



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID - TLEMCCEN**

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATION

**MEMOIRE**

Pour l'obtention du

**DIPLOME DE MASTER**

**EN**

**RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS**

**Présenté par :**

**Mme TRARI TANI AMEL**

**MELLE TAHRI ASMA**

***THEME***

**L'ESTIMATION DE CANAL POUR  
LES SYSTEMES MIMO MASSIF**

**Soutenu en octobre 2020 devant le jury :**

<b>M HADJILA Mourad</b>	Maitre de conférences	Univ. Tlemcen	Président.
<b>M BORSALI Riad</b>	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur.
<b>M BAHRI Sidi Mohammed</b>	Maitre de conférences	Univ. Tlemcen	Encadreur.

***Année universitaire : 2019-2020***

## Remerciements

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

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Monsieur S.M. BAHRI, Maître de Conférences à l'université d'ABOU BEKR BELKAID, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives. Son expérience en recherche et son soutien permanent, nous ont permis de mener à bien ce mémoire. Merci pour tout ce qu'il a pu nous apporter. C'est grâce à vous que le travail a pris cette forme.

Nous remercions les membres du jury, Monsieur HADJILA Mourad, Maître de Conférences à l'université d'ABOU BEKR BELKAID, d'avoir l'amabilité de présider le jury, Mr BORSALI Riad, Professeur à l'université d'ABOU BEKR BELKAID, d'avoir accepté d'examiner notre travail. Espérant qu'il le trouve correspondant à leurs attentes avec nos sincères remerciements.

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

## Dédicace

*Ce mémoire est dédié à*

*Nos parents, Nos familles,*

*Nos ami(e)s,*

*Tous ceux qui nous aiment et  
qu'on aime.*

**TRARI TANI AMEL & TAHRI ASMA**

## Résumé

La nécessité d'augmenter le nombre d'utilisateurs aux réseaux mobiles avec des débits de données plus élevés et une meilleure fiabilité tout en consommant moins d'énergie a imposé le passage à une nouvelle génération de communication mobile : la 5G, qui est basée sur la technique MIMO massif. Cette technique est une forme du système MIMO multi utilisateurs où les stations de bases sont équipées d'un grand nombre d'antennes stimulant le principe de la transmission simultanée par multiplexage spatial.

Nous présentons dans ce mémoire un système MIMO massif associé avec la technique d'estimation NMSE, qui est une technique permettant de connaître notre canal de transmission de manière à ce que le signal transmis soit facilement récupéré à la réception. Notre simulation par MATLAB dans le cas de contamination pilote avec présence des interférences permet de vérifier les performances du système. Les résultats de simulation montrent que la technique NMSE réalise une bonne estimation dans un canal corrélé avec contamination pilote.

**Mots clé** : 5G, MIMO Massif, MIMO Multi-utilisateurs, NMSE, communication mobile, contamination pilote, l'estimation de canal.

## Abstract

The need to increase the number of users to mobile networks with higher data rates and better reliability while consuming less energy has forced the switch to a new generation of mobile communication: 5G, which is based on massive MIMO technique. This technique is a form of the multi-user MIMO system where the base stations are equipped with a large number of antennas stimulating the principle of simultaneous transmission by spatial multiplexing.

We present in this dissertation a massive MIMO system associated with the NMSE estimation technique, which is a technique that allows us to know our transmission channel so that the transmitted signal is easily recovered on reception. Our simulation by MATLAB in the case of pilot contamination with presence of interferences makes it possible to verify the performance of the system. The simulation results show that the NMSE technique achieves a good estimate in a channel correlated with pilot contamination.

**Keywords**: 5G, Massive MIMO, MU-MIMO, NMSE, Communication Mobile, Contamination Pilote, channel estimation.

## تلخيص

أدت الحاجة الى زيادة عدد المستخدمين لشبكات الهاتف المحمول ذات معدلات البيانات الأعلى والموثوقية الأفضل مع استهلاك طاقة أقل إلى هذه التقنية التحول إلى جيل جديد من الاتصالات المتنقلة: الجيل الخامس، والتي تعتمد على تقنية متعدد هوائيات الإرسال و الاستقبال الضخمة، هي شكل من أشكال نظام متعدد الهوائيات-متعدد المستخدمين حيث يتم تجهيز المحطات القاعدية بعدد كبير من الهوائيات التي تحفز مبدأ الإرسال المتزامن عن طريق تعدد الإرسال المكاني.

نقدم في هذه الأطروحة نظام متعدد هوائيات الإرسال و الاستقبال ضخم مرتبط بتقنية تقدير، وهي تقنية تسمح بمعرفة قناة الإرسال لدينا بحيث يمكن استرداد الإشارة المرسله بسهولة عند الاستقبال. إن محاكاتها بواسطة "ماتلاب" في حالة التلوث التجريبي مع وجود تداخلات تجعل من الممكن التحقق من أداء النظام. تظهر نتائج المحاكاة أن تقنية التقدير تحقق تقديرًا جيدًا في قناة مرتبطة بالتلوث التجريبي.

**الكلمات المفتاحية** : الجيل الخامس ، تقنية التقدير ، تعدد المستخدمين-متعدد الهوائيات ، الاتصالات المتنقلة ، التلوث التجريبي.

# **Table des matières**

Résumé.....	I
Table des matières.....	III
Liste des figures .....	VI
Listes des acronymes et abréviations.....	VIII
<b>Introduction générale .....</b>	<b>2</b>
<b>Chapitre 1 : La 5<sup>ème</sup> Génération .....</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction.....	5
1.2 Evolution de communications mobiles.....	5
1.2.1 L'apparition de la 1G.....	6
1.2.2 La deuxième génération 2G.....	7
1.2.3 La troisième génération 3G.....	8
1.2.4 La quatrième génération 4G.....	8
1.2.5 La cinquième génération 5G.....	9
1.3 Réseaux mobile de 5G.....	9
1.3.1 Les premiers point forts de 5G.....	9
1.3.2 Les caractéristiques de la 5G.....	10
1.3.2.1 Communication dans la plage des ondes millimétriques.....	10
1.3.2.2 Entrée multiple sortie multiple massive (mMIMO).....	11
1.3.2.3 Mini cellules et réutilisation du spectre électromagnétique.....	12
1.4 Réseaux cellulaires.....	14
1.5 Les applications de la 5G.....	15
1.6 Objectifs de la 5G.....	16
1.7 5G : New Radio.....	16
1.7.1 Scénarios de déploiement de NR.....	17
1.7.2 Numérolgies.....	18
1.7.3 Structure de trame.....	19
1.7.4 NR Resource Block .....	20
1.7.5 Bande passante du canal NR.....	21
1.8 Conclusion.....	21
<b>Chapitre 2 : La Technologie MIMO massif .....</b>	<b>22</b>

2.1 Introduction.....	23
2.2 MIMO.....	23
2.3 Principes du MIMO.....	24
2.4 Types de MIMO.....	24
2.4.1 MIMO – SISO .....	24
2.4.2 MIMO – MISO .....	25
2.4.3 MIMO – SIMO .....	26
2.4.4 MIMO – MIMO.....	26
2.5 MIMO Massif .....	28
2.5.1 Beamforming .....	29
2.5.2 MU-MIMO .....	30
2.6 Caractéristiques de MIMO Massif.....	30
2.6.1 TDD vs FDD pour le MIMO Massif.....	31
2.6.2 L'évolutivité .....	33
2.6.3 Propagation favorable.....	33
2.6.4 Un réseau d'antenne de la station de base n'a pas besoin d'être physiquement grand .....	33
2.7 Avantages du MIMO Massif .....	33
2.8 Types MIMO Massif.....	34
2.8.1 Système MIMO mono-utilisateur.....	34
2.8.2 MIMO massif multiutilisateur.....	35
2.8.3 MU- Massive MIMO avec Multi-Cell scénario.....	36
2.8.4 MIMO massif distribuée.....	37
2.9 Comparaison entre MIMO et MIMO massif.....	37
2.10 Utilité pour la 5G.....	38
2.11 Défis des systèmes MIMO Massifs.....	38
2.11.1 La contamination des séquences pilotes.....	39
2.11.2 Propagation Défavorable .....	40
2.12 Conclusion.....	40
<b>Chapitre 3 Simulation et résultat.....</b>	<b>41</b>
3.1 Introduction.....	42
3.2 Langage utilisé.....	42
3.3 Environnement de simulation.....	42

3.4 Les modèle des canaux.....	45
3.5 L'estimation MMSE et NMSE.....	47
3.6 Discussion des résultats de simulation.....	48
3.6.1 L'impact de la corrélation spatiale et la contamination pilot.....	48
3.6.2 L'impact de SNR sur l'estimation de NMSE de canal.....	48
3.6.3 L'impact de la corrélation spatiale sur l'estimation.....	50
3.6.4 L'impact de la contamination pilot sur l'estimation.....	51
3.7 Conclusion.....	54
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>56</b>
<b>Les références bibliographiques.....</b>	<b>58</b>

## **Liste des figures :**

<b>Figure 1.1</b> : Chronologie de l'évolution du réseau cellulaire mobile.....	6
<b>Figure 1.2</b> : Exemples d'appareils 1G.....	7
<b>Figure 1.3</b> : Atténuation en fonction de différentes fréquences.....	11
<b>Figure 1.4</b> : Principe de la technologie MIMO.....	12
<b>Figure 1.5</b> : réseaux a macro cellules et a petites cellules.....	13
<b>Figure 1.6</b> : exemple d'un système de petite antenne et du boitier qui accompagne.....	13
<b>Figure 1.7</b> : Un réseau cellulaire.....	14
<b>Figure 1.8</b> : Scénarios de déploiement de NR .....	17
<b>Figure 1.9</b> : Organisation des trames dans la 5G-NR.....	19
<b>Figure 1.10</b> : Longueur des slots pour chaque numérolgie.....	20
<b>Figure 1.11</b> : Numérolgie - Espacement des sous-porteuses.....	20
<b>Figure 1.12</b> : Canal 5G-NR.....	21
<b>Figure 2.1</b> : Schéma bloc d'un système MIMO.....	24
<b>Figure 2.2</b> : SISO - Single Input Single Output.....	25
<b>Figure 2.3</b> : MISO - Multiple Input Single Output .....	25
<b>Figure 2.4</b> : SIMO - Single Input Multiple Output.....	26
<b>Figure 2.5</b> : MIMO- Multiple Input Multiple Output.....	28
<b>Figure 2.6</b> : Modèle MIMO massif - M antennes et K utilisateurs.....	29
<b>Figure 2.7</b> : Système Massive MIMO en transmission multiutilisateurs.....	30
<b>Figure 2.8</b> : Types de configurations et déploiement d'une station de base pour le MIMO massif.....	31
<b>Figure 2.9</b> : Le gain écrasant de TDD sur FDD pour les UT.....	32
<b>Figure 2.10</b> : Single-User Massive MIMO.....	34
<b>Figure 2.11</b> : Système MU-MIMO massif. M-antennes de BS dessert K simple antenne UT.....	35
<b>Figure 2.12</b> : La BS dans la l-ième cellule et le k-ième UT dans la j-ième cellule.....	37

<b>Figure 2.13</b> : Illustration du concept de pilote contamination. (a) liaison montante (b) liaison descendante.....	39
<b>Figure 3.1</b> : illustration de la transmission UL MIMO massifs dans les cellules j et l.....	43
<b>Figure 3.2</b> : propagation LoS entre un utilisateur a antenne unique et une Bs.....	45
<b>Figure 3.3</b> : Modèle de corrélation spatiale à diffusion locale.....	46
<b>Figure 3.4</b> : propagation NLoS entre un utilisateur a antenne unique et une Bs.....	47
<b>Figure 3.5</b> : NMSE dans l'estimation MMSE d'un canal spatialement corrélé.....	50
<b>Figure 3.6</b> : L'impact de l'ASD $\sigma_\varphi$ sur l'estimation de canal.....	51
<b>Figure 3.7</b> : la variation de coefficient de corrélation en fonction de l'angle d'UE interférant.....	52
<b>Figure 3.8</b> : NMSE dans l'estimation du canal de l'utilisateur désiré lorsqu'il ya un utilisateur interférant, qui utilise le même pilote.....	53

## Acronymes et Abréviations

<b>1G</b>	<b>La première génération</b>
<b>2G</b>	<b>deuxième génération</b>
<b>3G</b>	<b>troisième génération</b>
<b>3GPP</b>	<b>3 rd Generation Partnership Project</b>
<b>4G</b>	<b>quatrième génération</b>
<b>5G</b>	<b>Cinquième Génération</b>
<b>AMPS</b>	<b>Advanced Mobile Phone System</b>
<b>ASD</b>	<b>Angular Standard Deviation</b>
<b>AWGN</b>	<b>Additive White Gaussian Noise</b>
<b>BS</b>	<b>Base Station</b>
<b>CDMA</b>	<b>Code Division Multiple Access</b>
<b>CP</b>	<b>Cyclic Prefix</b>
<b>CST</b>	<b>codage spatio-temporel</b>
<b>DL</b>	<b>Downlink</b>
<b>ETACS</b>	<b>Extended Total Access Communication System</b>
<b>FDD</b>	<b>Frequency -Division Duplex</b>
<b>eNB</b>	<b>evolved Node B</b>
<b>FDD</b>	<b>Frequency -Division Duplex</b>
<b>gNB</b>	<b>Next Generation NodeB</b>
<b>GSM</b>	<b>Global System for Mobile Communications</b>
<b>i.i.d</b>	<b>Distribution indépendant identique</b>

<b>IoT</b>	<b>Internet Of Things</b>
<b>LoS</b>	<b>Line of sight</b>
<b>LTE</b>	<b>Long Term Evolution</b>
<b>LTE-A</b>	<b>Long Term Evolution-Advanced</b>
<b>MIMO</b>	<b>Multi Input Multi Output</b>
<b>MISO</b>	<b>Multi Input Single Output</b>
<b>MMSE</b>	<b>Multicell Minimum Mean-Squared Error</b>
<b>MSE</b>	<b>Mean-Squared Error</b>
<b>MR</b>	<b>Maximum Ratio</b>
<b>MU-MIMO</b>	<b>Multi-User</b>
<b>NFFT</b>	<b>Non-equispaced Fast Fourier Transform</b>
<b>NLoS</b>	<b>No line of sight</b>
<b>NMSE</b>	<b>Erreur quadratique moyen normalisé</b>
<b>NR</b>	<b>New Radio</b>
<b>OFDM</b>	<b>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</b>
<b>RF</b>	<b>Radio Frequency</b>
<b>RZF</b>	<b>Regularized Zero-Forcing</b>
<b>SE</b>	<b>Spectral Efficiency</b>
<b>SIMO</b>	<b>Single Input Multi Output</b>
<b>SISO</b>	<b>Single Input Single Output</b>
<b>SMS</b>	<b>Short Message Service</b>
<b>SNR</b>	<b>Signal-to-Noise Ratio</b>
<b>SU-MIMO</b>	<b>Single User MIMO</b>
<b>SVD</b>	<b>Singular Value Decomposition</b>
<b>TDD</b>	<b>Time-Division Duplex UL</b>
<b>TDMA</b>	<b>Time Division Multiple Access</b>
<b>TACS</b>	<b>Total Access Communication System</b>
<b>UE</b>	<b>User terminal</b>
<b>UIT</b>	<b>Union Internationale des Communications</b>
<b>UL</b>	<b>Up Link</b>

<b>UMTS</b>	<b>Universel Mobile Telecommunications System</b>
<b>UT</b>	<b>User Terminal</b>
<b>WLAN</b>	<b>Wireless Local Area Network</b>
<b>W-CDMA</b>	<b>Wideband Code Division Multiple Access</b>

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

# **INTRODUCTION GENERALE**

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 réseaux de la 5ème 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 / Km<sup>2</sup>, la mobilité des véhicules à grande vitesse jusqu'à 500 km / h. Un candidat prometteur qui peut offrir ces demandes est le système sans fil MIMO Massif (Massive Multiple-Input Multiple-Output).

Les MIMO massifs sont une technologie de couche physique prometteuse pour les communications sans fil 5G en raison de sa capacité de spectre élevé et de son efficacité énergétique, de sa résolution spatiale élevée et de sa conception simple d'émetteur-récepteur. Pour profiter de ses gains potentiels, l'acquisition d'informations sur l'état des canaux est cruciale, ce qui malheureusement fait face à un certain nombre de défis, tels que la contamination du pilote de liaison montante, la surcharge de la formation et du retour d'information sur la liaison descendante, et la complexité du calcul.

Toutefois le transport de donnée est un processus compliqué. En effet, il est possible que des données s'endommagent ou pire se perdent, et pour remédier à ce problème, les ingénieurs en recours à l'estimation de canal pour obtenir l'information complète au niveau de réception. Le NMSE est l'une des méthodes utilisé pour résoudre ce problème. Ce mémoire se base sur l'étude de cette méthode afin de fournir la meilleure estimation pour les conceptions des systèmes pratiques. Il est structuré autour de trois chapitres :

Le premier chapitre montre l'évolution des réseaux de communication mobile et l'importance de passer à la cinquième génération pour répondre à la demande croissance de débit et de capacité. Nous consacrons le deuxième chapitre à l'étude de la technologie MIMO massif après avoir présenté les systèmes MIMO.

Le troisième chapitre propose une analyse graphique sur l'influence des paramètres du système sur l'estimation de canal NMSE. Enfin, avec une conclusion générale on termine notre travail.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

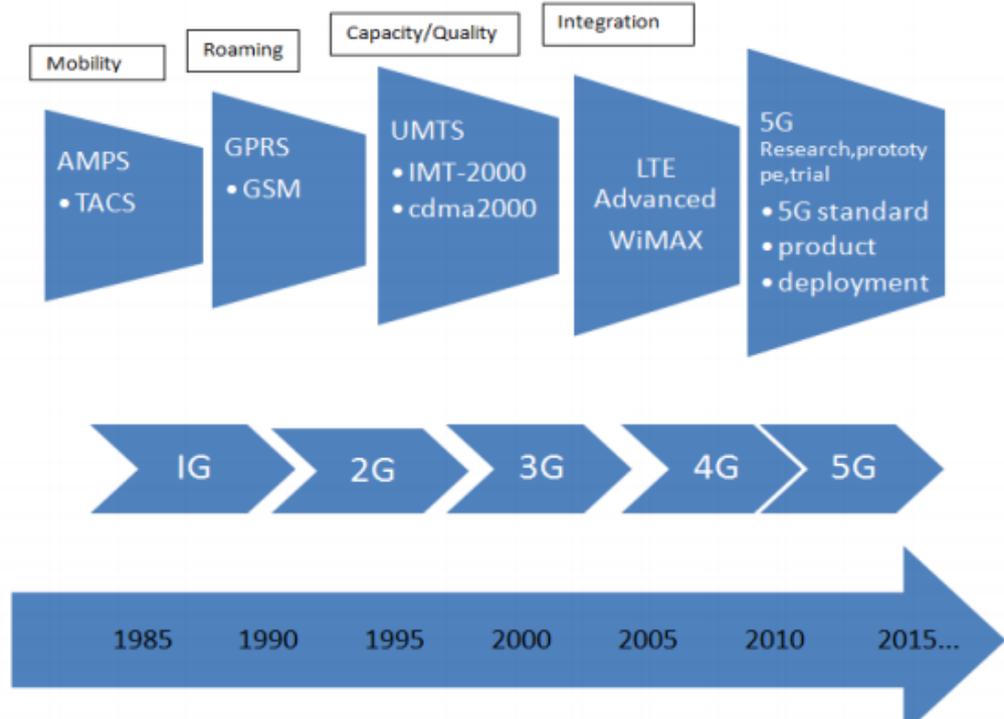
# **Chapitre I : La 5<sup>ème</sup> Génération**

### 1.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, le réseau de communication sans fil mobile, n'a pas cessé de se développer. La génération mobile sans fil (G) fait généralement référence à un changement dans la nature du système, vitesse, technologie, fréquence, capacité de données, latence, etc. Chaque génération a des normes, des capacités différentes, de nouvelles techniques et de nouvelles fonctionnalités qui la différencient de la précédente. Le réseau de communication sans fil mobile de première génération (1G) était analogique utilisé pour les appels vocaux seulement. La deuxième génération (2G) est une technologie numérique et prend en charge la messagerie texte. La troisième génération (3G) de technologie mobile a fourni un taux de transmission de données plus élevé. La quatrième génération (4G) intègre la 3G à internet fixe pour prendre en charge internet mobile sans fil, qui est une évolution de la technologie mobile et qui surmonte les limites de la 3G. Elle augmente également la bande passante et réduit le coût des ressources. La 5G signifie 5eme génération de technologie mobile et va être une nouvelle révolution dans le marché mobile qui a changé les moyens d'utiliser les téléphones portables à très haut débit. Avec la 5G, une véritable rupture technologique est née, utilisateur jamais connu avant une telle technologie de haute valeur qui comprend tous les types de fonctionnalités avancées, la technologie 5G sera la plus puissante et en forte demande dans un avenir proche.

### 1.2 Evolution de communications mobiles

Les réseaux mobiles ont connu une évolution très importante depuis le lancement du premier réseau mobile aux Etats Unis. Avant d'expliquer la 5ème génération, nous semblent intéressant de rappeler cette évolution.



**Figure 1.1** : chronologie de l'évolution du réseau cellulaire mobile [1].

## 1.2.1 Apparition de la 1G

La première génération de téléphonie mobile (notée 1G) possédait un fonctionnement analogique et était constituée d'appareils relativement volumineux. Il s'agissait principalement des standards suivants :

- **AMPS** (Advanced Mobile Phone System).
- **TACS** (Total Access Communication System).
- **l'ETACS** (Extended Total Access Communication System).

Les réseaux cellulaires de première génération qui fonctionnait sur un système de communication analogique n'ont pas connu le succès escompté à cause de certains problèmes de communication et de la qualité des téléphones mobiles qui ont été les premiers téléphones portables à être utilisés, introduits en 1982 et achevés au début des années 1990. Ces systèmes ont cependant été abandonnés il y a quelques années laissant la place de la 2<sup>ème</sup> génération.



Figure 1.2 : Exemples d'appareils 1G.

### 1.2.2 La deuxième génération 2G

La seconde génération de réseaux mobiles (notée 2G) a marqué une rupture avec la première génération de téléphones cellulaires grâce au passage de l'analogique vers le numérique pour la liaison ainsi que pour le signal vocal.

Les principaux standards de téléphonie mobile 2G sont les suivants :

- **Le GSM** (Global System for Mobile communications) : le standard le plus utilisé en Europe à la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Ce standard utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz. On est alors sur une gamme bien supérieure à celle utilisée pour la 1<sup>ère</sup> génération aux Etats-Unis où les bandes de fréquences utilisées sont les bandes 850 MHz et 1900 MHz. Le réseaux GSM a pour premier rôle de permettre des communications entre abonnés mobiles (GSM) et abonnés du réseaux téléphonique commuté (RTC -réseaux fixe).

- **Le CDMA** (Code Division Multiple Access), utilisant une technique d'étalement de spectre permettant de diffuser un signal radio sur une grande gamme de fréquences.

- **TDMA** (Time Division Multiple Access), utilisant une technique de découpage temporel des canaux de communication, afin d'augmenter le volume de données transmis simultanément.

Des extensions de la norme GSM ont été mises au point afin d'améliorer le débit. (General Packet Radio System), qui permet d'obtenir des débits théoriques de l'ordre

de 114 kbit/s, plus proche de 40 kbit/s dans la réalité, la technologie ne rentrant pas dans le cadre de l'appellation, cette 3G a été baptisée **2.5G**. La norme **EDGE** (Enhanced Data Rates for Global Evolution), présentée comme **2.75G** quadruple les améliorations du débit de la norme GPRS en annonçant un débit théorique de 384 Kbps, ouvrant ainsi la porte aux applications multimédias.

### 1.2.3 La troisième génération 3G

Les spécifications IMT-2000 (International Mobile Telecommunications for the year 2000) de l'Union Internationale des Communications (UIT), définissent les caractéristiques de la 3G (troisième génération de téléphonie mobile). Ces caractéristiques sont notamment les suivantes :

- Un haut débit de transmission :
  - 144 Kbps avec une couverture totale pour une utilisation mobile,
  - 384 Kbps avec une couverture moyenne pour une utilisation piétonne,
  - 2 Mbps avec une zone de couverture réduite pour une utilisation fixe.
- Compatibilité mondiale.
- Compatibilité des services mobiles de 3<sup>ème</sup> génération avec les réseaux de seconde génération, c'est-à-dire qu'ils souhaitent garder les paramètres des générations précédentes (envoi de messages et contenus multimédias).

La principale norme 3G utilisée en Europe s'appelle **UMTS** (Universal Mobile Télécommunications System), utilisant un codage **W-CDMA** (Wide band Code Division Multiple Access). La technologie UMTS utilise la bande de fréquence de 5 MHz pour le transfert de la voix et de données avec des débits pouvant aller de 384 kbps à 2 Mbps.

### 1.2.4 La quatrième génération 4G

La technologie 4G est la nouvelle génération des standards téléphoniques. Elle repose sur la nouvelle norme « LTE », en voie d'expansion à travers le monde. Alors qu'au sein du réseau 3G, les données internet et conversations téléphoniques étaient séparées, le débit devant alors se partager entre les utilisateurs connectés, la 4G réunit l'ensemble de ces données, cela garantit un transfert de données de meilleure qualité.

Les débits vont de 100Mb/s à 1Go/s. Le réseau mobile 4G peut donc offrir un débit nettement supérieur à celui de la fibre optique actuelle, du moins en théorie car en pratique

il n'est pour l'instant "que" de quelques dizaines de Mb/s, du fait que la bande passante soit partagée entre les différents utilisateurs du réseau dans une même zone [2].

### 1.2.5 La cinquième génération 5G

La cinquième génération (5G) est la nouvelle génération qui est entrée sur le marché en fin 2019 et sera commercialisée au début 2021. Succédera à la 4G, elle a une capacité extraordinaire de données et a la capacité de relier des volumes d'appels sans limitation. Cette technologie apportera un débit plus important encore avec un temps de latence bien plus faible qu'aujourd'hui et une diffusion de données infinie dans le dernier système d'exploitation mobile [3]. Par exemple avec la 4G, un film de 800 Mo prend environ 40 secondes à télécharger ; avec la 5g le temps réduit à une seule seconde [4].

## 1.3 Réseau mobile de 5G

Les systèmes de communication mobile de cinquième génération (5G) émergent à grande vitesse pour répondre à un large éventail de défis apportés par la soif de nos sociétés actuelles et futures pour les communications sans fil. La 5G doit s'attaquer, en plus d'une augmentation du volume de trafic, au défi de connecter des milliards d'appareils avec des besoins de service hétérogènes. Les réseaux de 5G devraient fournir beaucoup d'améliorations [5].

### 1.3.1 Les premiers points forts de 5G

- **La capacité de téléchargement**

Les débits en 5G seront jusqu'à 10 fois plus élevés que ceux de la 4G, elle pourrait même atteindre dans certaines situations jusqu'à 20 Gbit/ seconde. En pratique, il faut plutôt s'attendre à une expérience de navigation entre 100 Mbit/s et quelques Gbit/s.

- **La latence**

Cela désigne le délai de transit d'une donnée entre le moment où elle est envoyée et celui où elle est reçue. Celui-ci sera divisé par 10 par rapport à la 4G, avec un temps de réponse d'à peine une milliseconde. Cette réactivité est cruciale pour l'industrie, car des échanges constants et quasi-immédiats sont requis pour faire émerger des usages comme le transport autonome [5].

- **La densité**

La 5G embarque l'internet des objets (IoT pour Internet of Things) et devra donc gérer des millions de connexions.

### 1.3.2 Les caractéristiques de la 5G

Afin de répondre aux besoins de croissance du service sans fil développé au cours des dix prochaines années, nécessite des changements radicaux dans le paradigme du réseau en plus d'innovations perturbatrices. La capacité des réseaux sans fil peut être étendue de manière ce que peut faire appel à un large éventail de nouvelles technologies. Cela permet un saut dans les performances qui éclipsent les prédécesseurs de 5G. Ces innovations toucheront la transmission et la conception de la couche physique en plus d'introduire des bouleversements dans les couches supérieures du réseau.

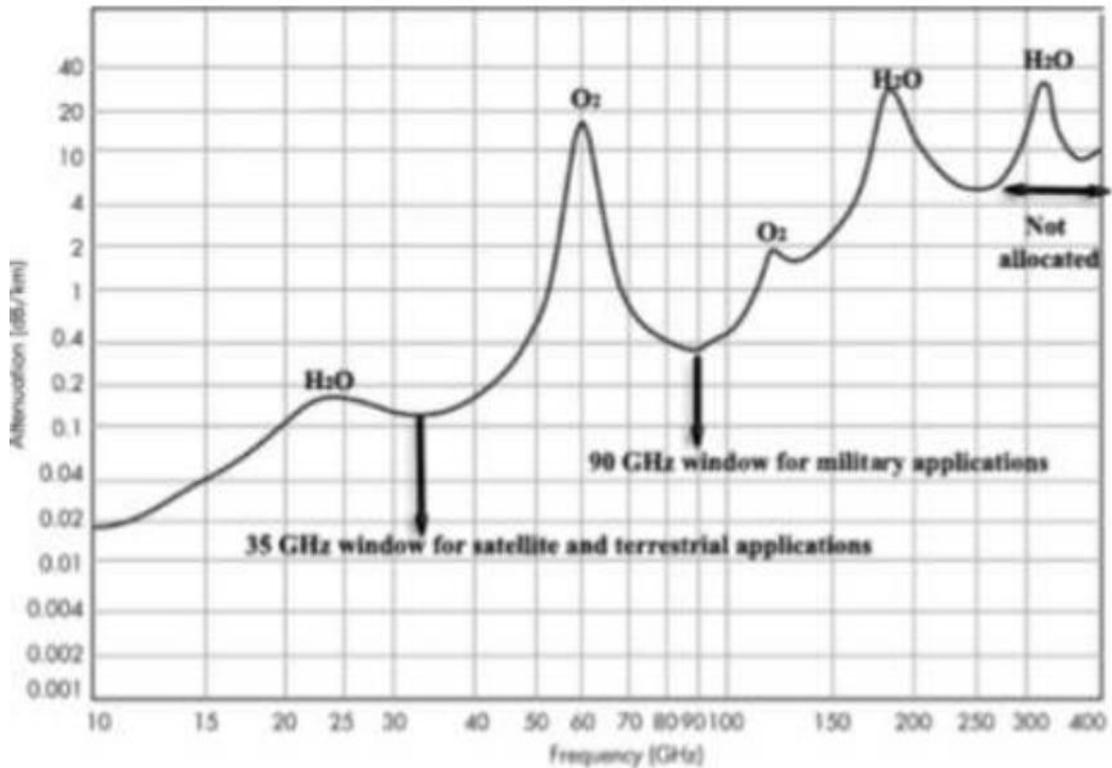
Parmi les innovations potentielles dans la couche physique 5G, on peut citer :

#### 1.3.2.1 Communications dans la plage des ondes millimétriques

Le développement rapide de la technologie de communication sans fil a entraîné une augmentation explosive du nombre d'utilisateurs mobiles. Les débits de données extrêmement élevés et l'amélioration des performances des réseaux sans fil sont des choses importantes pour satisfaire les futurs besoins des clients.

La 5G utilise les très hautes fréquences (extremely high frequencies ; "mmWaves") ; cela est un des éléments qui la caractérise le plus. Les besoins de spectre supplémentaires dans le monde seront de 1000 à 2000 MHz, tandis que la ressource de basse fréquence aura été largement épuisée. Comparées à la bande de basse fréquence utilisée, les ressources de fréquence disponibles dans la bande d'ondes millimétriques (30–300 GHz) associées à une longueur d'onde de 10 mm à 1 cm, ce qui correspond à environ 200 fois la bande de basse fréquence.

Cependant, ces fréquences plus élevées ont des problèmes de propagation du signal sur une grande distance [6].



**Figure 1. 3 :** Atténuation en fonction de différentes fréquences.

À partir de la figure (1.3), ces pics divisent le spectre en quatre fenêtres : 35, 90, 140 et 220GHz, ce qui permet de surpasser la limitation des ondes radio. Les spécifications de ces fenêtres en fonction de la valeur d'atténuation inférieure et de la largeur de bande large peuvent être adaptées à ces fenêtres pour les communications sans fil avec un débit binaire élevé.

### 1.3.2.2 Entrée multiple sortie multiple massif (mMIMO)

MIMO massif ou Massive MIMO est une technologie du futur qui fournira des réseaux large bande plus sécurisé, robuste, marque une rupture nette avec la pratique actuelle en utilisant un très grand nombre d'antennes de service (par exemple, des centaines ou des milliers) qui fonctionnent de manière totalement cohérente et adaptative. Des antennes supplémentaires aident en concentrant la transmission et la réception de l'énergie du signal dans des régions de plus en plus petites de l'espace. MIMO Massif est une forme du système MIMO multi utilisateurs où les stations de bases et le nombre d'utilisateurs sont très nombreux [7].

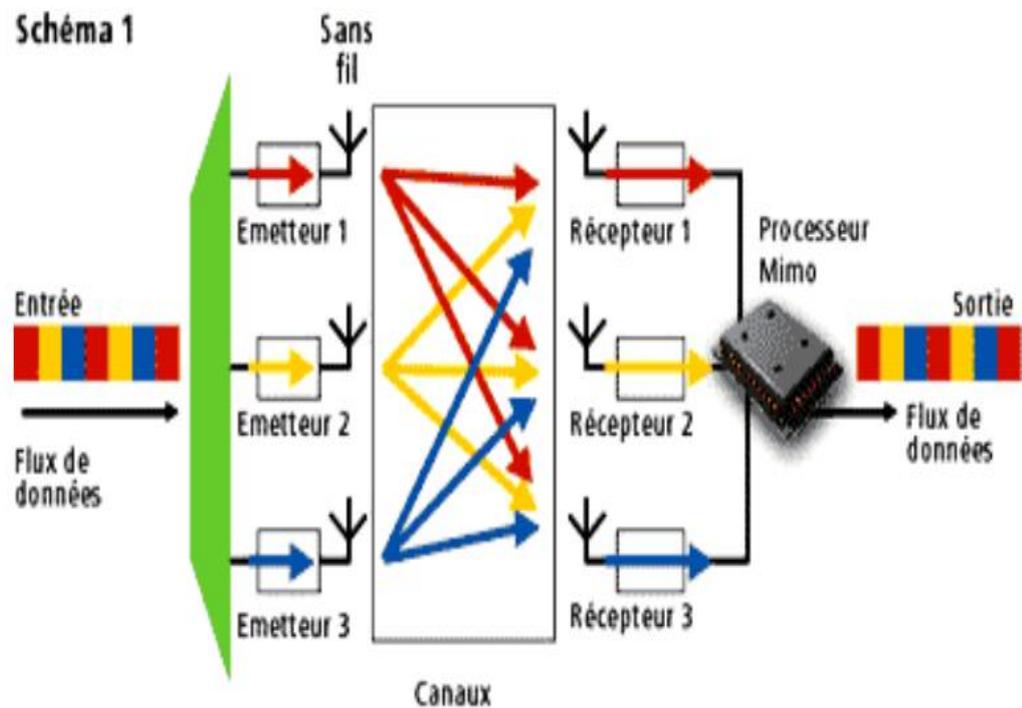


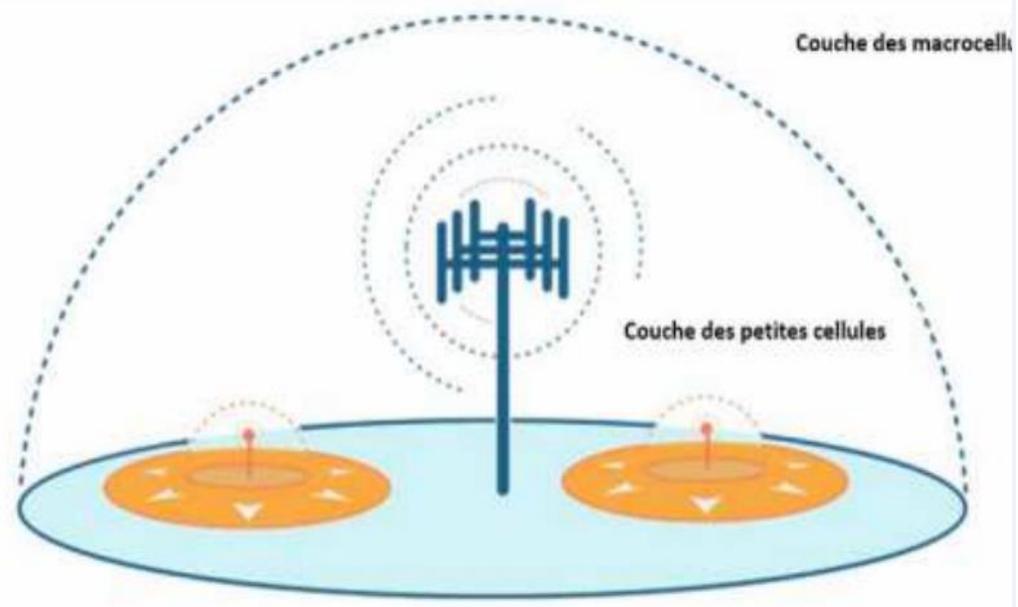
Figure 1.4: Principe de la technologie MIMO.

### 1.3.2.3 Mini-cellules et réutilisation du spectre électromagnétique

La 5G, verra encore probablement une forte amélioration des volumes de données échangés, sans nécessiter des bandes millimétriques, aux faibles capacités de propagation, nécessitera probablement la généralisation de la mise en place d'émetteurs radioélectriques de faible puissance (les petites cellules ou small-cells) [8].

Des estimations évoquent, pour satisfaire la demande et permettre l'introduction de la 5G, un nombre d'au moins 10 small-cells par site macro en milieu urbain, milieu dans lequel les cellules sont déjà relativement resserrées pour faire face à la densité des usages.

En déployant de petites cellules (micro, pico), bien qu'elles couvrent une zone géographique beaucoup plus petite que les macros cellules, les petites cellules améliorent la couverture, les capacités et la qualité de service des réseaux.



**Figure 1.5 :** réseaux a macro cellules et a petites cellules



**Figure 1.6 :** Exemple d'un système de petite antenne et du boîtier qui l'accompagne.

### **Communications sans fil full-duplex**

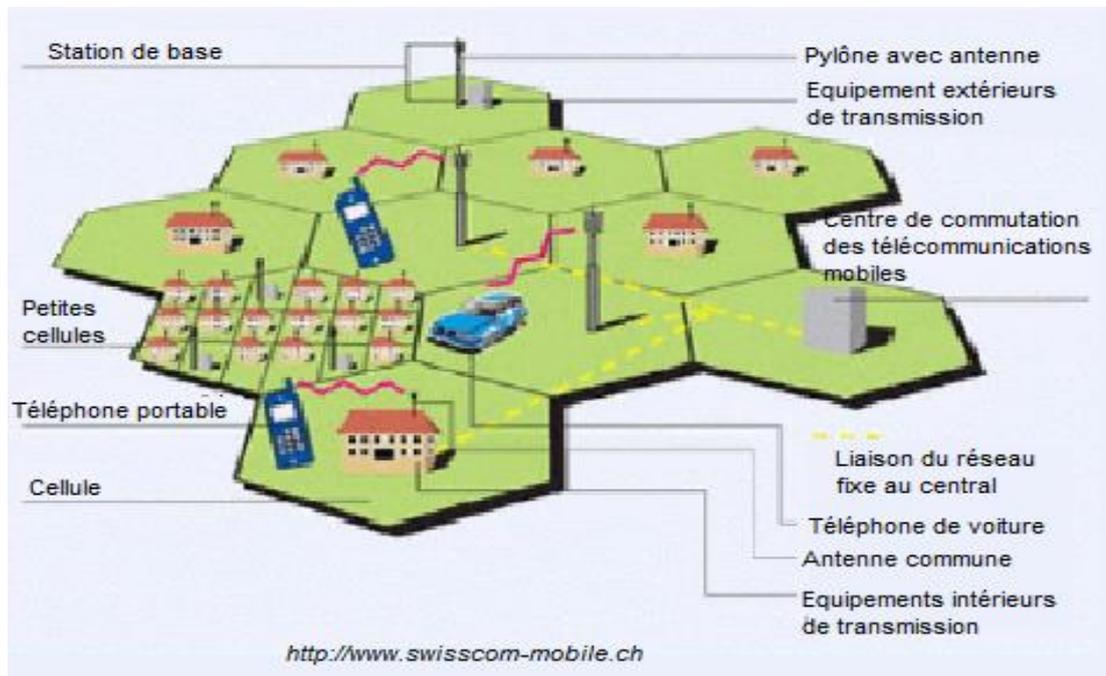
La normalisation en cours des spécifications de la 5G n'empêche pas les constructeurs d'équipement d'anticiper sur les futurs besoins de la prochaine génération de réseau mobile ou d'exploiter la tendance pour introduire de nouvelles solutions.

La technologie sans fil permet de doubler les capacités de transfert d'une mini cellule traditionnelle. Cette technologie est présentée « comme une étape vers 5G ».

« full-duplex » utilise une seule fréquence pour assurer simultanément l'envoi et la réception des données au lieu d'utiliser deux fréquences (half-duplex), chacune étant dévolue à un flux montant ou descendant, un émetteur-récepteur de séparation des communications, full-duplex permet de limiter grandement les interférences entre les stations radio, macro et petite, et les terminaux [9].

### 1.4 Réseaux cellulaire

Un réseau cellulaire se compose d'un ensemble de stations de base (BS) et d'un ensemble d'équipements utilisateurs (UE). Chaque équipement est connecté à l'un des BS, qui lui fournit des services, comme illustré à la Figure :



**Figure 1.7** : Un réseau cellulaire.

La communication entre les terminaux et BS est bidirectionnelle. La liaison descendante (DL) fait référence aux signaux envoyés par les BS à leurs équipements respectifs, tandis que la liaison montante (UL) fait référence aux transmissions des équipements vers leurs BS.

Le débit surfacique est donc une performance très pertinente de la métrique des réseaux cellulaires contemporains. Il est mesuré en bit / s / km<sup>2</sup> et peut être modélisé à l'aide de la formule de haut niveau suivante :

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

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

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

L'augmentation de la bande passante n'est pas aussi attrayante, car le spectre de fréquences est une ressource naturelle à coût élevé et confronté à la rareté. En outre, cela implique également l'utilisation de bandes de fréquences beaucoup plus élevées, ce qui limite la portée de la communication. Malgré cela, des bandes de longueurs d'onde millimétriques peuvent être utilisées pour les applications à courte portée. Densifier le réseau, en employant plus de BS, est une tâche difficile sans déplacer les BS plus près des terminaux, ce qui augmente les risques d'être dans l'ombre, réduisant ainsi la couverture. Ce sont les principales raisons pour lesquelles il est préférable d'améliorer la  $SE$ . Une façon d'améliorer le  $SE$  consiste à utiliser plusieurs antennes au niveau de la station de base pour collecter plus d'énergie à partir des ondes électromagnétiques.[10]

### 1.5 Les applications de la 5G

Avec un réseau cellulaire jusqu'à 100 fois plus rapide, la technologie 5G ouvre un vaste champ des possibles.

La 5G sera plus rapide que biens des réseaux WIFI. Pourtant la révolution promise ne repose pas seulement sur la vitesse. Le débit du réseau est lui aussi considérablement supérieur, permettant à un grand nombre de personnes ou d'objets de se connecter simultanément. Mais l'évolution ne s'arrête pas là. En effet, la latence sera désormais réduite à la milliseconde, créant les conditions d'émergence des technologies les plus prisées comme les véhicules autonomes ou la réalité virtuelle. Découvrons les domaines qui nous réservent les applications les plus prometteuses :

- Santé et chirurgie à distance.
- Industrie.
- Divertissement.
- Voiture autonome. [11]

### 1.6 Objectifs de la 5G

La 5G est la technologie qui permet les connexions et les téléchargements plus rapides que les autres générations et intègre toute une série de nouveaux usages, la future de la technologie 5G n'y fera pas exception en se concentrant sur l'internet des objets la 5G vise à : faciliter l'émergence d'un immense écosystème IOT.

- L'amélioration de la vitesse de transmission des données.
- Un temps de latence plus court donne l'impression que le réseau est très réactif.
- (1 milliseconde de latence). 100% de couverture.
- 90% de réduction en utilisation énergie du réseau.
- Jusqu'à 10 ans de durée de vie de la batterie.
- 1000 fois plus de bande passante par unité de la surface.
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface.
- 99,999% de disponibilité.
- La vitesse de transmission des données est double par rapport à 4G. [12]

Les usages que l'on fait de cette technologie sont divers et variés. Par exemple, l'enrichissement de la maison connectée, le véhicule autonome, les vidéos immersives et l'arrivée de la médecine. L'objectif étant de simplifier la vie des personnes. [13]

### 1.7 5G : New Radio

Différents réseaux mobiles conventionnels conçus pour optimiser l'efficacité de transmission d'un service particulier (par exemple, le streaming voix / vidéo) principalement, l'industrie et le monde universitaire parviennent à un accord selon lequel les réseaux mobiles 5G devraient soutenir de multiples besoins sans fil, y compris une mobilité plus élevée, débits de données et latence plus faible. À cet effet, 3GPP a lancé l'activité de normalisation pour la première phase du système 5G dans la version 15 appelée New Radio (NR). Pour bien comprendre cette technologie cruciale, ce paragraphe offre un aperçu complet du développement de pointe de NR, y compris les scénarios de déploiement, les numéologies, la structure de trame, la nouvelle forme d'onde, l'accès multiple, la procédure d'accès initial / aléatoire et la porteuse améliorée agrégation (CA) pour les demandes de ressources et les transmissions de données. Les informations fournies facilitent ainsi la connaissance de la conception et de la pratique pour d'autres fonctionnalités de NR. [14]

### 1.7.1 Scénarios de déploiement de NR

Pour assurer la compatibilité ascendante avec LTE / LTE-A, l'architecture de NR est requise pour un interfonctionnement étroit avec LTE / LTE-A. Pour cette exigence, les cellules LTE / LTE-A et NR peuvent avoir une couverture différente (Figure 1.11.a) ou la même couverture, et les scénarios de déploiement suivants sont réalisables :

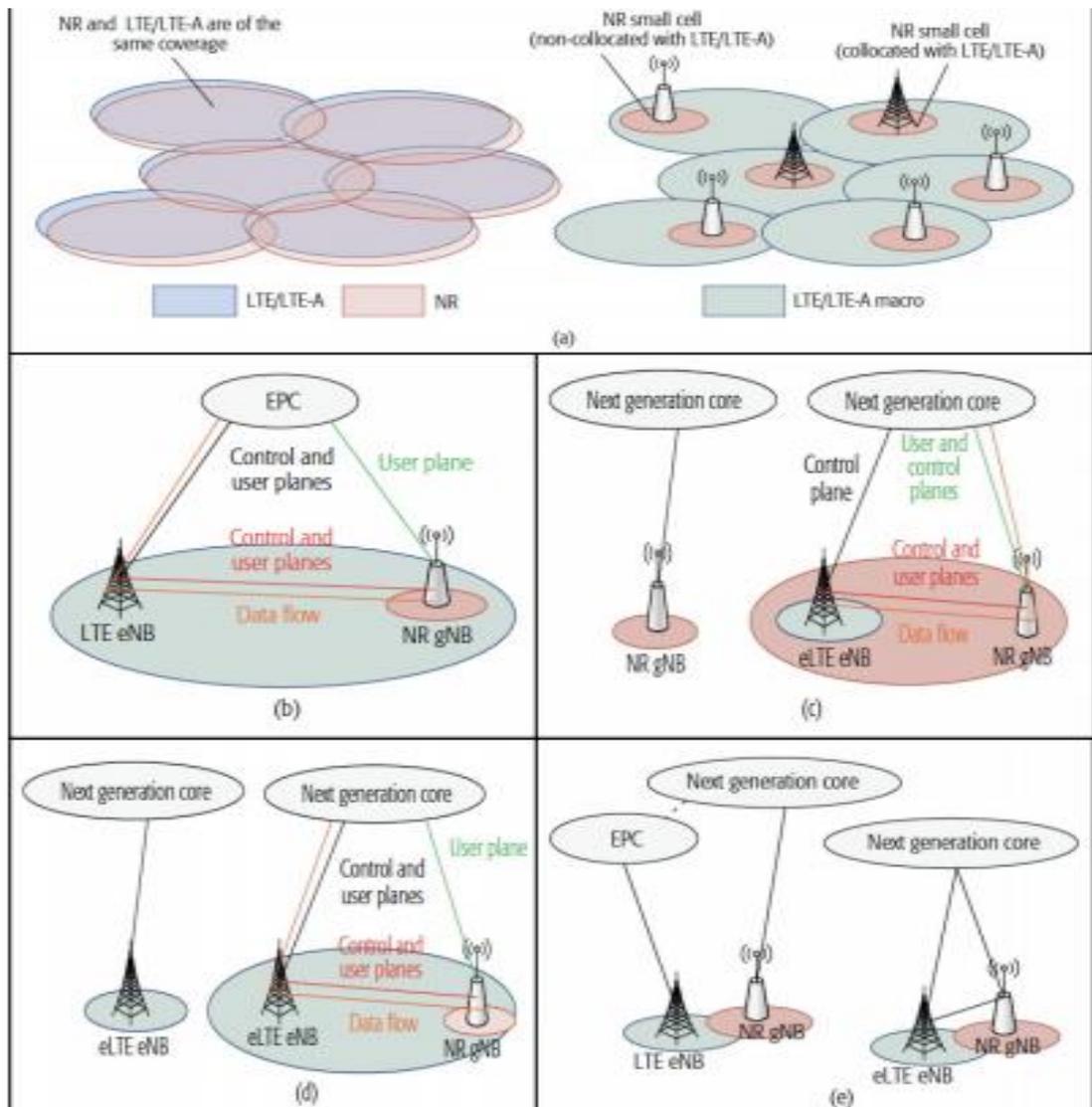


Figure 1.8 : Scénarios de déploiement de NR.

#### a\_ LTE / LTE-A eNB est un nœud maître

Un eNB LTE / LTE-A offre un support d'ancrage (dans les plans de contrôle et utilisateur), tandis qu'un NR gNB propose un support de rappel. Le flux de données est agrégé sur un eNB et un gNB via le noyau de paquet évolué (EPC) (Figure 1.8.b).

### **b\_ NRgNB est un nœud maître**

Un NR gNB autonome offre des services sans fil (dans les plans de contrôle et utilisateur) via le noyau de la prochaine génération. Un eLTE et eNB colocalisés peut également fournir des porteuses d'amplificateur pour des connexions doubles (Figure 1.8.c).

### **c\_eLTE eNB est un nœud maître**

Un eLTEeNB autonome offre des services sans fil (dans les plans de contrôle et utilisateur) via le cœur de prochaine génération ou un NR gNB colocalisé est en mesure de fournir des supports de rappel, comme illustré à la Figure 1.8.d.

### **d Transfert de technologie inter-radio (RAT) entre (e) eNB LTE / LTE-A et NR gNB**

Un LTE / LTE-A eNB se connecte à l'EPC et un gNB NR se connecte au noyau de nouvelle génération pour prendre en charge le Handover entre eux. Un eLTEeNB peut également se connecter au noyau de la prochaine génération, et le transfert entre eNB et gNB peut être entièrement géré via le noyau de la prochaine génération (Figure 1.8.e).

## **1.7.2 Numérolgies**

En NR, les émetteurs et les récepteurs peuvent bénéficier d'une bande passante plus large dans les bandes de fréquences élevées. Dans ce cas, l'espacement des sous porteuses peut être étendu (supérieur à 15 kHz, comme adopté par LTE / LTE-A, et éventuellement jusqu'à 960 kHz). De plus, les fréquences porteuses élevées sont également vulnérables à l'effet Doppler et un espacement important des sous-porteuses peut faciliter l'atténuation des interférences entre porteuses. D'autre part, NR devrait également prendre en charge un faible espacement des sous-porteuses, tel que 3,75 kHz, comme le permet l'internet des objets à bande étroite (NB-IoT), pour bénéficier d'un meilleur rendement énergétique dans les bandes de basses fréquences. En conséquence, les espacements des sous-porteuses dans NR sont évolutifs en tant que sous-ensemble ou sur-ensemble de 15 kHz. Les espacements possibles des sous-porteuses peuvent être de  $15 \text{ kHz} \times 2^\mu$ , où  $\mu$  peut être un entier positif / négatif ou zéro. Pour chaque valeur d'espacement de sous-porteuse, plusieurs longueurs de CP peuvent être insérées pour s'adapter à différents niveaux de brouillage inter-symbole à différentes fréquences porteuses et mobilité.

Les types NR numérolgie sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 1. Numérolgies de transmission prises en charge [15]

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

### 1.7.3 Structure de trame

Les transmissions en liaison descendante et montante sont organisées en trames d'une durée de 10 ms, figure 1.9, chacune divisée en dix sous-trames de 1 ms.

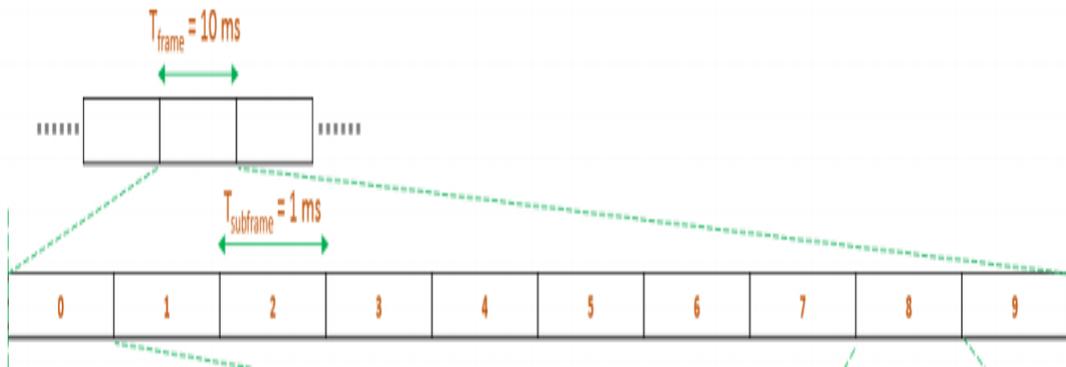


Figure 1.9 : Organisation des trames dans la 5G-NR.

La longueur de slot varie en fonction de l'espacement des sous-porteuses. La tendance générale est que la longueur de slot diminue à mesure que l'espacement des sous-porteuses s'élargit, figure 1.10. Cette tendance provient de la nature de l'OFDM.

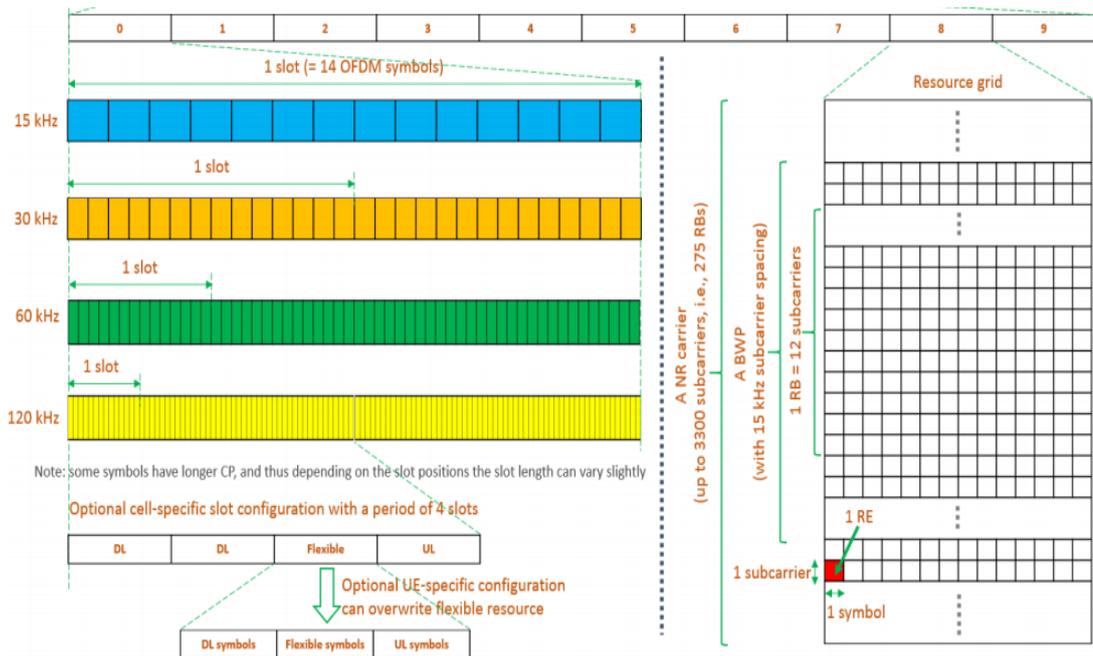


Figure 1.10 : Longueur des slots pour chaque numérogie.

### 1.7.4 Bloc de ressources NR

Un bloc de ressources NR (RBck) contient 14 symboles dans le domaine temporel et 12 sous-porteuses dans le domaine fréquentiel. En bande LTE, la largeur de bande RB est fixée à 180 KHz mais en NR, elle n'est pas fixe et dépend de l'espacement des sous-porteuses. La figure 1.14 montre les espacements des SP pour chaque numérogie.

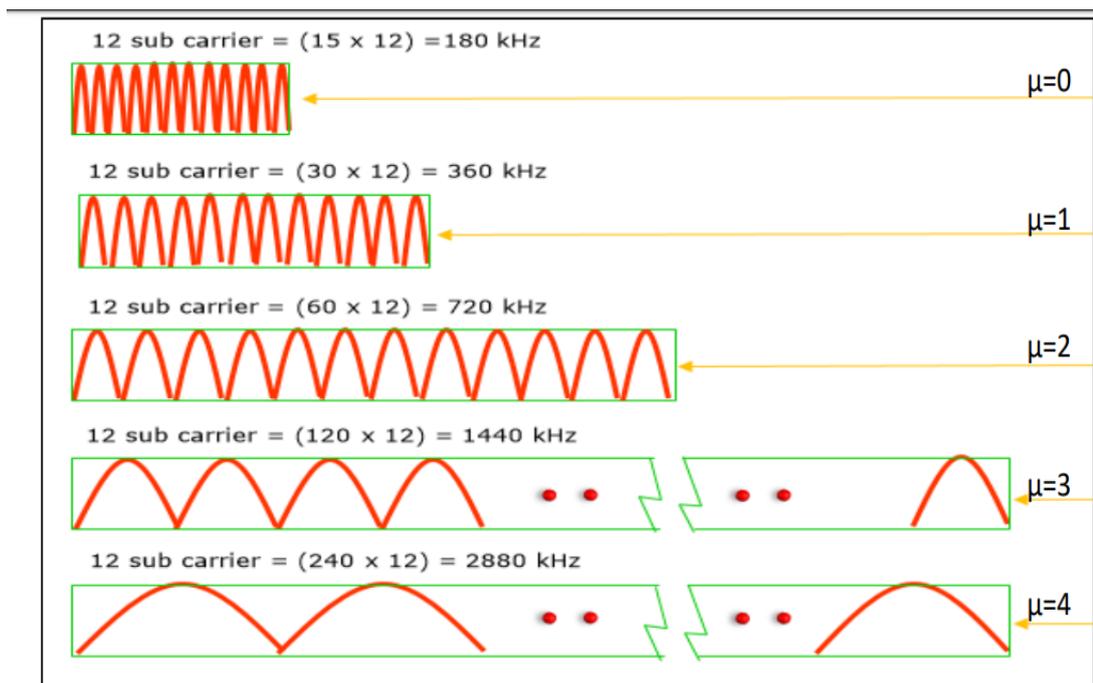


Figure 1.11 : Numérogie - Espacement des sous-porteuses.

### 1.7.5 Bande passante du canal NR

Le NR devrait fonctionner avec une largeur de canal de 100 MHz pour les bandes inférieures.

$$CBW = N\_RB \times N\_SP \times \Delta f + 2 \times BG \quad (1.2)$$

Où :

- CBW : la bande passante de canal.
- N\_RB : Nombre de ressource block.
- N\_SP : Nombre de sous porteuse = 12.
- BG : la bande de garde.

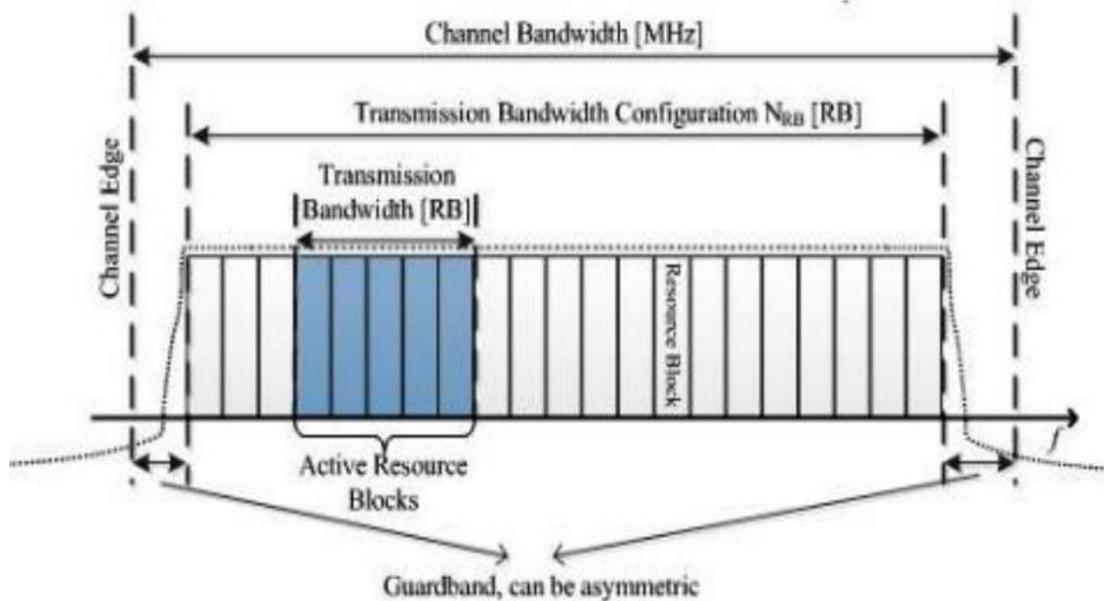


Figure 1.12 : Canal 5G-NR. [16]

### 1.8 Conclusion

La saturation du réseau 4G du à l'augmentation de nombre d'utilisateurs et à l'augmentation de volume des données échanger justifie le passage à une nouvelle génération de réseaux 5G, celle-ci nécessite plusieurs technologies, telles que le MIMO massif, la communication directes (Device-to-device), la communication à ondes millimétriques, l'accès multiple par division de faisceau dans la technologie MIMO massif. La numérogie de NR de la 5G donne une flexibilité convient avec son architecture hétérogène.

A decorative border resembling a scroll, with a black outline and rounded corners. The top and bottom edges are slightly curved, and there are small circular elements at the corners that look like the ends of the scroll's binding.

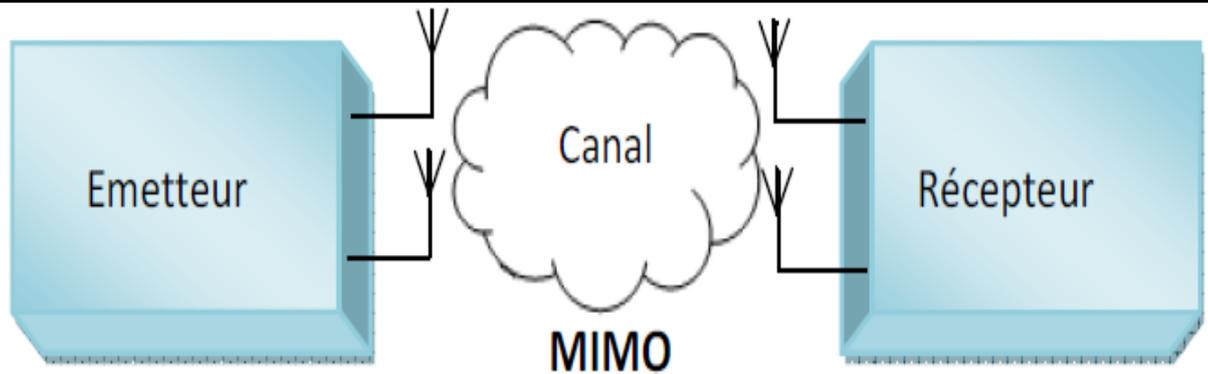
# **Chapitre II : La Technologie MIMO massif**

### 2.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter les réseaux **MIMO (Multiple Input Multiple Output)** massifs connus sous le nom de **Massive MIMO**. La capacité des systèmes multi-antennes augmentait linéairement avec le nombre d'antennes émettrices, ces systèmes possèdent un avantage en plus, car ils résistent aux évanouissements et aux interférences. D'autre part l'efficacité spectrale potentielle d'un tel système est plus élevée que celle d'un système mono-antenne. Cette nouvelle technologie est une méthode la plus favorable pour les systèmes révolutionnaires de la cinquième génération des réseaux mobiles (5G) et de l'internet des objets. Les évolutions technologiques exigeront des systèmes de communication puissants et fiables. Cela nécessite de nombreux progrès sur les systèmes actuels. Dans le cadre des améliorations possibles s'inscrit le Massive MIMO. Ainsi on explore la technologie MIMO traditionnel.

### 2.2 MIMO

Les technologies MIMO se basent sur l'utilisation de plusieurs antennes aussi bien du côté de l'émetteur que celui du récepteur. Elles permettent le transfert de données à plus longue portée et avec un débit plus élevé qu'avec des antennes utilisant la technique SISO (single-input single-output). La technologie MIMO tire parti d'un phénomène d'ondes radioélectriques appelé trajets multiples, où les informations transmises rebondissent sur les murs, les plafonds et d'autres objets, atteignant l'antenne de réception plusieurs fois sous différents angles et à des moments légèrement différents. Dans un système MIMO, on envoie un symbole différent sur chaque antenne émettrice. Chaque antenne réceptrice va capter un ou plusieurs signaux venant chacun d'une antenne émettrice suivant un trajet totalement différent des autres existants entre l'émetteur et le récepteur. La diversité spatiale du milieu assure une certaine décorrélation entre les divers trajets et ainsi rendre la résolution du système d'équations du système MIMO possible. En effet, si la décorrélation entre les trajets augmente, le nombre de symbole qu'on puisse extraire du système d'équations sera important et vice-versa [17].



**Figure 2.1** : Schéma bloc d'un système MIMO

Il est clair que la richesse en multi-trajets peut augmenter clairement la capacité du système en se basant sur la diversité spatiale présente dans le canal [18]. C'est dans ce contexte que se justifie notre choix de la technique MIMO à implémenter au sein du milieu en vue d'assurer des communications fiables et à haut débit.

### 2.3 Principes du MIMO

La principale source des perturbations, que subit un signal lors de sa propagation est le canal. Le signal subit des évanouissements, des décalages fréquentiels ou même temporels, à cause des phénomènes de propagation multi-trajets. Par contre aux systèmes classiques, les systèmes à diversité prennent avantage de ces types de propagation pour améliorer les performances du système. Pour mettre en place ces améliorations, les systèmes MIMO exploitent les techniques de diversité (spatiale, fréquentielle et temporelle).

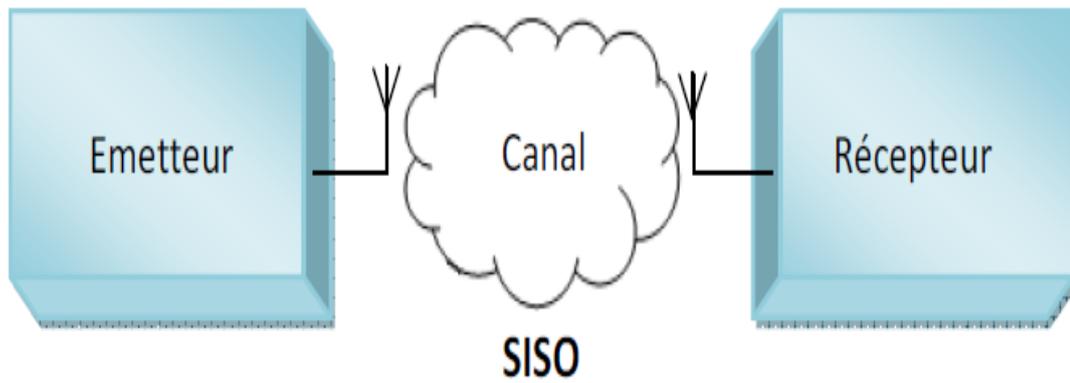
### 2.4 Types de MIMO

De part le nombre d'antennes existant dans les différents dispositifs d'antennes, nous pouvons distinguer quatre configurations (systèmes) :

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

#### 2.4.1 SISO

Il s'agit de l'architecture la plus simple et la plus traditionnelle où l'on dispose d'une seule antenne en émission et d'une autre en réception.



**Figure 2.2 :** SISO - Single Input Single Output

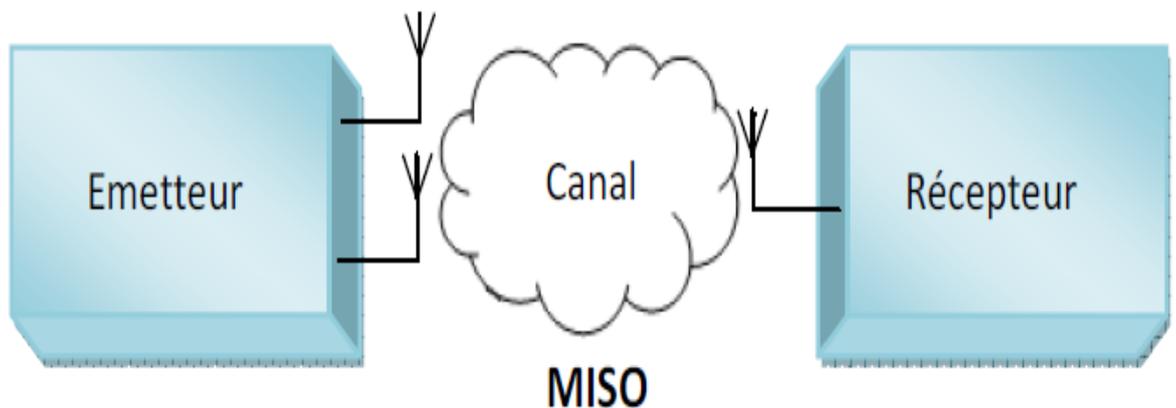
### 2.4.2 MISO

C'est une technique de diversité spatiale en émission. C'est-à-dire plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception. Dans ce mode de transmission, une superposition du signal transmis simultanément par les  $N_t$  antennes émettrices est reçue [20]. Chaque antenne émet le même symbole d'énergie  $E_s/N_t$ . C'est-à-dire que la puissance émise est divisée sur le nombre d'antenne telle que :

$$P = \sum p_i \quad (2.3)$$

Avec  $P_i$  est la puissance émise sur chaque antenne. Si cette puissance est égale sur toutes les antennes, alors on dira que

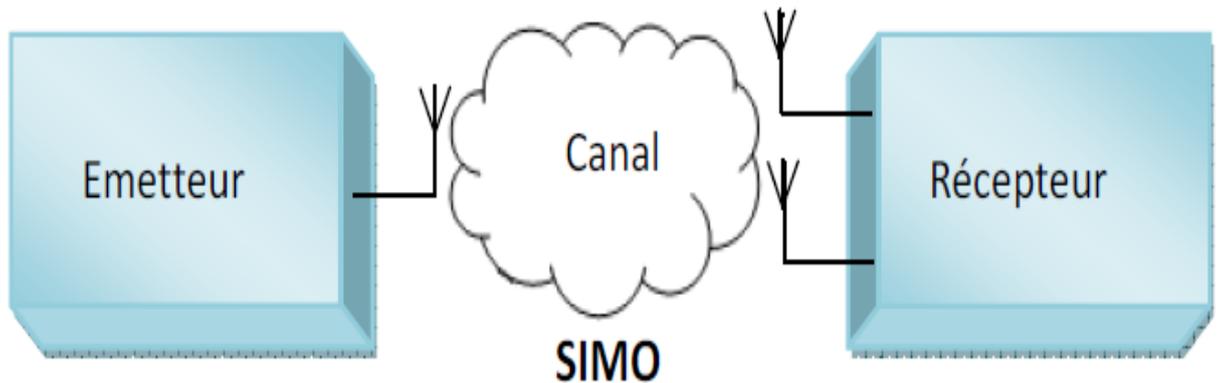
$$P = N_t \cdot P_i \quad (2.4)$$



**Figure 2.3:** MISO - Multiple Input Single Output.

### 2.4.3 SIMO

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal. La version SIMO à sorties multiples et à entrée unique se produit lorsque l'émetteur a une seule antenne et que le récepteur dispose de plusieurs antennes. [21]



**Figure 2.4:** SIMO - Single Input Multiple Output

### 2.4.4 MIMO

MIMO est une technologie d'antenne radio qui utilise plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur pour permettre aux signaux de traverser une variété de chemins pour transporter les données. Cette technique permet de contrer les effets du canal tout en améliorant la qualité des signaux en réception. Les systèmes sans fil MIMO peuvent être considérés comme une extension logique des antennes intelligentes utilisées depuis de nombreuses années pour améliorer la technologie sans fil.

Le canal MIMO est traduit par une matrice  $H$  de taille  $R \times T$  dite matrice de canal où  $R$  le nombre d'antennes d'émission et  $T$  le nombre d'antennes de réception.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1T} \\ h_{21} & \dots & \dots & h_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{R1} & h_{R2} & \dots & h_{RT} \end{bmatrix}$$

Où  $h_i$  est le gain complexe du canal entre la  $j^{\text{ème}}$  antenne émettrice et la  $i^{\text{ème}}$  antenne réceptrice.

On considérant l'émission d'une séquence  $X = [x_1, x_2, \dots, x_R]^T$  avec réception de

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_T]^T$$

On peut écrire la relation suivante :

$$Y=HX+\eta$$

Où  $\eta$  représente le bruit qui corrompt le signal lors de la traversée du canal.

Le calcul de la capacité dépend de deux points suivants :

- Le modèle du canal MIMO.
- La distribution des puissances entre les antennes émettrices.

$$C = \log_2(\det [I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \cdot H \cdot H^*]) \text{ bps/hz} \quad (2.7)$$

La capacité des systèmes MIMO est un sujet d'actualité dans la littérature, la puissance totale moyenne émise  $P$  reste constante. Lorsque le nombre d'antennes varie à l'émetteur, alors la puissance est répartie entre les  $N_t$  antennes de façon à ce que leur somme reste égale à  $P$ . Si aucune connaissance du canal n'est disponible à l'émetteur, la répartition de puissance uniforme est optimale en terme de capacité (chaque antenne émet une puissance  $P/N_t$ ).[22]

On distingue deux types d'antennes MIMO :

### **MIMO à Codes spatio-temporels**

Certaines études ont vite démontré que les systèmes MIMO permettaient également des communications bien plus sûres grâce à un codage conjoint de toutes les sous-chaînes d'information qui sont transmises aux antennes. Ce codage spatio-temporel (CST) est une méthode pour atteindre la capacité d'un système MIMO qui augmente considérablement lorsqu'on a plusieurs antennes de transmission et de réception.

Un code spatio-temporel est caractérisé par son rendement, son ordre de diversité et son gain de codage. On peut distinguer deux grandes classes de codage espace-temps permettant l'exploitation de la diversité : le codage en treillis et le codage en blocs.[23]

### **MIMO à Multiplexage spatiale**

Le multiplexage spatial est une technique utilisée pour augmenter le débit de transmission de données. Le multiplexage spatial peut améliorer considérablement l'efficacité spectrale [24], [25] mais le niveau d'erreurs important dû au manque de diversité d'antennes peut diminuer le débit de données à la réception particulièrement lorsque les SNR sont bas. Le multiplexage spatial ne fonctionne pas bien dans un environnement à faible SNR car le récepteur a des difficultés à identifier les signaux non corrélés [26][27].

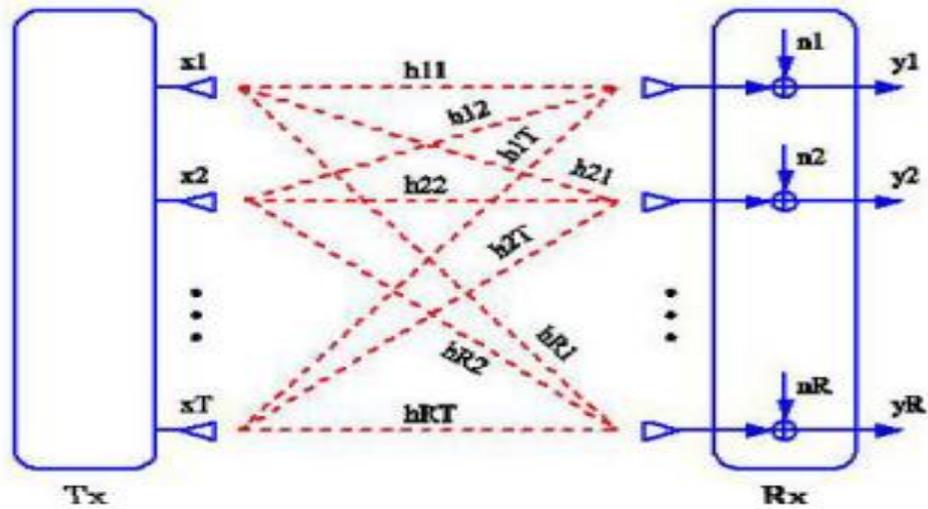
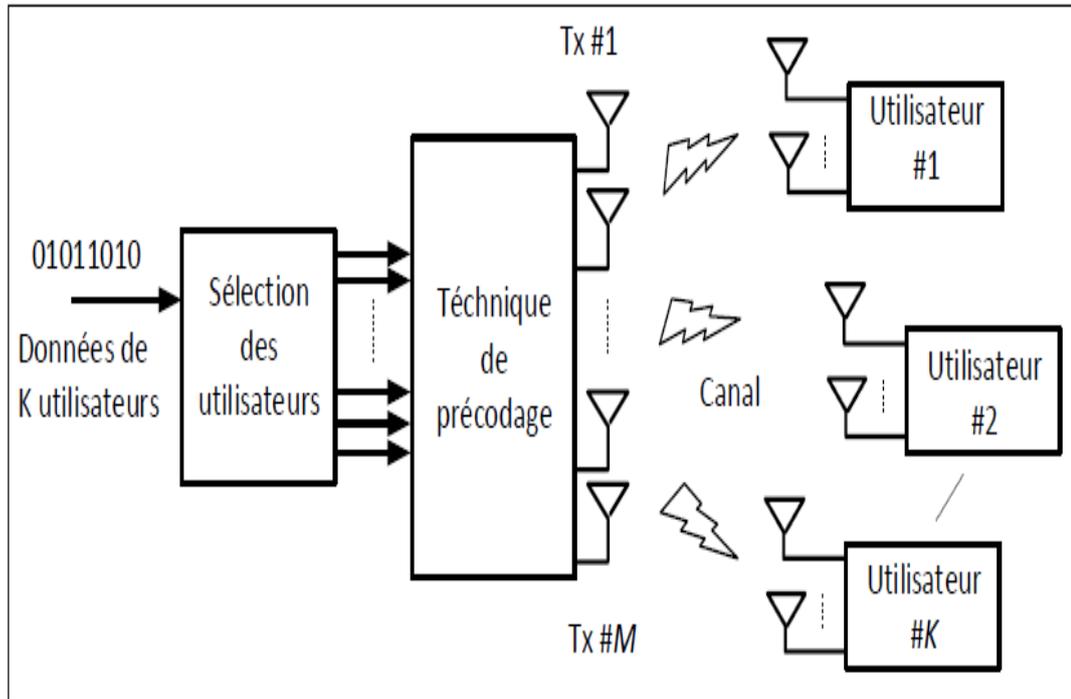


Figure 2.5 : MIMO- Multiple Input Multiple Output

## 2.5 MIMO Massif

Le MIMO massif est une technologie récente qui dépend de 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. Le MIMO massif a été initialement envisagé pour un fonctionnement en duplex à répartition dans le temps (TDD), mais peut potentiellement être appliqué également au fonctionnement en duplex à division de fréquence (FDD) [28]. 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 2.6.



**Figure 2.6 :** Modèle MIMO massif - M antennes et K utilisateurs.

Massive MIMO propose deux innovations majeures :

### 2.5.1 Beamforming

La formation de faisceaux ou le beamforming est une technique de traitement des signaux utilisée avec un réseau de capteurs à l'émission ou/et à la réception qui commande la forme du diagramme de rayonnement. L'utilisation de la formation de faisceau du côté de la transmission peut augmenter la puissance dans une direction précise. En commandant la phase et l'amplitude du signal sur chaque émetteur, on crée des interférences constructives ou destructives dans le front d'ondes. Du côté de la réception, la formation de faisceaux peut également être considérée comme un filtre spatial pour la direction d'intérêt parce qu'il augmente la sensibilité du récepteur dans la direction du signal désiré et la diminue dans la direction de l'interférence et du bruit. Ceci est équivalent à combiner d'une façon optimale les données reçues venant de différentes sources (antennes) avec les bons coefficients du filtre spatial.[29]

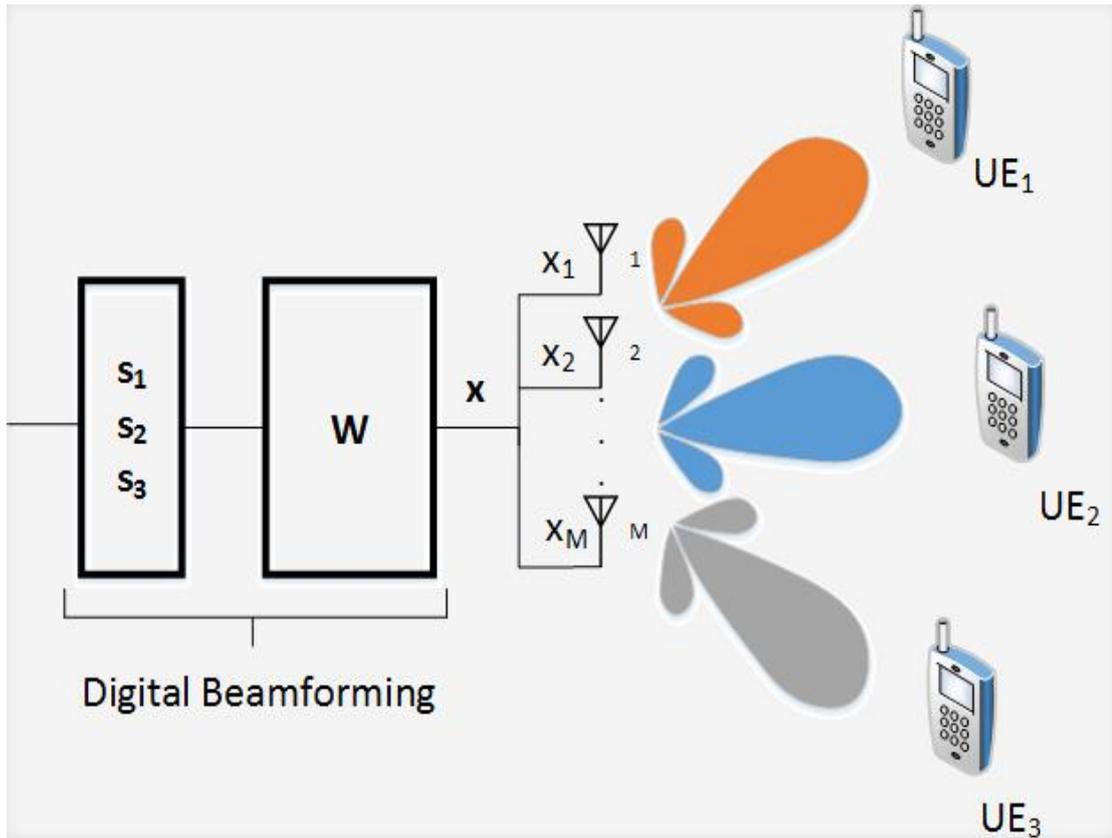


Figure 2.7 : Système Massive MIMO en transmission multiutilisateurs

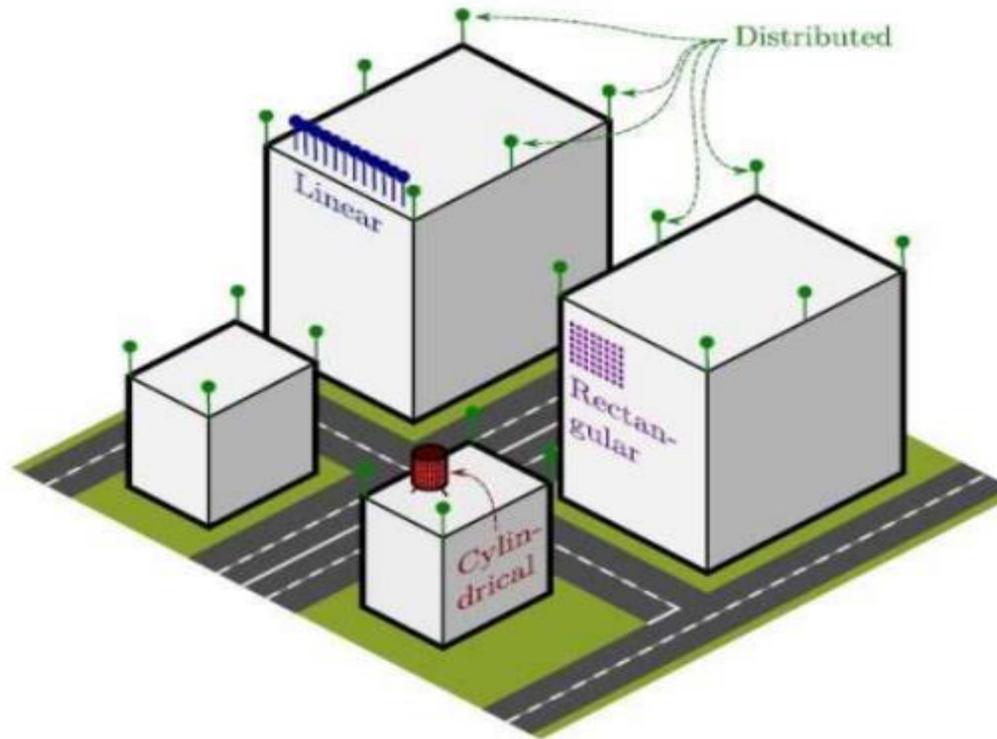
### 2.5.2 MU-MIMO

Augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant ainsi un côté périphérique pratiquement unifié. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grande échelle. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter la vitesse de transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de la station de base sans consommer plus de bande passante ni augmenter les valeurs de modulation.[30]

### 2.6 Caractéristiques de MIMO Massif

MIMO est une forme du système, MU MIMO (multi utilisateurs) où les stations de bases et le nombre d'utilisateurs sont très nombreux. En MIMO massif, une centaine voire une millième d'antenne à la station de bases serve un très grand nombre d'utilisateurs (dix à cents utilisateurs) simultanément et dans la même fréquence. MIMO Massif est une technologie du futur qui fournira des réseaux large bande plus sécurisé, robuste, efficace (en terme d'énergie

et d'utilisation de spectre). Différents types de déploiement et de configuration pour le MIMO massif peuvent être envisagés dans la figure 8.



**Figure 2.8 :** Types de configurations et déploiement d'une station de base pour le MIMO massif.

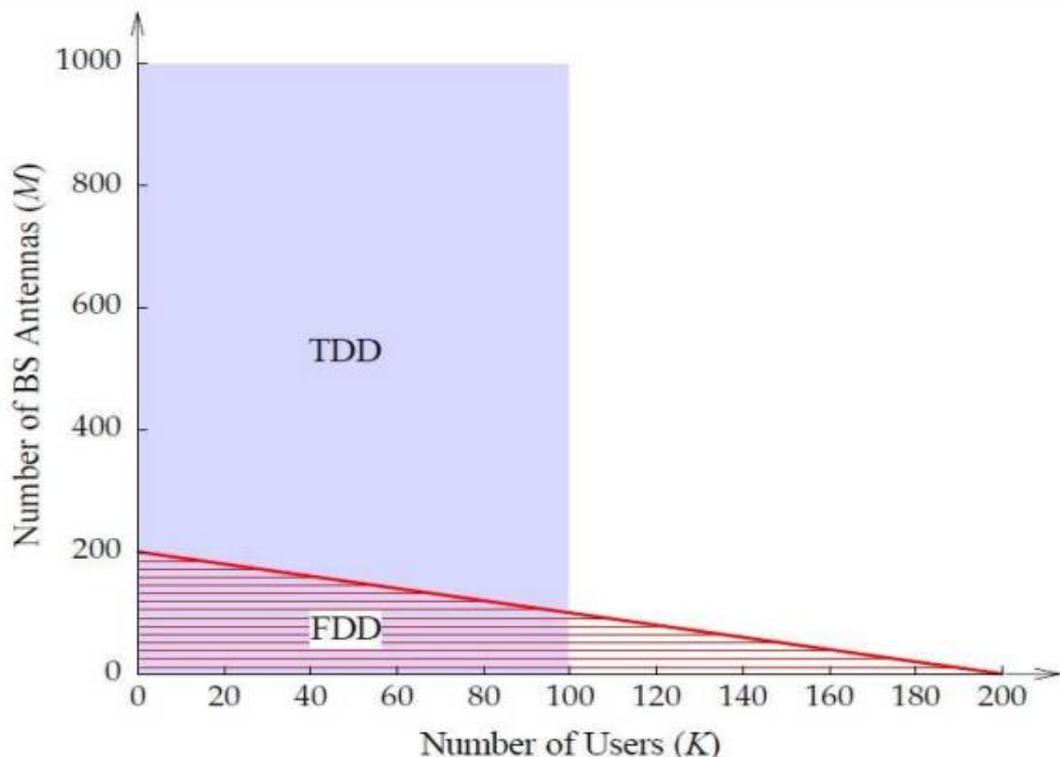
On peut donner quel que point important dans les systèmes MIMO massif:

### 2.6.1 TDD vs FDD pour le MIMO massif

Vu que le système MIMO Massif utilise un multiplexage spatial, il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance du canal, au niveau de la liaison montante et descendante. Au niveau de la liaison montante, il est plus facile d'estimer le canal quand les terminaux envoient des signaux à la station de base, tandis qu'il est plus complexe au niveau de la liaison descendante. Tout d'abord la station de base envoie des signaux aux terminaux, puis estime le canal pour pouvoir le quantifier. Enfin, l'estimation obtenue est renvoyé à la station de base. Cette technique est impossible pour le MIMO massif pour deux raisons. Premièrement, le signal au niveau de la liaison descendante doit être orthogonal c'est-à-dire tant que le nombre d'antennes augmente, plus de fréquence et de temps sont utilisé par rapport au MIMO classique. Deuxièmement, vu que chaque terminal accepte plusieurs signaux, l'estimation de canal augment alors par rapport aux nombre d'antennes à l'émission.

La solution à ce problème est donc d'utiliser la technique Duplex par séparation temporelle (ou Time-Division Duplex, TDD) et de dépendre à la réciprocité des liaisons montantes et descendantes du canal.

Utilisation de la technique Duplex par séparation temporelle (ou Time-Division Duplex, TDD) : comme vu précédemment, en utilisant la technique Frequency Division Duplexing ou FDD, l'estimation de canal dépend du nombre d'antenne  $M$  à la station de base. Par contre, avec TDD, l'estimation de canal est indépendante de  $M$ . En MIMO massif, le nombre d'antenne  $M$  est très nombreux, par conséquent, l'utilisation de la technique TDD est préférable. Par exemple, si l'intervalle de cohérence est  $T = 200$  symboles (correspondant au bande passante de cohérence de 200 kHz et de temps de cohérence de 1 ms). Alors, en utilisant le système FDD, le nombre d'antenne à la station de base et le nombre d'utilisateur sont limité par  $M+K < 200$  la figure montre Les régions possible  $(M, K)$  dans les systèmes TDD et FDD.



**Figure2.9:** Le gain écrasant de TDD sur FDD pour les UT.

### 2.6.2 Évolutivité

Dans le système MIMO massif, la station de base apprend les canaux via la formation de la liaison montante, à partir de la technique TDD. Le temps nécessaire pour l'estimation de canal est indépendant du nombre d'antennes à la station de base. Par conséquent, le nombre d'antennes à la station de base peut être rendu aussi large que l'on souhaite sans augmenter les frais généraux d'estimation de canal.

### 2.6.3 Propagation favorable

Signifie que la matrice de canal entre le réseau d'antenne de la station de base et des utilisateurs est bien conditionnée. En MIMO Massif, sous certaines conditions, la propriété de propagation favorable tient compte de la loi des grands nombres.

### 2.6.4 Un réseau d'antennes massif de la station de base n'a pas besoin d'être physiquement grand

Par exemple, considérons un réseau cylindrique avec 128 antennes, comprenant quatre cercles de 16 éléments à double polarisation d'antenne. À 2,6 GHz, la distance entre les antennes adjacentes est d'environ 6 cm, ce qui est une demi-longueur d'onde, et par conséquent, ce réseau occupe seulement une taille physique de 28 cm x 29 cm.[31]

## 2.7 Les avantages du MIMO massif

Les systèmes MIMO massifs sont extrêmement complexes. Cependant, les avantages offerts par le MIMO massif encouragent leur développement. Parmi c'est avantages :

**Efficacité spectrale :** Ce sujet prend de plus en plus d'importance, car nous grignotons toujours d'avantage du spectre électromagnétique pour divers protocoles de communication. Les gouvernements ont réservé une large bande de fréquences pour la 5G, mais ces spectres ne sont pas illimités. Le MIMO massif est en mesure d'exploiter son réseau d'antennes pour concentrer les faisceaux jusqu'aux utilisateurs individuels. Cela lui permet de proposer une efficacité spectrale 10 fois supérieure à celles des systèmes MIMO utilisés pour la 4G.

**Efficacité énergétique :** L'efficacité énergétique des systèmes électroniques devient un grand souci pour les concepteurs des nouveaux systèmes de télécommunications. Avec le MIMO massif, les antennes peuvent être conjuguées pour augmenter le gain de signaux transmis. Cela signifie qu'elles irradient moins d'énergie lorsqu'elles transmettent des données, améliorant l'efficacité énergétique du système.

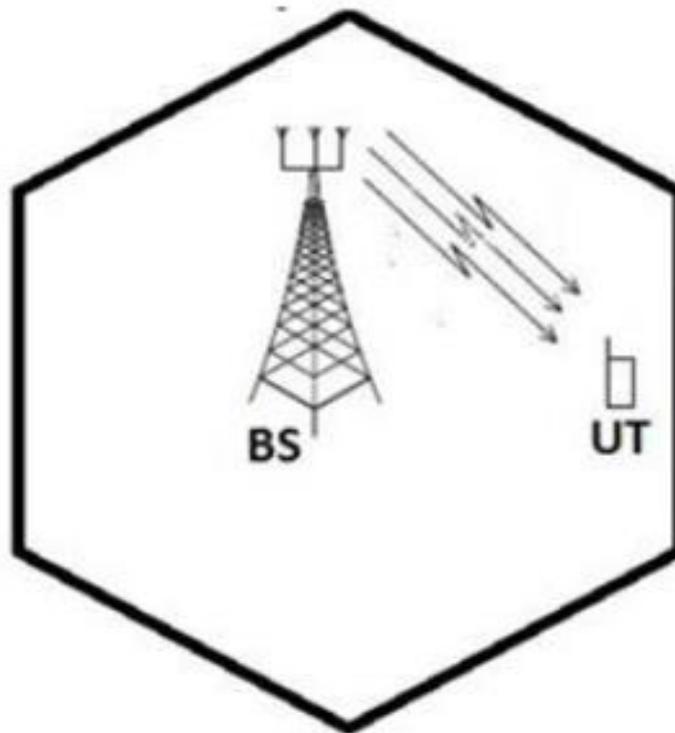
**Suivi des utilisateurs :** L'élément qui rend le MIMO massif si efficace énergétiquement parlant lui permet également de suivre très précisément les utilisateurs. Lorsque les faisceaux des antennes sont concentrés pour obtenir un gain élevé, leur largeur diminue. Ainsi, la Bs doit suivre chaque utilisateur avec un signal de faisceau étroit. Ce suivi fournira aux utilisateurs une connexion plus fiable et de meilleure qualité que les signaux larges qui ont été utilisés jusqu'à présent.[32]

### 2.8 Types de MIMO massif

#### 2.8.1 Système 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.

Dans le cas du système MIMO mono-utilisateur, le signal reçu par l'utilisateur est donné par l'équation suivante : [33]



**Figure 2.10 :** Single-User Massive MIMO

$$y = \sqrt{P_u} h_s + w \quad (2.8)$$

Notons  $P_u$ , le SNR de liaison montante, par  $h$ , le vecteur de réponse de canal, par  $s$ , le vecteur des symboles et par  $w$  le vecteur de bruit AWGN.

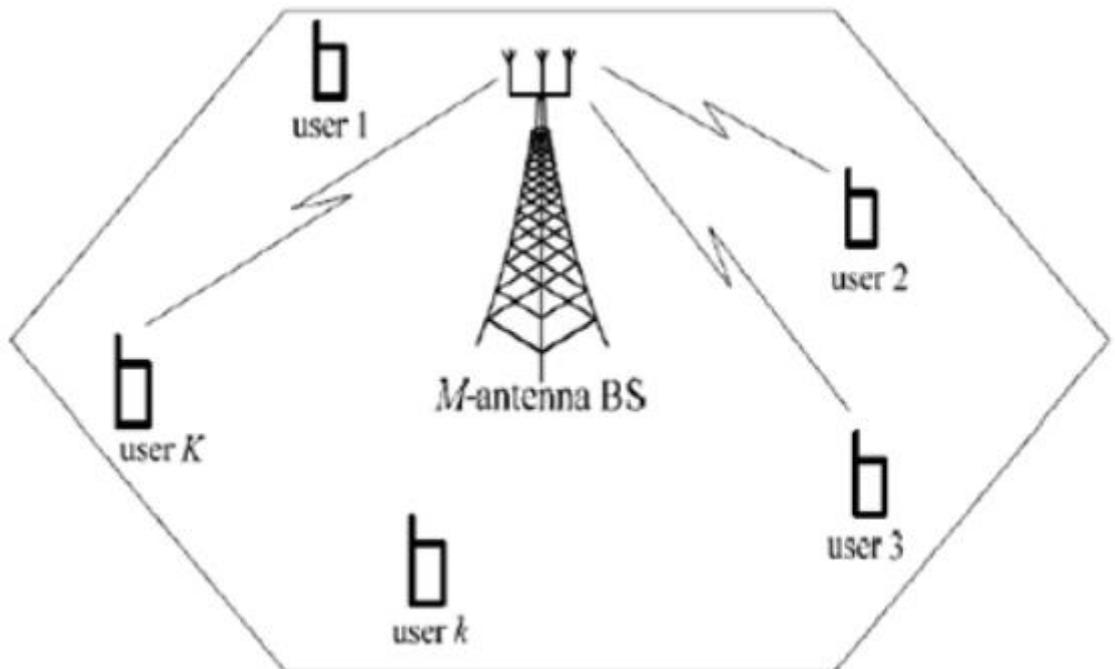
### 2.8.2 MIMO massif multiutilisateur

Lorsque plusieurs terminaux sont autorisés à accéder à une ressource temps-fréquence identique, MU-MIMO offre une plus grande efficacité du système contrairement à SU-MIMO. Dans cette section, nous prenons en considération un système MU-MIMO à cellule unique, où la BS dessert  $K$  UT avec chaque terminal équipé d'une antenne. Le signal reçu à la BS est:

$$Y = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_u} h_k s_k + W \quad (2.9)$$

$$y = \sqrt{P_u} H s + w \quad (2.10)$$

$y$  est  $M \times 1$  matrice de signaux reçus,  $h_k \in \mathbf{H}$ , par exemple.  $H = [h_1 \dots h_k \dots h_K]$  représente le vecteur de canal entre les antennes BS et le  $k$ ème UT,  $s_k \in s$  par exemple.  $s^T = [s_1 \dots s_k \dots s_K]$  représente le symbole transmis par  $k$ ème UT et  $w$  représente le bruit blanc additif gaussien (AWGN).



**Figure 2.11 :** Système MU-MIMO massif. M-antennes de BS dessert K simple antenne UT

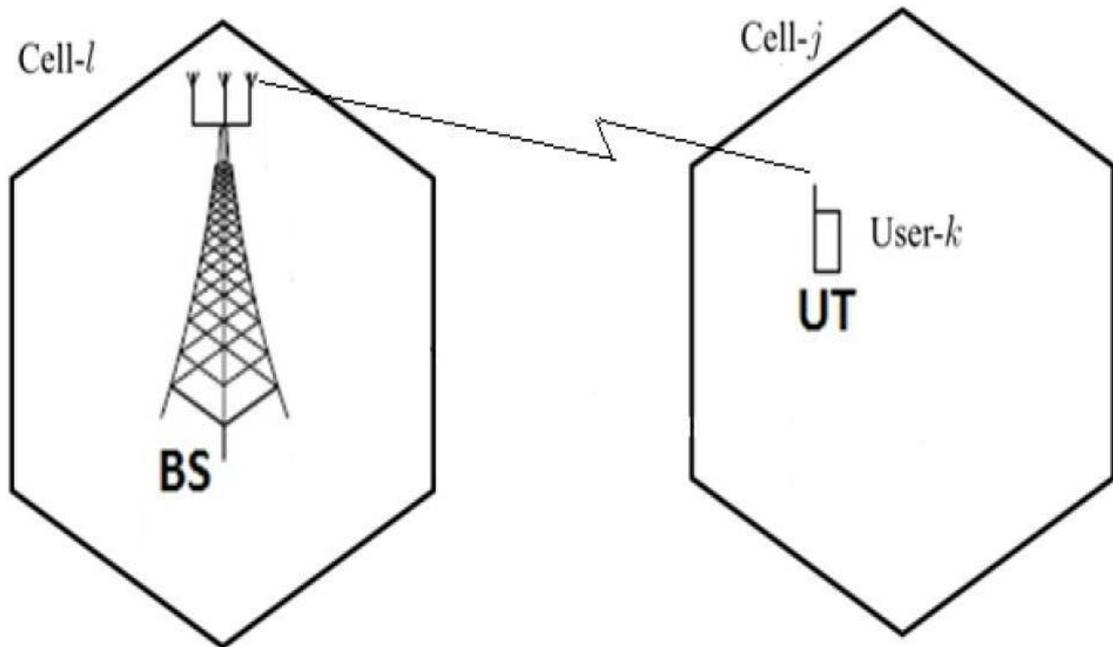
Lorsque  $K \geq 2$ , le signal obtenu de chaque terminal interfère avec ceux des autres terminaux donc les informations mutuelles de chaque terminal pour MU-MIMO sont plus petites que celles de SU-MIMO avec la même puissance transmise à chaque terminal. Cependant, lorsque  $M \gg K$ , l'orthogonalité de système annule les interférences des autres utilisateurs et rend le canal de propagation favorable du fait que les antennes aux terminaux sont presque non corrélées et découplées. C'est la raison pour laquelle le MIMO Massif est le meilleur candidat pour MU-MIMO.

### 2.8.3 Multi-User Massive MIMO avec Multi-Cell scenario

Dans cette section, nous envisageons la restriction des systèmes MIMO multiutilisateurs pour des cellules non coopératifs alors que  $M$  grandit sans limite. Pour une seule cellule, aussi bien que pour le MIMO multi-cellule, l'augmentation sans limite de  $M$  annule le bruit et les évanouissements de Rayleigh. Toutefois, les interférences dues à une contamination pilote persistera. L'idée de pollution pilote est nouvelle dans un contexte cellulaire MU-MIMO et est illustrée à la figure 2.12. L'estimation de canal de la station de base dans la cellule  $l$  est contaminée par le pilote de la cellule  $j$ . La station de base de la cellule  $l$  transmettra son signal partiellement aux côtés des terminaux de la cellule adjacente. En raison de la formation de faisceau, le brouillage causé à la cellule  $j$  ne disparaît pas de manière asymptotique quand  $M \rightarrow \infty$ . Pour cela nous pensons au système cellulaire multiutilisateur MIMO-OFDM avec des cellules hexagonales et des sous-porteuses NFFT. Toutes les cellules disposent de  $M$  antennes au niveau de la station de base et couvrent  $K$  terminaux indépendants. Les stations de base sont supposées non coopératives. La matrice de canaux composites  $M \times K$  entre les  $K$  UT dans la cellule  $l$  et les BS dans la cellule  $j$  est notée  $H_{jl}$ . En se basant sur la réciprocité, la matrice de canal de la liaison descendante entre la station de base de la cellule  $j$  et les terminaux de la cellule  $l$  est présentée par  $H_{jl}^T$ . Le signal reçu à la jème BS sera le suivant :

$$\mathbf{y}_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{P_u} h_{jlk} s_{lk} + \mathbf{W} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{y}_j = \sum_{l=1}^L \sqrt{P_u} H_{jl} s_l + \mathbf{W} \quad (2.12)$$



**Figure 2.12 :** La BS dans la l-ième cellule et le k-ième UT dans la j-ième cellule

### 2.8.4 MIMO massif distribuée

Le MIMO massif distribué peut être traité comme un cas distinct de MU-MIMO pour fournir en plus une plus grande capacité du système utilisant des antennes déployées dispersées pour transmettre et recevoir des signaux. L'un des mécanismes de la MIMO Massif consiste à permettre la coopération entre les BS dans des cellules distinctes, ce qui réduit l'interférence entre les cellules. Cependant, la synchronisation se transforme en un problème par excellence même pour des antennes distribuées au même BS. Dans certains cas, la quantité massive d'antennes à la station de base peut en outre être positionnée dans des endroits uniques (par exemple, au sommet des bâtiments). Dans ce cas, la synchronisation est un problème, et l'interface RF peu coûteux peut également introduire de plus gros problèmes.

[34]

## 2.9 Comparaison entre MIMO et MIMO massif

Comparés au MIMO, les avantages du MIMO massif incluent :

- Amélioration de l'Efficacité spectrale(SE),
- Grand Quantité de degrés de liberté dans le domaine spatial

- Bonnes performances du système avec uniquement un schéma de pré-codage linéaire (simple), par ex Forçage à zéro, transmission du rapport maximal, erreur quadratique moyenne minimale

- Faciliter l'allocation des ressources

### 2.10 Utilité pour la 5G

Le spectre disponible pour la 5G est limité, aussi l'efficacité spectrale est-elle très importante. Les réseaux 5G auront également besoin de connecter des milliards d'appareils. Pour que cela fonctionne, ils auront besoin de la précision millimétrique et de l'efficacité énergétique du MIMO massif.

Le gouvernement des États-Unis a récemment ouvert une nouvelle portion du spectre haute fréquence à la technologie 5G. Cela sera très utile à l'avenir, mais pendant la brève période de transition, les fréquences inférieures à 6 GHz fourniront une transition plus souple depuis la 4G/LTE. Il se trouve simplement que le MIMO massif fonctionne mieux sur des fréquences inférieures à 6 GHz. Cette bande étant déjà pleine à craquer, l'efficacité spectrale supérieure du MIMO massif en fait le candidat idéal.

Au fil des innovations technologiques, notre monde devient de plus en plus connecté. L'Internet des objets décolle, les voitures autopilotées apparaissent à l'horizon, et déjà, des réseaux sont en place pour établir des « villes intelligentes ». La 5G est sur le point d'investir tous ces domaines, et elle aura besoin de connecter des milliards d'appareils. Pour ce faire, le MIMO massif devra être capable d'envoyer des données vers et à partir d'appareils mobiles. L'efficacité énergétique du MIMO massif signifiera également que ces réseaux n'auront pas besoin d'un nouveau boom pétrolier pour fonctionner.

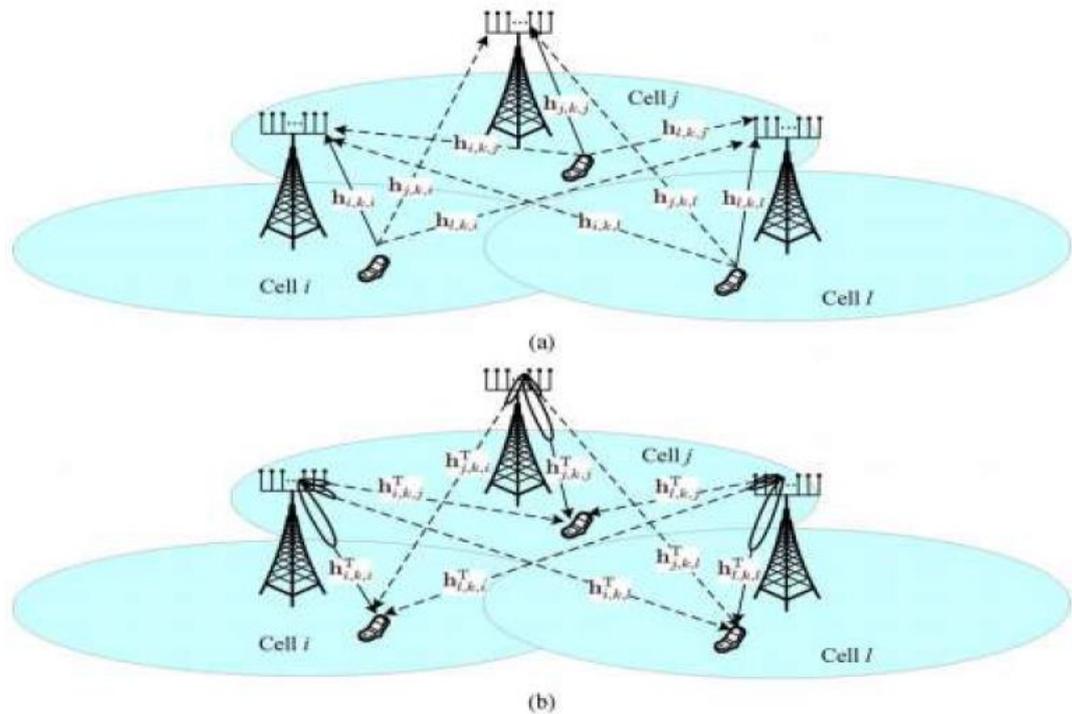
L'utilisation d'un très grand nombre d'antennes permettra aux réseaux cellulaires de connecter de grands nombres d'utilisateurs, avec efficacité et fiabilité. Il se trouve que ces attributs sont également ceux dont on a besoin pour implémenter la 5G. Avec des milliards d'appareils débarquant en ligne et un spectre de fréquences limité, la 5G aura besoin du MIMO massif pour nous aider à nous tourner vers l'avenir. [32]

### 2.11 Défis des systèmes MIMO Massifs

Malgré les énormes avantages de MIMO Massive, de nombreuses questions doivent encore être abordées. Les principaux défis de MIMO Massif sont répertoriés comme suit :

### 2.11.1 La contamination des séquences pilotes

Les utilisateurs appartenant à une même cellule utilisent généralement différentes séquences pilotes orthogonales. Cependant, du fait de leur nombre limité, dans un système multi-cellulaire, il est possible qu'un utilisateur d'une cellule utilise la même séquence pilote qu'un autre utilisateur d'une cellule adjacente, créant ainsi un phénomène de contamination des pilotes ("pilots contamination"). Ce phénomène est communément observé dans les transmissions UL multi-cellulaires. Le canal estimé par la station de base et l'utilisateur considéré, et entre la station de base et l'utilisateur de la cellule adjacente. Cette contamination des pilotes, propre aux systèmes multi-antennes et multicellulaires (MIMO conventionnel, MIMO Massif) utilisant un estimateur de canal linéaire génère des perturbations aussi bien dans la démodulation des signaux UL que dans les performances du précodage DL, aboutissant ainsi à une réduction des capacités théoriques. Plusieurs études sont menées afin d'atténuer l'impact de ce phénomène. Certaines solutions permettent de réduire les effets de ces perturbations à travers la coopération entre cellules, l'ingénierie radio (optimisation de l'allocation des séquences pilotes selon la localisation des cellules) ou encore les méthodes de précodage adaptées à la structure des cellules. La figure suivante représente la contamination pilote dans les systèmes MIMO Massif :



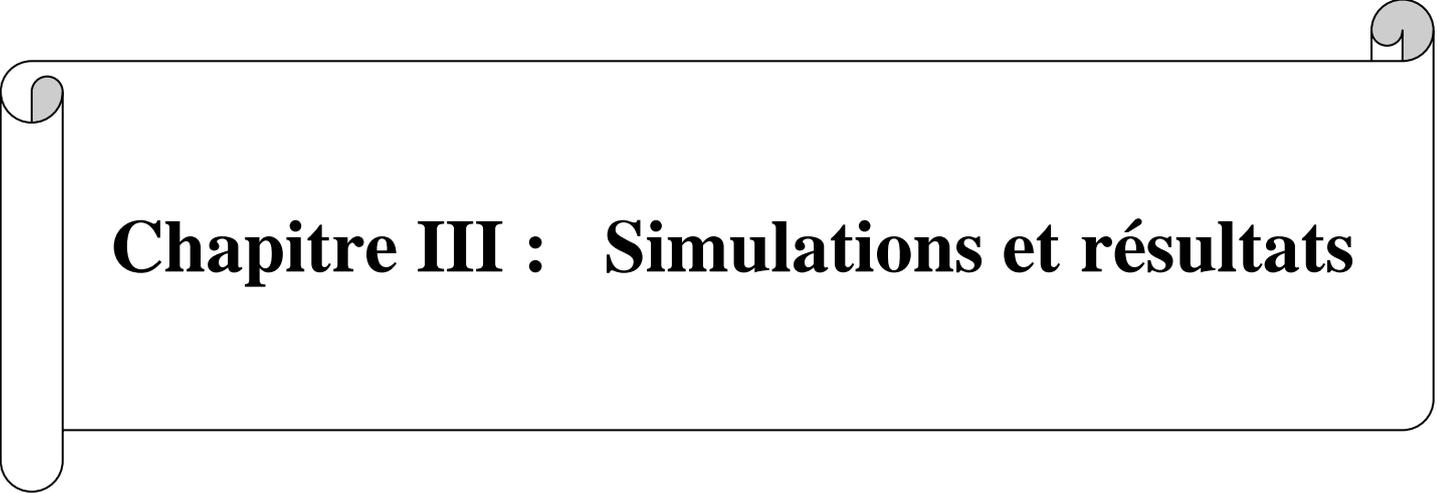
**Figure 2.13** : Illustration du concept de pilote contamination. (a) liaison montante (b) liaison descendantes.

### 2.11.2 Propagation Défavorable

MIMO Massif fonctionne sous les environnements favorables de propagation. Cependant, dans la pratique, il peut y avoir des environnements de propagation où les canaux ne sont pas favorables. Par exemple, dans des environnements de propagation où le nombre de diffuseurs est faible par rapport au nombre d'utilisateurs, ou les canaux de différents utilisateurs au BS partagent certains diffuseurs communs, le canal n'est pas favorable. Une possibilité pour résoudre ce problème est de distribuer les antennes de BS sur une grande surface.[35]

### 2.12 Conclusion

Les communications sans fils MIMO massifs à entrée multiple et sortie multiple font référence à l'idée d'équiper les stations de base cellulaire d'un très grand nombre d'antennes afin d'augmenter le débit du canal avec un multiplexage spatial et d'améliorer l'efficacité de la transmission. Soit plusieurs émetteurs émettent via des antennes séparées sur des canaux de propagation non corrélés afin d'augmenter la capacité de transmission pour un ou plusieurs utilisateurs, soit le même signal de sortie est émis via plusieurs antennes et combiné dans le récepteur afin d'améliorer la qualité du signal (diversité en réception). Les systèmes MIMO massifs exploitent les technique de la diversité, le multiplexage spatial, ou encore la formation de faisceaux pour l'amélioration des performances de la liaison.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the top and right. The text is centered within this border.

## **Chapitre III : Simulations et résultats**

### 3.1. Introduction

Dans les systèmes MIMO massifs, l'estimation du canal reste le sujet phare. Cette dernière est une méthode qui permet la connaissance de canal de transmission en estimant les coefficients des différents sous-canaux utilisant les séquences d'apprentissage.

Ce chapitre décrit comment l'estimation de canal est effectuée au niveau des BS en utilisant la transmission du signal pilote dans la voie montante. Nous exposons ensuite et nous étudions les résultats graphiques de simulation obtenus par le logiciel Matlab. Les simulations présentent l'impact des différents paramètres sur l'estimation NMSE d'un canal MIMO massif.

### 3.2 Langage utilisé

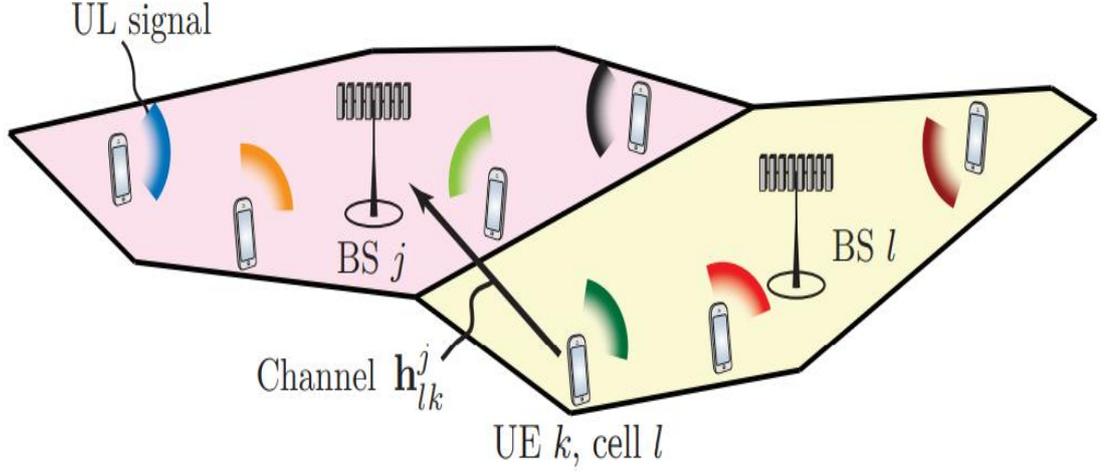
Le choix du bon environnement de programmation est très important pour le développement des projets. Cela se fait suivant plusieurs facteurs: la puissance de compilation, la facilité d'utilisation, la disponibilité de plusieurs fonctionnalités et la communication avec d'autres environnements, etc. Afin de réaliser les différentes simulations de notre système, nous avons eu recours aux outils du logiciel MATLAB®.

Ce dernier est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un environnement interactif pour le développement d'algorithmes, la visualisation et l'analyse des données, ou encore le calcul numérique (MATLAB veut dire MATrixLABoratory). En utilisant MATLAB, nous pouvons résoudre des problèmes de calcul scientifique plus rapidement qu'avec les langages de programmation traditionnels ; car il n'est pas nécessaire d'effectuer les tâches de programmation de bas niveau, comme la déclaration des variables, la spécification des types de données et l'allocation de la mémoire

### 3.3 Environnement de simulation

Nous considérons dans notre étude un système cellulaire avec un nombre  $L$  des cellules numérotées de  $(1, 2, \dots, L)$ . Chaque cellule comprend une station de base de  $M$  antennes et  $i$  utilisateurs ayant chacun une seule antenne, avec une  $BS_j$  qui fait des estimations des canaux des utilisateurs de la cellule  $i$  et  $l$ , l'estimation de canal des utilisateurs interférant dans d'autres cellules peuvent également être utiles pour supprimer les interférences pendant la transmission des données. Chaque terminal d'un système MIMO massif se voit attribuer une séquence pilote orthogonale dans la liaison montante qui est connue à la fois du récepteur et

de l'émetteur. Cette dernière est utilisée pour estimer le canal entre le terminal utilisateur et la station de base.



**Figure 3.1 :** Illustration de la transmission UL MIMO massifs dans les cellules j et l.

La séquence pilote de l'utilisateur k dans la cellule j est désignée par  $\phi_{jk} \in C^{\tau_p}$ , où  $\tau_p$  sont des échantillons réservés pour la signalisation pilote dans la voie montante (UL), chaque UE transmet une séquence pilote qui couvre ces  $\tau_p$ . Il est supposé avoir des éléments de grandeur unitaire, pour obtenir un niveau de puissance constant, ce qui implique que  $\|\phi_{jk}\|^2 = \phi_{jk}^H \phi_{jk} = \tau_p$ . Les éléments de  $\phi_{jk}$  sont mis à l'échelle par la puissance d'émission UL comme  $\sqrt{p_{jk}}$  puis transmis comme signal  $s_{jk}$  sur  $\tau_p$  échantillons UL, conduisant au signal UL reçu  $Y_j^p \in C^{M_j \times \tau_p}$  à la station de base BSj. Ce signal est donné par :

$$Y_j^p = \sum_{k=1}^{K_j} \sqrt{p_{jk}} h_{jk}^j \phi_{jk}^T + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^L \sum_{i=1}^{K_l} \sqrt{p_{li}} h_{li}^j \phi_{li}^T + N_j^p \quad (3.1)$$

Où  $N_j^p \in C^{M_j \times \tau_p}$  est le bruit du récepteur additif.  $Y_j^p$  est le signal pilote reçu par la station de base BSj pour estimer les réponses des canaux. La BS nécessite la connaissance de la séquence pilote de l'utilisateur pour estimer la réponse du canal. C'est pourquoi les pilotes sont des séquences déterministes et l'attribution est généralement effectuée lorsque l'UE se connecte à la BS.

Supposons, pour des raisons d'argumentation, que la BS j veuille estimer le canal  $h_{li}^j$  à partir d'un UE i arbitraire dans la cellule l. La BS peut alors multiplier  $Y_j^p$  avec la séquence pilote  $\phi_{li}$  de ce dernier, conduisant au signal pilote reçu traité  $y_{jli}^p \in C^{M_j}$ , donné par :

$$y_{jli}^p = Y_j^p \phi_{li}^* = \sum_{l'=1}^L \sum_{i'=1}^{K_{l'}} \sqrt{P_{l'i'}} h_{l'i'}^j \phi_{l'i'}^T \phi_{li}^* + N_j^p \phi_{li}^* \quad (3.2)$$

qui a la même dimension que  $h_{li}^j$ .

Pour le kème UE dans sa propre cellule, l'équation (3.2) peut être exprimée comme :

$$\begin{aligned} y_{jjk}^p &= Y_j^p \phi_{jk}^* & (3.3) \\ &= \sqrt{P_{jk}} h_{jk}^j \phi_{jk}^T \phi_{jk}^* + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_j} \sqrt{P_{ji}} h_{ji}^j \phi_{ji}^T \phi_{jk}^* + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^L \sum_{i=1}^{K_l} \sqrt{P_{ji}} h_{li}^j \phi_{li}^T \phi_{jk}^* + N_j^p \phi_{jk}^* \end{aligned}$$

Le deuxième et le troisième terme de (3.3) représentent les interférences, où J et l sont l'ensemble des indices des cellules du système et  $h_{jk}^j$  est le canal entre le kème terminal de cellule j vers la BS j. Puisque nous supposons que les séquences pilotes dans une cellule sont orthogonales, nous ignorons l'impact des pilotes brouilleurs des intra-cellules dû à la réception simultanée des autres séquences pilotes si  $i \neq k$ . Mais puisque les pilotes sont des vecteurs de dimension  $\tau_p$ , pour un  $\tau_p$  donné, on ne peut trouver qu'un ensemble d'au plus  $\tau_p$  séquences mutuellement orthogonales. La longueur finie de blocs de cohérence, imposent la contrainte  $\tau_p \leq \tau_c$  qui rend impossible l'attribution des pilotes mutuellement orthogonales à tous les UE en pratique. La règle de base est que  $\tau_p$  doit toujours être inférieur à  $\tau_c / 2$ , pour la transmission de données.

Nous définissons l'ensemble :

$$P_{jk} = \{(l, i) : \phi_{li} = \phi_{jk}, l = 1, \dots, L, i = 1, \dots, K_l\} \quad (3.4)$$

Est l'ensemble des indices de tous les UE qui utilisent la même séquence pilote que l'UE k dans la cellule j. Par conséquent,  $(l, i) \in P_{jk}$  implique que l'UE i dans la cellule l utilise le même pilote que UE k dans la cellule j. Notez que  $(j, k) \in P_{jk}$  par définition. En utilisant la notation (3.4), l'expression (3.3) se simplifie en(3.5) :

$$y_{jjk}^p = \sqrt{P_{jk}} \tau_p h_{jk}^j + \sum_{(l,i) \in P_{jk} \setminus (j,k)} \sqrt{P_{li}} \tau_p h_{li}^j + N_j^p \phi_{jk}^* \quad (3.5)$$

Notez que  $y_{jjk}^p = y_{jli}^p$  pour tout  $(l, i) \in P_{jk}$ , puisque ces UE utilisent le même pilote. On note également que  $N_j^p \phi_{jk}^* \sim N_C(0_{M_j}, \sigma_{UL}^2 \tau_p I_{M_j})$ , puisque les pilotes sont déterministes et  $\|\phi_{jk}\|^2 = \tau_p$ .

Le signal reçu  $y_{jjk}^p$  dans (3.5) est une statistique suffisante pour l'estimation de  $h_{jk}^j$ , car il n'y a pas de perte d'informations utiles par rapport à l'utilisation de signal reçu à l'origine  $Y_j^p$ .

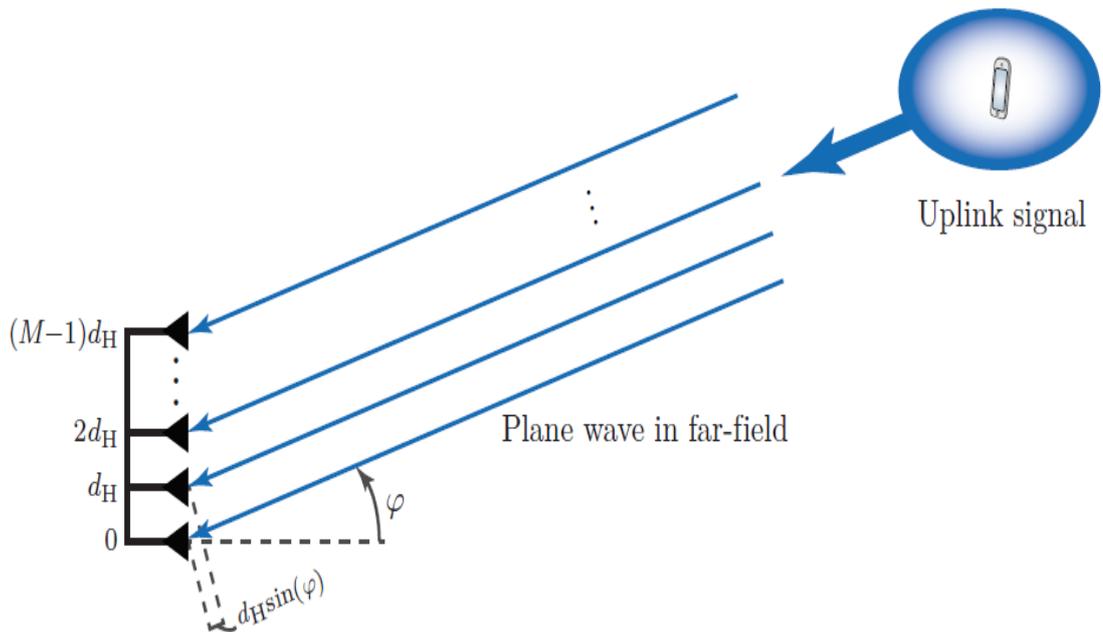
La raison est que le composant désirée  $h_{jk}^j \phi_{jk}^T$  en  $Y_j^p$  peut être ramené de  $y_{jjk}^p$  en multipliant par  $\phi_{jk}^T$  et les termes interférents sont zéro. De même,  $y_{jli}^p$  est une statistique suffisante pour estimer  $h_{li}^j$ .

### 3.4 Les modèles des canaux

On distingue deux modèles des canaux dans la communication sans fils :

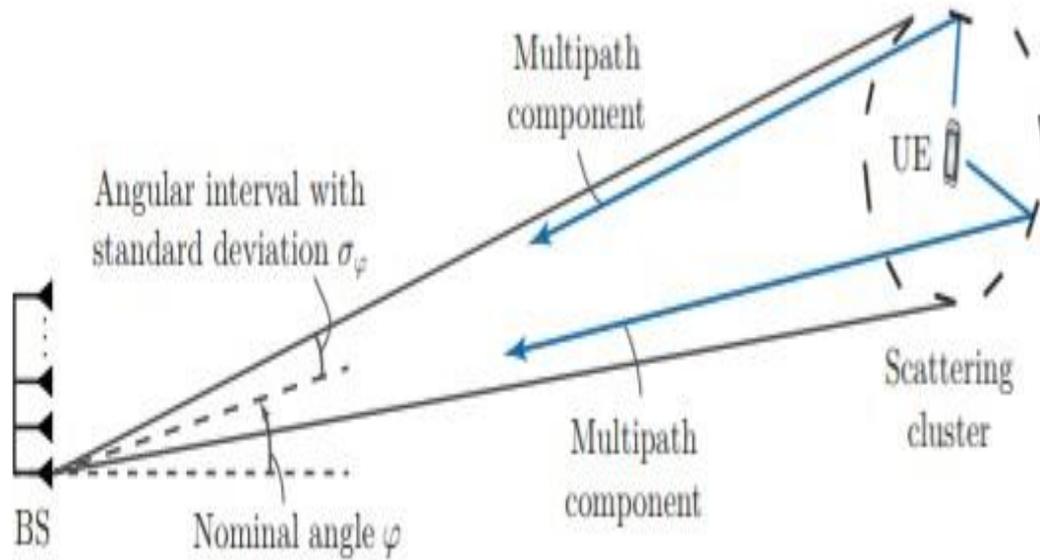
#### Les canaux corrélés

Les canaux corrélés sont des canaux dépendant qui ont la même direction vers les antennes, c'est-à-dire le coefficient de corrélation égal à 1. Dans l'absence des obstacles on a un trajet direct (LoS).



**Figure 3.2 :** Propagation LoS entre un utilisateur à antenne unique et une Bs.

### Le modèle de diffusion local



**Figure 3.3 :** Modèle de corrélation spatiale à diffusion locale

Le cercle des obstacles qui autour l'émetteur est un diffuseur locale, où plusieurs signaux ont la même direction vers le récepteur, ce phénomène du a la collision de signal émis avec les obstacles qui entoure l'UE, donc dans ce cas, on a un canal corrélé, ou l'angle  $\sigma_\varphi$ (ASD) est la déviation standard angulaire minimal et maximal. L'angle d'émission nominal  $\varphi$  c'est la moitié entre les deux extrémités, elle est bornée entre  $+\sigma_\varphi - \sigma_\varphi$

### Les canaux décorrélés

Ce modèle de canal est appelé à évanouissement de Rayleigh non corrélé ou à évanouissement de Rayleigh à distribution indépendant et identique (i.i.d.), la décoloration de Rayleigh est un modèle traitable pour des conditions de diffusion riches, où le réseau BS est entouré de nombreux objets diffusants, par rapport au nombre d'antennes. Les signaux arrivent aux antennes selon plusieurs directions à cause des obstacles (NLoS).

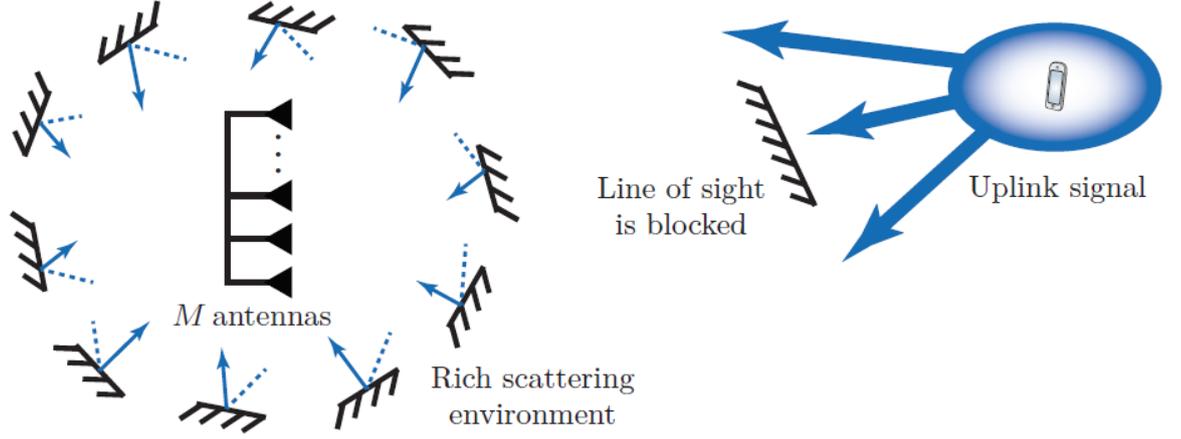


Figure 3.4 : Propagation NLoS entre un utilisateur a antenne unique et une Bs.

### 3.5 L'estimation MMSE et NMSE

Le détecteur MMSE est un détecteur linéaire dont la matrice de transformation permet de minimiser l'erreur quadratique moyenne entre le vecteur réel et le vecteur estimé. MMSE réduit le problème de l'amélioration du bruit en prenant en compte la puissance de bruit lors de la construction de la matrice de filtrage en utilisant le critère basé sur la performance MMSE[12]. L'estimateur de l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) de  $h_{li}^j$  est le vecteur  $\hat{h}_{li}^j$  qui minimise le MSE  $E\{\|h_{li}^j - \hat{h}_{li}^j\|^2\}$ .

L'estimation MMSE du canal  $h_{li}^j$  est donnée par :

$$\hat{h}_{li}^j = \sqrt{p_{li}} R_{li}^j \psi_{li}^j y_{li}^p \quad (3.6)$$

Avec :

$$\psi_{li}^j = \left( \sum_{(l', l'') \in p_{li}} p_{l' l''} \tau_p R_{l' l''}^j + \sigma_{UL}^2 I_{M_j} \right)^{-1} \quad (3.7)$$

Où la matrice de corrélation R est donnée par :

$$\begin{aligned} [R]_{l,m} &= \sum_{n=1}^{N_{path}} E\{|g_n|^2\} E\{e^{2\pi j d_H(l-1) \sin(\bar{\varphi}_n)} e^{-2\pi j d_H(m-1) \sin(\bar{\varphi}_n)}\} \\ &= \beta \int e^{2\pi j d_H(l-m) \sin(\bar{\varphi})} f(\bar{\varphi}) d\bar{\varphi} \end{aligned} \quad (3.8)$$

L'erreur d'estimation  $\tilde{h}_{li}^j = h_{li}^j - \hat{h}_{li}^j$  a une matrice de corrélation donnée par

$$C_{li}^j = E\{\tilde{h}_{li}^j (\tilde{h}_{li}^j)^H\}$$

$$C_{ii}^j = R_{ii}^j - p_{ii}\tau_p R_{ii}^j \psi_{ii}^j R_{ii}^j \quad (3.9)$$

Cette équation fournit le mécanisme pour calculer l'estimation MMSE du canal de tout UE du réseau vers la BS j. la qualité d'estimation est représentée par le MSE, qui est  $E \{ \|h_{ii}^j - \hat{h}_{ii}^j\|^2 \} = tr(C_{ii}^j)$  pour l'estimateur MMSE. Une bonne qualité d'estimation est représentée par un MSE petit. Rappelons que l'estimateur MMSE minimise le MSE, qui est définie par :

$$E \{ \|h_{ii}^j - \hat{h}_{ii}^j\|^2 \} = E \{ \|\tilde{h}_{ii}^j\|^2 \} = E \{ tr(\tilde{h}_{ii}^j (\tilde{h}_{ii}^j)^H) \} = tr(C_{ii}^j) \quad (3.10)$$

Nous utilisons l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE) pour comparer la qualité de l'estimation obtenue avec différentes estimations dans différents scénarios définie par :

$$NMSE_{ii}^j = \frac{tr(C_{ii}^j)}{tr(R_{ii}^j)} \quad (3.11)$$

C'est une métrique appropriée, car elle mesure l'erreur d'estimation relative par antenne. Il s'agit d'une valeur comprise entre 0 (estimation parfaite) et 1 (atteinte en utilisant la valeur moyenne de la variable,  $E \{ h_{ii}^j \}$ , comme estimation).

### **3.6 Discussion des résultats de simulation**

#### **3.6.1 L'impact de la corrélation spatial et la contamination pilote**

L'estimation de canal conventionnelle repose sur la corrélation du signal reçu avec la séquence pilote connue, nous allons montrer comment la corrélation spatiale des canaux et la contamination des pilotes affecte ses performances pour comprendre les propriétés de base de l'estimateur MMSE.

#### **3.6.2 L'impact du SNR sur l'estimation de canal NMSE**

Soit R :

$$R = U \Lambda U^H \quad (3.12)$$

L'équation (3.12) dénote la décomposition en valeur propre de la matrice de corrélation, où la matrice unitaire  $U \in \mathbb{C}^{M \times M}$  contient les vecteurs propres et la matrice diagonale

$\Lambda$  contient les valeurs propres correspondantes. La matrice de corrélation des erreurs d'estimation dans (3.9) devient :

$$C = U \text{diag} \left( \lambda_1 - \frac{p\tau_p \lambda_1^2}{p\tau_p \lambda_1 + \sigma_{UL}^2}, \dots, \lambda_M - \frac{p\tau_p \lambda_M^2}{p\tau_p \lambda_M + \sigma_{UL}^2} \right) U^H \quad (3.13)$$

$$\lambda_m - \frac{p\tau_p \lambda_m^2}{p\tau_p \lambda_m + \sigma_{UL}^2} = \frac{\sigma_{UL}^2 \lambda_m}{p\tau_p \lambda_m + \sigma_{UL}^2} = \frac{\lambda_m}{SNR^p \frac{\lambda_m}{\beta} + 1} \quad (3.14)$$

Où  $SNR^p$  et le SNR effectif définie par :

$$SNR_{jk}^p = \frac{p_{jk} \tau_p \beta_{jk}^j}{\sigma_{UL}^2} \quad (3.15)$$

Les valeurs propres de C dans (3.14) représentent la variance de l'erreur d'estimation dans chaque direction propre.

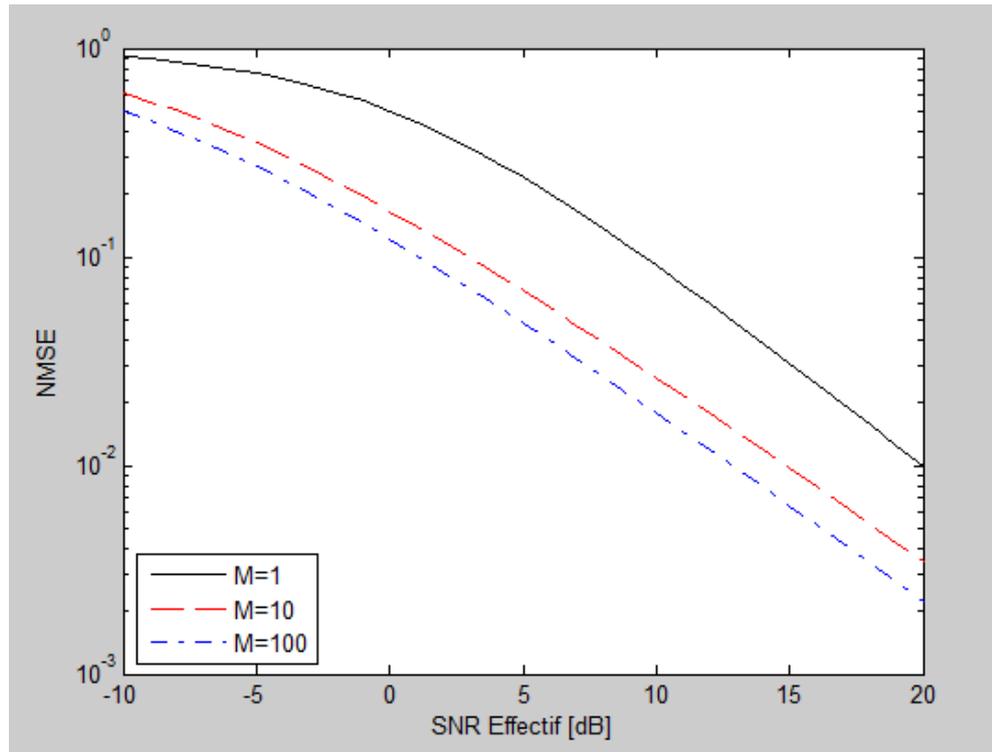
On remarque a partir de l'équation (3.14) qu'une direction propre de R avec une valeur grande  $\lambda_m$  a une variance d'erreur normalisée plus petite qu'une direction propre qui a une valeur propre plus petite.

$$\frac{\frac{\lambda_m}{SNR^p \frac{\lambda_m}{\beta} + 1}}{\lambda_m} = \frac{1}{SNR^p \frac{\lambda_m}{\beta} + 1} \quad (3.16)$$

L'intuition est que les directions propres sont estimées indépendamment et les directions propres fortes sont plus faciles à estimer car le SNR est plus élevé.

Dans cette section, on calcul l'estimation du canal NMSE entre une station de base BSj et un terminal UEk, qui dépend de la puissance du signal sur bruit SNR.

Les résultats de simulation sont présentés par la figure suivante :



**Figure 3.5** : NMSE dans l'estimation MMSE d'un canal spatialement corrélé.

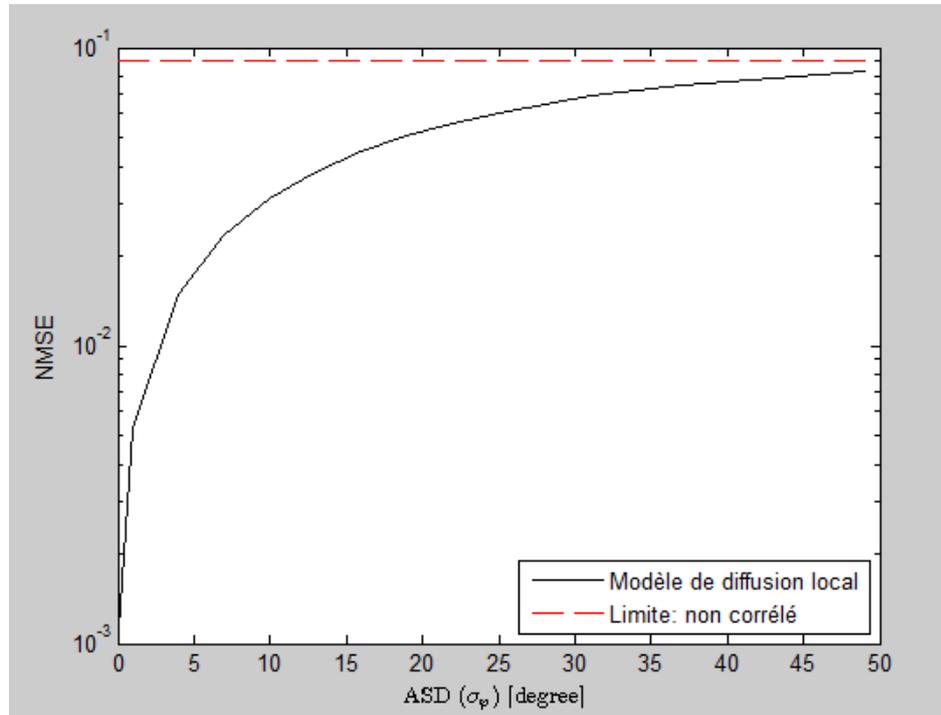
La figure 3.5 représente la variation NMSE en fonction du SNR effectif doté par les antennes SISO, MIMO et MIMO massif avec distribution angulaire gaussienne. Les résultats sont moyennés sur différents angles nominaux uniformément répartis entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$  et l'angle de déviation  $\sigma_d = 10^\circ$ .

Cette figure montre que le NMSE diminue de façon monotone avec le SNR, comme prévu à partir de (3.14). Une NMSE d'environ  $10^{-2}$  est obtenu à un SNR de 20 dB, ce qui signifie que la variance de l'erreur d'estimation n'est que de 1% de la variance d'origine du canal. Il est à noter que ce SNR effectif peut être obtenu en ayant un SNR nominal de 10 dB avec  $\tau_p = 10$ , donc ce n'est pas particulièrement élevé.

### 3.6.3 L'impact de la corrélation spatiale sur l'estimation de canal

Nous allons étudier dans cette simulation plus en détail L'impact de la corrélation spatiale des canaux, où le NMSE est représentée en fonction de l'ASD  $\sigma_\varphi$  dans le modèle de diffusion local. Le SNR effectif est de 10 dB avec  $M = 100$ .

La figure 3.6 représente le résultat de simulation :



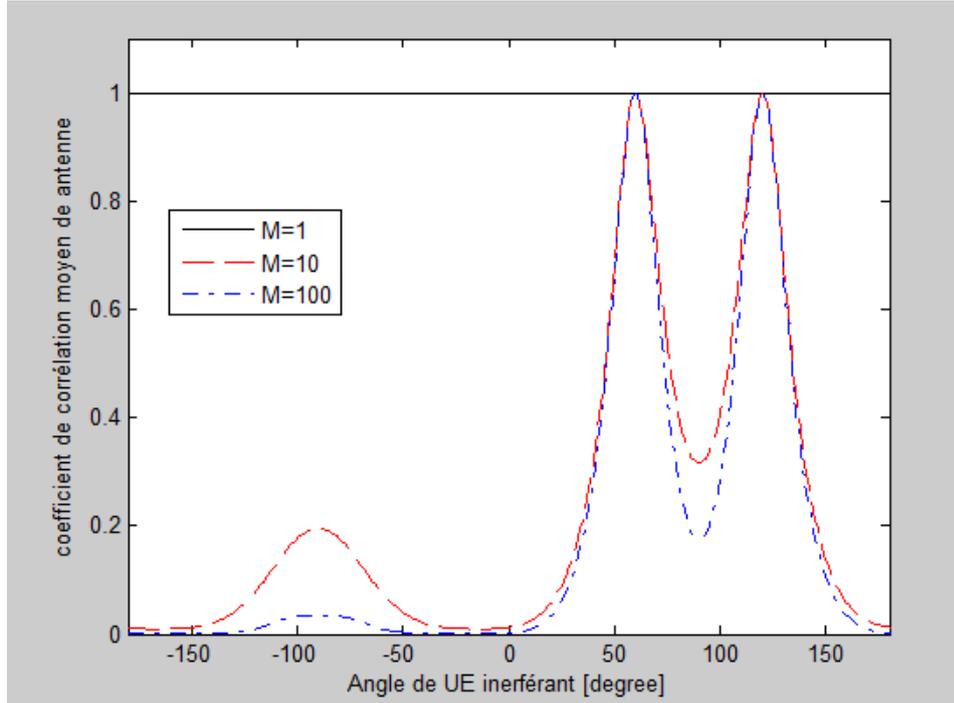
**Figure 3.6 :** L'impact de l'ASD  $\sigma_\varphi$  sur l'estimation de canal

La figure 3.6 montre que l'erreur est plus petite lorsque l'ASD est petit (c.-à-d. corrélation spatiale). Cela s'explique par le fait que la plupart des variances des canaux résident dans quelques valeurs propres lorsque  $\sigma_\varphi$  est petite. Comme il a été conclu à partir de (3.16), il est plus facile d'estimer des valeurs propres fortes que les plus faibles.

### 3.6.4 L'impact de la contamination pilote sur l'estimation

Nous analysons maintenant le problème de contamination pilote dans le cadre suivant : deux UE utilisent la même séquence pilote. BS  $j$  estime le canal de l'UE  $k$  dans sa propre cellule, tandis que l'UE  $i$  dans la cellule  $l$  avec le même pilote, dans la suite on va estimer les deux canaux (le canal de signal désiré et le canal de signal interférant) puis on va calculer la corrélation entre ces deux canaux.

La figure 3.7 montre ces résultats :



**Figure 3.7 :** La variation de coefficient de corrélation en fonction de l'angle d'UE interférant.

La figure 3.7 montre le coefficient de corrélation Moyen de liaison entre les estimations de canal défini par :

$$\frac{E \left\{ (\hat{h}_{li}^j)^H \hat{h}_{jk}^j \right\}}{\sqrt{E \left\{ \|\hat{h}_{jk}^j\|^2 \right\} E \left\{ \|\hat{h}_{li}^j\|^2 \right\}}} = \frac{\text{tr}(R_{li}^j R_{jk}^j \psi_{li}^j)}{\sqrt{\text{tr}(R_{jk}^j R_{jk}^j \psi_{li}^j) \text{tr}(R_{li}^j R_{li}^j \psi_{li}^j)}} \quad (3.17)$$

$$(l, i) \in P_{jk}$$

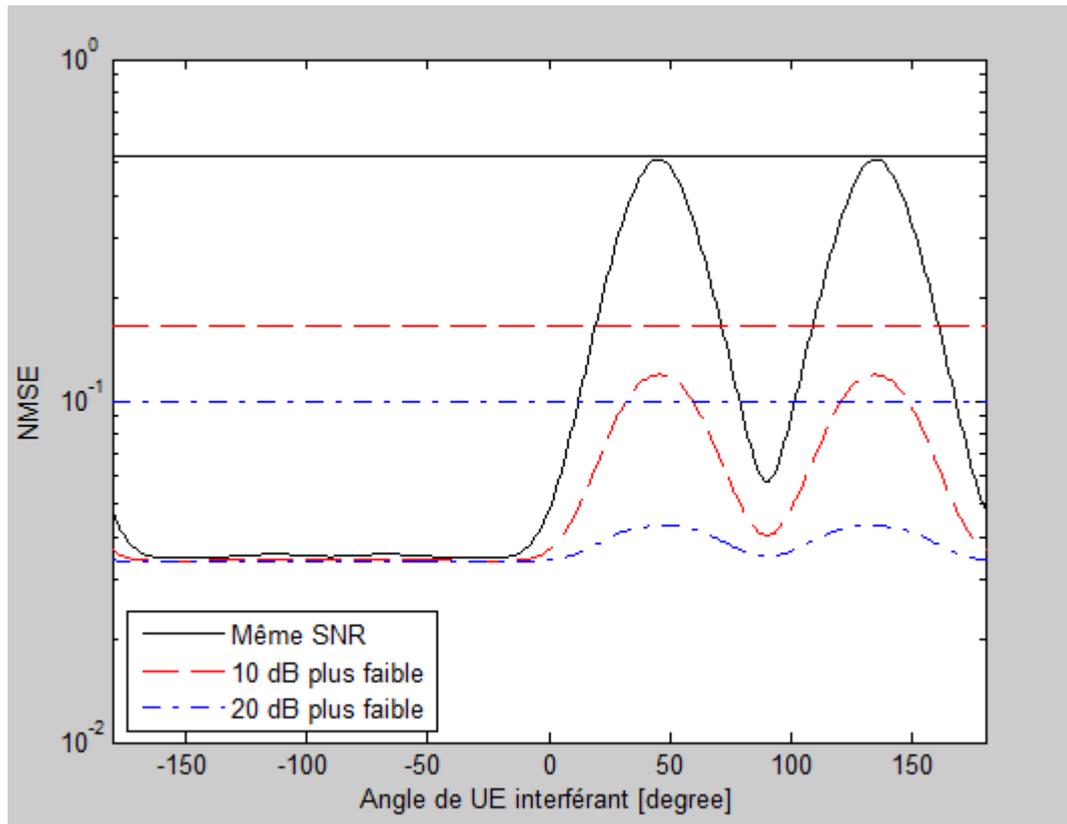
$$(l, i) \notin P_{jk}$$

Lorsque le SNR effectif de l'UE désiré est de 10 dB et que le signal interférant est 10 dB plus faible, les deux matrices de corrélation sont générées en utilisant le modèle de diffusion locale avec distribution angulaire gaussienne  $ASD\sigma_\varphi = 10^\circ$ , mais en utilisant des angles nominaux différents. L'angle du signal interférent varie entre  $-180^\circ$  et  $180^\circ$  tandis que la direction du signal désiré est fixé à  $60^\circ$ .

La première observation de la figure 3.7 est que les angles UE jouent un rôle clé lorsque la BS est équipée de plusieurs antennes. Si les UEs ont le même angle, le coefficient de corrélation est de un, ce qui signifie que les estimations sont identiques. Si les angles des UE sont bien séparés, le coefficient de corrélation est plutôt proche de zéro. Cela indique que non

seulement les gains moyens de canal détermine l'impact de la contamination pilote mais aussi la structure propre des matrices de corrélation spatiale. Ceci est différent dans le cas de SISO où le coefficient de corrélation est égal à un, quels que soient les angles d'interférences. Donc la corrélation spatiale des canaux peut atténuer l'impact de contamination pilote.

La figure 3.8 montre le NMSE de l'estimation du canal avec  $M = 100$  antennes et dans un canal à diffusion local avec ASD  $\sigma_\varphi = 10^\circ$ .



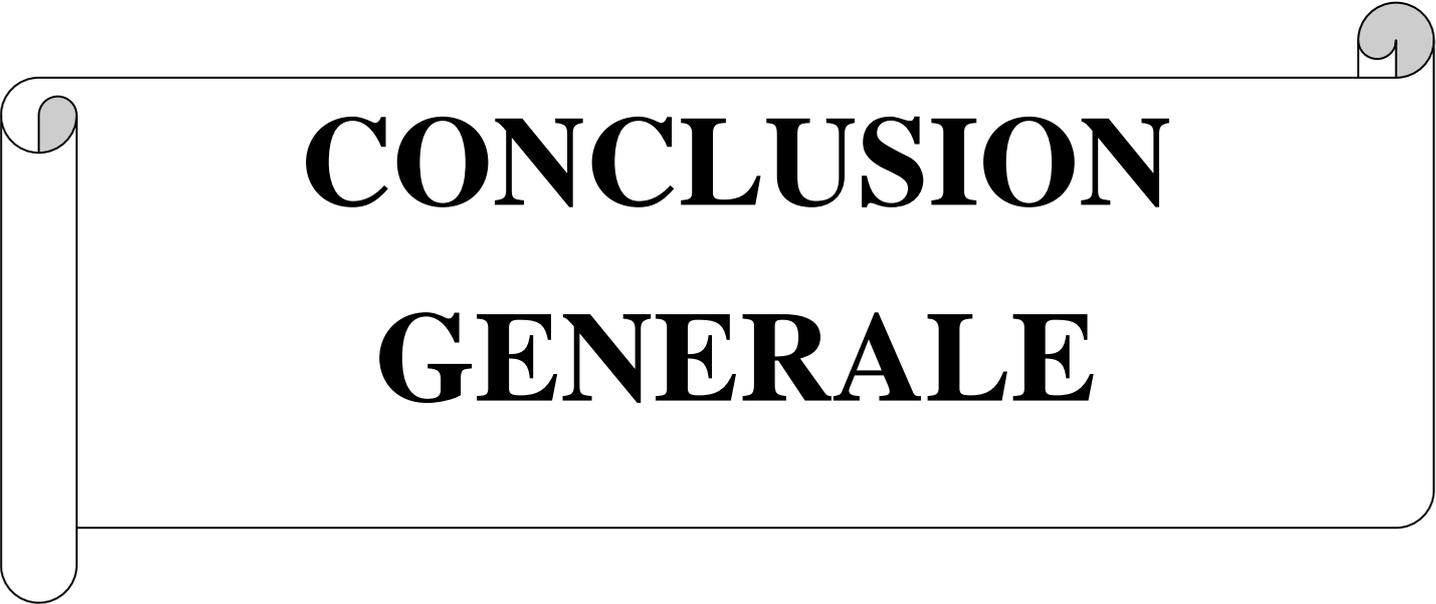
**Figure 3.8 :** NMSE dans l'estimation du canal de l'utilisateur désiré lorsqu'il ya un utilisateur interférant, qui utilise le même pilote.

Le SNR effectif du UE désiré est de 10 dB et la puissance du signal brouilleur est soit tout aussi la même, 10 dB plus faible ou 20 dB plus faible. Dans le cas du canal spatialement corrélé, lorsque les angles UE sont bien séparés, le NMSE est d'environ 0,04 quel que soit la puissance du signal pilote brouilleur. Cela implique que la contamination de pilote a un impact négligeable sur la qualité de l'estimation lorsque les UE ont des espaces de corrélation presque orthogonaux. Le NMSE augmente lorsque les UE ont des angles similaires, en particulier lorsque l'interférence UE a un canal fort vers la BS. Si les canaux des UE sont décorrélés, les NMSE sont toujours plus grands que sous corrélation spatiale et également

indépendants de l'angle de séparation. Par conséquent, la corrélation spatiale des canaux est utile dans la pratique pour améliorer la qualité d'estimation sous contamination pilote.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu les résultats de simulation pour la problématique posée dans ce mémoire qui est l'estimation de canal MIMO massif par la méthode NMSE dans les liaisons montantes. On a présenté l'influence de différents paramètres sur l'estimation NMSE, d'après nos études et nos simulations effectuées nous avons conclu : que l'augmentation de nombre des antennes dans la BS avec l'augmentation de SNR, a un impact sur le NMSE, et dans le cas de la contamination de pilote la séparation des angles d'utilisateurs améliore l'estimation NMSE, par contre le SNR a un impact négligeable par rapport aux angles d'utilisateurs.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top. The scroll is outlined in black and has a light gray shadow on its left and top edges. The text is centered within the horizontal strip.

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

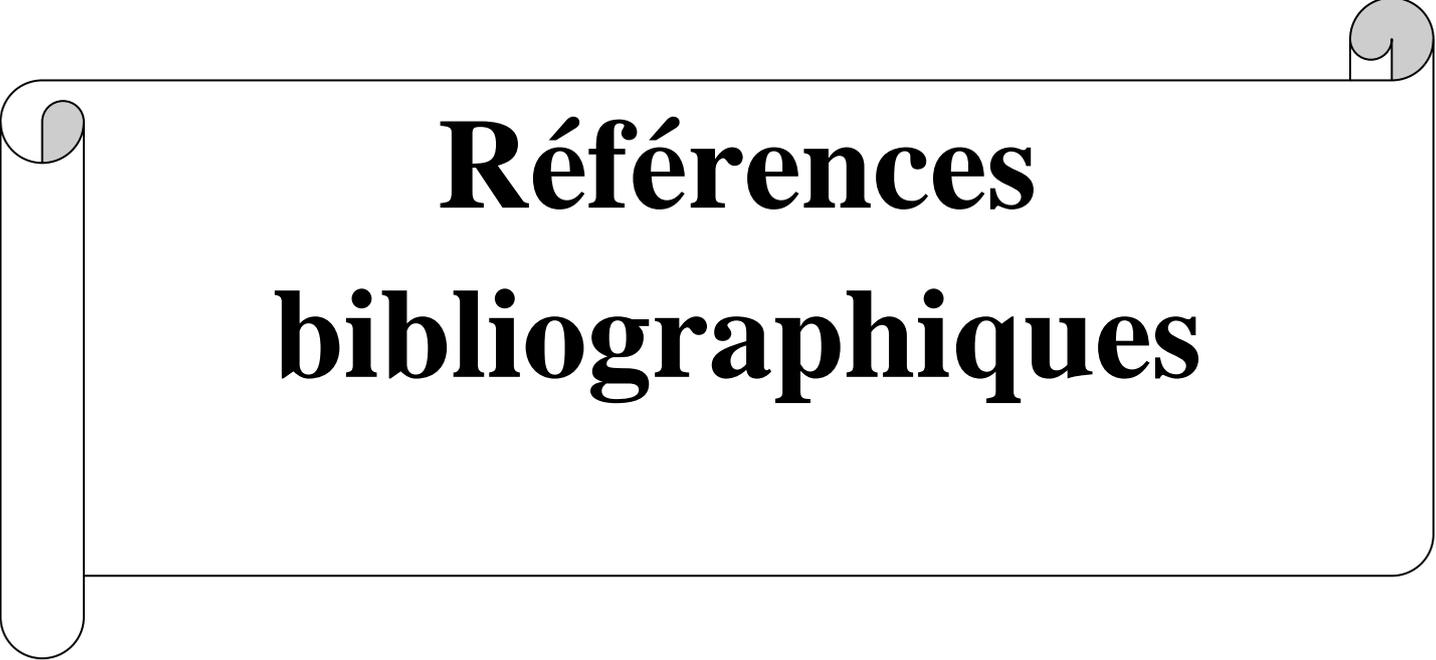
---

Le besoin de toujours améliorer les débits de transmission de données pousse les ingénieurs dans le domaine des communications sans fils à améliorer sans cesse les systèmes de communications existants et à imaginer de meilleures solutions pour les futurs standards. Ce besoin a conduit la naissance d'une nouvelle génération de communication mobile la 5G, basant sur la technique MIMO massif. Ce mémoire est consacré à l'étude de l'estimation de canal de système MIMO massif.

Dans le premier chapitre, nous avons mené une étude sur le développement de la cinquième génération (5G) des réseaux cellulaires qui diffèrent aux générations précédentes, elle ne représente pas une évolution des réseaux précédents mais elle correspond à une nouvelle fondation technologique développée pour but de soutenir les demandes croissantes des clients, en commençant par une explication sur le réseau cellulaire passant par l'objectif et les caractéristiques de la 5G. La flexibilité de 5G NR offre trop d'opportunités de recherche ouvertes par rapport aux générations précédentes de communications cellulaires.

Dans un deuxième temps, un accent particulier sur les systèmes MIMO massifs de la 5G on été présentés, passer à travers les caractéristiques et les défis de MIMO massifs .La comparaison entre le MIMO et le MIMO massif a montré qu'il ya une efficacité spectrale 10 fois supérieure a celle des systèmes MIMO utilisés dans la 4G. Le MIMO massif combine plusieurs antennes à la fois afin de renforcer le signal et réduire les interférences, notant la complexité de calcul, la réalisation d'algorithmes de traitement distribué, le problème d'interférence inter et intracellulaire et la contamination des pilotes.

La troisième partie du travaille était consacrée à l'analyse des résultats de simulation de l'estimation de canal par la méthode NMSE en fonction des variétés de paramètres des systèmes MIMO massifs en les comparants avec les systèmes SISO et MIMO d'où on peut garantir que l'augmentation du nombre d'antennes dans la BS améliore l'estimation du canal. nous avons également montré pour mieux comprendre l'impact de la corrélation spatiale des canaux qu'elle peut avoir sur MIMO multiutilisateurs, l'objectif d'estimation de canal est de réduire l'erreur entre le canal désiré et le canal réel .pour améliorer cette estimation, la clé est d'améliorer le rapport signal sur bruit (SNR).

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a light gray shadow, framing the text. The scroll is partially unrolled at the top corners.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] Roopali Sood, Atul Garg : Digital Society from 1G to 5G: A Comparative Study: International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM) Web Site: [www.ijaiem.org](http://www.ijaiem.org) Email : [editor@ijaiem.org](mailto:editor@ijaiem.org), [editorijaiem@gmail.com](mailto:editorijaiem@gmail.com) Volume 3, Issue 2, February 2014.
- [2] «Téléphonie mobile :l'évolution du réseau de la 1 à la 5G», consulté le 20 Mars 2019  
<https://bastienbonnard.com/1444-2>.
- [3] J. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. Soong, and J. Zhang. What will 5G be ? IEEE Journal on selected areas in communications, 32(6) :1065–1082, 2014.
- [4] 5g tout 5G : tout comprendre au réseau mobile du futur en 10 questions.  
<https://www.numerama.com/tech/147723-5g-tout-savoir-sur-le-reseau-mobile-du-futur.html>.
- [5] S. E. Hajri «L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs» thèse doctorat, Paris : Université Paris-Saclay, 2018.
- [6] BeddiaF Safia, Yahia Selma «Technologie Radio sur Fibre pour les applications sans fil (5G)» Université 8Mai 1945 – Guelma Juillet 2019.
- [7] «Etude de la capacité du canal pour un système MIMO massif» Laboratoire de recherche en Télécommunication, Automatique, Signal Et Images (LR-TASI) Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation(EDSTII).
- [8] «Poser les jalons de la 5G: perspectives et difficultés» Union internationale De Télécommunication, 2018.
- [9] C. Lagane, Fujitsu «double les capacités des small-cell full-duplex», 9 septembre 2015.
- [10] Björnson, Emil, Jakob Hoydis, and Luca Sanguinetti. «Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency» Foundations and Trends® in Signal Processing 11.3-4 (2017): 154-655.
- [11] [ici EXpertsluxembourg-network-connectivity-5g-applications-prometteuses](http://icexpertsluxembourg-network-connectivity-5g-applications-prometteuses).  
<https://icexpertsluxembourg.lu/network-connectivity/5g-applications-prometteuses/>
- [12] Dehemchi Marwa et Bouhafer Asma «Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G» Mémoire de master Guelma.

## Références bibliographiques

- [13] Ouleha Ouassim et Didouna Salahdine «Etude des performances de modulation UFMC Pour le réseaux 5G» Guelma Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunication Université 8Mai 1945 – Guelma.
- [14] 5G New Radio : Waveform, Frame Structure, Multiple Access, and Initial Access.
- [15] <http://www.techplayon.com/understanding-basic-5g-nr-terminologies-subcarrier-spacing-frame-and-subframe-slot-and-ofdm-symbols/>
- [16] <http://www.techplayon.com/nr-resource-block-definition-and-rbs-calculation/>
- [17] H. Shin et J. H. Lee. «Capacity of multiple-antenna fading channels: spatial fading correlation, double scattering, and keyhole» IEEE Transactions on Information Theory, vol. 49, pp. 2636- 2647, Oct. 2003.
- [18] I. E. Telatar, «Capacity of multi-antenna Gaussian channels» European Trans. Telecommun. (ETT), vol. vol. 10, p. 585-595, Nov./Dec. 1999 ..
- [19] Hehrache Lamia, Merad Safa «etude et simulation de système MIMO a multiplexage spatial associe a la technique WCDMA» page 44, Mémoire master, Université ABOU-BEKR BELKAÏD, Tlemcen 2014.
- [20] Zerrouki el-Hadj, «Application de la technologie MIMO dans les réseaux WI-FI».
- Thèse de Magister en Télécommunications, Université ABOU-BEKR BELKAÏD, Tlemcen2006.
- [21] Study Paper on: Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technology, page 4.
- [22] Belbachir, Belkhiter « Simulation des antennes MIMO adaptatives associées avec la technique MC-CDMA» Mémoire master, Université ABOU-BEKR BELKAÏD, Tlemcen 2015.
- [23] Bendahmane Amira Meriem, Ghermoul Rania « Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC » mémoire de master Université ABOU-BEKR BELKAÏD, Tlemcen 2018.
- [24] G. C. Raleigh et J. M. Cioffi, «Spatio-temporal coding for wireless communication» IEEE Transactions on Communications - vol. 46, no. 3, p 357-366 - 1998.

## Références bibliographiques

- [25] E. Telatar - Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels - European Transactions on Telecommunications, vol. 10, no. 6, p. 585–595, 1999.
- [26] A. F. Molisch - MIMO systems with antenna selection - an overview - in Radio and Wireless Conference, 2003
- [27] J. W. Wallace ET M. A. Jensen - MIMO capacity variation with SNR and multipath richness from full-wave indoor FDTD simulations - in IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium – 2003
- [28] « MIMO Massif », article de Wikipedia consulté le 11 Avril 2019.  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/MIMO\\_massif](https://fr.wikipedia.org/wiki/MIMO_massif)
- [29] Benyarou Mourad, « Optimisation des systèmes multi-antennes appliqués aux systèmes MC-CDMA. », Université Abou Bakr-Belkaid, Tlemcen. Thèse de doctorat 2012-2013.
- [30] Michael Wang, «The Role of Massive MIMO in 5G » . Oct 23, 2018 [Enligne]. <https://medium.com/@miccowang/the-role-of-massive-mimo-in-5g-c362e790ef61>[consulté le 03 Avril 2019].
- [31] Randriamiadana Z.A. « Etude de la capacité du canal pour un système MIMO massif » Laboratoire de recherche en Télécommunication, Automatique, Signal Et Images (LR-TASI) Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation(EDSTII), BP 1500, Antananarivo 101 –Madagascar.
- [32] Belarbi Abderrahmane et Belmedani Houssam Eddine «Etude comparative des formes d'ondes candidates à la 5G : OFDM, FBMC et UFMC » Université Abou Bakr-Belkaid, Tlemcen 2019.
- [33] Hadouche Khaled «contamination des pilotes en MIMO massif», mémoire de master 2018 BLIDA.
- [34] Ahmad Abboud « Atténuation des interférences dans les réseaux mobiles 5G : Contamination pilote des liaisons montantes dans le schéma massif MIMO TDD ». Electronics. Université de Limoges, 2017. English.

## **Références bibliographiques**

[35] Gourayi Ahlem «Efficacité Energétique dans les Systèmes MIMO Massive» mémoire de master Université SAAD DAHLAB de BLIDA 2015.