
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Faculté : Électronique

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

présenté par

HADDOUCHE Khaled

Contamination des pilotes en MIMO Massif

Proposé par : Dr AIT SAADI Hocine & Prof MELIANI Hamza

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

Je remercie « Allah » le tout puissant qui m'a donné la santé, la volonté, la patience et le courage tout au long de mes études et au cours de la réalisation de ce modeste travail.

J'aimerais tout d'abord remercier chaleureusement mes encadreurs, Mr AITSAADI Hocine, pour son esprit scientifique et sa pédagogie et Mr MELIANI Hamza pour sa vision innovante des nouvelles techniques et sa rigueur. Ils ont tous les deux permis, à travers leurs orientations, de surmonter la plupart des défis rencontrés. Ils représentent de véritables chercheurs scientifiques qui ont su me faire profiter de leurs expériences ainsi que de leur grande culture scientifique.

Je remercie aussi toute la promotion de système de télécommunication, et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail

Je tiens à adresser ma reconnaissance à tous mes profs et en particulier ceux et celles qui ont su m'encourager et m'aiguiller à tout moment.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui me sont chers, je cite en premier lieu mes irremplaçables parents, Mohamed et Fatma qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance et m'ont octroyé de nobles valeurs.

Mon adorable sœur Hizia, et mes chers frères Billel, Reda

Mes chers Toufik, Amin et Bilel.

Et mes chères Assala, Moufida, Radhia.

Toute ma famille et mes proches amis et amies.

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Moi-même et à tous ceux qui m'aiment

Khaled

ملخص:

نحن نحرز تقدماً نحو عصر الجيل الخامس الآن، وكفاءة الطاقة هي معيار تصميمي مهم لتلبية أهداف الاتصالات الخضراء. " تتمثل إحدى الاستراتيجيات للتعامل مع هذه المشكلة في الاتصالات المتعددة المدخلات المتعددة (متعددة المدخلات متعددة المخرجات) ، خاصة عندما يصبح عدد الهوائيات كبيراً جداً. "Massive MIMO" تقنية MIMO الضخمة هي تقنية ناشئة يتم تصور استخدامها في شبكات المحمول المستقبلية. ومع ذلك، واحدة من المشاكل الخطيرة التي واجهتها هي تلوث السائقين التي نقترح تحليلها في هذه الذاكرة.

كلمات المفاتيح: هائل MIMO , متعدد الاستخدامات, تلوث الطيار.

Résumé :

Nous faisons des progrès actuellement vers l'ère delà 5G, l'efficacité énergétique (EE) est un critère de conception important pour répondre aux objectifs des " communications vertes ". L'une des stratégies permettant de traiter ce problème est les communications multi-antennes multi-utilisateurs (multi-input multi-output), notamment lorsque le nombre d'antennes devient très grand « Massive MIMO ». La technologie MIMO massif est une technique émergente dont l'utilisation est envisagée dans les futurs réseaux mobiles. Cependant, un des problèmes sérieux rencontrés est la contamination des pilotes que nous proposons d'analyser dans ce mémoire.

Mots clés : MIMO massif, multiutilisateur, contamination des pilotes

Abstract :

As we make progress towards the 5G era, energy efficiency (EE) is an important design criterion to meet the goals of "green communications". One of the strategies for dealing with this problem is multi-input multi-input communications, especially when the number of antennas becomes very large "Massive MIMO". Massive MIMO technology is an emerging technology for use in future mobile networks. However, one important problem faced in this field of telecommunication is the pilot contamination that we propose to analyze in this dissertation.

Keywords : massive MIMO, multi-user, Pilot Contamination

Table de matière

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Les systèmes MIMO massif	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Massive MIMO	3
1.3 Principe de la technique MIMO.....	5
1.4 MIMO homogène (systèmes à un seul niveau).....	6
1.5 Les différents types du MIMO massif.....	7
1.5.1 MIMO mono-utilisateur :	7
1.5.2 MIMO Massif multiutilisateurs :	8
1.5.3 Modèle de système TDD multi-cellules.....	10
1.6 Caractéristiques d'un système MIMO Massif	10
1.6.1 La préférence du schéma TDD en MIMO Massif.....	11
1.6.2 Évolutivité :	11
1.7 Traitement dans le système MIMO Massif	11
1.7.1 Estimation du canal	12
1.7.2 Données de la liaison montante.....	12
1.7.3 Données de liaison descendante.....	13
1.7.4 Apprentissage basé sur TDD.....	13
1.8 Conclusion	13
Chapitre 2 :	14
Contamination des pilotes en MIMO Massif.....	14
2.1 Introduction :	14
2.2 Le système MIMO multi-utilisateur.....	14
2.3 Le beamforming	15
2.4 Interférence multi-cellules	16
2.5 Les différents niveaux de coopération multicellulaire	16
2.5.1 Coordination des interférences.....	16
2.5.2 Coopération MIMO	17
2.6 CoMP (Coordinated Multi-Point)	18
2.7 Contamination des pilotes	19
2.7.1 Acquisition CSI	20

2.7.2	Méthodes d'apprentissage.....	20
2.8	Sources de contamination du pilote	20
2.8.1	Réutilisation pilote non-orthogonale	21
2.8.2	Déficiences matérielles (Hardware Impairment)	21
2.8.3	Émetteur-récepteur non-réciproque	21
2.9	Contamination du pilote de liaison montante	21
2.10	Contamination pilote dans la liaison montante et la liaison descendante	22
2.10.1	Performances de liaison montante	22
2.10.2	Session de liaison descendante	22
2.11	Atténuation de la contamination du pilote.....	22
2.11.1	Pilotes décalés dans le temps.....	23
2.11.2	Estimation de canal non linéaire	23
2.12	Conclusion	23
Chapitre 3	: Simulation et résultats.....	24
3.1	Introduction :.....	24
3.2	Présentation de la liaison montante du système étudié.....	24
3.3	Etude et Simulation du modèle mathématique de la liaison montante	24
1.5.4	Phases de la communication de la liaison montante :	24
3.3.1	Apprentissage et estimation du canal sur la liaison montante	25
3.3.2	Résultat de l'EQM avec l'algorithme MMSE	26
3.4	Analyse de l'effet de la contamination des pilotes en DL :	29
3.5	Conclusion	33
Conclusion générale	35
Bibliographie	36

Liste des figures

- Fig. 1.1 :** Vitesse évolutive des réseaux sans fil
- Fig. 1.2 :** Système MIMO massif en transmission multi-utilisateur
- Fig. 1.3 :** Principe de MIMO
- Fig. 1.4 :** Fonctionnement d'une liaison montante et de liaison descendante en MIMO
- Fig. 1.5 :** MIMO massif mono-utilisateur
- Fig. 1.6 :** Système multi-utilisateur MIMO massif
- Fig. 1.7 :** La BS dans la $l^{\text{ième}}$ et $k^{\text{ième}}$ utilisateur dans la $j^{\text{ième}}$ cellule
- Fig. 1.8 :** Trois étapes dans un cadre TDD
- Fig. 1.9 :** Trame TDD
- Fig. 2.1 :** Illustration de la transmission en liaison descendante et en liaison montante dans un système MIMO multi-utilisateurs
- Fig. 2.2 :** Beamforming analogique
- Fig. 2.3 :** Beamforming coordonné spécifique
- Fig. 2.4 :** MIMO coopération
- Fig. 2.5 :** Transmission conjointe
- Fig. 2.6 :** Coordinated beamforming
- Fig. 2.7 :** Contamination du pilote
- Fig. 3.1 :** L'erreur quadratique moyenne (EQM) en fonction du nombre de cellules L
- Fig. 3.2 :** La BS avec $M=200$ antennes dans la cellule- j et K utilisateurs dans la cellule- l adjacente
- Fig. 3.3 :** l'efficacité spectrale en (bits/s/Hz) en fonction de nombre d'antenne M

Liste des acronymes et abréviations

5G:	Fifth Generation
BS:	Base Station. SB: Station de base.
CSI:	Channel State Information
D2D:	Device-To Device.
FDD:	Frequency Division Duplexing
ICI:	Inter Cell Interference
LOS:	Line of Sight
MIMO:	multiple-input-multiple-output
MMSE:	Minimum Mean Square Error.
MU-MIMO:	Multiple users MIMO
Mass-BS:	Massive MIMO Base Station
OFDM:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
QoS:	Quality of service
RF:	Radio Frequency.
SISO:	Single-input-single-output
SU-MIMO:	Single user MIMO
TDD:	Time Division Duplexing.
UT:	User Terminal

Introduction générale

Par la révolution du Cloud Computing et des Smartphones, une énorme quantité de données devrait traverser le réseau chaque seconde où la plupart de ces données sont livrées par des transmissions sans fil. La demande rapide de la croissance de la bande passante et les demandes de QoS (quality of service) rendent les réseaux mobiles de la 4^{ème} génération insuffisants. Les réseaux de la 5^{ème} génération doivent répondre aux exigences des transmissions futures telles qu'une vitesse de transmission de données de 100 Mbits/s jusqu'à 1 Gbit / s par terminal utilisateur (UT), avec une densité de connexion qui dépasse 1Méga de connexions / Km², la mobilité des véhicules à grande vitesse jusqu'à 500 km / h et un délai de bout en bout (E2E) inférieur à 10 ms. Un candidat prometteur qui peut offrir ces demandes est le système sans fil multi-utilisateurs multi-cellules Massif (*Massive Multiple-Input Multiple-Output* : **Massive MIMO** [4]. Dans la technique multi porteuse, on utilise généralement des données supplémentaires qu'on appelle pilotes pour l'estimation du canal de transmission. Cependant, la technique MIMO massive est limitée par l'interférence intercellulaire (ICI) due à la réutilisation du pilote qui provoque la contamination de celui-ci.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la contamination du pilote dans les liaisons sans fil. L'étude de ce problème dans le cas de la liaison montante TDD (*Time Division Duplexing*) est réalisée dans ce mémoire.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres;

Dans le premier chapitre, les différentes techniques proposées pour les systèmes MIMO seront présentées. Une extension vers les systèmes avec un large nombre d'antennes dite massive MIMO sera exposée. Le principe de la technique Massive MIMO, les types et les caractéristiques du système MIMO, ainsi que le traitement dans le système massif MIMO et l'apprentissage basé sur la technique TDD (*Time Division Duplexing*) seront énoncés par la suite.

Dans le deuxième chapitre, on présente le problème des interférences multi-cellule, les différents niveaux de coopération multicellulaire, les sources de contamination de pilotes, la contamination de pilote de la liaison montante et de la liaison descendante.

Dans le troisième chapitre on présente une étude et la simulation de modèle mathématique. Ensuite on fait un calcul d'erreur quadratique moyenne (EQM) en utilise l'algorithme MMSE. Dans ce chapitre on présente aussi l'effet de la contamination du pilote en liaison descendante. Et en dernier lieu on termine le mémoire par une conclusion générale dans laquelle on suggère une continuation à notre travail comme perspective.

Chapitre 1 : Les systèmes MIMO massif

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter dans un premier temps, un résumé sur les systèmes MIMO. Ensuite, des généralités sur les systèmes massive MIMO seront exposées, telles que les types des systèmes massive MIMO, les défis, ainsi que les modèles de canal des systèmes massive MIMO.

1.2 Massive MIMO

MIMO Massif ou Massive MIMO en anglais (*Massive Multiple-Input Multiple-Output*) est une technologie sans fil qui utilise la technologie de communication multiutilisateur qui a suscité d'énormes intérêts de recherche ces dernières années. Chaque station de base (BS) utilise plusieurs antennes pour desservir des dizaines d'utilisateurs dans chaque cellule simultanément [1-2]. Par conséquent, massive MIMO est l'une des technologies clés pour la prochaine génération des réseaux sans-fil.

La figure 1.1 [1], montre l'évolution à partir de l'année 2002 de la vitesse des réseaux sans fil débutant par les systèmes SISO (single-input-single-output), réseaux MIMO mono-utilisateur (SU) et multiutilisateurs (MU). Les systèmes MU-MIMO offrent des avantages significatifs par rapport aux systèmes antérieurs. Les systèmes Massive MIMO dont le principe est d'utiliser un grand nombre d'antennes visent à améliorer encore davantage le débit de transmission jusqu'à 10 Gbps et plus.

Les antennes supplémentaires aident à focaliser l'énergie du signal vers plusieurs positions particulières de l'espace et à améliorer d'une manière significative le rendement du système et l'efficacité énergétique, en particulier en présence d'un grand nombre d'utilisateurs.

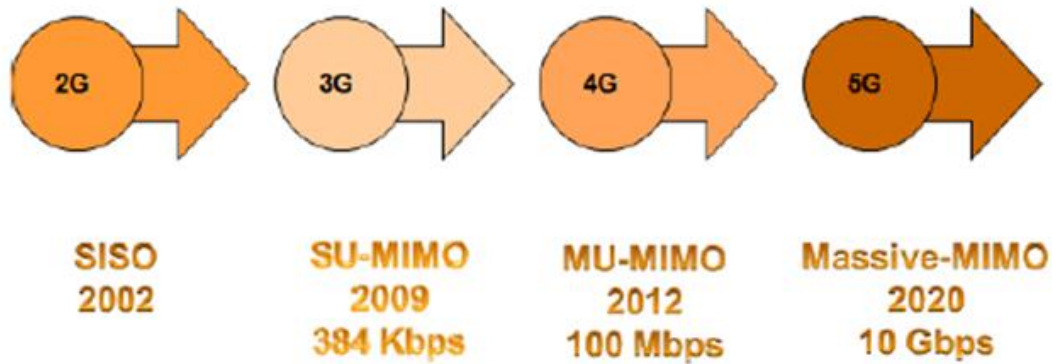


Figure 1.1 Vitesse évolutive des réseaux sans fil [1].

Le système Massive MIMO¹, illustré sur la Figure 1.2, est un système comprenant un nombre d'antennes M relativement élevé ($M > 10$) au niveau de la station de base [2]. Ce grand nombre d'éléments rayonnants, chacun contrôlé numériquement, va permettre un contrôle final du rayonnement global de la station de base.

Le processus de pré-codage sert à exploiter une certaine connaissance du canal de propagation pour cibler plusieurs utilisateurs et les servir simultanément. Ceci permet à chaque utilisateur de bénéficier de la totalité de la bande passante et d'obtenir un débit très élevé. Le pré-codage se fait au niveau de la station de base car l'utilisateur terminal actuel ne possède pas les capacités et les informations nécessaires pour effectuer des traitements de post-codage. Comme mentionner ci-dessus, la focalisation de l'énergie du signal se traduit par un gain plus fort lié au pré-codage sans augmentation de la puissance de transmission. En d'autres termes, un système Massive MIMO permet théoriquement de diviser la puissance radio nécessaire à l'obtention d'une même qualité de service qu'un système SISO par un facteur proportionnel au nombre d'antennes (M) du système [2].

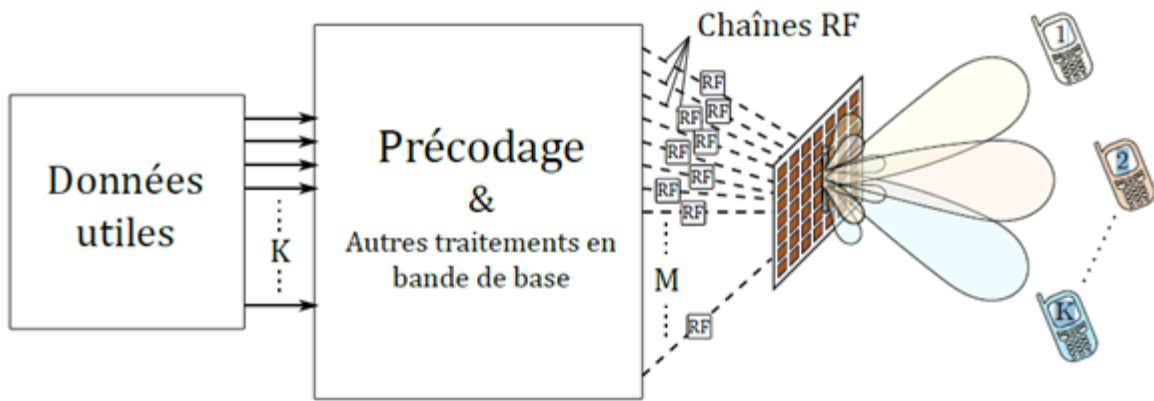


Figure 1.2 – Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs [2].

1.3 Principe de la technique MIMO

Dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception (SISO). Or la demande de la capacité transmission des services de communications mobiles sans fils est de plus en plus croissante d'où la nécessité pour les systèmes SISO d'augmenter les bandes passantes, et les puissances à transmettre. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (Multiple Input, Multiple Output) (Fig. 1.3). Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes [3].

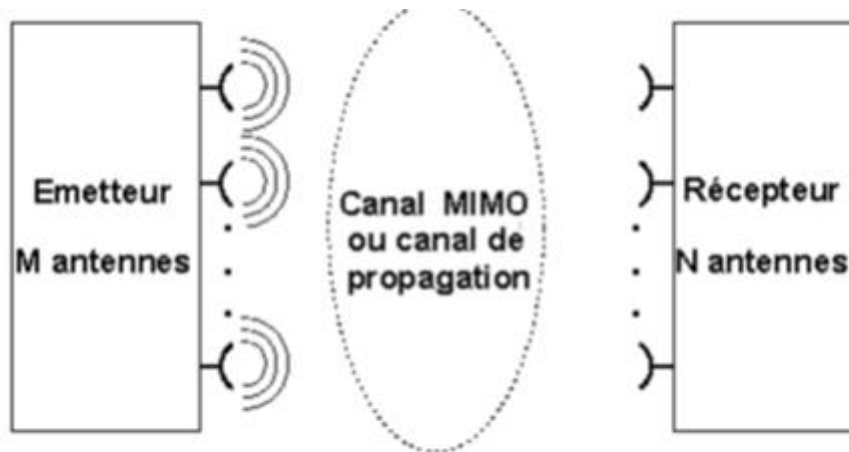


Fig.1.3 : Principe du MIMO

1.4 MIMO homogène (systèmes à un seul niveau)

Les systèmes MIMO conventionnels sont composés de BS à antennes multiples distribuées aléatoirement, où chaque BS dessert un certain nombre d'utilisateurs. Toutes les BS travaillent avec les mêmes méthodes d'accès, techniques de diversité et type de transmission. La puissance d'émission moyenne par unité de surface de service est également souvent la même (soumise à des algorithmes de contrôle de puissance).

La figure 1.4, montre la liaison montante et la liaison descendante d'un système monocellulaire massif MIMO. La BS est composée de quelques centaines d'antennes de service desservant chacune quelques centaines d'utilisateurs. Généralement chaque utilisateur possède une seule antenne [1].

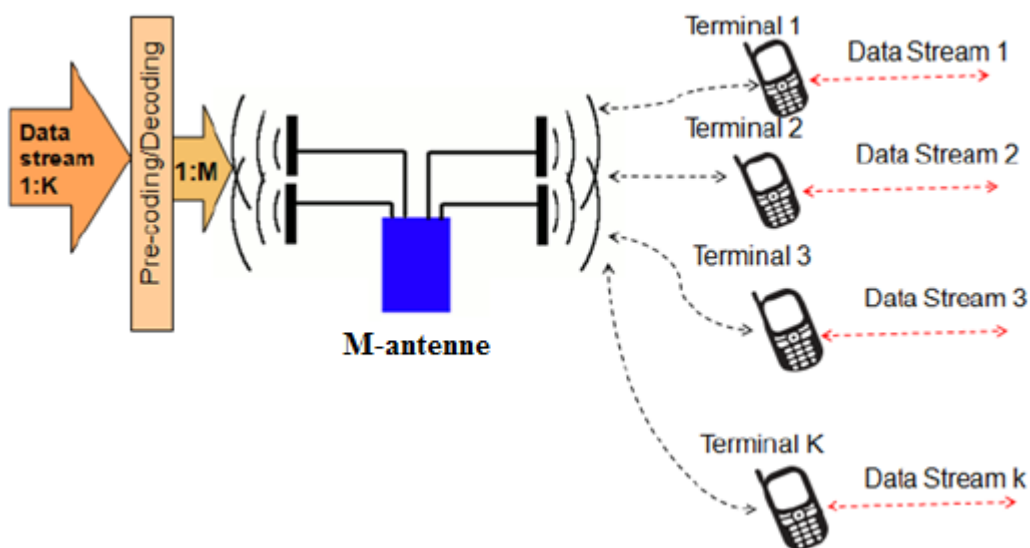


Fig.1.4 : Fonctionnement des liaisons montantes et descendantes en MIMO

Les étapes de l'opération de liaison montante sont les suivantes [1] :

1. Le codage est utilisé pour préparer les données à transmettre.
2. Les séquences pilotes et les séquences de données montantes sont transmises de chaque utilisateur vers la BS en même temps et sur la même fréquence.
3. La station de base reçoit la somme des flux de données de tous les utilisateurs et estime le canal.
4. Les opérations de décodage et de détection produisent des flux de données individuels en utilisant le CSI estimé (*Channel State Information : information de l'état du canal*).

Les étapes du processus de liaison descendante sont les suivantes :

1. Beamforming: Les flux de données sont transmis des BS aux seuls utilisateurs prévus au moyen de beamforming, où les différents flux de données peuvent occuper les mêmes fréquences en même temps (multiplexage par division spatiale).
2. Pré-codage : L'opération précédente est réalisée en connaissant la réponse en fréquence des canaux de propagation (ou CSI) entre chaque élément de la BS et chaque utilisateur et pré-codant le signal en conséquence.

Le décodage linéaire ou le démultiplexage est utilisé sur la liaison montante, tandis que le pré-codage linéaire ou le multiplexage est utilisé sur la liaison descendante. Les techniques de pré-codage linéaire au niveau de la liaison descendante visent à focaliser chaque signal sur sa borne désirée et à atténuer les interférences vers d'autres terminaux [1] entre temps, la combinaison de réception est utilisée dans la liaison montante pour différencier les signaux envoyés depuis différents terminaux. Plus un grand nombre d'antennes est utilisé, plus la focalisation spatiale peut être fine. Les méthodes de pré-codage à faible complexité sont essentielles pour minimiser la complexité de calcul du pré-codeur [2]. Contrairement au système MIMO conventionnel, le système MIMO massif utilise des pré-codeurs linéaires, tels que la combinaison de rapport maximum (MRC), le filtrage adapté, la formation de faisceau conjugué, la combinaison de réception d'erreur quadratique moyenne (MMSE) et le forçage zéro (ZF) [2].

1.5 Les différents types du MIMO massif

1.5.1 MIMO mono-utilisateur :

Le système MIMO mono-utilisateur est constitué d'un côté d'une BS comportant plusieurs antennes et d'un seul utilisateur de l'autre côté. Du point de vue de l'efficacité énergétique, l'utilisation d'un réseau d'antennes massif pour desservir un seul ou un petit nombre d'UT n'est pas judicieuse [4].

Dans le cas du système MIMO mono-utilisateur, le signal reçu par l'utilisateur est donné par

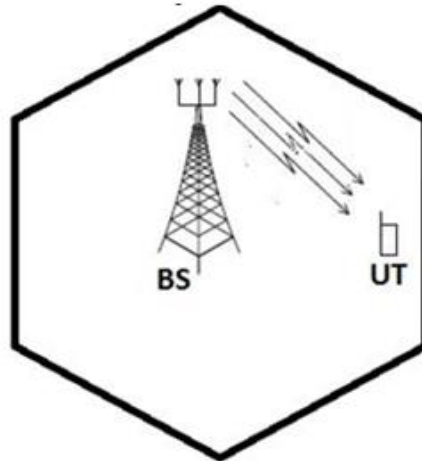


Figure 1.5 : MIMO Massive mono-utilisateur

l'équation suivante :

$$Y = \sqrt{P_u} \cdot H \cdot s + W \quad (1.1)$$

Où :

- P_u : la puissance moyenne (pendant la transmission) de chaque utilisateur,
- H : vecteur de réponse de canal.
- s : Le vecteur de symbole.
- W : le vecteur de bruit AWGN.

1.5.2 MIMO Massif multiutilisateurs :

Lorsque plus d'un terminal est autorisé à accéder à une ressource temps-fréquence identique, la technique MU-MIMO offre une meilleure efficacité du système contrairement à SU-MIMO. Dans cette section, nous prenons en compte un système MU-MIMO unicellulaires où la station de base dessert un nombre K d'utilisateurs (UT) chacun équipé d'une antenne. Le signal reçu au niveau de la BS pour la liaison montante est donné par [4] :

$$y = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_u} \cdot h_k \cdot s_k + w \quad (1.2)$$

$$Y = \sqrt{P_u} \cdot H \cdot s + W \quad (1.3)$$

- Y : matrice $M \times 1$ du signal reçu.
- P_u : Puissance utilisateur.
- $H = [h_1 \dots h_k \dots h_K]$ matrice ($K \times 1$) représente le vecteur de canal entre les antennes de la BS et le k^{th} utilisateur.
- $s = [s_1 \dots s_k \dots s_K]$ matrice ($K \times 1$) représente les symboles transmis par k^{th} utilisateur.
- W Représente le bruit blanc gaussien additif complexe (AWGN) avec $W \sim \mathcal{CN}(0,1)$

Lorsque $K \geq 2$ (figure 1.6), au niveau de la BS, le signal obtenu de chaque UT interfère avec ceux des autres terminaux. L'information mutuelle de chaque terminal pour le système MU-MIMO est plus petit que celle pour le système SU-MIMO étant donné la même puissance transmise à chaque terminal.

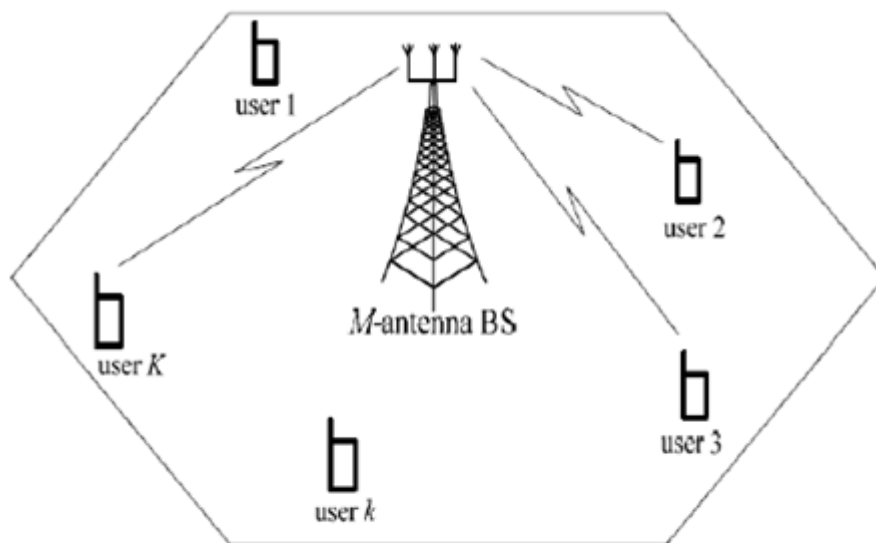


Figure 1.6 System multi utilisateur massif MIMO

Cependant, quand le nombre M d'antennes au niveau de la BS est supérieur au nombre K utilisateurs, les signaux obtenus des terminaux sont presque orthogonaux entre eux d'où l'atténuation drastique des interférences. Aussi, étant donné que les terminaux sont autonomes, la condition favorable de propagation du canal est généralement confortable en raison du fait que les antennes des terminaux sont presque décorréliées et découplées [4].

1.5.3 Modèle de système TDD multi-cellules

Nous considérons un système cellulaire avec L cellules numérotées $1, 2, \dots, L$. Chaque cellule comprend une station de base avec M antennes et K ($\leq M$) utilisateurs à antenne unique. La puissance moyenne (en downlink) transmise par la station de base est donnée par p_f . La puissance moyenne (en uplink) de chaque utilisateur est notée P_r .

Le facteur de propagation entre l'antenne de la station de base de la $l^{\text{ième}}$ cellule et le $k^{\text{ième}}$ utilisateur de la $j^{\text{ième}}$ cellule est $\sqrt{\beta_{jlk}}h_{jlk m}$, où $\{\beta_{jlk}\}$ sont des constantes non négatives et supposées connues de tous, et $\{h_{jlk m}\}$ sont des variables aléatoires gaussiennes indépendantes selon $\mathcal{CN}(0, 1)$. Le modèle de ce système est illustré par la figure 1.6 [5].

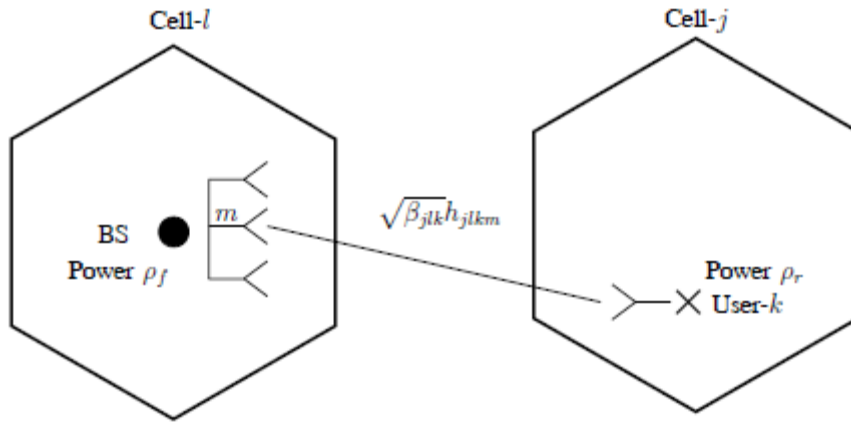


Fig. 1.7 : la BS dans la $l^{\text{ième}}$ cellule et $k^{\text{ième}}$ utilisateur dans la $j^{\text{ième}}$ cellule

Dans la figure 1.7, la $m^{\text{ième}}$ antenne de la station de base de la cellule-l reçoit le signal y_l qui est la somme des signaux provenant d'autres cellules.

$$y_{lm} = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{p_r \tau \beta_{jlk}} h_{jlk m} \varphi_{JK} + w_{lm} \quad (1.4)$$

$$Y_l = \sqrt{p_r \tau} \sum_{j=1}^L \Psi_{JK} D_{jl} H_{jl} + W_l \quad (1.5)$$

- H_{jl} représente la matrice de dimension $M \times K$ des canaux composites entre les K utilisateurs terminaux dans la cellule l et la BS dans la cellule j .

1.6 Caractéristiques d'un système MIMO Massif

Le système MIMO massif est une forme de structures multi-utilisateurs MU-MIMO où la variété des antennes BS et le nombre d'utilisateurs sont énormes. Dans ce système des milliers d'antennes BS desservent simultanément des dizaines ou des centaines d'utilisateurs avec les mêmes ressources en fréquence. On peut donner quelques points importants dans les systèmes MIMO massif.

1.6.1 La préférence du schéma TDD en MIMO Massif

Dans la plupart des études proposées, le schéma TDD est préféré à celui du FDD en MIMO massive. En utilisant la technique FDD (une bande pour l'UL et une autre pour le DL), la période d'estimation du canal en DL dépend du nombre d'antennes M à la BS. En revanche, en utilisant le schéma TDD (une seule bande), l'estimation se fait uniquement en uplink, et la période d'estimation (nombre de pilotes nécessaires) ne dépend donc pas du nombre d'antennes M . Si on veut avoir un grand nombre d'antennes M à la BS, il y a avantage à utiliser le schéma TDD en MIMO massif.

1.6.2 Évolutivité :

En TDD donc, la BS réalise une estimation du canal lors de la liaison montante (uplink). Le temps requis pour l'estimation de canal ne dépend pas du nombre d'antennes BS. Par conséquent, ce nombre peut être rendu aussi grand que possible sans extension dans la période d'estimation de canal (nombre de pilotes) [3]. C'est l'évolutivité non limitée du nombre d'antennes de la station de base en TDD.

1.7 Traitement dans le système MIMO Massif

En supposant que le schéma TDD est adopté, le traitement dans le système MIMO Massif s'effectue en trois phases :

- 1) Estimation du canal, en utilisant les pilotes pour chaque utilisateur en liaison montante (UL),
- 2) Transmission et réception des données de la liaison montante
- 3) Transmission des données de la liaison descendante (DL).

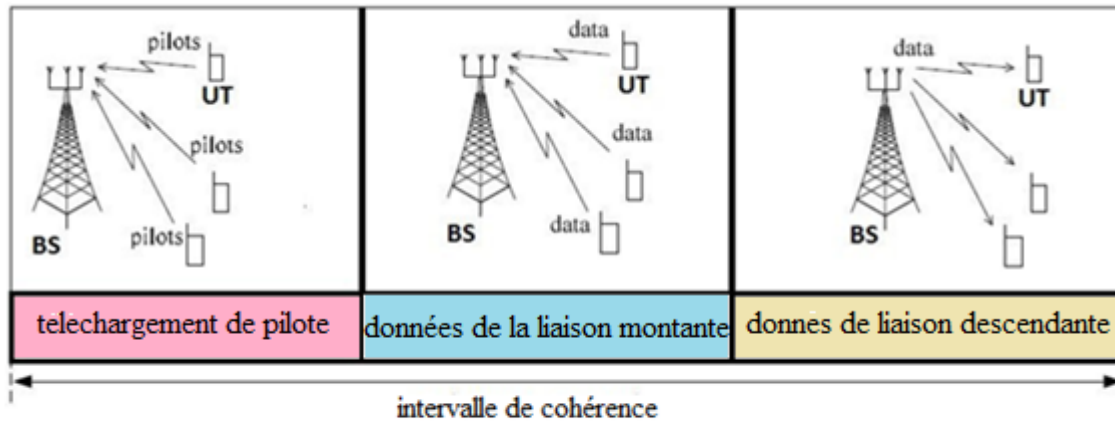


Fig 1.8 : Trois étapes dans un cadre TDD

Les trois étapes sont effectuées dans des divisions à deux temps qui ne sont pas plus longues que la longueur de l'intervalle de cohérence.

1.7.1 Estimation du canal

Au niveau de la liaison retour (BS-UT), la BS a besoin des informations sur canal (CSI) pour prendre connaissance des signaux transmis par les UT dans la liaison montante, et pour pré-coder les signaux dans la liaison descendante. Cette information de canal est acquise via l'apprentissage de la liaison montante (estimation du canal). Chaque utilisateur reçoit une séquence pilote orthogonale et envoie sa séquence pilote au BS. En raison de l'orthogonalité des séquences pilotes, la BS est au courant des pilotes transmis par tous les terminaux d'utilisateurs, puis estime les canaux sur la base des signaux pilotes reçus. De même, chaque utilisateur peut avoir besoin d'informations partielles de CSI pour découvrir de manière cohérente les signaux transmis depuis la BS. L'apprentissage en liaison descendante permet d'obtenir ces statistiques. Etant donné que la BS utilise des stratégies de pré-codage linéaire pour transmettre les indicateurs aux utilisateurs. L'utilisateur souhaite uniquement, sur le canal actif, remarquer ses signaux préférés. Par conséquent, la station de base peut passer un temps bref à former des pilotes dans la liaison descendante pour l'acquisition de canal afin d'accéder à l'UT [3].

1.7.2 Données de la liaison montante

Après l'estimation du canal, la BS peut recevoir les données téléchargées pour chaque UT en utilisant la version estimée du CSI. Cette estimation est faite pour les deux liaisons (montante et descendante) durant l'intervalle de temps de cohérence. Les données téléchargées de chaque

UT sont supposées partager le même domaine de fréquence-temps, où la BS utilise la signature de multiplexage spatial acquise à partir du CSI pour séparer les flux de données reçus. Les récepteurs linéaires comprenant (MRC, MMSE, ZF) peuvent recevoir efficacement le flux de données téléchargé sans avoir besoin de récepteurs non linéaires complexes.

1.7.3 Données de liaison descendante

La troisième phase de la trame TDD est la phase de données de liaison descendante. Le lien descendant est généralement considéré plus court que le lien montant car seules les données de liaison descendante l'occupent. Dans le même intervalle de cohérence, la station de base utilise le CSI estimé pour pré-coder le flux de données de liaison descendante. De nombreuses techniques peuvent effectuer le pré-codage dans le système MIMO Massif. Des pré-codeurs linéaires comme MRT, MMSE et ZF peuvent être utilisés pour effectuer la tâche.

1.7.4 Apprentissage basé sur TDD

L'apprentissage basé sur la technique TDD s'effectue en deux phases ;

Au cours de la première phase, les premiers terminaux utilisateurs doivent envoyer leurs séquences pilotes pendant la session de liaison montante tandis que la station de base estime la matrice de canal et prépare la matrice de pré-codage [4].

Au cours de la seconde phase, la station de base utilise la matrice de pré-codage pour estimer les données de liaison montante provenant du terminal utilisateur, puis l'utilise pour pré-coder les données de liaison descendante vers les terminaux d'utilisateurs. Une illustration de la trame TDD est présentée dans la figure 1.9 [4] ci-dessous :

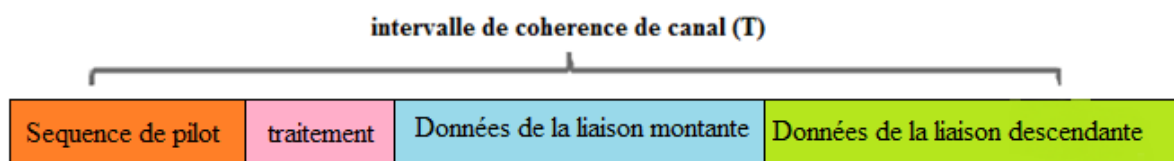


Fig. 1.9 : trame TDD

1.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté un aperçu de la technologie MIMO massif. Il a introduit également certaines caractéristiques principales de MIMO massif telles que les types des systèmes massifs MIMO, les défis, ainsi que les modèles de canal des systèmes massifs MIMO.

Chapitre 2 :

Contamination des pilotes en MIMO Massif

2.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va introduire le défi d'interférence dans les réseaux 5G et principalement sur les réseaux MIMO massifs. L'interférence multicellulaire de différents niveaux, la contamination du pilote pour les liaisons montante et descendante suscitent le plus d'intérêt dans ce chapitre. Une brève étude sur les sources de contamination pilote, leurs effets et la technique d'atténuation seront aussi présentés dans les sections suivantes

2.2 Le système MIMO multi-utilisateur

Le système MIMO multi-utilisateurs est constitué d'une BS avec M antennes desservant K terminaux à une seule antenne. La Fig. 2.1. Illustre la transmission en liaison descendante et en liaison montante dans un système MIMO multi-utilisateurs. La BS multiplexe un flux de données par utilisateur dans la liaison descendante et reçoit un flux par utilisateur dans la liaison montante. En termes simples, la station de base utilise ses antennes pour diriger chaque signal vers son récepteur souhaité dans la liaison descendante, et pour séparer les multiples signaux reçus dans la liaison montante. Si le terminal est équipé de plusieurs antennes, il est souvent avantageux d'utiliser ces antennes supplémentaires pour atténuer les interférences et améliorer le SNR plutôt que d'envoyer plusieurs flux de données.

Cette illustration met l'accent sur la propagation en visibilité directe où les signaux de liaison descendante peuvent être considérés comme des faisceaux angulaires, mais le MIMO multi-utilisateur fonctionne aussi bien dans des conditions de non-visibilité directe [5].

(a) Liaison descendante dans MIMO multi-utilisateur.

(b) Liaison montante dans MIMO multi-utilisateurs.

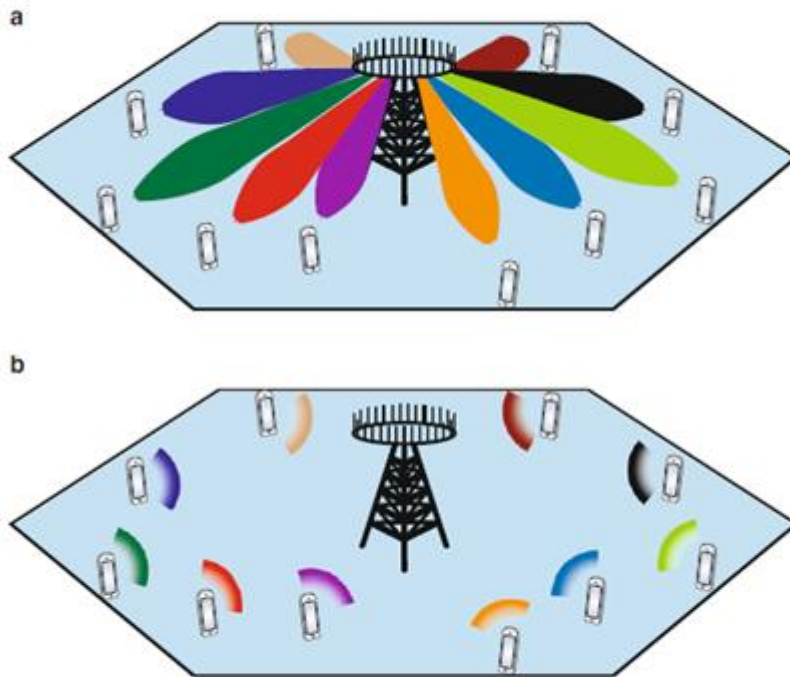


Fig .2.1 : Illustration de la transmission en liaison descendante et en liaison montante dans un système MIMO multi-utilisateur.

2.3 Le beamforming

Le beamforming fait partie des techniques de traitement d'antennes, utilisé pour l'estimation des signaux et des directions d'arrivée (DOA) et dans la suppression d'interférences. Il a pour but de trouver un filtre spatial ou spatiotemporel dont la sortie correspond à une estimée du signal utile bruité venant d'une direction particulière [6].

Les avantages de ces réseaux intelligents énoncés sont [2] :

- Une meilleure efficacité spectrale permettant d'accroître la capacité de la cellule
- Une réduction de l'étalement des retards et des évanouissements liés

On voit sur la figure 2.2 [2] que chaque trajet indirect ou signal provenant d'un autre utilisateur est automatiquement atténué et le gain obtenu dans la direction d'intérêt, qu'on appelle gain de beamforming, va permettre d'augmenter grandement le bilan de liaison.

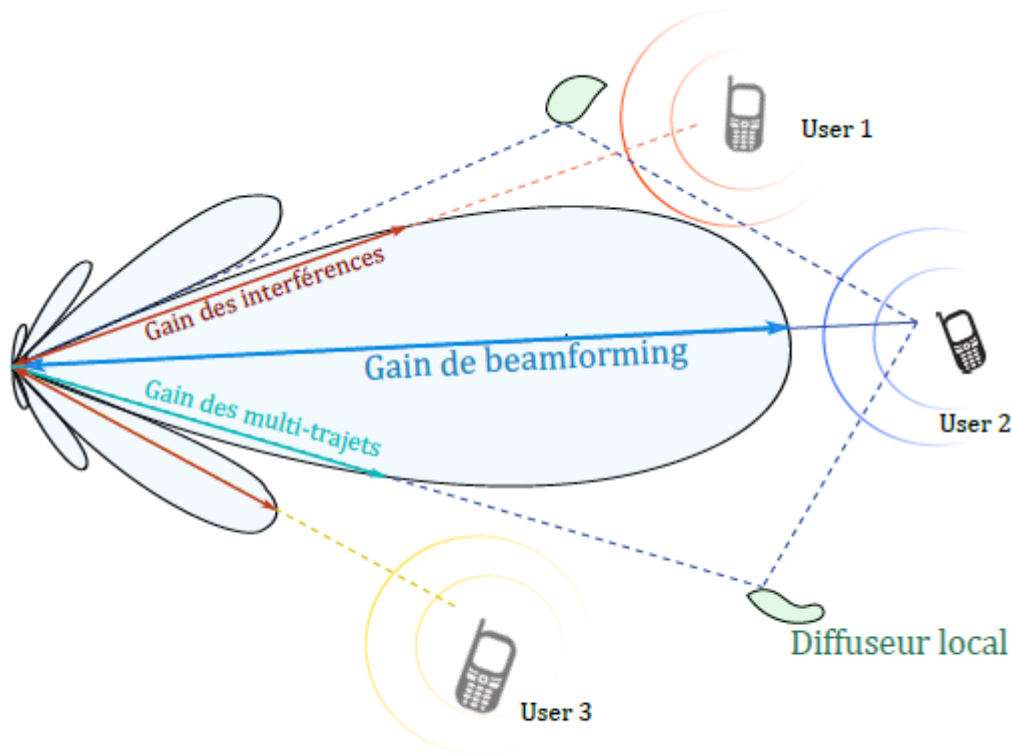


Figure 2.2 – Beamforming analogique

2.4 Interférence multi-cellules

La coopération entre les stations de base est une technique ancienne dans les réseaux mobiles, où le terminal mobile communiquait avec la station de base voisine pour surmonter l'effet des évanouissements à court terme et à long terme (par exemple, le transfert : *hand-off*). Dans les réseaux mobiles classiques, tels que CDMA, la station mobile utilise une approche de transfert sans coupure en communiquant avec plusieurs stations de base pour la décision de la prochaine connexion. Comme la sélection de la diversité vise à augmenter à la fois la capacité et la couverture et lorsqu'elle est soumise au contrôle de la puissance, elle permettra la réutilisation de la fréquence dans chaque cellule [4].

2.5 Les différents niveaux de coopération multicellulaire

Dans cette section, on présente les différents niveaux de coopération multicellulaire qu'on retrouve le plus dans la littérature [4].

2.5.1 Coordination des interférences

En utilisant les informations d'état de canal (CSI) [4], les stations de base peuvent gérer la direction du beamforming, l'attribution de puissance et la programmation de l'utilisateur en temps et en fréquence. Avec une quantité modeste de données backhaul, les stations de base peuvent atteindre de bonnes performances, en particulier si de nombreux utilisateurs existent dans le système. Etant donné qu'il n'y a pas de partage de données de synchronisation ou de transmission de niveau de signal entre stations de base, cette technique de gestion des interférences est appelée coordination des interférences. Les stations de base suivent ce schéma de gestion des interférences, gèrent les données de transmission qui correspondent uniquement à leurs K utilisateurs terminaux [4].

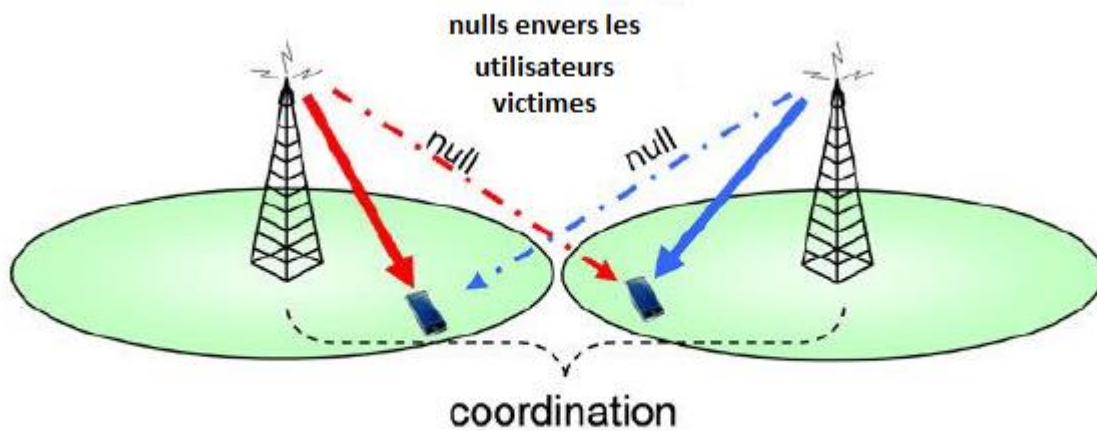


Figure 2.3 Beamforming coordonné spécifique

2.5.2 Coopération MIMO

Si les CSI et les données de transmission sont partagées entre des stations de base, un Beamforming coopératif peut être obtenu. Dans un tel schéma, chaque utilisateur terminal peut être desservi par une combinaison d'antennes appartenant à différentes stations de base ayant le rapport signal sur bruit maximal sur ce canal (figure 2.4). Compte tenu de cette coopération, MIMO multi-cellules agira comme un multiutilisateur MIMO d'où l'on peut imaginer une station de base virtuelle constituée d'antennes appartenant à différentes stations de base physique. Ce type de coopération ne peut être atteint que si un faible retard avec des liaisons à haute capacité se produit entre les stations de base. Sinon, backhaul overhead limiteront la capacité du système [4].

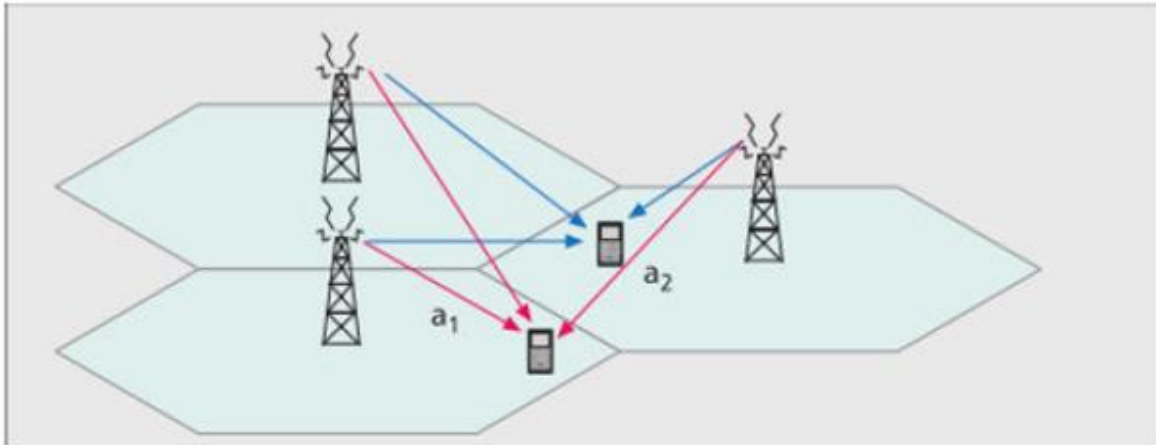


Figure 2.4 MIMO coopération

2.6 CoMP (Coordinated Multi-Point)

Il s'agit d'un ensemble de techniques visant à tirer parti d'une communication entre plusieurs SB afin de réduire ou de s'affranchir des interférences inter-cellules tout en augmentant considérablement la capacité et l'efficacité énergétique du système [2].

Deux catégories de CoMP sont identifiées [2] :

- Joint Proccession (Figure 2.5) [2] : cette technique vise à faire coopérer les SB pour :
 - soit exploiter des cellules adjacentes afin de transmettre conjointement les informations à un même utilisateur.
 - soit sélectionner dynamiquement la SB la plus apte à transmettre les données à un utilisateur en fonction de sa position (handover immédiat).

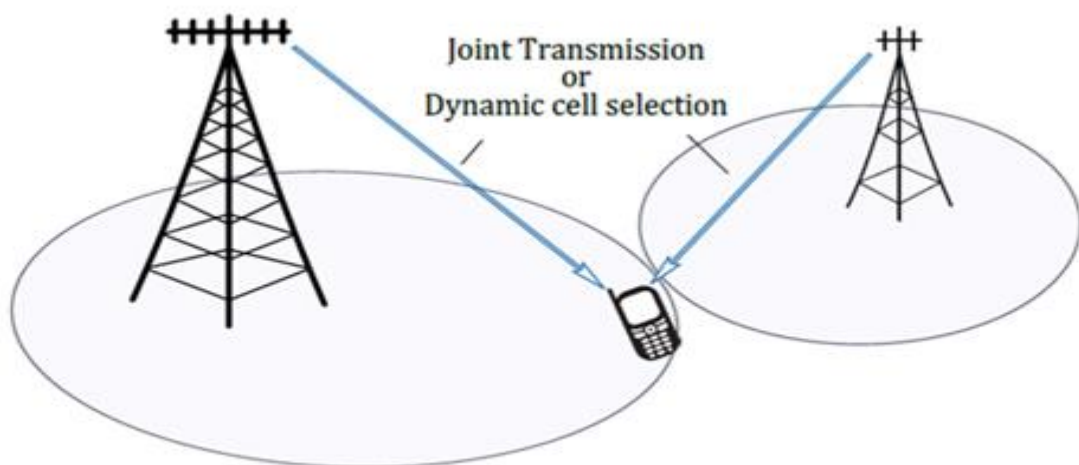


Figure 2.5 – Transmission Conjointe

- CB / CS (Figure 2.6) [2] : le Coordinated Beamforming / Coordinated Scheduling permet, au travers de cette communication inter-cellules, la modification du diagramme de rayonnement de chaque SB 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 visé. Une technique CoMP nécessite donc de pouvoir centraliser tous les calculs, ce qui soulève plusieurs problèmes de contamination que nous allons voir dans la section suivante.

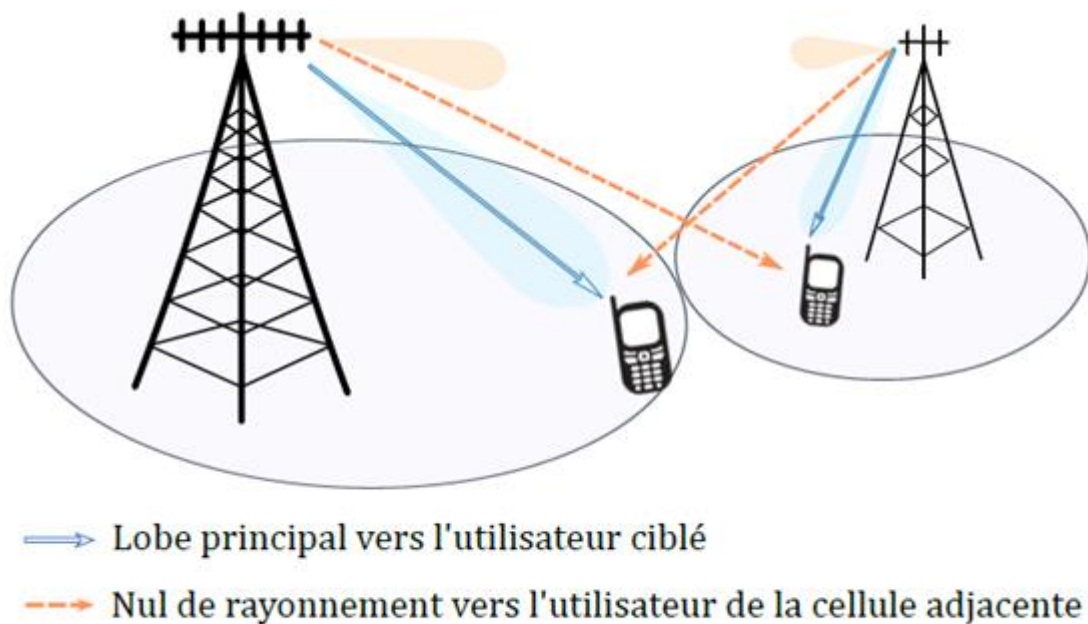


Figure 2.6 – Coordinated Beamforming / Coordinated Scheduling

2.7 Contamination des pilotes

Pour atteindre la capacité du MIMO massif, l'information précise sur le canal (atténuations petites et larges échelle) qu'on appelle (CSI) doit être estimée. À moins que plusieurs défis ne soient confrontés à l'acquisition des canaux. Par exemple, la contamination des pilotes est l'une des principales difficultés rencontrées pour une estimation précise.

L'estimation des canaux à travers l'entraînement a lieu dans deux états, soit par feedback, soit par schéma de réciprocité. Ainsi, l'apprentissage de canal peut être effectué via un système de duplexage par répartition en fréquence (FDD), où le retour d'information CSI aura lieu, ou via un schéma TDD (Time Division Duplexing), où la réciprocité de canal sera considérée. Le schéma TDD est préféré dans la littérature puisqu'il n'a besoin que d'une estimation de canal

alors que FDD a besoin d'estimation et de retour d'information. En outre, à mesure que le nombre d'antennes augmente, la taille de l'information de retour augmente éventuellement [4]. Dans le schéma TDD, la réciprocité de canal devrait être considérée, où le canal sur la liaison montante est supposé être approximativement égal à la transposition de celle-ci à la session de liaison descendante [4].

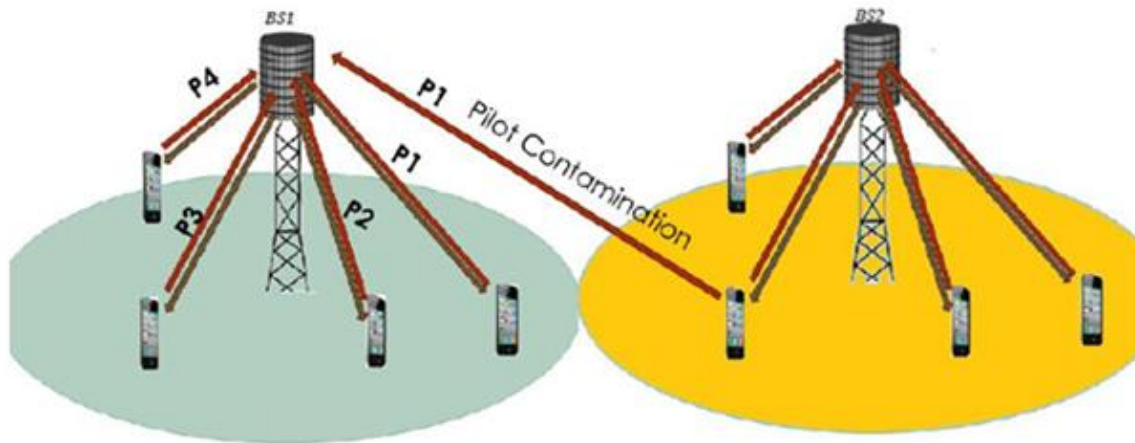


Figure 2.7 – Contamination de pilotes

2.7.1 Acquisition CSI

L'une des principales tâches du système MIMO Massif est l'acquisition de CSI précis, qui est également considéré comme un problème particulier dans de nombreux systèmes de communication sans fil 4G et 5G. Lorsque le CSI est plus précis, il permet d'augmenter la précision de focalisation du faisceau en liaison descendante et de collecter des données avec une puissance supérieure pendant la session de liaison montante [4].

2.7.2 Méthodes d'apprentissage

Une séquence pilote qui est connue à la fois du récepteur et de l'émetteur est utilisée pour estimer le canal entre le terminal utilisateur et la station de base. Deux schémas différents le font, le premier étant le schéma de multiplexage par répartition dans le temps standard, et le second schéma est appelé pilotes superposés. Considérant l'apprentissage de pilote classique, chaque trame contient une partie dédiée à l'envoi des pilotes. Cependant, en utilisant un schéma pilote superposé, les pilotes se superposent aux données pendant la séance d'entraînement [3].

2.8 Sources de contamination du pilote

Dans cette section, nous considérons les principales sources de contamination du pilote, en commençant par la réutilisation des pilotes non orthogonaux et en passant par la dégradation du matériel et la non-réciprocité dans l'émetteur-récepteur [4].

2.8.1 Réutilisation pilote non-orthogonale

En supposant une cellule L , où une bande de fréquence est partagée entre toutes les cellules, l'interférence intracellulaire est considérée comme négligeable en raison de l'orthogonalité des pilotes dans la même cellule. Cependant, étant donné que des cellules adjacentes peuvent rencontrer les mêmes séquences pilotes, une interférence entre cellules peut se produire. Le facteur de réutilisation augmentera directement l'effet de contamination entraînant une dégradation sévère des performances. Cela commence dans la session de liaison montante, alors que BS essaie de séparer les signaux pilotes. Cependant, en raison de l'absence d'orthogonalité de séquence pilote entre plusieurs utilisateurs, la BS ne parviendra pas à séparer les signaux d'utilisateur. Par conséquent, une estimation CSI inexacte sera formée [4].

2.8.2 Déficience matérielle (Hardware Impairment)

Plusieurs études ont été réalisées sur l'effet de la dégradation du matériel sur MIMO massif. Selon des études sur des systèmes expérimentaux, ils déclarent que les composants matériels en radiofréquence sont sujets à des dégradations matérielles telles qu'un déséquilibre en quadrature, une erreur de quantification, un bruit de phase et une non-linéarité d'amplificateur[4].

2.8.3 Émetteur-récepteur non-réciproque

En considérant le système MIMO massif TDD, les canaux des liaisons montantes et descendantes sont supposés être réciproques puisqu'ils fonctionnent à la même fréquence [4].

2.9 Contamination du pilote de liaison montante

Idéalement, chaque terminal d'un système MIMO Massif est assigné à une séquence orthogonale de pilotes de la liaison montante. Cependant, le nombre maximal de séquences pilotes orthogonales qui peuvent exister, est borné par la longueur de l'intervalle de cohérence divisé par l'écart de propagation de canal. Certaines approches utilisées pour atténuer la contamination des pilotes sont énumérées ci-dessous [4].

- **Allocation du pilote** : Une façon qui consiste à utiliser un facteur de réutilisation des fréquences moins agressif pour les pilotes. Cette technique pousse les cellules contaminantes

plus loin. Il est également possible de coordonner l'utilisation des pilotes ou l'allocation adaptative des séquences pilotes aux terminaux distincts du système.

- **Estimation intelligente** : par exemple, des algorithmes d'estimation qui évitent l'utilisation de pilotes pourrait également atténuer ou supprimer les conséquences de la contamination du pilote.

2.10 Contamination pilote dans la liaison montante et la liaison descendante

Le schéma de communication bidirectionnel pendant la trame TDD comprend la liaison montante et la liaison descendante, où les pilotes d'entraînement sont téléchargés pendant la session de liaison montante. Dans cette sous-section, une brève discussion sur la session de liaison montante et la session de liaison descendante sera présentée. Elle éclairera la contamination du pilote de liaison montante dans ce qui suit [3].

2.10.1 Performances de liaison montante

Pendant la session de liaison montante, chaque terminal d'utilisateur télécharge une séquence pilote d'entraînement de longueur τ vers la station de base. Cependant, en raison de l'intervalle de cohérence de canal limité, un pool de séquences de pilote orthogonal limité n'est pas suffisant pour tous les terminaux d'utilisateurs. Par conséquent, la réutilisation de la séquence pilote peut avoir lieu, en particulier dans les cellules croisées.

2.10.2 Session de liaison descendante

Après avoir estimé le CSI à partir de la session de formation pendant le téléchargement, BS peut utiliser le CSI estimé pour pré-coder les données pour chaque utilisateur. Cependant, si le CSI est imparfait, la qualité du signal pré-codé peut être dégradée. Cela est dû à de nombreux facteurs, où nous sommes intéressés à présenter l'effet de contamination pilote comme un défi majeur.

2.11 Atténuation de la contamination du pilote

Cette section examine les méthodes proposées pour éliminer ou atténuer la contamination des pilotes dans les systèmes MIMO massif. Deux types d'approches sont considérés comme traitant du problème de contamination du pilote. Le premier type est les pilotes décalés dans le temps, le deuxième type est l'estimation de canal non linéaire [3].

2.11.1 Pilotes décalés dans le temps

Le pilote à décalage temporel a été introduit dans plusieurs études pour atténuer la contamination du pilote. Cette technique attribue la transmission de pilotes non orthogonaux entre des cellules croisées à des décalages temporels différents. En d'autres termes, la position du pilote est déplacée sur la trame TDD pour chaque cellule qui réutilise le même pool pilote. Compte tenu de ce système, la contamination du pilote a été éliminée si les pilotes ne se chevauchent pas dans le temps [4].

2.11.2 Estimation de canal non linéaire

L'estimation de canal non-linéaire est proposée pour éliminer la contamination du pilote en contrôlant la puissance et la projection du sous-espace. Cette méthode montre la capacité de cet algorithme à déterminer le sous-espace du signal préféré.

2.12 Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé sur les interférences MIMO massifs et la contamination du pilote qu'ils sont devenus une préoccupation majeure dans la conception et le fonctionnement des systèmes de communication sans fil. Puis on a passé aux solutions qui nous permet d'éviter cette crise de contamination de pilote tel que l'atténuation de la contamination de pilote.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le problème des interférences multi-cellule ainsi que les différents niveaux de coopération multicellulaire, les sources de contamination de pilotes, la contamination de pilote de la liaison montante et de la liaison descendante. Ensuite nous avons vu deux solutions pour atténuer le problème de la contamination des pilotes à savoir :

- l'allocation du pilote qui consiste à utiliser un facteur de réutilisation des fréquences moins agressif pour les pilotes.
- l'estimation intelligente qui évite l'utilisation des pilotes dans l'estimation qui pourrait également atténuer ou supprimer les conséquences de la contamination du pilote.

Chapitre 3 : Simulation et résultats

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on analyse les effets de la contamination des pilotes d'un système Massive MIMO sur la liaison montante et descendante avec un schéma TDD (*Time Division Duplexing*)

3.2 Présentation de la liaison montante du système étudié

Nous considérons un système cellulaire avec un nombre L des cellules numérotées $1, 2, \dots, L$. Chaque cellule comprend une station de base avec M antennes et K ($K < M$) utilisateurs ayant chacun une seule antenne. Soit P_f la puissance moyenne (pendant la transmission) de la station de base et P_r la puissance moyenne de chaque utilisateur.

Le facteur de propagation entre la $m^{\text{ème}}$ antenne de la station de base de la $l^{\text{ème}}$ cellule et le $k^{\text{ème}}$ utilisateur de la $j^{\text{ème}}$ cellule est $\sqrt{\beta_{jlk}} h_{jlk m}$. Les $\{\beta_{jlk}\}$ sont des valeurs qui modélisent le Shadowing et le Pathloss, et ils varient lentement et leur estimation s'effectue sur une longue période de temps [5]. Nous supposons une réciprocité de canal pour les liaisons montante et descendante, c'est-à-dire que le facteur de propagation $\sqrt{\beta_{jlk}} h_{jlk m}$ est le même pour les deux liaisons. L'évanouissement de bloc, $\{h_{jlk m}\}$ reste constant pendant une durée de T symboles. Les bruits additifs au niveau de chaque terminal sont des variables aléatoires gaussiennes i.i.d. Les équations du système décrivant les signaux reçus à la station de base et les utilisateurs sont données dans la section suivante.

3.3 Étude et Simulation du modèle mathématique de la liaison montante

1.5.4 Phases de la communication de la liaison montante :

- Apprentissage sur la liaison montante et transmission de données : La phase d'entraînement de liaison montante consiste en des utilisateurs transmettant des pilotes d'entraînement et des stations de base qui obtiennent des estimations de canaux.
- La phase de transmission de données consiste en des stations de base qui transmettent des données aux utilisateurs via un pré-codage d'émission.

3.3.1 Apprentissage et estimation du canal sur la liaison montante

Dans cette section, on calcule l'estimation MMSE du canal entre une station de base (BS) donnée et tous les autres utilisateurs incluant ceux de cette BS.

Au début de chaque intervalle de cohérence, le signal d'apprentissage y_{lm} qui arrive de tous les utilisateurs de toutes les cellules à la $m^{\text{ième}}$ antenne de la $l^{\text{ième}}$ cellule est donné par l'équation (3.1). Le signal y_{lm} est constitué de la somme des séquences d'apprentissage qui sont des vecteurs colonnes de longueur τ [7].

$$y_{lm} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{p_r \tau \beta_{jlk}} h_{jlk} \varphi_{JK} + w_{lm} \quad (3.1)$$

Où :

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

Le signal d'apprentissage Y_l qui arrive des utilisateurs de toutes les cellules à toutes les antennes de la BS de la $l^{\text{ième}}$ cellule est donné par l'équation (3.2).

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

Où

- $Y_l = [y_{l1} y_{l2} \dots y_{lm}]$ et $W_l = [w_{l1} w_{l2} \dots w_{lm}]$ sont des matrices de dimensions $\tau \times M$.
- $\Psi_j = [\varphi_{j1} \varphi_{j2} \dots \varphi_{jK}]$ est une matrice de dimensions $\tau \times K$.
- $D_{jl} = \text{diag} \{[\beta_{jl1} \beta_{jl2} \dots \beta_{jlk}]\}$: Matrice diagonale

- $H_{jl} = \begin{bmatrix} h_{jl11} & \dots & h_{jl1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{jK1} & \dots & h_{jKM} \end{bmatrix}$: matrice de dimensions $K \times M$ (3.3)

Pour générer les séquences d'apprentissages ou pilotes, nous utilisons la matrice d'Hadamard dont voici un exemple pour $\tau = 4$, et $K = 4$:

$$Hadamard_{Matrice} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Donc voici les pilotes de chaque utilisateur qui vont composer la matrice des pilotes Ψ_j :

$$P_1 = \frac{1}{\sqrt{\tau}} [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T; P_2 = \frac{1}{\sqrt{\tau}} [1 \ -1 \ 1 \ -1]^T;$$

$$P_3 = \frac{1}{\sqrt{\tau}} [1 \ 1 \ -1 \ -1]^T; P_4 = \frac{1}{\sqrt{\tau}} [1 \ -1 \ -1 \ 1]^T;$$

Pour $\tau = 8$ et $K = 4$, voici la matrice :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

La matrice des pilotes Ψ_j est constituée en prenant uniquement les 04 premières colonnes de la matrice d'Hadamard en normalisant par $\frac{1}{\sqrt{\tau}}$ de sorte que $\psi_{jk}^T \times \psi_{jk} = 1$.

Pour estimer le canal à partir du signal reçu Y_l , l'algorithme MMSE est utilisé, son expression est donnée par [5] :

$$\hat{H}_{il}^{mmse} = \sqrt{p_r \tau} D_{jl}^{\frac{1}{2}} \Psi_j^\dagger \left(I + p_r \tau \sum_i^L \Psi_i D_{il} \Psi_i^\dagger \right)^{-1} Y_l \quad (3.4)$$

L'estimation MMSE du canal entre cette station de base et de tous les utilisateurs est donnée par

$$\hat{H}_l = [\hat{H}_{1l} \hat{H}_{2l} \dots \hat{H}_{jl}] \quad (3.5)$$

3.3.2 Résultat du l'EQM avec l'algorithme MMSE

Dans cette section nous faisons varier le nombre de cellules L entre 1 et 5. Le facteur de réutilisation des pilotes est de 1, c'est-à-dire que toutes les cellules utilisent les mêmes

séquences pilotes (les pilotes inter-cellules ne sont pas orthogonaux). Chaque cellule se compose de $K = 4$ utilisateurs et une station de base (BS) contenant $M = 8$ antennes. Dans la même cellule, les pilotes sont orthogonaux.

Une estimation du canal sur la liaison UL est réalisée avec l'algorithme MMSE donné par l'équation (3.4). Nous avons calculé l'erreur quadratique moyenne EQM selon l'équation suivante et elle représente l'erreur au carré entre le canal H_{jl} donné par la matrice (3.3) et \widehat{H}_{jl} estimé donné par la matrice (3.4).

$$EQM = \frac{1}{K \times M} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M (h_{ij} - \widehat{h}_{ij}^{mmse})^2$$

On a généré des séquences orthogonales en utilisant la matrice d'Hadamard. Les paramètres du problème étudié sont donnés dans le tableau (3.1). La figure 3.2 montre les résultats de la simulation obtenus en utilisant 1000 réalisations de Monte-Carlo.

Le tableau 3.1 donne les paramètres de simulation utilisés avec Cinq cellules.

Puissance d'UT P_r	10 dB
Puissance de la BS P_f	10 dB
Le nombre de pilotes τ	4
Nombre de cellules L	5
Nombre d'utilisateurs K	4
Nombre d'antennes M	8
La variance du bruit	1

Table 3.1 Paramètres de simulation

Les étapes de simulation sont données dans l'organigramme suivant :

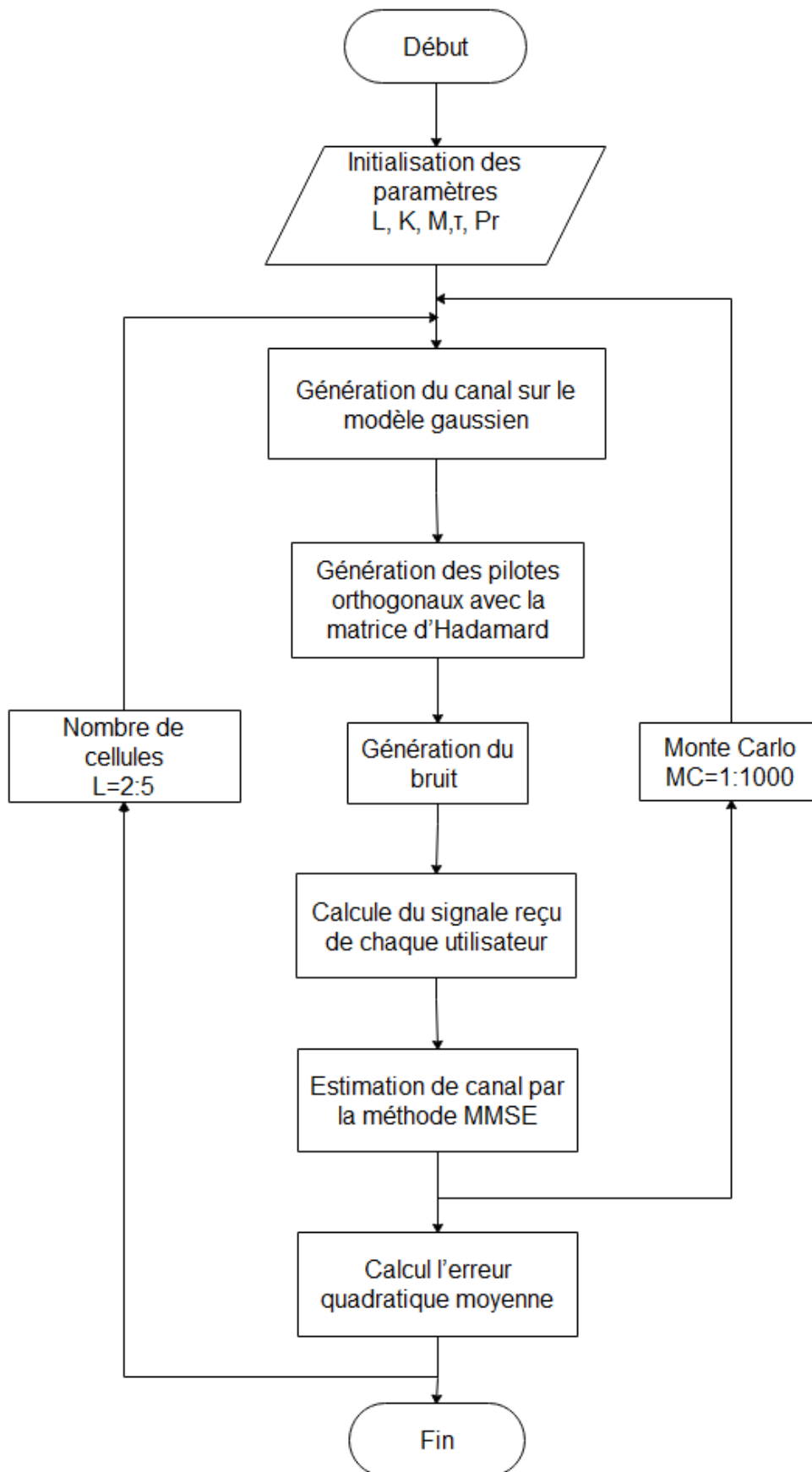


Figure 3.1 – Organigramme du EQM avec l’algorithme MMSE

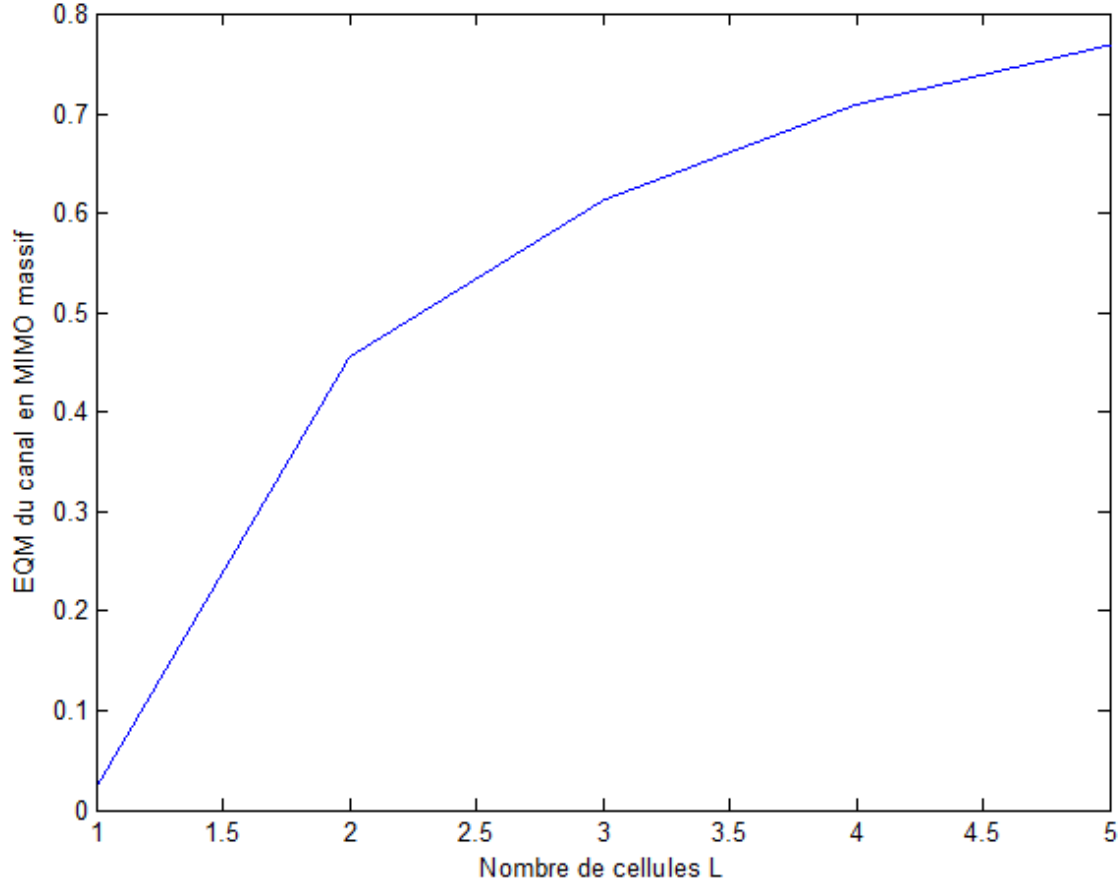


Fig.3.2 : L'erreur quadratique moyenne (EQM) en fonction de nombre de cellules L

La figure 3.2 Montre que l'erreur quadratique moyenne (EQM) augmente avec l'augmentation du nombre L de cellules. En fait, en augmentant le nombre de cellules réutilisant les pilotes de la cellule utile, l'interférence des pilotes augmente causant une dégradation de l'estimation MMSE du canal en uplink.

3.4 Analyse de l'effet de la contamination des pilotes en DL :

Dans cette section nous analysons l'effet de la contamination du pilote sur l'efficacité spectrale R_j pour l'utilisateur j donnée par l'équation (3.6) en fonction du nombre d'antennes [7].

$$R_j = C \left(\frac{P_f \beta_{jj} \frac{P_r \tau \beta_{jj}}{1 + P_r \tau \sum_{i=1}^L \beta_{ij}} E^2(\theta)}{1 + P_f \beta_{jj} \frac{P_r \tau \beta_{jj}}{1 + P_r \tau \sum_{i=1}^L \beta_{ij}} \text{var}(\theta) + \sum_{l \neq j} P_f \beta_{jl} \frac{P_r \tau \beta_{jl}}{1 + P_r \tau \sum_{i=1}^L \beta_{il}} E(\theta^2) + \sum_{l=1}^L P_f \beta_{jl} \frac{1 + P_r \tau \sum_{i \neq j} \beta_{il}}{1 + P_r \tau \sum_{i=1}^L \beta_{il}}} \right) \quad (3.6)$$

Où

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

R_j : l'efficacité spectrale (bits/s/Hz)

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

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

$\Gamma(.)$ est la fonction Gamma.

Nous considérons un exemple de réseau mobile sans fil de base (figure 3.2) constitué de deux cellules pour comprendre l'impact de la contamination du pilote. La cellule- j contaminée contient un nombre $K=4$ utilisateurs ayant chacun une puissance $p_r = 10$ dB et une station de base contenant un nombre M d'antennes qui varie jusqu'à 200 antennes et une puissance $p_f = 10$ dB. On suppose que la deuxième cellule contaminatrice contient un nombre $K=4$ utilisateurs. Les séquences d'apprentissage orthogonales utilisées dans la 1ère sont réutilisées dans la 2^{ème} cellule.

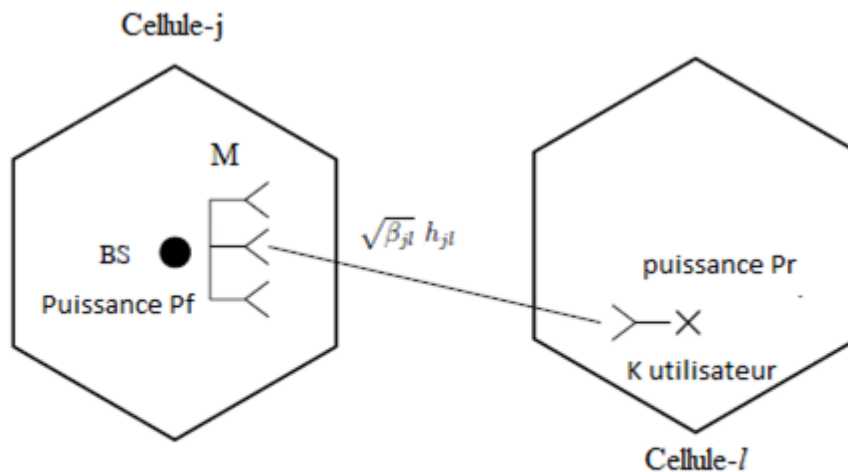


Fig. 3.2 : La BS avec $M=200$ antennes dans la cellule- j et K utilisateurs dans la cellule- l adjacente

Le tableau 3.2 donne les paramètres de simulation utilisés avec deux cellules $L=2$.

B_{ij} avec $i = j$	1
B_{ij} avec $i \neq j$	0.8
Nombre de pilotes τ	4
Puissance de la BS	10dB
Puissance d'UT	10dB
Nombre d'antennes M	200
Table 3.2 Paramètres de simulation.	

Les résultats de simulation sont donnés par la figure 3.2 pour un nombre de cellules $L=2$ et une station de base contenant un nombre d'antennes $M=200$.

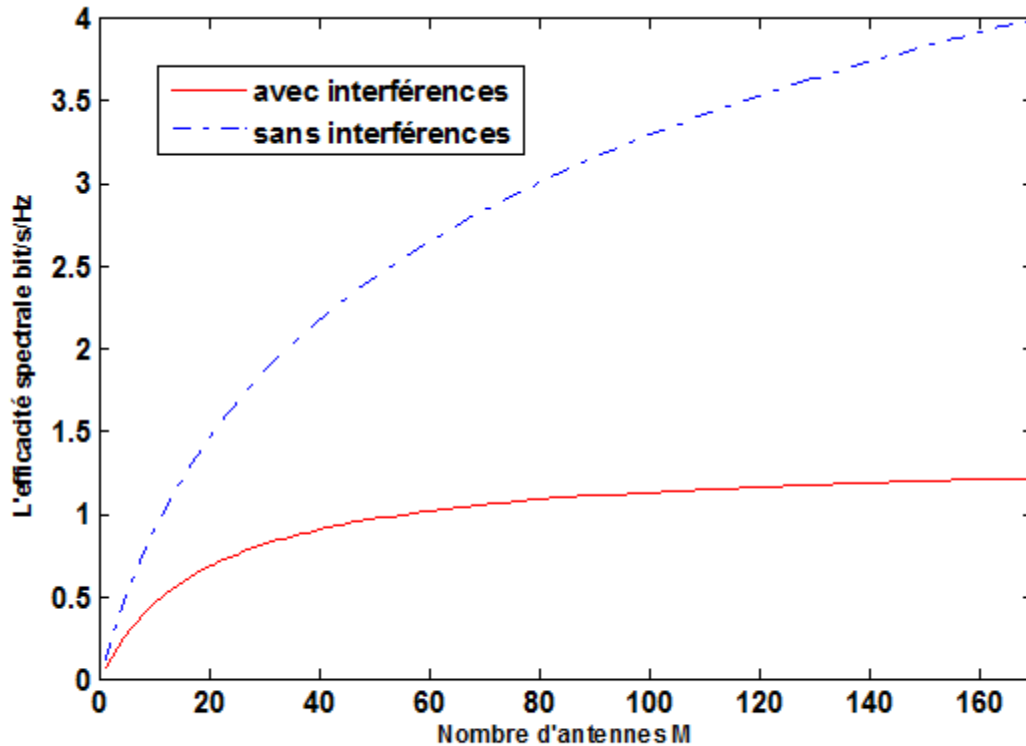


Figure.3.3 L'efficacité spectrale (en bit/s/ Hz) en fonction de nombre M d'antenne.

La figure 3.3 illustre l'efficacité spectrale en bit/s/Hz en fonction du nombre d'antennes M au niveau de la station de base de la cellule utile et un nombre total de cellules $L=2$. Deux cas sont considérés. Le premier cas, les pilotes utilisés dans les deux cellules par tous les utilisateurs sont orthogonaux, donc pas d'interférences. Le deuxième cas, la deuxième cellule réutilise les pilotes de la première cellule et cause des interférences qui induit une contamination des pilotes au niveau de la station de base. Cette contamination dégrade l'estimation du canal et par conséquent diminue le rapport signal sur bruit. L'impact est observé sur l'efficacité spectrale en Downlink. L'efficacité spectrale augmente lorsqu'on augmente le nombre d'antennes au niveau de la station de base. Mais elle est très affecté par la contamination des pilotes et semble stagner à partir de la valeur $M = 100$ du nombre d'antennes.

On refait la simulation en prenant un facteur de réutilisation 2 (R_2), c'est-à-dire 3 cellules, notre cellule utile, la deuxième cellule adjacente i avec des pilotes orthogonaux avec la première cellule (pas d'interférence), ensuite

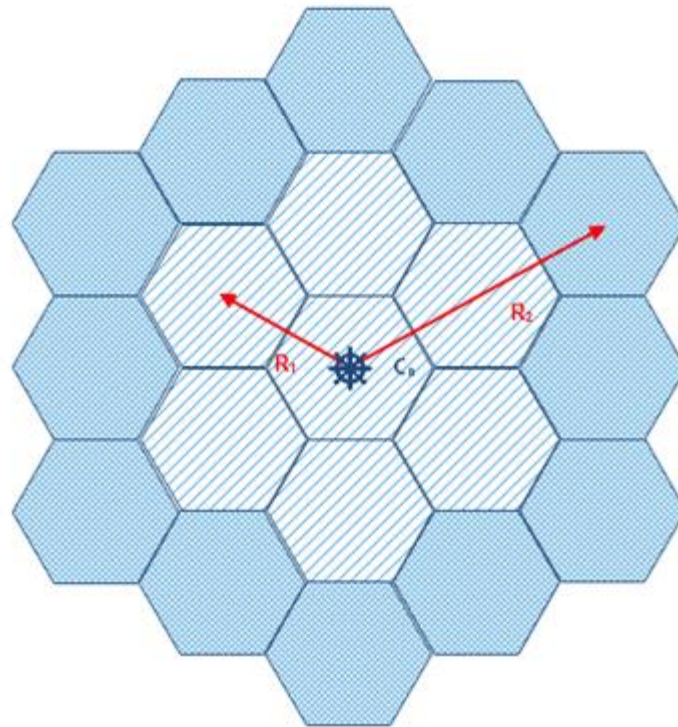


Fig.3.4 : plan de réutilisation selon le nombre de pilote orthogonaux disponible.

On peut envisager pour réduire l'interférence un plan de réutilisation selon le nombre de pilote orthogonaux disponible.

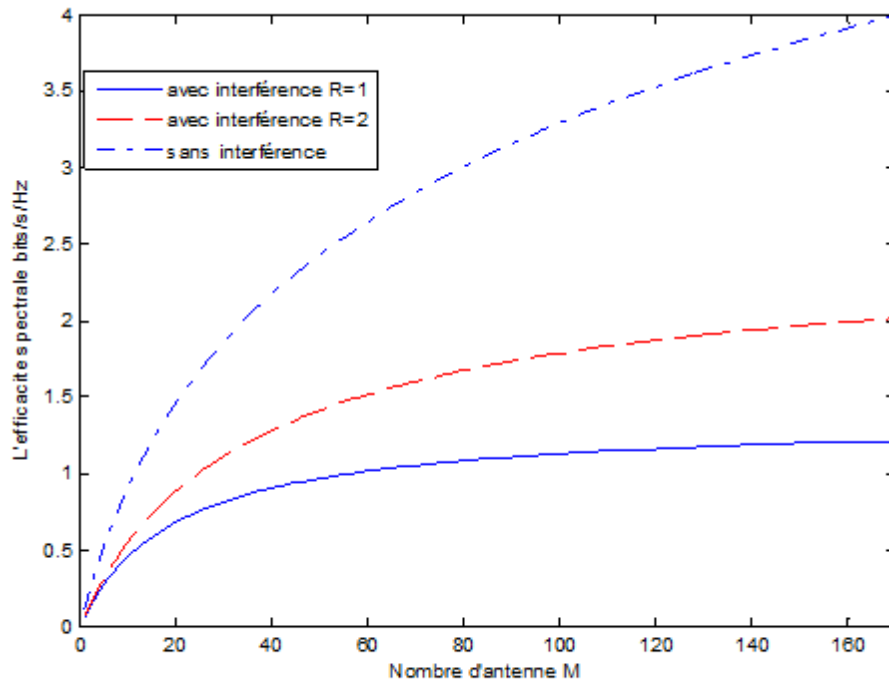


Fig.3.4 : L'efficacité spectrale (en bits/s/Hz) en fonction de nombre M d'antenne

La figure 3.4 illustre l'efficacité spectrale en bit/s/Hz en fonction du nombre d'antennes M au niveau de la station de base de la cellule utile et un nombre total de cellules $L=3$. En prenant un facteur de réutilisation 2 (R2), c'est-à-dire 3 cellules, notre cellule utile, la deuxième cellule adjacente i avec des pilotes orthogonaux avec la première cellule (pas d'interférence), ensuite la troisième cellule avec $\beta = 0.5$ qui utilise les mêmes pilotes que la première (donc interférence). L'efficacité spectrale augmente pour R2 par rapport le R1 car les cellules sont plus éloignées.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu les résultats de simulation pour la problématique posée dans ce mémoire qui est la contamination du pilote dans les liaisons montantes TDD (Time Division Duplexing). On a vu que l'erreur quadratique moyenne (EQM) augmente avec l'augmentation du nombre L de cellules interférentes. En fait, en augmentant le nombre de cellules réutilisant les pilotes de la cellule utile, l'interférence des pilotes augmente causant une dégradation de l'estimation MMSE du canal en uplink. D'un autre côté, l'efficacité spectrale augmente lorsqu'on augmente le nombre d'antennes au niveau de la station de base. Mais elle est très affectée

par la contamination des pilotes et semble stagner à partir de la valeur $M = 100$ du nombre d'antennes pour un facteur de réutilisation $R=1$.

Conclusion générale

Le MIMO Massif est une technologie sans fil qui utilise la technologie de communication multiutilisateur et qui a suscité d'énormes intérêts de recherche ces dernières années. Chaque station de base (BS) utilise plusieurs antennes pour desservir des dizaines d'utilisateurs dans chaque cellule simultanément. Par conséquent, le MIMO massif est l'une des technologies clés pour la prochaine génération des réseaux sans-fil. Ce projet de master est consacré à l'étude des systèmes MIMO massif multi-utilisateur dans le cas de contamination des pilotes. Le mode TDD (*Time Division Duplexing*) est adopté car il permet d'avoir une réciprocité du canal et nous éviter la transmission du CSI dans la liaison de retour. La transmission simultanée des utilisateurs dans la même cellule, impose que les pilotes (séquences d'apprentissage) soient orthogonaux. La limitation en nombre de pilotes (durée de la séquence) qui doit être respectée pour éviter de dépasser l'intervalle de cohérence, nous oblige à réutiliser ses séquences dans les cellules adjacentes (pilotes non orthogonaux). La conséquence directe est la contamination des pilotes d'une cellule donnée par les pilotes provenant des cellules adjacentes. Nous avons alors, analysé l'impact de la contamination pilotes sur l'estimation MMSE du canal de la liaison montante (UL) en calculant l'EQM.

Nous avons observé que l'erreur quadratique moyenne (EQM) augmente avec l'augmentation du nombre L de cellules interférentes. En fait, en augmentant le nombre de cellules réutilisant les pilotes de la cellule utile, l'interférence des pilotes augmente causant une dégradation de l'estimation MMSE du canal en uplink.

Par la suite, nous avons examiné le résultat de cette contamination sur l'efficacité spectrale en liaison descendante (DL) et en fonction du nombre d'antennes utilisées. Cette efficacité est très affectée par la présence de pilotes contaminés.

Il y a donc nécessité de prendre ce problème d'interférences en considération. L'une des solutions préconisées est d'effectuer un plan de réutilisation des pilotes sur les cellules les plus éloignées avec un facteur de réutilisation $R > 1$. Il existe tout de même, d'autres méthodes que nous souhaitons laisser comme perspective d'un futur travail de PFE. Il serait aussi intéressant de tester d'autres séquences orthogonales que les séquences d'Hadamard.

Bibliographie

- [1] N. Hassan, X. Fernando “Massive MIMO Wireless Networks: An Overview Electronics” 2017, 6, 63; 5 September 2017.
- [2] A. Roze “Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d’onde millimétriques”.Thèse de doctorat Electronique. INSA de Rennes, 2016.
- [3] A. Diallo. “Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO”. Université Nice Sophia Antipolis, 2007.
- [4] A. Abboud“Interférence Mitigation in 5G Mobile Networks”, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 22 septembre 2017.
- [5] J. Jose, *Student Member, IEEE*, A. Ashikhmin, *Senior Member, IEEE*, Thomas L. Marzetta, *Fellow, IEEE*, and Sriram Vishwanath, *Senior Member, IEEE* ‘Pilot Contamination and Precoding in Multi-Cell TDD Systems’ 8, AUGUST 2011.
- [6] A.Oukachi. Beamforming et detection pour signaux non circulaires et/ou non gaussiens (algorithme et performance). Autre. Institut Nationale des Télécommunication, 2010.
- [7] Jubin Jose*, Alexei Ashikhminl, Thomas L. Marzetta, and Sriram Vishwanath ‘ ‘ Pilot Contamination Problem in Multi-Cell TDD Systems’ ’ Laboratory for Informatics, Networks and Communications (LINC) Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin, Austin, ISIT 2009, Seoul, Korea, June 28 - July 3, 2009.