétérogènes denses de petites cellules. Ceci a été démontré dans [29], où les auteurs affirment que l'efficacité énergétique du réseau augmente avec l'augmentation de la taille de la cellule.

1.3.2 Application aux systèmes MIMO massifs

Dans cette section, nous listons brièvement les avantages et les inconvénients de l'utilisation des systèmes MIMO massifs aux ondes millimétriques :

Avantages

- Très larges bandes : l'augmentation de la bande passante permet d'améliorer considérablement la capacité d'une cellule (jusqu'à 500 MHz de bande contre un maximum de 20 MHz pour les réseaux traditionnels).
- Très faible encombrement : la diminution de la dimension des antennes permet à la station de base massive de maintenir une taille convenable qui lui permet d'être facilement déployable.
- Canaux généralement en visibilité directe : en effet, la chance que le terminal mobile soit en visibilité directe par rapport à la station de base va s'accroître avec la diminution de la taille des cellules. Cette spécificité permettra l'utilisation de nouvelles techniques qui s'appuient sur la structure angulaire du canal.

Inconvénients

- Mauvaise pénétration en présence d'obstructions : les ondes millimétriques ne pénètrent pas facilement les murs ce qui affecte la qualité du signal et dégrade les performances des communications dans un milieu riche en obstacles. Cela limite leur utilisation pour des scénarios bien déterminés (p. ex. festival, stades de football) qui se caractérisent par une mobilité réduite.

- Pertes en espace libre : l'atténuation et le déphasage créés par le canal en espace libre décrits par l'équation suivante :

$$h = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^\gamma e^{\frac{2i\pi d}{\lambda}} \quad (1.2)$$

où λ est la longueur d'onde, d est la distance parcourue par l'onde, et γ est un facteur compris entre 2 et 4 dans l'air et qui caractérise généralement l'absorption selon les éléments météorologiques, les fréquences utilisées, etc...

- Couplage entre les lignes : avec l'augmentation de la fréquence, les lignes de propagation deviennent de plus en plus fines aux ondes millimétriques, et seront ainsi plus capable de rayonner. Cela va à contre-courant de la direction prise vers une efficacité énergétique améliorée. Le fait d'associer de nombreuses chaînes radio dans un tel système va donc exiger une étude détaillée de l'architecture des antennes afin de diminuer le plus possible le couplage entre ces lignes.
- Coût élevé : en effet, un tel système nécessite une grande précision de fabrication ce qui augmente évidemment son coût. Par conséquent, il est important d'adopter un compromis coût / performances pour produire un système durable économiquement.
- Effet Doppler : la fréquence Doppler f_d est par définition l'écart fréquentiel engendré par un élément en mouvement par rapport au milieu de propagation de l'onde avec une vitesse v . Elle est donnée par l'équation suivante :

$$f_d = \frac{v \cdot f_c}{c} \quad (1.3)$$

où f_c est la fréquence porteuse et c est la vitesse de la lumière dans le vide. En effet, le temps de cohérence du canal, c'est-à-dire le temps pendant lequel le système peut supposer que le canal radio reste constant, étant pratiquement inversement proportionnel à l'effet Doppler, il diminue au fur et à mesure que la mobilité augmente [30]. Par conséquent, l'utilisation des ondes millimétriques est ainsi plus pertinente dans les milieux à mobilité réduite, ce qui explique la densification du réseau dans les environnements urbains.

1.4 Précodage et beamforming

La notion de précodage apparaît dès lors que l'on effectue un traitement numérique à l'émission codant puis répartissant les données sur chacune des antennes, à l'aide d'une connaissance plus ou moins parfaite du canal de transmission. Il s'agira toujours de codes usant de la dimension spatiale car c'est là tout l'intérêt du MIMO. Dans la suite, nous énumérons les différents précodeurs linéaires que nous avons jugés pertinents pour cette étude et nous décrivons le système de précodage hybride.

1.4.1 Les différents précodeurs linéaires

Un précodage prenant en compte le résultat de l'évaluation de l'état instantané des canaux radio (CSI) est effectué à la station de base. Il permet de focaliser l'énergie émise dans un espace limité proche de chaque terminal et ainsi d'améliorer significativement les performances du lien descendant de la station de base vers les terminaux et de réduire l'énergie rayonnée. En effet, plus M est grand, meilleure est la focalisation. À la réception, une combinaison linéaire des signaux reçus par la station de base permet de discriminer les signaux émis par chacun des K terminaux. Les performances en matière d'efficacité spectrale, de tolérance au bruit ou aux interférences dépendent des algorithmes utilisés tant à la réception qu'à l'émission. À la réception, les terminaux doivent connaître le gain du canal : il peut être obtenu par des informations explicites transmises par la station de base ou bien estimé à l'aveugle à partir des données reçues. Dans ce qui suit, nous allons énumérer les différents précodeurs linéaires que nous avons jugés pertinents pour cette étude.

Notations

On considère un système MU-MIMO avec M antennes à l'émission (BS massive) et K utilisateurs dans la cellule [31, 32, 33, 34, 35].

Soit $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ le vecteur contenant les données (symboles) à destination de chaque utilisateur. On appelle $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ la matrice de précodage permettant de répartir les données sur chaque antenne émettrice tel que l'on obtienne le vecteur émis $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$. En d'autres termes, chaque antenne va ainsi émettre une combinaison linéaire de K symboles du vecteur entrant :

$$\mathbf{x} = \sqrt{\eta} \mathbf{W} \mathbf{s} \quad (1.4)$$

où $\sqrt{\eta}$ est le facteur de normalisation permettant de s'assurer que la puissance émise sur le canal reste inchangée par le précodage et ce, quel que soit M . Il s'exprime ainsi :

$$\eta = \frac{1}{\mathbb{E}[\text{Tr}(\mathbf{W}^H \mathbf{W})]} \quad (1.5)$$

où $\mathbb{E}[\]$ est l'espérance mathématique. Pour l'antenne d'indice m on a :

$$x_m = \sqrt{\eta} \sum_{k=1}^K W_{m,k} s_k \quad (1.6)$$

Le vecteur de signaux reçus par les différents utilisateurs $\mathbf{r} = [r_1, r_1, \dots, r_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ s'écrit donc :

$$\mathbf{r} = \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1.7)$$

où $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{K \times M}$ est la matrice contenant les coefficients $G_{k,m}$ modélisant le canal en voie descendante entre l'utilisateur k et l'antenne m de la BS massive. $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$

est le vecteur contenant le bruit blanc i.i.d. suivant une loi normale de moyenne nulle et de variance $\mathbb{E}[n_k^* n_k] = \sigma^2$. La matrice \mathbf{G} s'exprime par le produit matriciel entre $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{K \times M}$ et $\mathbf{D}_\beta^{\frac{1}{2}} \in \mathbb{C}^{K \times K}$:

$$\mathbf{G} = \mathbf{D}_\beta^{\frac{1}{2}} \mathbf{H} \quad (1.8)$$

\mathbf{H} est une matrice telle que la puissance de chaque lien antenne/utilisateur $H_{k,m}$ est en moyenne unitaire, c'est-à-dire $\mathbb{E}[|H_{k,m}|^2] = 1$, et qui contient les variations à petite échelle du canal. \mathbf{D}_β est une matrice diagonale $[K \times K]$ contenant les pertes en espace libre β_k entre la BS massive et l'utilisateur k .

Cela revient à écrire chaque coefficient comme :

$$G_{k,m} = \sqrt{\beta_k} H_{k,m}, \quad k = 1, \dots, K; m = 1, \dots, M \quad (1.9)$$

avec β_k tel que :

$$\beta_k = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_k} \right)^2 \quad (1.10)$$

où d_k est la distance entre l'utilisateur k et la BS massive. En remplaçant \mathbf{G} avec son expression définie dans l'équation 1.8, en obtient :

$$\mathbf{r} = \mathbf{D}_\beta^{\frac{1}{2}} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1.11)$$

On peut alors extraire le signal reçu par l'utilisateur k afin d'identifier la partie utile et la partie d'interférences :

$$r_k = \sum_{m=1}^M \sqrt{\beta_k} H_{k,m} x_m + n_k \quad (1.12)$$

$$= \sum_{m=1}^M \sqrt{\beta_k} H_{k,m} (\sqrt{\eta} \sum_{j=1}^K W_{m,j} s_j) + n_k \quad (1.13)$$

Pour plus de clarté, nous appelons \mathbf{u} la partie utile et \mathbf{i} la partie interférente du signal reçu. On a donc :

$$u_k = \sqrt{\eta} \sqrt{\beta_k} \sum_{m=1}^M H_{k,m} W_{m,k} s_k \quad (1.14)$$

$$i_k = \sqrt{\eta} \sqrt{\beta_k} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1, j \neq k}^K H_{k,m} W_{m,j} s_j \quad (1.15)$$

Ces termes vont être directement influencés par le choix du précodeur et les métriques SNR , $SINR$ (rapport signal sur interférence plus bruit) et SIR en résultant s'expriment par :

$$SNR_k = \frac{\mathbb{E}[|u_k|^2]}{\mathbb{E}[|n_k|^2]}, \quad SINR_k = \frac{\mathbb{E}[|u_k|^2]}{\mathbb{E}[|i_k|^2] + \mathbb{E}[|n_k|^2]}, \quad SIR_k = \frac{\mathbb{E}[|u_k|^2]}{\mathbb{E}[|i_k|^2]} \quad (1.16)$$

Maximum Ratio Transmission (MRT)

Cette technique lorsqu'appliquée dans le domaine temporel, vise à maximiser le SNR. En effet, un tel précodeur va offrir un gain de beamforming maximal à chaque utilisateur mais va générer une certaine quantité d'interférences sur les autres. L'expression la plus largement utilisée dans la littérature [3, 19] est :

$$W_{m,k}^{(MRT)} = H_{k,m}^* \quad (1.17)$$

et matriciellement :

$$\mathbf{W}^{(MRT)} = \mathbf{H}^H \quad (1.18)$$

Il s'agit donc du filtre adapté au canal visant à maximiser le SNR. En réinjectant (1.17) dans (1.14) et (1.15) on obtient :

$$u_k^{CB} = \sqrt{\eta} \sqrt{\beta_k} \sum_{m=1}^M |H_{k,m}|^2 s_k = \sqrt{\eta} \sqrt{\beta_k} \text{Tr}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) s^k \quad (1.19)$$

$$i_k^{CB} = \sqrt{\eta} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1, j \neq k}^K \sqrt{\beta_j} H_{k,m} H_{j,m}^* s_j \quad (1.20)$$

u_k^{CB} est une somme constructive de combinaisons linéaires du signal utile qui va croître proportionnellement avec le nombre d'antennes M , contrairement à i_k^{CB} dont le produit $H_{k,m} H_{j,m}^*$ peut être constructif comme destructif. L'augmentation conséquente de M va donc voir u_k^{CB} croître linéairement, contrairement à i_k^{CB} lorsque le nombre d'antennes tend vers l'infini.

Equal Gain Transmission (EGT)

L'EGT, ou transmission à gain constant, ne va compenser que le déphasage engendré par le canal sur chaque sous porteuse :

$$W_{k,m}^{(EGT)} = e^{-i\phi_{k,m}} \quad (1.21)$$

avec $\phi_{k,m}$ le déphasage introduit par le canal entre l'utilisateur k et l'antenne m . Cela donne matriciellement :

$$\mathbf{W}^{(EGT)} = \angle \mathbf{H}^H \quad (1.22)$$

Notons que le coefficient de normalisation devient exactement :

$$\eta = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \mathbb{E}[|e^{i\phi_{k,m}}|^2]} = \frac{1}{MK} \quad (1.23)$$

Les signaux en réception s'écrivent alors :

$$u_k^{(EGT)} = \sqrt{\frac{\beta_k}{MK}} \sum_{m=1}^M |H_{k,m}| s_k \quad (1.24)$$

$$i_k^{(EGT)} = \frac{1}{\sqrt{MK}} \sum_{m=1}^M |H_{k,m}| s_k \quad (1.25)$$

Il est nécessaire de soulever l'aspect de la diversité exploitée par le système. En effet, alors que EGT et MRT exploitent une diversité de M , le précodeur TR (Time Reversal) n'exploite qu'une diversité de $M/2$ [36]. Dans un scénario où sont présentes de très nombreuses réflexions, le CB semble plus pertinent. Cela s'explique par sa capacité à gérer l'énergie émise dans les différentes directions en adaptant la puissance de la radiation en fonction de la qualité de chaque trajet. En d'autres termes, moins le trajet subit d'atténuations plus la puissance lui étant attribuée sera élevée. L'EGT, quant à lui, va émettre la même énergie quelle que soit la qualité du trajet ce qui le rend plus adapté à un scénario à moindre nombre de trajets réfléchis.

Zero Forcing (ZF)

Le ZF, illustré à la figure 1.6, est un précodeur annulant les interférences inter-utilisateurs (interférences produites par une transmission MU-MIMO) et donc qui maximise le SIR. La

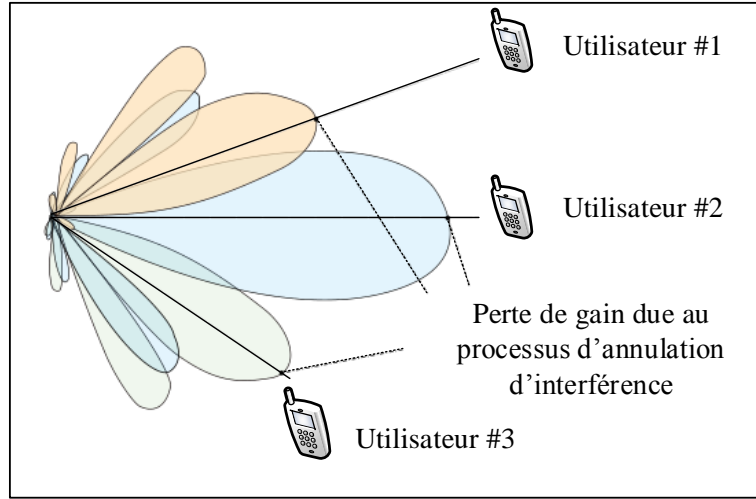


FIGURE 1.6 – Précodeur Zero-Forcing.

forme linéaire devenant très complexe, l'écriture matricielle est préférable pour plus de lisibilité.

$$\mathbf{W}^{(ZF)} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (1.26)$$

Soit :

$$\mathbf{r} = \sqrt{\eta} \mathbf{D} \frac{1}{\beta} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1.27)$$

ainsi :

$$u_k^{(ZF)} = \sqrt{\eta \beta_k} s_k \quad (1.28)$$

$$i_k^{(ZF)} = 0, \quad \text{si } \mathbf{H}\mathbf{H}^H \text{ est inversible} \quad (1.29)$$

Bien que très performant, la complexité apportée par l'inversion matricielle $(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}$ est élevée et croit avec M . Le ZF permet donc bien d'annuler les interférences ($SIR_k \rightarrow +\infty$), et cela au détriment du gain de beamforming qui est d'autant plus faible qu'il y a d'interférences à annuler.

Minimum Mean Square Error (MMSE)

Le précodeur MMSE est un compromis entre annulation d'interférences et minimisation du bruit, ce qui en fait un précodeur plus adapté que le ZF à bas SNR. Il vise donc à maximiser le SINR.

$$\mathbf{W}^{MMSE} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_K)^{-1} \quad (1.30)$$

Comme le ZF, il est d'une grande complexité à cause de l'inversion matricielle nécessaire au calcul de la matrice de précodage. Il permet de limiter l'impact du bruit à faible SNR que subit le ZF.

1.4.2 Précodage hybride

Les systèmes MIMO massifs font partie des solutions pertinentes pour l'exploitation des transmissions mmWave dans le but de répondre à la forte demande en terme de débit très élevé. La mise en oeuvre d'un système MIMO massif en mmWave constitue un sujet de recherche très intéressant pour plusieurs raisons. D'abord, le MIMO massif est une technologie qui permet de combattre le problème de pertes en espace libre grâce à sa capacité de focalisation d'énergie. De plus, le réseau d'antennes possède un faible encombrement grâce à la réduction de la taille des antennes. Outre cela, les bandes sont larges et le spectre fréquentiel y est très peu utilisé jusqu'à maintenant.

Cependant, malgré tous les avantages des systèmes MIMO massifs, ces derniers possèdent des inconvénients. En effet, les systèmes MIMO traditionnels possèdent un nombre réduit d'antennes implémentées à la station de base (entre 1 et 70). Dans ce cas, le nombre de chaînes radio fréquence (RF), des convertisseurs numériques/analogiques (DAC) et des convertisseurs analogiques/numériques (ADC) qui sont les plus coûteux et les plus consommateurs en énergie du module émetteur-récepteur sans fil, peut être égal au nombre d'antennes. Cependant, dans un système MIMO massif avec plus que 100 antennes implémentées à la station de base, il est pratiquement impossible d'avoir ce nombre de chaînes RF en raison du coût élevé et leur consommation excessive d'énergie. Plus précisément, lorsque la largeur de bande de transmission est très grande, la consommation d'énergie des convertisseurs ADC serait trop élevée. Ainsi, l'utilisation d'un nombre élevé de chaînes RF en parallèle semble plus compliquée. Pour remédier à ce problème, des systèmes dits hybrides ont vu le jour et ils sont identifiés comme

des solutions pertinentes afin de contourner ces difficultés. Les techniques hybrides visent à diminuer le nombre de chaînes RF, minimisant ainsi la complexité de conception, tout en conservant le même nombre élevé d’antennes [37, 38] nécessaire à l’obtention d’un gain de beamforming élevé.

Plusieurs techniques de précodage hybrides ont été étudiées dans la littérature et chacune a des avantages et inconvénients. Cependant, la majorité d’entre elles ne sont pas aptes d’assurer une transmission multi-utilisateurs. Un exemple des techniques hybrides est présenté dans la Figure 1.7.

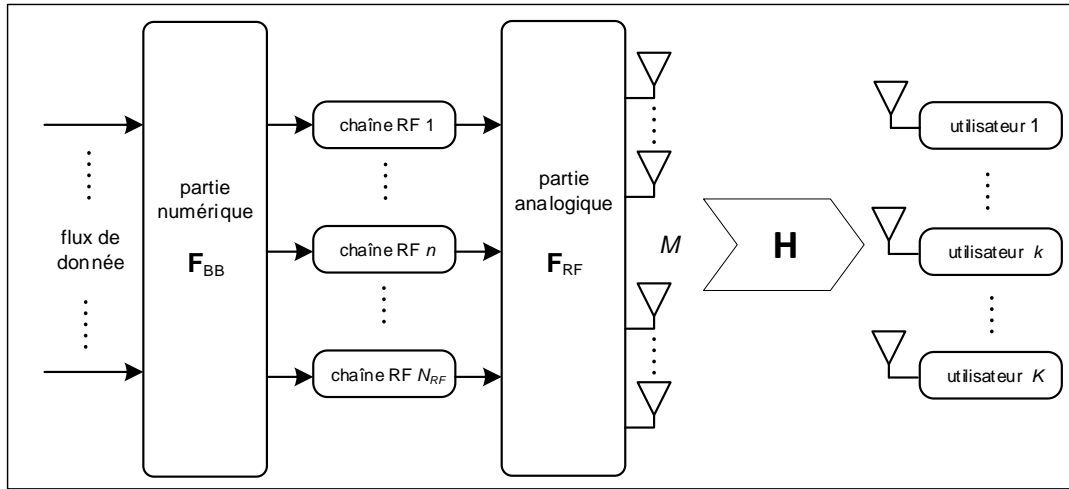


FIGURE 1.7 – Précodage hybride.

Nous remarquons d’après la figure, que le processus de précodage est composé en deux parties : une partie numérique et une partie analogique.

1. Une partie numérique ($\mathbf{F}_{BB} \in \mathbb{C}^{N_{RF} \times K}$) où N_{RF} est le nombre de chaînes RF et K est le nombre d’utilisateurs ;
2. Une partie analogique ($\mathbf{F}_{RF} \in \mathbb{C}^{M \times N_{RF}}$) où M est le nombre d’antenne à la station de base. L’objectif principal de cette partie est de construire un faisceau dont le lobe principal englobe tous les utilisateurs à adresser simultanément. Chaque étage analogique, placé dans le même sens d’une chaîne RF, est constitué de N_A antennes, chacune étant reliée à un déphaseur analogique qui est contrôlé par le système. Ces déphaseurs contribuent au contrôle de la direction du faisceau. Par conséquent, la partie analogique vise à garantir un gain de *beamforming* plus significatif sans augmenter le nombre de chaînes RF. A l’inverse, l’augmentation du gain de *beamforming* de cette façon, engendre la formation d’un faisceau fin ce qui réduit le nombre d’utilisateurs que le lobe principal englobe.

Les paramètres N_{RF} et N_A sont déterminés selon l’environnement auquel la solution est destinée. Effectivement, plus la cellule est dense, plus la focalisation l’énergie vers des groupes d’utilisateurs bien précis est intéressante en respectant $K < N_{RF}$. En revanche, si le nombre d’utilisateurs dans la cellule est toujours en moyenne inférieur à N_{RF} , alors la présence d’un étage analogique est moins pertinente. Le nombre d’antennes du système est donc $M = N_{RF} \times N_A$ et le vecteur des signaux précodés $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ s’écrit alors :

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BBS} \mathbf{s} \quad (1.31)$$

avec $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ est le vecteur de K symboles.

Le problème de précodage hybride consiste au découplage des dispositifs RF et numérique. Cependant, avec le développement des techniques de traitement du signal, l’intérêt porté au précodage hybride, en particulier pour les systèmes MIMO massifs, a augmenté et diverses architectures ont été proposées. Nous distinguons les architectures entièrement connectées et partiellement connectées.

Architecture hybride entièrement connectée

Comme illustré à la figure 1.8, l’architecture entièrement connectée consiste à connecter chaque chaîne RF à toutes les antennes par des additionneurs. Par conséquent, le signal transmis passe par M voies RF (qui contiennent un mélangeur, un amplificateur de puissance, un déphaseur, etc.). Les signaux sont ensuite additionnés avant d’être appliqués à chaque antenne, comme illustré à la figure 1.8. L’architecture hybride entièrement connectée offre un gain de beamforming élevé et une plus grande flexibilité dans l’orientation de faisceau.

Architecture hybride partiellement connectée

Bien que l’architecture de précodage hybride entièrement connectée offre un gain élevé de beamforming et une plus grande flexibilité dans l’orientation de faisceau, cette dernière possède une complexité de mise en œuvre élevée et nécessite l’utilisation d’un additionneur pour chaque antenne. En effet, avec un tel système, le signal traversera un nombre de voies égale à $N_{RF} \times M$. Le précodage hybride partiellement connecté, illustré à la figure 1.9, permet de réduire la complexité. En effet, l’ensemble du réseau d’antennes est divisé en $\frac{M}{N_{RF}}$ sous-réseaux. Ensuite, chaque chaîne RF est connectée à un certain sous-réseau. Cela réduit la complexité globale du système de M voies RF, mais au prix d’un gain de beamforming égale à $\frac{1}{N_{RF}}$ par rapport à l’architecture hybride entièrement connectée. La combinaison de la technologie MIMO massif et de précodage hybride partiellement connectée permet de réduire considérablement le nombre d’émetteurs-récepteurs et la consommation d’énergie des systèmes 5G.

Les études antérieures sur les systèmes MIMO massifs à précodage hybride étaient principalement axées sur les systèmes à un seul utilisateur [39, 40, 41]. D’autre part, des études sur les systèmes MIMO multi utilisateurs ont été faites dans [42, 43, 44]. Les auteurs dans

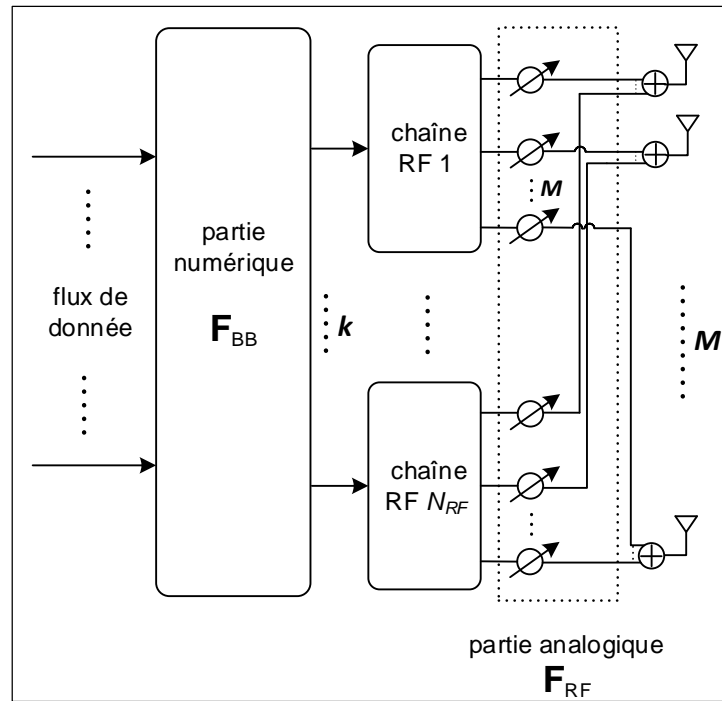


FIGURE 1.8 – Architecture hybride entièrement connectée.

[42], proposent un schéma de multiplexage par division spatiale commune (JSDM) pour créer plusieurs secteurs virtuels, ce qui réduit les coûts et la complexité de calcul de l'apprentissage de la liaison descendante et de la rétroaction de la liaison montante. Dans [43, 44], il a été démontré que le nombre requis de chaînes RF ne devait être que le double du nombre de flux de données pour obtenir les mêmes performances qu'un système de précodage purement numérique. Cependant, ces études ne considèrent pas le précodage hybride dans le contexte des réseaux hétérogènes et se concentrent principalement sur les systèmes macro cellulaires.

1.5 Gestion des interférences dans les HetNets

Deux types d'interférences se produisent dans un réseau hétérogène :

- **Interférence intracellulaire** : ce type d'interférence se produit entre les éléments du réseau qui appartiennent au même niveau. Dans le cas d'un HetNet, ce type d'interférence se situe entre les petites cellules voisines. Par exemple, un SUE (un utilisateur d'une petite cellule) provoque des interférences intracellulaires dans le sens montant aux SBS (une station de base d'une petite cellule) voisines. D'autre part, une SBS agit comme une source d'interférence intracellulaire dans le sens descendant aux autres SUE des cellules voisines.

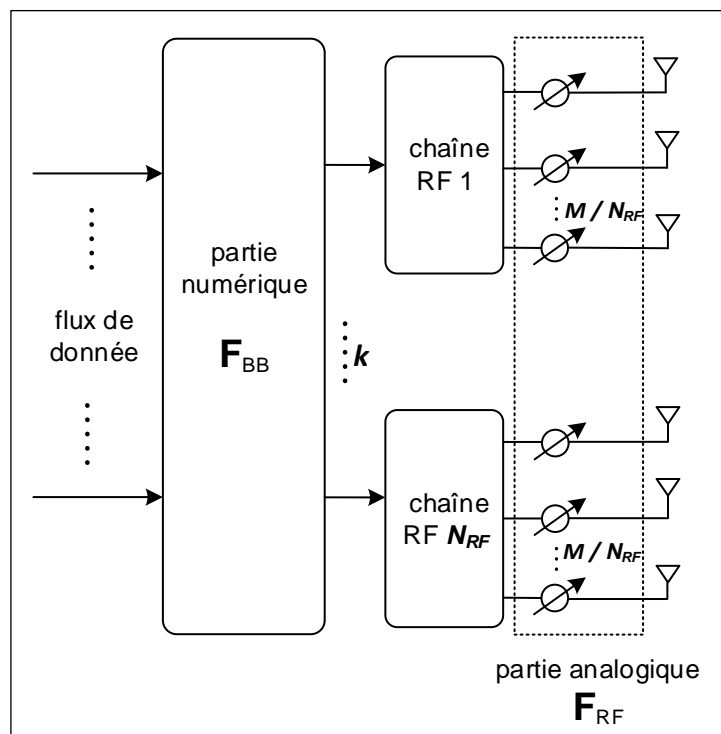


FIGURE 1.9 – Architecture hybride partiellement connectée.

- **Interférence intercellulaire** : ce type d'interférence se produit entre les éléments de réseau qui appartiennent à des niveaux différents, c.-à-d. l'interférence entre le système « petit » et le système macro. Par exemple, les SUE agissent comme une source d'interférence intercellulaire dans le sens montant à la MBS. D'autre part, la MBS et les SBS provoquent des interférences intercellulaires dans le sens descendant aux SUE et aux MUE à proximité, respectivement. Dans les réseaux HetNets, les petites cellules sont déployées dans le réseau macro existant et partagent le même spectre de fréquence avec la macrocellule. En raison de l'insuffisance du spectre, les petites cellules et la macrocellule doivent réutiliser et/ou partager la bande de fréquences attribuée partiellement ou totalement, ce qui conduit à des interférences intercellulaires ou intracellulaires. En même temps, afin d'assurer une meilleure qualité de service aux MUE, les petites cellules peuvent avoir besoin d'occuper une petite partie de la bande passante disponible ce qui conduit à des interférences intracellulaires. Par conséquent, le débit du réseau peut diminuer en raison de ces interférences.

Des interférences surviennent chaque fois que la même ressource radio est utilisée simultanément par différentes cellules. Par conséquent, la performance du système est déterminée par

la probabilité de collision et la façon dont une telle collision affectera le SINR. Les techniques générales de gestion des interférences visent à réduire la probabilité de collision et à atténuer la dégradation du SINR en utilisant des stratégies appropriées d'allocation des ressources [45].

1.5.1 Association de cellules

La stratégie classique d'association de cellules est basée sur les valeurs de SINR de cellules. L'utilisateur choisit la cellule de service ayant la valeur la plus élevée de SINR en s'appuyant sur des signaux descendants de référence spécifiques. Ce critère maximise le débit cellulaire dans un réseau à une seule couche, mais entraîne également un énorme déséquilibre de trafic dans les HetNets. En effet, les petites cellules sont caractérisées par une faible puissance d'émission et ainsi par une couverture réduite qui est également limitée par les interférences de la MBS, qui a une puissance d'émission plus élevée. Par conséquent, en appliquant l'approche traditionnelle, un utilisateur qui se trouve à proximité d'une petite cellule va choisir la macrocellule comme une cellule de service, ce qui rend cette approche inadaptée pour les HetNets. Comme conséquence de cette approche, les SUE peuvent se connecter à des macrocellules éloignées de hautes puissances plutôt qu'à une petite cellule proche, ce qui entraîne une répartition inefficace de charge. Une solution pour remédier à ce problème est d'étendre la zone de couverture des petites cellules par l'application de la technique d'extension de rayon de cellule (ERC) détaillée dans la section suivante.

1.5.2 Coordination d'interférences intercellulaires (ICIC)

Les techniques ICIC, définies dans les "releases" 8 et 9 de la norme LTE, visent à réduire les interférences intercellulaires afin de faciliter le "handover". On parle de coordination, car un échange d'informations est effectué entre l'utilisateur et les deux BS concernées [22]. Ainsi lors de la gestion du handover, la station de base adapte sa puissance d'émission en fonction des indicateurs reçus pour interférer le moins possible avec l'autre BS et ainsi faciliter la commutation d'une cellule à l'autre pour l'utilisateur concerné. Soulignons cependant que ces techniques ne couvrent pas les scénarios de réseaux hétérogènes vers lesquels nous nous orientons. De nouvelles méthodes, appelées eICIC pour « enhanced ICIC », ont été définies dans les releases 10 et 11 de la norme LTE Advanced pour y remédier. Elles sont classées en 3 catégories : celles liées au domaine temporel, au domaine fréquentiel et au contrôle de puissance [46].

Dans le domaine fréquentiel, une façon de réduire l'interférence est d'allouer à des cellules voisines des blocs de ressources qui ne se chevauchent pas.

Dans le domaine temporel, une façon de réduire l'interférence est qu'une cellule arrête de transmettre à une certaine sous-trame afin qu'une autre cellule (p. ex. une petite cellule) puisse transmettre le signal pendant cette période. Mais parfois, l'arrêt complet de la transmission du signal entraînerait des problèmes. Il serait donc recommandé de transmettre le signal à

très faible puissance au lieu d'arrêter complètement la transmission. Ces sous-trames avec une puissance de signal très faible sont appelées ABS (Almost Blank Subframe). Les ABS ont été proposés par les membres 3GPP pour combattre les interférences intercellulaires dans les réseaux hétérogènes. Dans [47], les auteurs proposent une méthode de programmation dynamique qui détermine les utilisateurs victimes d'interférence et trouve l'ABS optimal en évaluant les performances globales du système. Une autre technique fondamentale de l'eICIC est l'expansion de rayon de cellule (ERC). En effet, la couverture des SBS est assez limitée par leur puissance d'émission et par une forte interférence des macrocellules, ce qui signifie que seulement un faible nombre d'utilisateurs peut bénéficier du déploiement de petites cellules, en particulier dans les bords cellulaires où le nombre d'utilisateurs est faible. Cela conduit à un déséquilibre du niveau de couverture nécessitant une nouvelle technique pour augmenter l'efficacité du réseau hétérogène. Cela permet de diminuer le trafic de la macrocellule, d'attirer plus d'utilisateurs sur les SBS et de résoudre le problème de déséquilibre de la couverture en liaison montante et descendante. En outre, les performances des SBS seront considérablement améliorées si les utilisateurs sont autorisés à se connecter à des SBS ayant un SINR plus faible. Cela améliore les performances de réseau, puisque plus d'utilisateurs peuvent s'y connecter et profiter du spectre offert par celles-ci. À ces fins, l'ERC décrit dans [48] est introduite pour les SBS. Ce mécanisme favorise l'association d'un mobile avec des petites cellules et donc la décharge du réseau macro. Cette technique est considérée comme une caractéristique de conception clé permettant d'améliorer l'efficacité de HetNets. Le principe de l'ERC est illustré à la figure 1.10. Ces dernières sont efficaces mais ne permettent pas de supprimer complètement

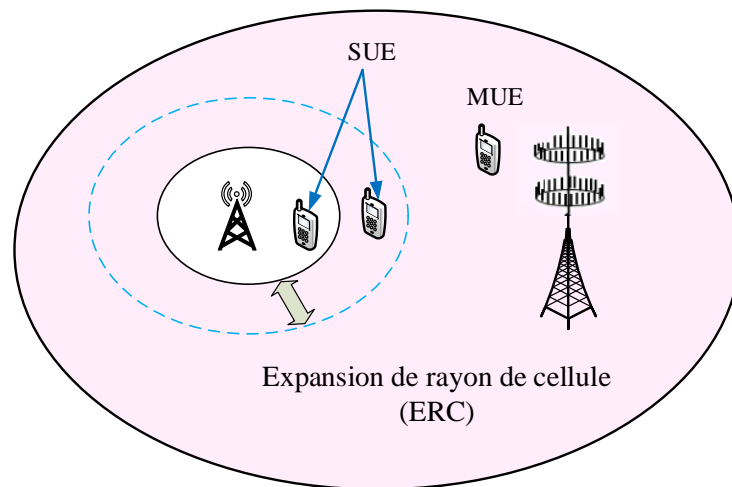


FIGURE 1.10 – Principe de l'expansion de rayon de cellule (ERC).

les interférences ou de profiter de la multiplicité des cellules pour accroître la capacité globale d'une zone. C'est en cela qu'interviennent les techniques CoMP.

1.5.3 CoMP (Coordinated Multi-Point)

Il s'agit d'un ensemble de techniques visant à tirer parti d'une communication entre plusieurs stations de base afin de réduire ou de s'affranchir des interférences intercellulaires tout en augmentant considérablement la capacité et l'efficacité énergétique du système [49, 50, 51, 52, 53]. CoMP est essentiellement une gamme de différentes techniques qui permettent la coordination dynamique de transmission et de réception sur différentes stations de base. L'objectif est d'améliorer la qualité globale du service offert à l'utilisateur ainsi que l'amélioration de l'utilisation du réseau. CoMP transforme l'interférence intercellulaire, ICI, en signal utile, en particulier aux frontières de la cellule où les performances peuvent être dégradées. CoMP est un ensemble complexe de techniques qui apporte de nombreux avantages à l'utilisateur ainsi que l'opérateur de réseau.

- Permet une meilleure utilisation du réseau : en offrant des connexions vers plusieurs stations de base à la fois et en permettant une transmission des données par les stations de base moins chargées pour une meilleure utilisation des ressources.
- Offre des performances de réception améliorées : l'utilisation de plusieurs sites cellulaires pour chaque connexion signifie que la réception globale sera améliorée et le nombre d'appels interrompus devrait être réduit.
- La réception conjointe de plusieurs stations de base en utilisant des techniques de coordination LTE permet d'augmenter la puissance totale reçue.
- La réduction des interférences : en utilisant des techniques combinées spécialisées, il est possible d'utiliser l'interférence constructive plutôt que destructrice, réduisant ainsi les niveaux d'interférence.

Deux catégories de CoMP sont identifiées :

Joint Processing (JT)

Cette technique, illustrée à la figure 1.11, vise à faire coopérer les stations de base pour :

- Exploiter des cellules adjacentes afin de transmettre conjointement les informations à un même utilisateur.
- Sélectionner dynamiquement la station de base la plus apte à transmettre les données à un utilisateur en fonction de sa position.

Coordinated Beamforming / Coordinated Scheduling (CB / CS)

Cette technique, illustrée à la figure 1.12, permet à travers cette communication intercellulaire, la modification du diagramme de rayonnement de chaque station de base pour créer un nul de rayonnement vers l'utilisateur profitant des mêmes ressources (temporelles/fréquentielles) dans la/les cellule(s) adjacente(s), tout en offrant un maximum de rayonnement vers l'utilisateur cible. Une technique CoMP nécessite donc de pouvoir centraliser tous les calculs, ce qui

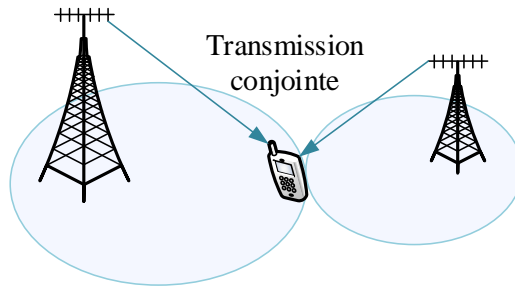


FIGURE 1.11 – La transmission conjointe.

soulève plusieurs problèmes. Par exemple, une transmission conjointe va avoir besoin d'une synchronisation fine et donc les *backhauled* reliant chaque petite cellule ne doivent générer que très peu de latence. De plus, le coût d'un tel déploiement ne sera pas négligeable si l'on considère l'ensemble des liens en fibre à mettre en place. Sur ce point, l'utilisation d'un système MIMO massif en tant que *backhaul* sans fil est digne d'intérêt. Les systèmes MIMO massifs bénéficient beaucoup des techniques CoMP en raison de leur forte vulnérabilité aux interférences intercellulaires. Une implémentation réaliste vise à considérer des groupes de cellules formés autour d'unités de calculs centralisées [54, 55, 56]. Les interférences entre ces groupes de cellules peuvent être en revanche très problématiques pour des utilisateurs aux bords de la cellule. Les auteurs dans [57] proposent un nouveau concept de CoMP optimisé entre la macrocellule et la petite cellule incluant le MIMO massif dans la MBS. Il a été démontré que le schéma proposé est extrêmement bénéfique pour les utilisateurs à la frontière de la cellule.

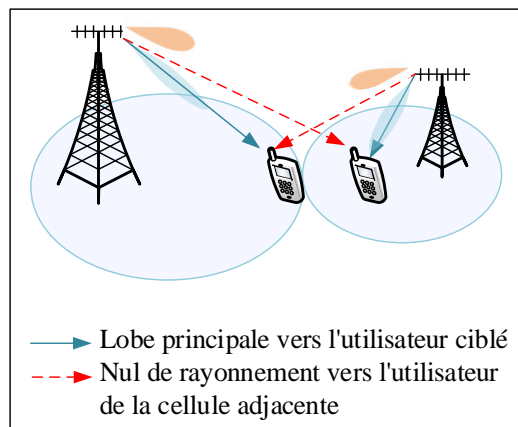


FIGURE 1.12 – Coordinated Beamforming / Coordinated Scheduling.

1.5.4 Approche de contrôle de puissance

Les méthodes de contrôle de puissance pour réduire les interférences intercellulaires se concentrent généralement sur la réduction de la puissance de transmission de SBS. Ces techniques sont avantageuses en ce que les MBS et les SBS peuvent utiliser toute la bande passante avec la coordination d'interférence. Une puissance dynamique ou réglage de puissance adaptative, qui est préférable à un réglage de puissance fixe, peut être effectuée soit dans une boucle de réglage de puissance ouverte (open loop power setting, OLPS) ou un réglage de puissance en boucle fermée (closed-loop power setting, CLPS). Dans le mode OLPS, la SBS ajuste sa puissance de transmission sur la base de ses résultats de mesure ou des paramètres prédéterminés du système (par exemple, dans une approche proactive). Dans le mode CLPS, la SBS ajuste sa puissance d'émission sur la base de la coordination avec la MBS (de façon réactive) [58]. En outre, un mode hybride peut être utilisé lorsque la SBS commute entre les deux modes en fonction des scénarios de l'opération [59]. Un autre concept est le contrôle de puissance pour SBS à base de groupe dans lequel le réglage de puissance initial pour les BS se fait de façon opportuniste sur la base du nombre de BS actifs dans un groupe. Pour cela, la détection centralisée peut être utilisée par laquelle une MBS peut estimer le nombre de SBS actives par groupe et diffuser des informations de quotas d'interférences aux SBS pour leur réglage de la puissance initiale. Sinon, la détection distribuée peut être utilisée où chaque cellule détecte si les autres sont actives dans le même groupe et ajuste son réglage de la puissance initiale en conséquence.

L'approche de contrôle de puissance dans les réseaux sans fil a été largement discutée dans la littérature. Ainsi, différents modèles mathématiques basés sur l'optimisation convexe, l'apprentissage, la géométrie stochastique et la théorie des jeux ont été développés. Les auteurs dans [60] proposent un algorithme d'apprentissage distribué pour l'allocation de la puissance dans le réseau de petites cellules, où les SBS s'organisent et atténuent l'interférence en s'appuyant respectivement sur ses informations locales et sur l'apprentissage d'informations au voisinage. L'inconvénient de cet algorithme d'apprentissage est sa lente convergence. Le problème de contrôle de puissance dans les réseaux cellulaires peut être résolu par l'application de la théorie des jeux. La théorie des jeux est une famille d'outils d'optimisation largement étudiée depuis plusieurs années pour tenter de résoudre le problème d'allocation de ressources. La théorie des jeux est considérée ces dernières années comme un outil efficace pour concevoir les réseaux sans fil du futur. Cela permettra de combiner des règles décisionnelles avec les différentes techniques et formalisations de la théorie des jeux dans la nouvelle génération des réseaux sans fil. L'utilisation de la théorie des jeux permet un fonctionnement plus efficace des nœuds du réseau sans fil et permet à chaque utilisateur de répondre à ses besoins [61, 62, 63, 64].

1.5.5 Récepteur avancé

Dans les systèmes cellulaires classiques, l'interférence a été traitée comme du bruit. Malgré cela, il y a une différence entre le bruit et le signal d'interférence. Le signal d'interférence a une structure similaire au signal désiré et affecte les performances du système. Un récepteur avancé est la technique qui aide à atténuer les interférences. Le récepteur exploite la structure des signaux d'interférence dans la détection et le décodage des symboles de signal d'interférence dans la constellation de modulation, le schéma de codage et l'allocation de ressources. Ensuite, en fonction de la sortie du détecteur/décodeur, le signal d'interférence peut être reconstruit et retiré du signal désiré.

Les techniques de réception permettant d'annuler les interférences sont largement utilisées dans la littérature particulièrement dans les réseaux traditionnels unicellulaires, contrairement aux réseaux hétérogènes. En effet, les techniques de détection linéaire telles que MRC (maximum ratio combining) et ZF (zero forcing) sont les plus performantes en termes de complexité de calcul. Cependant, leurs performances ne satisfont pas la demande croissante de débits de données. Les performances des détecteurs linéaires peuvent être améliorées en utilisant un détecteur sous-optimal non linéaire basé sur l'annulation successive d'interférence (SIC) [65], par exemple SIC multibranches (MB-SIC) [66] et SIC *multifeedback* (MF-SIC) [67]. Cependant, les détecteurs basés sur la SIC souffrent d'un coût de calcul élevé pour les systèmes de haute dimension.

Les techniques d'annulation des interférences dans les réseaux hétérogènes sont généralement considérées dans les liaisons descendantes et elles sont appliquées pour supprimer les interférences engendrées par les MBS limitant les performances des utilisateurs. Dans la liaison montante, la gestion d'interférence a été étudiée en s'appuyant sur les approches de contrôle de puissance et de l'élargissement de rayon de cellule (CRE) [68].

Les récepteurs avancés aident non seulement à atténuer les interférences intercellulaires et sur les bords des cellules, mais incluent également la gestion des interférences intracellulaires particulièrement dans le cas du MIMO massif. Dans les réseaux 5G, une intégration des technologies de réception avancées serait requise dans la spécification de la prochaine génération.

1.5.6 Approche cognitive

L'approche de radio cognitive basée sur la détection du spectre distribué peut être utilisée pour l'atténuation des interférences dans les réseaux hétérogènes. Dans [69], une technique efficace d'atténuation d'interférence intracellulaire en transmission descendante pour le système à base de OFDM est proposée où l'information de l'atténuation du parcours est partagée entre les SBS voisines. En outre, ces derniers partagent les informations relatives à l'utilisation des porteuses composantes (CC : Component Carriers), obtenues sur la base de la technique d'agrégation, dans une manière distribuée [58]. L'idée de cette technique est que, chaque SBS

estime l'interférence intracellulaire basée sur l'information de perte de trajet, capitalise la connaissance de l'utilisation des CC par les voisines, et accède au spectre intelligemment pour minimiser les interférences. La sélection de CC se fait de manière telle que chaque SBS sélectionne le CC qui n'est pas utilisé par la voisine ou le CC qui est occupé par la voisine la plus loin ou le CC qui est occupé par le plus petit nombre de voisines. Les résultats de simulation montrent une réduction significative des interférences intracellulaires, mais un surplus de signalisation dans le réseau par rapport à une autre approche cognitive basée sur la gestion des interférences intracellulaires dans la SBS.

1.6 Gestion d'interférence pour les HetNets MIMO massif

Le MIMO massif et les petites cellules sont deux technologies clés pour les systèmes 5G en raison de leur grand potentiel à améliorer la capacité du réseau. En effet, le MIMO massif améliore considérablement l'efficacité énergétique et l'efficacité spectrale par rapport aux systèmes sans fil traditionnels. D'autre part, le déploiement de petites cellules permet d'obtenir un rapport signal/bruit (SNR) élevé grâce à la courte distance de transmission et leurs faibles zones de couverture. Par conséquent, un réseau hétérogène avec de petites cellules augmente considérablement la capacité du réseau par rapport au réseau traditionnel. Cependant, les petites cellules partagent la même bande de spectre avec la macrocellule, ce qui provoque des interférences entre les niveaux. Alors que la gestion des interférences dans un réseau HetNet classique se concentre principalement sur l'allocation des ressources dans le domaine temps-fréquence, les caractéristiques spatiales du MIMO massif peuvent être exploitées pour atténuer les interférences dans les HetNets MIMO massifs.

Une étude de combinaisons appropriées de MIMO massif et la transmission conjointe des cellules multi-antenne coordonnées dans un réseau dense de petites cellules pour les futurs systèmes 5G est présentée dans [70]. Le défi est d'assurer une orthogonalité entre la macrocellule et la petite cellule par l'allocation à deux différentes bandes de fréquences (p. ex. 2,6 et 3,5 GHz). En outre, une coopération opportuniste entre les MBS et les SBS est proposée dans la bande de fréquence allouée à la macrocellule. Les résultats indiquent une efficacité spectrale significative et un gain de capacité pour les utilisateurs de la macrocellule et qui bénéficient d'une puissance de transmission plus élevée.

L'idée principale de l'utilisation de MIMO massif est d'exploiter les résultats de la théorie de matrices aléatoires pour réduire les gains des canaux à des constantes déterministes [71], ce qui simplifie considérablement l'analyse [3], [72]. Dans [73], les auteurs démontrent que l'augmentation de nombre d'antennes à la macrocellule est une alternative intéressante pour la coordination des interférences sans avoir besoin d'orthogonaliser les ressources temporelles ou fréquentielles. Puisque la macrocellule est typiquement située à une position élevée (par exemple montée sur une tour ou déployée sur le toit d'un bâtiment), elle « voit » ses propres

utilisateurs ainsi que les petites cellules sous un écartement angulaire relativement étroit. Ceci donne lieu à des vecteurs de canaux hautement directionnels, qui peuvent être modélisés comme des vecteurs aléatoires gaussiens avec un nombre faible de modes propres dominants (vecteurs propres de leur matrice de covariance). La macrocellule peut exploiter cette directionnalité en appliquant la technique JSMD (Joint Spatial Division and Multiplexing), proposée dans [74], afin de fournir simultanément un multiplexage spatial à ses propres utilisateurs et d'atténuer les interférences des petites cellules. Cela peut être réalisé explicitement en annulant certaines directions spatiales, c.-à-d. en transmettant dans le complément orthogonal des modes propres dominants des vecteurs de canaux de la macrocellule à un sous-ensemble de petites cellules sélectionnées. Cette approche est appelée « spatial blanking 1 », par analogie avec l'approche d'ABS d'eICIC. La technique JSMD a été considérée pour la coordination intercellulaire dans le contexte de petites cellules cognitives et de l'architecture (TDD) dans [75].

Une autre approche qui permet d'annuler les interférences dans un réseau hétérogène en utilisant le MIMO massif est présentée dans [17]. L'idée est d'identifier les directions de sources d'interférence, puis annuler les interférences provenant d'autres directions en utilisant une technique de traitement de second ordre appelée « nested array » [76]. Cette technique est implémentée par un placement non uniforme d'antennes et se caractérise par un nombre élevé de degrés de liberté (DoF) (de $O(N^2)$ avec N antennes).

Le problème de conception de précodeur pour l'annulation des interférences est largement étudié dans la littérature [77, 78]. Un schéma de précodage présenté dans [79] permet de maximiser le débit réalisable de la cellule considérée. Cependant, cette approche ne considère pas les interférences créées par les stations de base et subies par les autres cellules. Les techniques de précodage linéaire peuvent être utilisées pour éliminer les interférences inter-antennes et multi-utilisateurs et pour fournir un gain de diversité lorsque la CSI est disponible à l'émetteur. La technique de précodage linéaire ZF permet d'obtenir le même gain de multiplexage que le codage par filigrane "dirty paper" (DPC), tout en étant beaucoup plus facile à mettre en œuvre dans la pratique [80]. Un schéma de précodage MRT (maximum ratio transmission) a été proposé dans [81] pour un système MIMO multi-utilisateurs de voie descendante. Les auteurs ont constaté que cette technique est plus performante en termes de gain de diversité spatiale que le précodage BD (Block Diagonalization). Cependant, les interférences intercellulaires sont négligées ce qui limite significativement les performances de système, particulièrement pour les utilisateurs localisés aux bords des cellules [82].

Les auteurs dans [83] introduisent le déploiement de MIMO massif dans un réseau hétérogène et étudient l'efficacité énergétique de système. L'étude menée leur a permis de conclure que les précodeurs ZF et MRT sont performants pour l'élimination d'interférences sous certaines conditions. Dans le même axe de recherche, des limites inférieures de débits de transmission ergodiques pour les MUE et SUE sont dérivées dans [84] lorsque les MBS et les SBS utilisent

respectivement les précodeurs ZF et MRT. Un algorithme basé sur des informations statistiques sur l'état de canal est développé pour maximiser le débit de transmission globale de réseau en sélectionnant les SUE sans interférences.

Le problème de conception de précodeur en utilisant la connaissance de la matrice de covariance d'interférences a été étudié dans les réseaux cognitifs. Dans ce contexte, un transmetteur secondaire acquiert des informations utiles sur les liaisons interférentes afin de minimiser les interférences imposées à un émetteur-récepteur primaire [85]. Une approche similaire est proposée dans [86] afin de maximiser le débit dans un système TDD à deux cellules. Le protocole R-TDD a été aussi proposé pour réduire les effets négatifs de la contamination de pilote dans les systèmes cellulaires [87]. Le protocole R-TDD est également considéré dans [88], où, les auteurs proposent un algorithme d'allocation de puissance en s'appuyant sur la dualité UL-DL établie dans [89], afin d'assurer des débits UL-DL symétriques dans les deux niveaux. Cependant, ce schéma est basé sur un algorithme d'allocation de puissance itératif et distribué qui doit fonctionner sur plusieurs blocs de cohérence pour converger. Dans [90], un protocole R-TDD (Reverse Time Division Duplexing) est utilisé par la macrocellule et les petites cellules. En effet, les utilisateurs statiques et de faibles mobilités sont associés aux SBS, tandis que ceux de mobilités moyennes à hautes sont desservis par la MBS. Ce protocole permet à la MBS d'estimer localement à la fois les canaux intracellulaires et intercellulaires. Cette connaissance est ensuite utilisée à la MBS, soit dans la liaison montante, soit dans la liaison descendante pour servir simultanément les MUE et fournir le *backhauled* sans fil aux SBS.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques fondamentales des systèmes MIMO massifs afin de permettre aux différents précodeurs d'être introduits, de façon à mettre en avant leur effet sur l'efficacité spectrale globale du réseau. En outre, une revue de la littérature sur l'état de l'art des différentes approches de gestion d'interférences dans un réseau hétérogène MIMO massif a été présentée, notamment les techniques d'association de cellules, de coordination d'interférences intercellulaires et de contrôle de puissance. Dans le chapitre suivant, nous présentons notre approche de précodage hybride adoptée pour annuler les interférences intercellulaires.

Chapitre 2

Approche proposée d'annulation d'interférences dans un réseau hétérogène MIMO massif

2.1 Introduction

Le déploiement des petites cellules de faible couverture dans les réseaux traditionnels permet d'augmenter considérablement la capacité de réseau grâce à la réutilisation du spectre ainsi que de garantir une meilleure qualité de service grâce à la proximité des utilisateurs de leurs points d'accès. Cependant, le déploiement de ces cellules dans la couverture de la macrocellule dans un réseau hétérogène peut être la source de fortes interférences entre les cellules. En effet, la macro-station de base (MBS) peut engendrer des interférences qui affectent les utilisateurs des petites cellules (SUE) pendant les transmissions descendantes. De même, les utilisateurs de la macro-cellules (MUE) peuvent recevoir des interférences provoquées par les stations de base des petites cellules (SBS). Ces interférences causent néanmoins une forte dégradation de la performance globale du système. Ainsi, avoir une technique efficace de suppression d'interférences intercellulaires dans un tel type de réseau est un enjeu important. Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons à concevoir une nouvelle technique d'annulation d'interférences sur le lien descendant (DL), plus particulièrement quand un utilisateur apparaît dans la zone de couverture d'une autre cellule. Dans ce cadre, nous proposons une nouvelle approche de précodage hybride pour supprimer les interférences dans un réseau hétérogène à spectre partagé. Dans ce chapitre, nous présentons une étude détaillée de l'approche proposée.

2.2 Modèle du système

Nous considérons un réseau hétérogène, illustré à la figure 2.1, contenant une macrocellule et S petites cellules de faible couverture. La MBS est équipée de N_t antennes et N_{RF} chaînes radio-

fréquence (RF) pour servir K_M MUE, avec $N_t \gg N_{RF} \geq K_M$. Chacune des S SBS est équipée de N_c antennes et sert K_s SUE. Le réseau contient M utilisateurs actifs. Les MUE et les SUE sont équipés chacun d'une seule antenne de réception. Soient $\mathcal{K}_M = \{1, \dots, K_M\}$ l'ensemble des MUE et $\{(s, l) | l \in \mathcal{K}_s = \{1, \dots, K_s\}\}$ l'ensemble des SUE qui sont servis par la SBS s . La macrocellule et les petites cellules partagent les mêmes ressources fréquentielles. Comme le montre la figure 2.1, sous ses conditions, la MBS génère des interférences qui affectent tous les SUE (s, l) durant la liaison descendante. D'autre part, une SBS agit comme une source d'interférences intercellulaires dans le sens descendant aux MUE. Nous supposons que les petites cellules sont suffisamment éloignées les unes des autres pour que les interférences entre les petites cellules voisines puissent être ignorées. Soient \mathcal{I}_s de cardinalité égale à I_s , l'ensemble des MUE qui reçoivent des interférences provenant d'une SBS s et \mathcal{N}_k , de cardinalité égale à N_k , l'ensemble des SBS qui provoquent des interférences au MUE k .

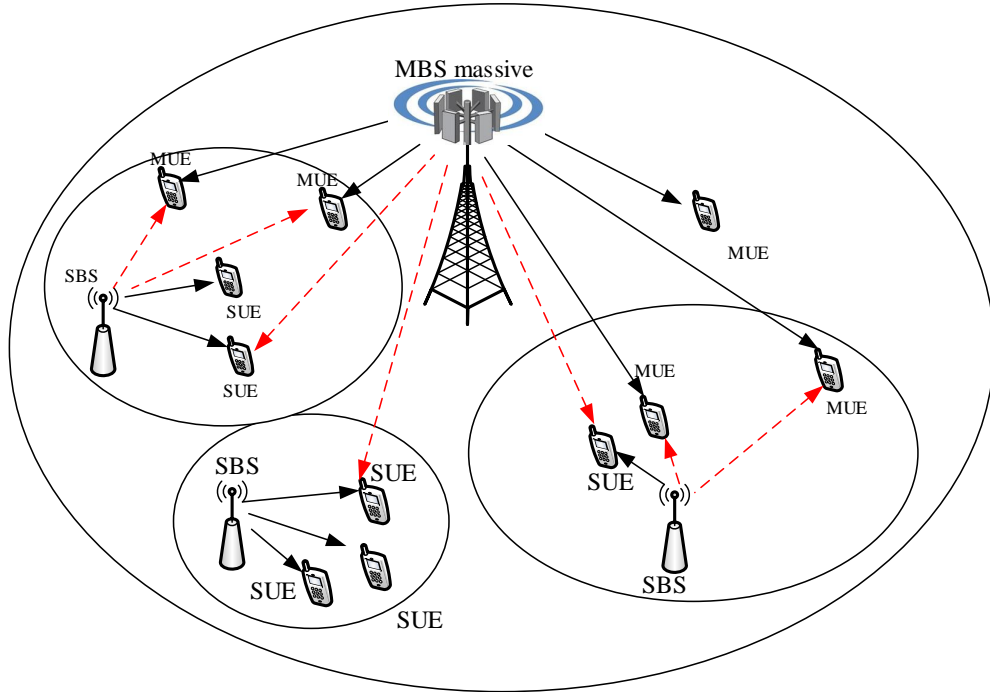


FIGURE 2.1 – Réseau hétérogène MIMO massif. Les lignes rouges interrompues désignent les interférences intercellulaires.

Nous considérons un précodage hybride à la MBS (figure 2.2). En effet, la matrice de précodage hybride combine un traitement de signal numérique et analogique représentés par $\mathbf{F}_{BB} \in \mathbb{C}^{K_M \times K_M}$ et $\mathbf{F}_{RF} \in \mathbb{C}^{N_t \times K_M}$ respectivement. Notamment, des modifications d'amplitude et de phase sont possibles pour le précodeur numérique \mathbf{F}_{BB} , mais seuls des changements de phase peuvent être apportés au précodeur RF \mathbf{F}_{RF} comme il est mis en oeuvre en utilisant des déphaseurs analogiques.

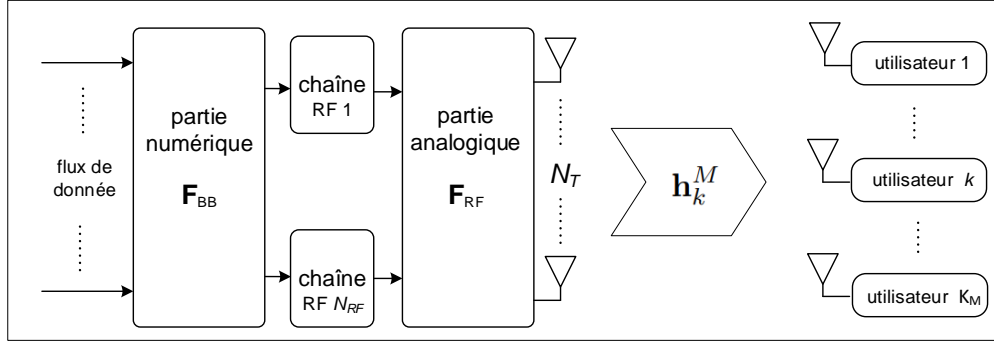


FIGURE 2.2 – Architecture de précodage hybride pour la transmission MBS-MUE.

Ainsi, chaque élément de \mathbf{F}_{RF} est normalisé pour satisfaire :

$$|\mathbf{F}_{RF}^{i,j}| = \frac{1}{\sqrt{N_t}} \quad (2.1)$$

où $|\mathbf{F}_{RF}^{i,j}|$ désigne l'amplitude de l'élément (i, j) de la matrice \mathbf{F}_{RF} . Afin d'exploiter les avantages des antennes MIMO massives, nous supposons que le protocole de duplexage par répartition dans le temps (TDD) est appliqué avec une connaissance parfaite de l'état de canal. Ainsi le signal reçu par le MUE k est exprimé par :

$$y_k = \mathbf{h}_k^M \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_{BB,k} x_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_M} \mathbf{h}_k^M \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_{BB,i} x_i + \sum_{s=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{K_s} \mathbf{g}_{s,k} \mathbf{w}_{s,j} x_{s,j} + n_k \quad (2.2)$$

où $\mathbf{h}_k^M \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ et x_k sont respectivement le vecteur du canal et l'information transmise par la MBS au MUE k . $\mathbf{g}_{s,k} \in \mathbb{C}^{1 \times N_c}$ et $x_{s,j}$ sont respectivement le vecteur du canal entre la SBS s et le MUE k et l'information envoyée par la SBS s . $\mathbf{w}_{s,j} \in \mathbb{C}^{N_c \times 1}$ est le vecteur de précodage à la SBS s et $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_k^2)$ représente le bruit blanc gaussien additif (AWGN) de variance σ_k^2 .

Dans ce type de réseau hétérogène, la MBS agit comme une source d'interférence intercellulaire dans le sens descendant aux SUE qui appartiennent à des petites cellules de faibles couvertures. D'autre part, des interférences entre les SUE de la même cellules peuvent se produire. Nous supposons que les petites cellules sont suffisamment éloignées les unes des autres pour que les interférences entre les petites cellules voisines puissent être ignorées. Cela est également applicable pour les petites cellules denses où le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est utilisé pour assurer une distance suffisante entre les cellules afin d'utiliser la même porteuse [91]. Par conséquent, le signal reçu par un SUE (s, l) est exprimé par :

$$y_{s,l} = \mathbf{h}_{s,l}^P \mathbf{w}_{s,l} s_{s,l} + \sum_{i=1}^{K_M} \mathbf{j}_{s,l} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_{BB,i} x_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^{K_s} \mathbf{h}_{s,l}^P \mathbf{w}_{s,j} x_{s,j} + n_{s,l} \quad (2.3)$$

où $\mathbf{h}_{s,l}^P \in \mathbb{C}^{1 \times N_c}$ et $\mathbf{j}_{s,l} \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ sont respectivement le vecteur du canal entre la SBS et le SUE (s, l) et le vecteur du canal entre la MBS et le SUE (s, l). $n_{s,l} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{s,l}^2)$ représente le bruit blanc gaussien additif (AWGN) de variance $\sigma_{s,l}^2$ au SUE (s, l).

Dans un système MIMO multi-utilisateurs, les interférences inter-utilisateurs sont un phénomène pénalisant et contribuent à la dégradation des performances globales du réseau cellulaire. Nous distinguons dans notre système les interférences entre les MUE et entre les SUE, définies respectivement par les équations du second terme de (2.2) et du troisième terme de (2.3) :

$$\chi_k^{MUE} \triangleq \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_M} |\mathbf{h}_k^M \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_{BB,i}|^2, \quad k = 1, \dots, K_M \quad (2.4)$$

$$\chi_{s,l}^{SUE} \triangleq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^{K_s} |\mathbf{h}_{s,l}^P \mathbf{w}_{s,j}|^2, \quad l = 1, \dots, K_s; s = 1, \dots, S \quad (2.5)$$

Dans le réseau hétérogène, les petites cellules sont déployées conjointement avec la cellule macro. Cette nouvelle couche de cellules peut générer une interférence au niveau du lien descendant qui peut affecter les MUE et les SUE. Les fonctions d'interférences provoquées par la MBS et la SBS sont données respectivement par les équations du second terme de (2.3) et du troisième terme de (2.2) :

$$\chi_{s,l}^{MBS} \triangleq \sum_{i=1}^{K_M} |\mathbf{j}_{s,l} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_{BB,i}|^2, \quad s = 1, \dots, S; l = 1, \dots, K_s \quad (2.6)$$

et

$$\chi_k^{SBS} \triangleq \sum_{s=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{K_s} |\mathbf{g}_{s,k} \mathbf{w}_{s,j}|^2, \quad k = 1, \dots, K_M \quad (2.7)$$

D'après les équations (2.2) et (2.3), les rapports signal sur interférences plus bruit du MUE k et du SUE (s, l) sont donnés respectivement par :

$$\text{SINR}_k = \frac{|\mathbf{h}_k^M \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_{BB,k}|^2}{\chi_k^{MUE} + \chi_k^{SBS} + \sigma_k^2} \quad (2.8)$$

et

$$\text{SINR}_{s,l} = \frac{|\mathbf{h}_{s,l}^P \mathbf{w}_{s,l}|^2}{\chi_{s,l}^{SUE} + \chi_{s,l}^{MBS} + \sigma_{s,l}^2} \quad (2.9)$$

Par conséquent, les débits d'informations du MUE k et du SUE (s, l) sont donnés respectivement par :

$$R_k = \log_2(1 + \text{SINR}_k) \quad (2.10)$$

et

$$R_{s,l} = \log_2(1 + \text{SINR}_{s,l}) \quad (2.11)$$

2.3 Modèle du canal

Les bandes de fréquences millimétriques ont des caractéristiques différentes de celles relativement basses (en LTE les fréquences exploitées sont 800 MHz, 1.8 GHz et 2.4 GHz). Le nouveau système exige donc des normes et des modèles différents. En effet, l'affaiblissement de propagation des ondes millimétriques est beaucoup plus élevé que celui des basses fréquences, en particulier pour les trajets hors ligne de vision (NLOS). De plus, le besoin de l'utilisation des antennes directives avec les systèmes millimétriques rend l'étalement du retard, qui est la différence entre le temps d'arrivée des premiers composants à trajets multiples significatifs et le temps d'arrivée des derniers, beaucoup plus faible par rapport aux bandes de fréquences basses. Les pertes de pénétration sont également beaucoup plus importantes dans les scénarios de l'intérieur à l'extérieur (indoor-to-outdoor). L'avantage de regrouper de nombreuses antennes dans de petites puces et d'utiliser des antennes directives différencie le modèle du canal millimétrique. Les canaux millimétriques sont souvent épars dans les domaines angulaire et temporel [92, 40, 93], avec quelques éléments de dispersion et chacun avec plusieurs rayons (il existe quelques chemins, y compris le chemin en visibilité directe (LOS)). Un signal à des fréquences millimétriques subit la réflexion et la diffusion dans les trajets hors ligne de vision (NLOS), mais la diffraction est beaucoup plus faible. Par conséquent, les signaux millimétriques sont atténués par des objets plus petits tels que le corps humain, les arbres, la pluie... La perte de pénétration provoquée par un corps humain est mesurée entre 20 et 30 dB [92]. La sélectivité spatiale limitée et les caractéristiques de diffusion dans les scénarios extérieurs du canal millimétrique MIMO massif causés par une forte perte de trajet [92] peuvent être modélisés par le modèle proposé par Saleh et Venzuela (SV) [40], où la matrice de canal \mathbf{H}_k entre un utilisateur k et la station de base est modélisée comme suit :

$$\mathbf{H}_k = \sqrt{\frac{N_t \times N_r}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_{k,l} \mathbf{a}_{UE}(\theta_{k,l}^{UE}, \phi_{k,l}^{UE}) \mathbf{a}_{BS}^H(\theta_{k,l}^{BS}, \phi_{k,l}^{BS}) \quad (2.12)$$

où L est le nombre de trajets observés par chaque utilisateur, $\alpha_{k,l}$ est une variable gaussienne de moyenne nulle et de variance unitaire qui représente le gain de trajet l observé par l'utilisateur k . $\mathbf{a}_{UE}(\theta_{k,l}^{UE}, \phi_{k,l}^{UE})$ et $\mathbf{a}_{BS}^H(\theta_{k,l}^{BS}, \phi_{k,l}^{BS})$ sont respectivement les ensembles de vecteurs de réponse à l'émission et à la réception avec $(\theta_{k,l}^{UE}, \phi_{k,l}^{UE})$ et $(\theta_{k,l}^{BS}, \phi_{k,l}^{BS})$ représentent les angles en azimut et en élévation d'arrivée et de départ (AoA/AoD) du trajet l . Pour le réseau linéaire uniforme (ULA), seulement les angles en azimut AoA et AoD sont considérés et le vecteur de réponse

est exprimé par :

$$\mathbf{a}_{ULA}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} [1, e^{jkd \sin(\theta)}, \dots, e^{j(N-1)kd \sin(\theta)}]^T \quad (2.13)$$

où $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ tel que λ est la longueur d'onde du signal, et d est l'espacement d'antennes. Si un réseau planaire uniforme (UPA) est considéré, le vecteur de réponse peut être exprimé par :

$$\mathbf{a}_{UPA}(\theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1, e^{jkd(m \sin(\phi) \sin(\theta) + n \cos(\theta))}, \dots, e^{jkd(W-1) \sin(\phi) \sin(\theta) + (H-1) \cos(\theta)} \right]^T \quad (2.14)$$

où $0 \leq m \leq W - 1$, $0 \leq n \leq H - 1$, et $N = WH$, avec $N = N_t$ pour \mathbf{a}_{BS} et $N = N_r$ pour \mathbf{a}_{UE} .

2.4 Technique de précodage hybride pour l'annulation des interférences à la MBS MIMO massive

Afin de simplifier l'implémentation des systèmes MIMO massifs dans les bandes millimétriques, il est primordial de réduire les coûts de mise en place de ces systèmes aussi complexes. Parmi les solutions les plus prometteuses, la structure hybride analogique et numérique a suscité une grande attention. En effet, cette technique permet d'introduire des déphaseurs et de réduire le nombre de composants coûteux sur les chaînes numériques et radio fréquence, tels que les DAC/ADC et les mélangeurs de signaux. Par conséquent, le précodage hybride offre la possibilité de construire des systèmes MIMO massifs à un coût relativement bas. *Nous proposons dans cette partie, d'appliquer uniquement un contrôle de phase pour coupler les sorties de la chaîne RF aux antennes d'émission, en utilisant des déphaseurs RF économiques. Ainsi, le contrôle de phase est appliqué au précodeur analogique et un précodage numérique est ensuite effectué à la macro station de base pour gérer les interférences intercellulaires et multiutilisateurs.*

Précodage analogique

Le contrôle de phase dans le domaine RF vise à extraire les phases de la transposée conjuguée de la matrice du canal de la liaison descendante de la MBS massive vers les utilisateurs associés. Ceci permet d'aligner les phases des éléments du canal et permet ainsi de profiter du gain important du réseau, fourni par les antennes excessives des systèmes MIMO massifs. Pour clarifier, nous notons $\mathbf{F}_{RF}(i, j)$, l'élément (i, j) de la matrice \mathbf{F}_{RF} et nous proposons d'appliquer le précodage RF selon :

$$\mathbf{F}_{RF}(i, j) = \frac{1}{\sqrt{N_t}} e^{j\Phi_{i,j}} \quad (2.15)$$

où $\Phi_{i,j}$ est la phase de l'élément (i,j) de la transposée conjuguée de la matrice du canal de la liaison descendante de la MBS massive vers ses utilisateurs, c.-à-d. $\mathbf{H}^M = [(\mathbf{h}_1^M)^T, \dots, (\mathbf{h}_{K_M}^M)^T]^T$. Nous supposons implicitement une connaissance parfaite du canal à la MBS et à la SBS qui peuvent obtenir l'information sur l'état de canal, par exemple, par une estimation de liaison montante et la réciprocité de canal qui s'appliquent particulièrement dans les réseaux hétérogènes duplex par répartition dans le temps (TDD) [94]. Il faut savoir que des techniques efficaces d'estimation de canal utilisant des structures hybrides et un traitement rigoureux de la sélectivité de fréquence, présentent un sujet de recherche pertinent ayant un grand intérêt pratique.

Une fois la matrice analogique \mathbf{F}_{RF} définie, nous observons, en bande de base, un canal équivalent, exprimé par :

$$\mathbf{H}_{eq} = \mathbf{H}^M \mathbf{F}_{RF} \quad (2.16)$$

Précodage numérique

Afin d'annuler les interférences intercellulaires de la MBS aux SUE et les interférences multi-utilisateurs (MUE), nous proposons un schéma de précodage pour la MBS en s'appuyant sur le canal analogique effectif. *D'abord, les interférences multi-utilisateurs sont éliminées en sélectionnant le vecteur de précodage de transmission pour un utilisateur spécifique dans l'espace nul engendré par les canaux des autres utilisateurs. Pour le scénario hétérogène MIMO massif, nous cherchons d'abord l'espace nul des canaux d'interférences entre la MBS à tous les SUE, puis la matrice de précodage de la liaison descendante pour les MUE est projetée sur cet espace nul afin d'annuler les interférences intercellulaires et multi-MUE simultanément.* Les canaux d'interférences intercellulaires de la MBS aux SUE sont définis par :

$$\mathbf{J}_{int} = [\mathbf{j}_{11}^T, \dots, \mathbf{j}_{1K_s}^T, \dots, \mathbf{j}_{S1}^T, \dots, \mathbf{j}_{SK_s}^T]^T \quad (2.17)$$

où $\mathbf{J}_{int} \in \mathbb{C}^{SK_s \times N_t}$. Afin d'obtenir l'espace nul du canal d'interférences, nous appliquons la décomposition en valeurs singulières (SVD) à la matrice équivalente \mathbf{J}_{eq} définie par :

$$\mathbf{J}_{eq} = \mathbf{J}_{int} \mathbf{F}_{RF} \quad (2.18)$$

Alors,

$$\mathbf{J}_{eq} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \quad (2.19)$$

où $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{SK_s \times SK_s}$ est la matrice des vecteurs singuliers gauche, $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{K_M \times K_M}$ est la matrice des vecteurs singuliers droite et $\mathbf{\Sigma} \in \mathbb{C}^{SK_s \times K_M}$ est la matrice des valeurs singulières donnée

par :

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \hat{\Sigma}_r & 0_{r \times (K_M - r)} \\ 0_{(SK_s - r) \times r} & 0_{(SK_s - r) \times (K_M - r)} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

où r est le rang de la matrice \mathbf{J}_{eq} et $\hat{\Sigma}_r = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$ tel que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$. Selon la propriété de la décomposition en valeurs singulières, l'espace nul de la matrice d'interférence, $\text{Null}(\mathbf{J}_{eq})$ est formé par la répartition des colonnes de \mathbf{V} comme suit :

$$\hat{\mathbf{V}} = [\mathbf{v}_{r+1}, \mathbf{v}_{r+2}, \dots, \mathbf{v}_{K_M}] \quad (2.21)$$

Par conséquent, nous avons :

$$\mathbf{J}_{eq} \hat{\mathbf{V}} = 0 \quad (2.22)$$

Selon (2.22), les interférences intercellulaires peuvent être annulées complètement si le vecteur de précodage d'un MUE est choisi arbitrairement de la matrice $\hat{\mathbf{V}}$. Toutefois, cela peut provoquer des interférences entre les MUE de la même cellule macro. Afin d'annuler simultanément les interférences intercellulaires et interutilisateurs, nous définissons la matrice de projection \mathbf{V}_{int} basée sur l'espace nul $\text{Null}(\mathbf{J}_{eq})$ du canal d'interférences :

$$\mathbf{V}_{int} = \hat{\mathbf{V}} \hat{\mathbf{V}}^H \quad (2.23)$$

Ensuite, nous proposons d'appliquer le précodage par forçage à zéro (ZF) afin de projeter la matrice du canal des MUE dans l'espace nul. Nous obtenons la matrice de précodage finale exprimée par :

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^M &= (\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int})^H \left(\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int} (\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int})^H \right)^{-1} \\ &= (\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int})^H \left(\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int} \mathbf{V}_{int}^H \mathbf{H}_{eq}^H \right)^{-1} \\ &= (\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int})^H \left(\mathbf{H}_{eq} \hat{\mathbf{V}} \hat{\mathbf{V}}^H \hat{\mathbf{V}} \hat{\mathbf{V}}^H \mathbf{H}_{eq}^H \right)^{-1} \\ &= (\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int})^H \left(\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int} (\mathbf{H}_{eq})^H \right)^{-1} \end{aligned} \quad (2.24)$$

En s'appuyant sur la matrice de précode \mathbf{T}^M , nous obtenons :

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{eq} \mathbf{T}^M &= \mathbf{H}_{eq} (\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int})^H \left(\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int} \mathbf{H}_{eq}^H \right)^{-1} \\ &= \mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int} \mathbf{H}_{eq}^H \left(\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int} \mathbf{H}_{eq}^H \right)^{-1} \\ &= \mathbf{I} \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}_{eq} \mathbf{T}^M &= \mathbf{J}_{eq} (\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int})^H (\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int} \mathbf{H}_{eq}^H)^{-1} \\
&= \mathbf{J}_{eq} \widehat{\mathbf{V}} \widehat{\mathbf{V}}^H \mathbf{H}_{eq}^H (\mathbf{H}_{eq} \mathbf{V}_{int} \mathbf{H}_{eq}^H)^{-1} \\
&= \mathbf{0}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Par conséquent, le vecteur de précodage pour le MUE i est exprimé par :

$$\mathbf{f}_{BB,i} = \frac{\mathbf{T}_i^M}{\|\mathbf{T}_i^M\|} \tag{2.27}$$

où \mathbf{T}_i^M est la i ème colonne de la matrice de précodage \mathbf{T}^M .

2.5 Technique de précodage pour l'annulation des interférences à la SBS

Dans un réseau hétérogène, les utilisateurs des petites cellules reçoivent des interférences intercellulaires provoquées par la MBS pendant la transmission descendante. De plus, des interférences entre les utilisateurs de la même cellule auront lieu. *Dans cette section, nous proposons d'appliquer une technique de précodage à chaque SBS, similaire à celle à la MBS, pour annuler simultanément les interférences intercellulaires et inter-SUE. Nous commençons par trouver l'espace nul des canaux d'interférences intercellulaires de la SBS aux MUE. Ensuite, la matrice de précodage pour les SUE est projetée dans l'espace nul pour annuler à la fois les deux types d'interférence.*

Les canaux d'interférences entre la SBS s et les MUE sont donnés par :

$$\mathbf{G}_{int,s} = [(\mathbf{g}_{s1})^T, \dots, (\mathbf{g}_{sK_M})^T]^T, \quad s \in \{1, \dots, S\} \tag{2.28}$$

Nous appliquons la décomposition en valeurs singulière (SVD) afin de trouver l'espace nul de la matrice d'interférences $\widehat{\mathbf{V}}_s = \text{Null}(\mathbf{G}_{int,s})$:

$$\mathbf{G}_{int,s} = \mathbf{U}_s \Sigma_s \mathbf{V}_s^H \tag{2.29}$$

Les canaux entre la SBS s et les SUE sont représentés par :

$$\mathbf{H}_s^P = [(\mathbf{h}_{s1}^P)^T, \dots, (\mathbf{h}_{sK_s}^P)^T]^T \tag{2.30}$$

Nous projetons maintenant la matrice de précodage pour les SUE dans cet espace nul en appliquant la technique de précodage par forçage à zéro (ZF) :

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}_s^P &= (\mathbf{H}_s^P \mathbf{V}_{int,s})^H \left(\mathbf{H}_s^P \mathbf{V}_{int,s} (\mathbf{H}_s^P \mathbf{V}_{int,s})^H \right)^{-1} \\
&= (\mathbf{H}_s^P \mathbf{V}_{int,s})^H \left(\mathbf{H}_s^P \mathbf{V}_{int,s} \mathbf{V}_{int,s}^H (\mathbf{H}_s^P)^H \right)^{-1} \\
&= (\mathbf{H}_s^P \mathbf{V}_{int,s})^H \left(\mathbf{H}_s^P \hat{\mathbf{V}}_s \hat{\mathbf{V}}_s^H \hat{\mathbf{V}}_s \hat{\mathbf{V}}_s^H (\mathbf{H}_s^P)^H \right)^{-1} \\
&= (\mathbf{H}_s^P \mathbf{V}_{int,s})^H \left(\mathbf{H}_s^P \mathbf{V}_{int,s} (\mathbf{H}_s^P)^H \right)^{-1}
\end{aligned} \tag{2.31}$$

où $\mathbf{V}_{int,s} = \hat{\mathbf{V}}_s \hat{\mathbf{V}}_s^H$. Par conséquent, le vecteur de précodage pour le SUE l associé la SBS s est exprimé par :

$$\mathbf{w}_{s,l} = \frac{\mathbf{T}_{s,l}^P}{\|\mathbf{T}_{s,l}^P\|} \tag{2.32}$$

avec $\mathbf{T}_{s,l}^P$ est le vecteur colonne l de la matrice \mathbf{T}_s^P .

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'architecture du réseau hétérogène adoptée et la modélisation du canal. Dans un second temps, nous avons détaillé notre nouvelle technique de précodage hybride à la station de base massive sur le lien descendant (DL) permettant d'annuler les interférences intercellulaires et multi-utilisateurs en s'appuyant sur l'espace nul des canaux d'interférences. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter l'environnement de simulation et les résultats obtenus.

Chapitre 3

Résultats et discussions

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l’environnement de simulation, l’architecture du réseau adoptée, les principaux résultats obtenus lors de nos simulations d’un réseau hétérogène MIMO massif, ainsi qu’une discussion des différents résultats. Nous étudions les performances de l’approche de précodage proposée en variant le SNR, le nombre d’antennes à la station de base et le nombre d’utilisateurs actifs dans le réseau.

3.2 Environnement de simulation

Nous considérons le réseau hétérogène illustré à la figure 3.1. Le réseau est composé d’une macro cellule circulaire et 4 petites cellules de faible couverture. Il y a $M = 25$ utilisateurs actifs dans la macro-cellule, dont 2 utilisateurs sont associés à chaque petite cellule. Tous les utilisateurs sont équipés chacun d’une seule antenne de réception. La MBS est équipée d’un nombre élevé d’antennes d’émission contrairement aux petites cellules. Le modèle du canal utilisé dans nos simulations est le modèle géométrique d’un canal millimétrique décrit dans le chapitre précédent. Nous évaluons les performances du réseau cellulaire selon 1000 réalisations du canal. Les simulations sont faites sur Matlab en supposant à la fois un canal à trajet unique ($L = 1$) et multi-trajets ($L = 10$). Les angles en azimut et en élévation d’arrivée et de départ (AoAs/AoDs) d’un trajet l sont uniformément distribués dans l’intervalle $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$. Nous supposons une connaissance parfaite de l’état de canal.

Nous évaluons les performances de notre approche de précodage hybride en étudiant l’efficacité spectrale du réseau pour différents scénarios de simulation. Nous adoptons une architecture de réseau qui combine le modèle géométrique du canal et les petites cellules. Nous implémentons l’approche proposée afin d’atteindre la qualité de service désirée avec une faible complexité pour les systèmes millimétriques. De plus, nous exploitons la propriété de l’espace nul pour annuler les interférences entre les cellules. Nous proposons de comparer, sous différentes condi-

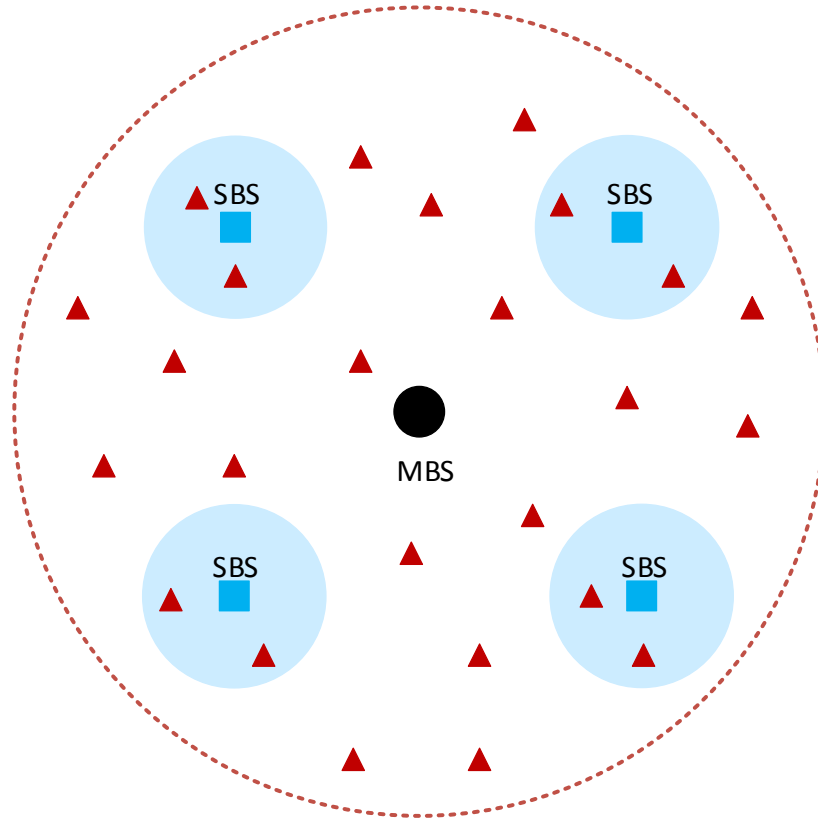


FIGURE 3.1 – Architecture du réseau hétérogène MIMO massif avec 4 petites cellules dans la couverture de la macrocellule.

tions, les performances de la technique proposée par différentes techniques de précodage MIMO massif. Nous distinguons deux techniques de précodage linéaire conventionnelles, le forçage à zéro (ZF) et le rapport de transmission maximum (MRT) qui, de même, se basent sur l'espace nul.

3.3 Discussion des résultats de simulation

3.3.1 Impact de la variation du SNR

Dans cette section, nous évaluons la variation de l'efficacité spectrale en fonction du rapport signal à bruit (SNR) dans un scénario multi chemins ($L = 10$). Nous considérons une macro station de base MIMO massive avec $N_t = 100$ antennes. Nous supposons que le nombre de chaînes radios implémentées à la MBS est égal au nombre d'utilisateurs actifs dans le réseaux

c.-à-d. $N_{RF} = M$. Nous considérons que tous les utilisateurs ont une seule antenne de réception et que le nombre d'antennes d'émission de chaque SBS est $N_c = 4$. Les résultats sont évalués dans la plage de SNR $[-20, 20]$.

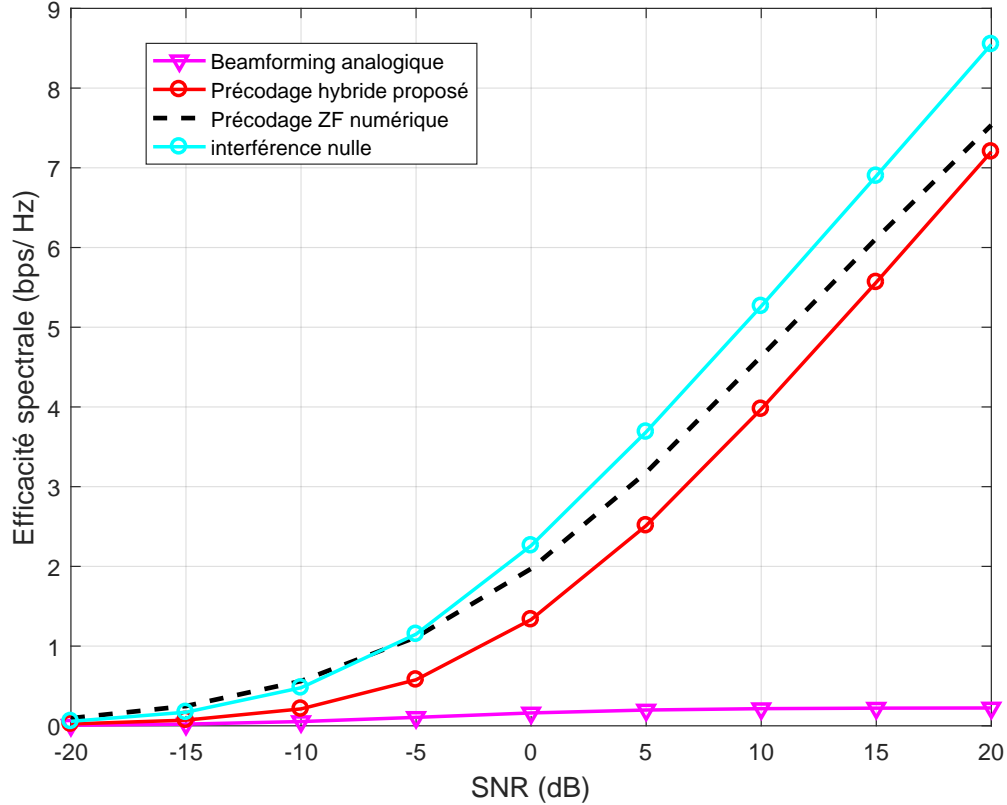


FIGURE 3.2 – Efficacité spectrale vs SNR lorsque $N_t = 100$, $M = 25$ et $L = 10$.

Nous comparons dans la figure 3.2 les efficacités spectrales de la technique de précodage hybride proposée, du beamforming purement analogique et de la technique de précodage numérique (ZF). Nous examinons aussi le cas d'interférences nulles où nous négligeons l'effet des interférences intercellulaires. Les résultats illustrés dans cette figure montrent qu'une solution classique purement analogique n'est pas suffisante. En effet, l'efficacité spectrale résultante est faible sur toute la plage du SNR. D'un autre côté, la courbe d'efficacité spectrale de la technique de précodage hybride proposée se rapproche de plus en plus de celle du ZF numérique. En outre, l'algorithme hybride proposé permet d'obtenir des performances proches du scénario à interférences nulles, ce qui signifie qu'il est en mesure de réduire les interférences causées par l'environnement multi-cellulaire.

Dans la figure 3.3, nous comparons l'efficacité spectrale de notre technique de précodage hybride proposée par rapport à différentes techniques de précodage existantes dans la plage de SNR $[-20, 20]$. Nous considérons $M = 25$ utilisateurs actifs dans le réseaux. Nous remarquons

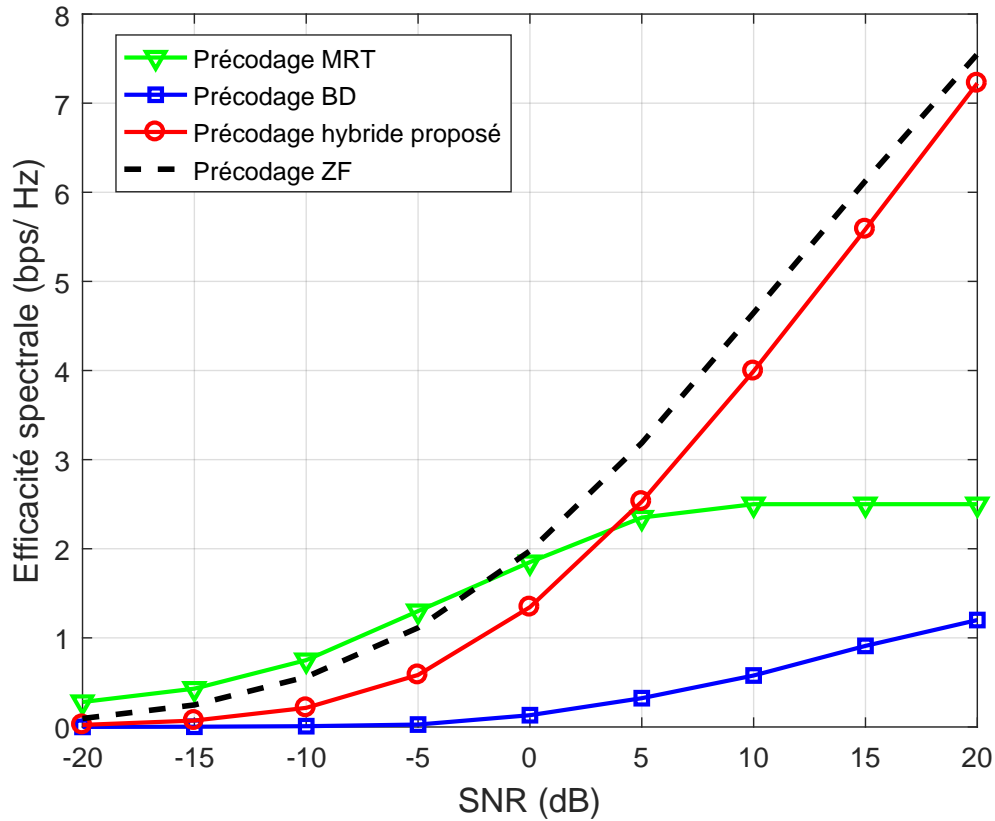


FIGURE 3.3 – Efficacité spectrale vs SNR lorsque $N_t = 100$, $M = 25$ et $L = 10$ pour les différents techniques de précodage.

que l'efficacité spectrale du précodage hybride est légèrement plus faible que l'efficacité spectrale de ZF et supérieure à celle de MRT à SNR élevé (à partir de 5 dB) et de BD sur toute la plage de SNR. De plus, l'avantage en efficacité spectrale par rapport à MRT et BD augmente avec l'augmentation du SNR. D'un autre côté, la figure montre que l'écart entre l'approche proposée et le ZF diminue pour un SNR élevé. En effet, la technique de précodage ZF est pratiquement irréalisable et complexe en raison du grand nombre de chaînes RF implémentées à la station de base massive. La perte de performances provoquée par les contraintes du module analogique du précodeur hybride est contrôlée dans une plage minimale. Cela signifie que ce schéma de précodage hybride est convenable pour un système à ondes millimétriques réel grâce à son aspect pratique et à son efficacité spectrale considérable.

La figure 3.4 montre la variation de l'efficacité spectrale en fonction du SNR de la technique de précodage hybride proposée et du précodage ZF pour $L = 10$ et $L = 20$. Nous constatons que les deux approches perdent en efficacité spectrale en augmentant le nombre de chemins dans un système à ondes millimétriques. En particulier, la diminution des performances est

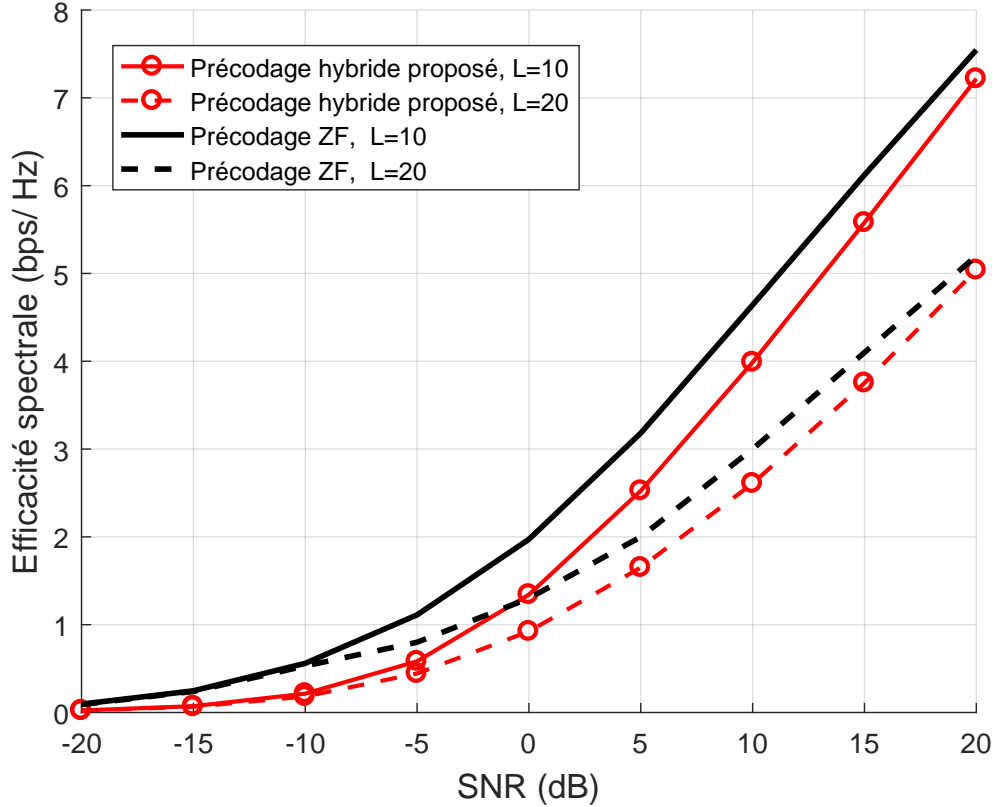


FIGURE 3.4 – Efficacité spectrale vs SNR lorsque $N_t = 100$ et $M = 25$.

plus remarquable pour le ZF. En effet, à $\text{SNR} = 5$ dB, l'efficacité spectrale de ZF a diminué de 1.2 bps/Hz alors que, à la même valeur de SNR, la diminution des performances en efficacité spectrale pour la technique proposée est égale à 0.8 bps/Hz. Par conséquent, le ZF est l'algorithme dont les performances deviennent plus mauvaises dans un environnement à trajets multiples, en raison de sa faiblesse à exploiter les gains de canaux multi trajets.

La figure 3.5 montre la variation de l'efficacité spectrale de la technique de précodage proposée et du précodage ZF en fonction du SNR pour différentes valeurs de nombre d'antennes à la MBS, soit $N_t = 100, 144$ et 196 . Les résultats montrent que les performances du précodage hybride s'améliorent avec l'augmentation du nombre d'antennes à SNR élevé. De plus, nous remarquons que le taux d'amélioration est plus considérable pour l'approche proposée que pour le ZF. En effet, pour un nombre élevé d'antennes à la MBS ($N_t = 196$), les performances du précodage hybride sont similaires au ZF et les courbes d'efficacité spectrale se rapprochent à $\text{SNR} = 20$ dB. Les résultats confirment l'efficacité de la technique proposée pour un système massif dans un réseau hétérogène.

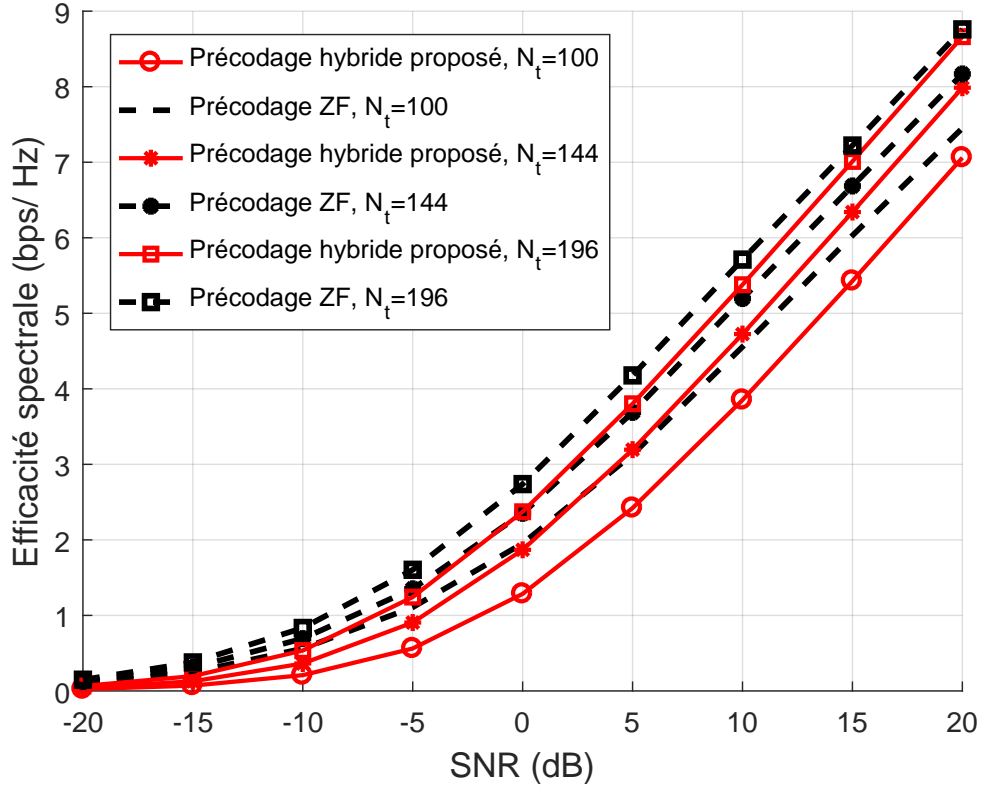


FIGURE 3.5 – Efficacité spectrale vs SNR lorsque $N_t = 100, 144$ et 196 , $M = 25$ et $L = 10$.

3.3.2 Impact de la variation du nombre d'antennes

Nous évaluons, dans cette partie, les performances en termes d'efficacité spectrale de l'approche de précodage proposée en fonction du nombre d'antennes à la MBS. Nous supposons que le nombre d'utilisateurs actifs dans le réseau est $M = 25$ et le $SNR = 10$ dB. Les résultats de simulation des précodages hybride, ZF, MRT et BD qui combinent tous la méthode à espace nul pour atténuer les interférences, sont illustrés à la figure 3.6.

D'après la figure 3.6, nous constatons que l'approche proposée dépasse les techniques de précodage MRT et BD sur toute la plage de nombre d'antennes. Le précodage ZF conventionnel est appliqué à la MBS pour éliminer les interférences multi-utilisateurs, tandis que le schéma de précodage proposé permet d'éliminer simultanément les interférences multi-utilisateurs et intercellulaires. Nous remarquons que l'efficacité spectrale du schéma de précodage hybride est faiblement inférieur à ZF, mais l'écart entre les deux courbes est de plus en plus faible lorsque le nombre d'antennes à la MBS augmente. La raison est que, lorsque la technique de précodage proposée est appliquée à la MBS massive, celle-ci doit sacrifier un certain nombre de degrés de liberté (DoF) pour éliminer les interférences des utilisateurs des petites cellules au voisinage, ce qui entraîne une diminution du débit total des MUE. Cependant, pour un

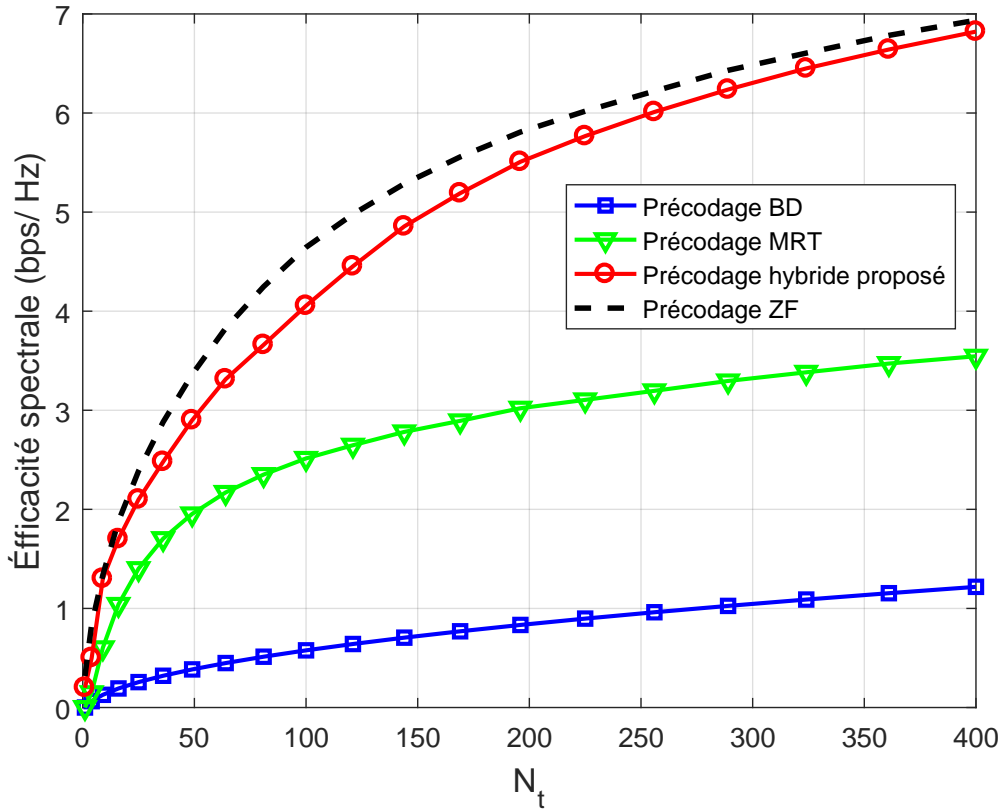


FIGURE 3.6 – Efficacité spectrale vs N_t lorsque $SNR = 10$ dB, $M = 25$ et $L = 10$.

nombre élevé d’antennes implémentées à la MBS, il convient d’appliquer le précodage hybride proposé pour éliminer les interférences intercellulaires, ce qui peut effectivement améliorer l’efficacité spectrale totale du système en liaison descendante tout en offrant une réduction de la complexité.

3.3.3 Impact de la variation du nombre d’utilisateurs

Nous étudions dans cette section la variation de l’efficacité spectrale en fonction du nombre d’utilisateurs actifs dans le réseau hétérogène dans un scénario multi chemins ($L = 10$) à $SNR = 10$ dB avec $N_t = 100$ antennes. Dans la figure 3.7, nous comparons l’efficacité spectrale de la technique de précodage hybride proposée avec celles de ZF, MRT et BD.

La figure 3.7 montre que l’efficacité spectrale de la technique de précodage proposée est inférieure à celle du ZF et dépasse largement la MRT et le BD. De plus, nous remarquons qu’en augmentant le nombre d’utilisateurs dans le réseau, la différence de performances entre l’approche hybride et le ZF est de plus en plus faible et les courbes d’efficacité spectrales correspondantes se rapprochent. De plus, l’avantage par rapport à la MRT et au BD est en-

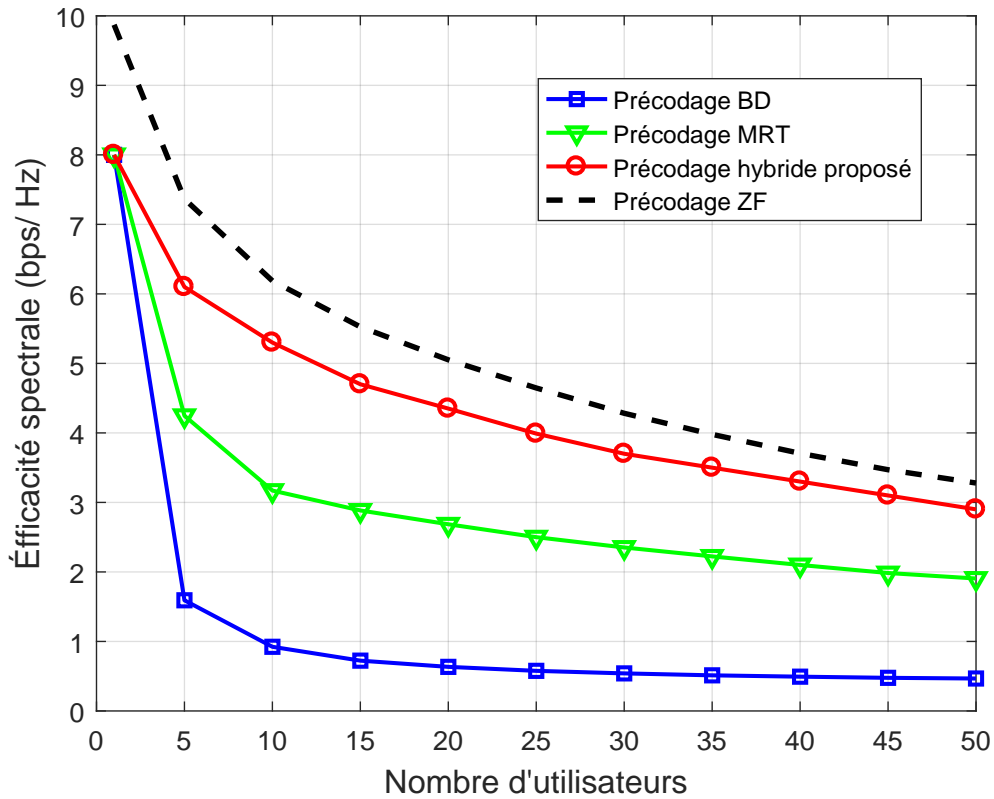


FIGURE 3.7 – Efficacité spectrale vs M lorsque $SNR = 10$ dB, $N_t = 25$ et $L = 10$.

core important. La figure 3.7 montre clairement que la pénalité de performances du précodage hybride à faible complexité (comparée au précodage ZF numérique) peut être réduite en augmentant significativement le nombre d'utilisateurs dans le réseau multicellulaire. Les résultats prouvent que le schéma de précodage proposé peut assurer les performances nécessaires d'un réseau hétérogène avec un nombre élevé d'utilisateurs et une macro station de base massive.

Conclusion générale

Avec la croissance exponentielle du volume de données mobiles au cours des dernières années suite à la diffusion massive des dispositifs connectés et la demande exhaustive des ressources radio, les réseaux hétérogènes ont suscité des intérêts considérables en raison de leur meilleure couverture dans des environnements denses. Le travail de ce mémoire se concentre sur la gestion des interférences intercellulaires dans un réseau hétérogène MIMO massif. Ces interférences sont dues à la réutilisation agressive du spectre et à l'emplacement aléatoire de petites stations de base (SBS) particulièrement en cas de déploiement à l'intérieur. Cela affecte la qualité de signal offerte aux usagers et résulte donc en une dégradation des performances du réseau hétérogène.

Dans un premier temps, ces travaux ont permis de décrire, dans l'introduction, l'évolution des réseaux d'accès mobile et l'amélioration considérable de la qualité de transmission. Nous mettons l'accent sur les performances qu'offrent les systèmes MIMO en général et les MIMO massifs en particulier en termes d'efficacité spectrale et énergétique dans le contexte 5G. De plus, nous décrivons la notion d'hétérogénéité pour les réseaux cellulaires en introduisant le concept de petite cellule (small cell) et les améliorations qu'elle offre en termes de couvertures radio et de capacité du système. Les caractéristiques fondamentales des systèmes MIMO massifs ont ensuite été étudiées dans le chapitre 1 pour permettre aux différents précodeurs d'être introduits, de façon à mettre en avant leur effet sur l'efficacité spectrale globale du réseau. De plus, dans ce chapitre, nous avons présenté une revue de la littérature sur l'état de l'art des différentes approches de gestion d'interférences dans un réseau hétérogène MIMO massif, notamment les techniques d'association de cellules, de coordination d'interférences intercellulaires et de contrôle de puissance.

Nous avons ensuite décrit, dans le chapitre 2, l'architecture du réseau hétérogène adoptée ayant mené aux résultats présentés dans ce mémoire, en modélisant le canal de manière géométrique. Dans un second temps, nous avons introduit une nouvelle technique de précodage hybride à la station de base massive sur le lien descendant (DL). Nous proposons d'appliquer uniquement un contrôle de phase pour coupler les sorties de la chaîne RF aux antennes d'émission, en utilisant des déphaseurs RF économiques. Un précodage numérique est ensuite effectué pour gérer les interférences intercellulaires et multi-utilisateurs en s'appuyant sur l'es-

pace nul des canaux d'interférences. Les résultats de simulations, présentés au chapitre 3, ont montré que la technique proposée permet d'obtenir des performances proches du scénario à interférences nulles, ce qui signifie qu'il est en mesure de réduire les interférences causées par l'environnement multicellulaire. De plus, pour un nombre élevé d'antennes implémentées à la MBS, il convient d'appliquer le précodage hybride proposé pour éliminer les interférences, ce qui peut effectivement améliorer l'efficacité spectrale totale du système MIMO massif tout en offrant une réduction de la complexité. Les résultats ont montré également l'efficacité de notre approche de précodage dans un scénario hétérogène avec un nombre élevé d'utilisateurs.

Dans le futur, il serait intéressant d'observer les performances de telles solutions dans le cas d'une implémentation de type *Wireless Backhaul*. De plus, une approche de coordination des interférences entre les petites cellules sera intéressante. En effet, les petites cellules peuvent être regroupées dans des groupes (clusters) tel que les utilisateurs des petites cellules seront servis simultanément par les petites stations de base d'un même groupe. Cette piste permettra d'augmenter la capacité du réseau et le débit des utilisateurs. D'un autre côté, l'étude faite dans ce mémoire pourrait éventuellement considérer des conditions réelles de l'état du canal. En effet, la question cruciale est l'acquisition de l'information sur l'état du canal (CSI). En dépit d'un nombre d'interfereurs limité, les différents Tx/Rx restent couplés et l'organisation de l'acquisition de la CSI n'est pas évidente. En effet les techniques comme l'alignement d'interférences nécessitent qu'on connaisse parfaitement les informations CSI de toutes les cellules interférées. Or, dans la réalité, il est impossible d'obtenir ces informations sans erreur et sans délai. Donc, nous pouvons tenter, dans le futur, d'apporter des solutions optimales et concrètes pour la réduction d'interférence avec des conditions réalistes de CSI (un délai et une connaissance imparfaite du CSI), tout en garantissant un débit global du réseau 5 G très important.

L'implémentation des algorithmes proposées dans ce mémoire sur une plate-forme MIMO massive réelle permettra de mieux concrétiser les résultats obtenus. Cette piste permettra de mettre l'accent sur les problèmes analogiques que nous pouvons rencontrer et solutions possibles pour les résoudre.

Bibliographie

- [1] J. G. Andrews, H. Claussen, M. Dohler, S. Rangan, et M. C. Reed, “Femtocells : Past, present, and future,” *IEEE Journal on Sel. Areas in Comm.*, vol. 30, no. 3, pp. 497–508, avril 2012.
- [2] Hoydis, M. Kobayashi et M. Debbah, “Green Small-Cell Networks, ” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 37-43, 2011.
- [3] T. Marzetta, “Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, 2010.
- [4] K. Hosseini, J. Hoydis, S. Brink, et M. Debbah, “Massive MIMO and small cells : How to densify heterogeneous networks,” *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Budapest, Hungary, juin 2013, pp. 5442–5447
- [5] M. Feng, S. Mao, et T. Jiang, “BOOST : Base station on-off switching strategy for energy efficient massive MIMO HetNets,” *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, avril 2016, pp. 1–9.
- [6] M. Feng, T. Jiang, D. Chen, et S. Mao, “Cooperative small cell networks : High capacity for hotspots with interference mitigation,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 21, no. 6, pp. 108–116, décembre 2014.
- [7] M. Hajir, “Resource management and interference mitigation for dense heterogeneous small-cell networks”, Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, 2017.
- [8] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson et T. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, 2014.
- [9] White Paper, 5G Americas and Rysavy Research, LTE to 5G : The Global Impact of Wireless Innovation at 4 (Aug. 2018), http://www.5gamericas.org/files/4915/3479/4684/2018_5G_Americas_Rysavy_LTE_to_5G_The_Global_Impact_of_Wireless_Innovation_final.pdf.
- [10] E. Bjornson, L. Sanguinetti, J. Hoydis et M. Debbah, “Optimal Design of Energy-Efficient Multi-User MIMO Systems : Is Massive MIMO the Answer?”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 6, pp. 3059-3075, 2015.

- [11] F. Boccardi, R. Heath, A. Lozano, T. Marzetta et P. Popovski, “Five disruptive technology directions for 5G”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, 2014.
- [12] P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu, C. Xiong et J. Yao, “5G on the Horizon : Key Challenges for the Radio-Access Network”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 47-53, 2013.
- [13] T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Hai, S. Xiaodong, Y. Ning et L. Nan, “Trends in small cell enhancements in LTE advanced”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 2, pp. 98-105, 2013.
- [14] H. Leem, S. Y. Baek, et D. K. Sung, “The Effects of Cell Size on Energy Saving, System Capacity, and Per-Energy Capacity,” *Proc. IEEE WCNC 2010*.
- [15] N. Bhushan, Junyi Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. Sukhavasi, C. Patel et S. Geirhofer, “Network densification : the dominant theme for wireless evolution into 5G”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 82-89, 2014.
- [16] B. Li, D. Zhu et P. Liang, “Small Cell In-Band Wireless Backhaul in Massive MIMO Systems : A Cooperation of Next-Generation Techniques”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 12, pp. 7057-7069, 2015.
- [17] M. Feng, S. Mao, “Interference management in massive MIMO HetNets : a nested array approach,” *Proceedings of IEEE GLOBECOM 2016, Washington DC, 2016*.
- [18] L. Gille, J.-F. Marchandise, “La dynamique d’internet. Prospective 2030”, (Etude réalisée pour le Commissariat général à la stratégie et à la prospective), *Télécom ParisTech, Fondation Internet Nouvelle Génération, 2013*.
- [19] F. Rusek, D. Persson, Buon Kiong Lau, E. Larsson, T. Marzetta et F. Tufvesson, “Scaling Up MIMO : Opportunities and Challenges with Very Large Arrays”, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, 2013.
- [20] E. Björnson, L. Sanguinetti, J. Hoydis, et M. Debbah, “Designing multiuser MIMO for energy efficiency : When is massive MIMO the answer?”, *Proc. IEEE WCNC, avril 2014*, pp. 1–6.
- [21] J. Hoydis, S. ten Brink et M. Debbah, “Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks : How Many Antennas Do We Need?”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 160-171, 2013.
- [22] A. Hakkarainen, J. Werner, K. Dandekar et M. Valkama, “Widely-linear beamforming and RF impairment suppression in massive antenna arrays”, *Journal of Communications and Networks*, vol. 15, no. 4, pp. 383-397, 2013.
- [23] [15]W. Roh, J. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, J. Cho, K. Cheun et F. Aryanfar, “Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications :

- theoretical feasibility and prototype results”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106-113, 2014.
- [24] Hien Quoc Ngo, E. Larsson et T. Marzetta, “Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449, 2013.
- [25] K. Truong et R. Heath, “Effects of channel aging in massive MIMO systems”, *Journal of Communications and Networks*, vol. 15, no. 4, pp. 338-351, 2013.
- [26] J. Jose, A. Ashikhmin, T. Marzetta et S. Vishwanath, “Pilot Contamination and Precoding in Multi-Cell TDD Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 8, pp. 2640-2651, 2011.
- [27] N. Krishnan, R. D. Yates, et N. B. Mandayam, “Cellular systems with many antennas : Large system analysis under pilot contamination,” *Proc. 50th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, Comput.*, juin 2012, pp. 1220–1224.
- [28] Wang. Z, “Performance of Uplink Multiuser Massive MIMO Systems,” *arXiv preprint arXiv :1311.1288* (2013).
- [29] E. Kurniawan et A. Goldsmith, “Optimizing cellular network architectures to minimize energy consumption,” *Proc. IEEE ICC*, juin. 2012, pp. 4771–4775.
- [30] 5G New Radio : Introduction à la couche physique. National instrument. ni.com/5g/nr
- [31] J. Jose, A. Ashikhmin, T. Marzetta et S. Vishwanath, “Pilot Contamination and Precoding in Multi-Cell TDD Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 8, pp. 2640-2651, 2011.
- [32] J. Hoydis, S. ten Brink, et M. Debbah, “Comparison of Linear Precoding Schemes for Downlink Massive MIMO,” *Proc. of the 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC 2012)*, Ottawa, Canada, juin 2012.
- [33] S. Wagner, R. Couillet, M. Debbah, et D. T. M. Slock, “Large system analysis of linear precoding in MISO broadcast channels with limited feedback,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 7, pp. 4506–4537, juillet 2012.
- [34] T. Dubois, M. Helard, M. Crussiere, et C. Germond, “Performance of time reversal precoding technique for MISO OFDM systems,” *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013.
- [35] C. Shepard, N. Anand, et L. Zhong, “Practical performance of MU-MIMO precoding in many-antenna base stations,” *Proc. Workshop Cellular Netw., Oper., Challenges, Future Design (CellNet)*, Taipei, Taiwan, juin 2013, pp. 13–18.
- [36] T. Dubois, M. Hélar, M. Crussière et C. Germond, “Performance of time reversal precoding technique for MISO-OFDM systems”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2013, no. 1, 2013.

- [37] O. El Ayach, R. W. Heath, Jr., S. Abu-Surra, S. Rajagopal, et Z. Pi, "The capacity optimality of beam steering in large millimeter wave MIMO systems," Proc. 2012 IEEE International Workshop Signal Process. Advances Wireless Commun., pp. 100–104.
- [38] S. Han, C.-L. I, Z. Xu, et C. Rowell, "Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 1, pp. 186–194, jan. 2015.
- [39] F. Sofrabi et W. Yu, "Hybrid beamforming with finite-resolution phase shifters for large-scale MIMO systems," Proc. IEEE 16th Int. Workshop Signal Process. Adv. Wireless Commun., Stockholm, Sweden, juillet 2015, pp. 136–140.
- [40] O. El Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, et R. W. Heath, Jr., "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, mars 2014.
- [41] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, et R. W. Heath, Jr., "Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems," IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol. 8, no. 5, pp. 831–846, oct. 2014.
- [42] F. Sofrabi et W. Yu, "Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale MIMO systems," Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP), avril 2015, pp. 2929–2933.
- [43] L. Liang, Y. Dai, W. Xu, et X. Dong, "How to approach zero-forcing under RF chain limitations in large mmwave multiuser systems?" Proc. IEEE/CIC Int. Conf. Commun., China, Oct. 2014, pp. 518–522.
- [44] L. Liang, W. Xu, X. Dong, S. Member, et W. Xu, "Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 3, no. 6, pp. 1–5, décembre 2014.
- [45] J. Nam, A. Adhikary, J. Ahn et G. Caire, "Joint Spatial Division and Multiplexing : Opportunistic Beamforming, User Grouping and Simplified Downlink Scheduling", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 8, no. 5, pp. 876-890, 2014.
- [46] 3GPP Mobile Competence Centre, "Summary of the description of candidate eICIC solutions," Engineers Without Borders, 2010. [Online]. Available : <http://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg-R1-62-28032.htm>
- [47] S. N. S. Kshatriya, S. Kaimalettu, S. R. Yerrapareddy, K. Milleth, et N. Akhtar, "On interference management based on subframe blanking in heterogeneous LTE networks," Fifth International Conf. on Comm. Systems and Networks (COMSNETS), pp. 1–7, janvier 2013.

- [48] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, M. Al-Shalash, C. Caramanis et J. Andrews, "User Association for Load Balancing in Heterogeneous Cellular Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 2706-2716, 2013.
- [49] H. Huang et M. Trivellato, "Performance of multiuser MIMO et network coordination in downlink cellular networks," in *Int. Symp. on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT)*, Berlin, avril 2008, pp. 85–90.
- [50] H. Huh, G. Caire, H. Papadopoulos et S. Ramprasad, "Achieving "Massive MIMO" Spectral Efficiency with a Not-so-Large Number of Antennas", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 9, pp. 3226-3239, 2012.
- [51] R. Zhang et L. Hanzo, "Cooperative Downlink Multicell Preprocessing Relying on Reduced-Rate Back-Haul Data Exchange", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 539-545, 2011.
- [52] M. Bouzigues, I. Siaud, M. Helard et A. Ulmer-Moll, "Turn Back the Clock : Time Reversal for Green Radio Communications", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 49-56, 2013.
- [53] J. Hoydis, A. M uller, R. Couillet et M. Debbah, "Analysis of multicell cooperation with random user locations via deterministic equivalents," in *Eighth Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks*, Paderborn, Germany, 2012.
- [54] A. Papadogiannis, D. Gesbert, et E. Hardouin, "A dynamic clustering approach in wireless networks with multi-cell cooperative processing," *Proc. IEEE Intern. Conf. on Comm. (ICC)*, pp. 4033-4037, mai 2008.
- [55] J. Gong, S. Zhou, Z. Niu, L. Geng, et M. Zheng, "Joint scheduling and dynamic clustering in downlink cellular networks", *Proc. IEEE Global Telecom. Conf.*, 2011, pp. 1-5.
- [56] S. Ramprasad, G. Caire, et H. Papadopoulos, "A joint scheduling and cell clustering scheme for MU-MIMO downlink with limited coordination," presented at *ICC*, (Cape Town, South Africa), juin 2010.
- [57] L. Liu, J. Zhang, Y. Yi, et H. Li, "Combating Interference : MU-MIMO, CoMP, and HetNet (Invited Paper)," *Journal of Communications*, vol. 7, no. 9, 2012.
- [58] O. Rhouma, "Gestion d'interférence dans un réseau LTE hétérogène par contrôle d'admission cognitif," Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 2014.
- [59] MediaTek Inc, "Further Discussion on HeNB Downlink Power Setting in HetNet," *Jacksonville, USA*, 2010.
- [60] D. N. Mehdi Bennis, "A Q-learning Based Approach to Interference Avoidance in Self-Organized Femtocell Networks," *2010 IEEE Globecom 2010 Workshop on Femtocell Networks*, pp. 706-710, 2010.

- [61] F. Meshkati, H. V. Poor, S. C. Schwartz, et N. B. Mandayam, "An energy-efficient approach to power control and receiver design in wireless data networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 11, pp. 1885–1894, 2005.
- [62] D. Niyato et E. Hossain, "A Game-Theoretic Approach to Competitive Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 16–20, mars 2007.
- [63] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Basar, et A. Hjørungnes, "Game Theory in Wireless and Communication Networks : Theory, Models and Applications," Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2011.
- [64] R. Etkin, A. Parekh et D. Tse, "Spectrum sharing for unlicensed bands," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 517-528, 2007.
- [65] G. D. Golden, G. J. Foschini, R. A. Valenzuela, et P. W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using the V-BLAST space-time communication architecture," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 1, pp. 14–15, 1999.
- [66] R. C. de Lamare, "Adaptive and Iterative Multi-Branch MMSE Decision Feedback Detection Algorithms for Multi-Antenna Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.12, no.10, pp.5294-5308, octobre 2013.
- [67] P. Li, R. C. de Lamare, et R. Fa, "Multiple feedback successive interference cancellation detection for multiuser MIMO systems," *IEEE Trans Wireless Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2434–2439, août 2011.
- [68] R. Madan, J. Borran, A. Sampath, N. Bhushan, A. Khandekar, et T. Ji, "Cell association and interference coordination in heterogeneous LTE-A cellular networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, no. 9, pp. 1479–1489, décembre 2010.
- [69] L. Zhang, L. Yang, et T. Yang, "Cognitive Interference Management for LTE-A Femtocells with Distributed Carrier Selection," *Proc. IEEE 72nd Vehic. Tech. Conf. Fall (VTC 2010-Fall)*, 6–9 septembre 2010, pp. 1–5.
- [70] W. Zirwas, "Opportunistic CoMP for 5G massive MIMO multilayer networks", *ITG WSA 2015*, mars 2015.
- [71] Najim, Jamal. "An introduction to large random matrix theory." *Traitement du signal* 33.2-3 2016.
- [72] S. Wagner, R. Couillet, M. Debbah et D. Slock, "Large System Analysis of Linear Precoding in Correlated MISO Broadcast Channels Under Limited Feedback", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 58, no. 7, pp. 4509-4537, 2012.
- [73] A. Adhikary, H. Dhillon et G. Caire, "Massive-MIMO Meets HetNet : Interference Coordination Through Spatial Blanking," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 6, pp. 1171-1186, 2015.

- [74] A. Adhikary, J. Nam, J.-Y. Ahn, et G. Caire, “Joint spatial division and multiplexing the large-scale array regime,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no. 10, pp. 6441–6463, 2013.
- [75] A. Adhikary, E. A. Safadi, et G. Caire, “Massive MIMO and intertier interference coordination,” *Proc., Information Theory and its Applications (ITA)*, février 2014.
- [76] P. Pal et P. Vaidyanathan, “Nested Arrays : A Novel Approach to Array Processing With Enhanced Degrees of Freedom”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 8, pp. 4167-4181, 2010.
- [77] J. G. Andrews, W. Choi, et R. W. Heath Jr., “Overcoming interference in spatial multiplexing MIMO cellular networks,” *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 14, no. 6, pp. 95–104, décembre 2007.
- [78] M. Yavuz, F. Meshkati, S. Nanda, A. Pokhariyal, N. Johnson, B. Raghoehtaman, et A. Richardson, “Interference management and performance analysis of UMTS/HSPA+ femtocells,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 9, pp. 102–109, septembre 2009.
- [79] F. R. Farrokhi, G. J. Foschini, A. Lozano, et R. A. Valenzuela, “Linkoptimal space-time processing with multiple transmit and receive antennas,” *IEEE Commun. Lett.*, mars 2001.
- [80] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. Shamai, O. Simeone, et W. Yu, “Multi-cell MIMO cooperative networks : A new look at interference,” *IEEE Journal on Sel. Areas in Communications*, vol. 28, no. 9, pp. 1380 –1408, décembre 2010.
- [81] Y. Zhang, J. Gao, et Y. Liu. “MRT precoding in downlink multi-user MIMO systems,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 1.2016 (2016) : 1-7.
- [82] J. Tang, D. K. C. So, E. Alsusa, K. Hamdi, et A. Shojaeifard, “Energy efficiency optimization with interference alignment in multicell MIMO interfering broadcast channels,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 7, pp. 2486–2499, juillet 2015
- [83] Z. Ren, “Application of Large Scale MIMO Technology in the Heterogeneous Networks”, *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol. 9, no. 6, pp. 179-190, 2016.
- [84] Y. Liu, L. Lu, G. Li, et Q. Cui, “Performance analysis and interference cancellation for heterogeneous network with massive MIMO”, In *Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, *IEEE Global Conference on* (pp. 888-892), 2015.
- [85] R. Zhang, F. Gao, et Y.-C. Liang, “Cognitive beamforming made practical : Effective interference channel and learning-throughput tradeoff,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 2, pp. 706–718, février 2010.
- [86] B. Lee, H. W. Je, I. Sohn, O. S. Shin, et K. B. Lee, “Interference aware decentralized precoding for multicell MIMO TDD systems,” *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (Globecom)*, 2008, pp. 1–5.

- [87] F. Fernandez, A. Ashikhmin, et T. Marzetta, "Interference reduction on cellular networks with large antenna arrays," Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), Ottawa, Canada, juin 2012.
- [88] A. Adhikary et G. Caire, "On the coexistence of macrocell spatial multiplexing and cognitive femtocells," 2012. [Online]. Available : <http://arxiv.org/abs/1202.1449>
- [89] F. Negro, I. Ghauri, et D. Slock, "Beamforming for the underlay cognitive MISO interference channel via UL-DL duality," in 5th Int. Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM). IEEE, pp. 1–5.
- [90] L. Sanguinetti, A. Moustakas et M. Debbah, "Interference Management in 5G Reverse TDD HetNets With Wireless Backhaul : A Large System Analysis", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 6, pp. 1187-1200, 2015.
- [91] N. Saquib, E. Hossain, L. B. Le, et D. I. Kim, "Interference management in OFDMA femtocell networks : Issues and approaches," IEEE Wireless Commun., vol. 19, no. 3, pp. 86–95, juin 2012.
- [92] J. G. Andrews, T. Bai, M. N. Kulkarni, A. Alkhateeb, A. K. Gupta, et R. W. Heath, Jr., "Modeling and analyzing millimeter wave cellular systems," IEEE Trans. Commun., vol. 65, no. 1, pp. 403–430, jan. 2017.
- [93] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, et R. W. Heath, "Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems," IEEE J. Sel. Topics Signal Process., arXiv preprint arXiv :1401.7426, janvier 2014.
- [94] L. Sanguinetti, A. L. Moustakas, and M. Debbah, "Interference management in 5G reverse TDD HetNets with wireless backhaul : A large system analysis," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 33, no. 6, pp. 1187– 1200, juin 2015.