République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia Farès de Médéa



Faculté De Technologie

Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'Études Master

Filière : **Science et Technologie**

Spécialité : **Systèmes Des Télécommunications**

Thème

Simulation de la Technologie Massive MIMO pour la Communication Mobile 5G

- **Préparé et présenté par : BELAID Rabah**
- **Proposé et dirigé par : Dr. KALACHE Mohamed Aissa**

Soutenu en juin 2025, devant le jury composé de :

Dr – Président : Menasri

Dr – Examinateur : Guedmani

Année universitaire : 2024-2025

Summary :

This memory focuses on **Massive MIMO technology**, a critical component of **5G mobile communication networks**, designed to meet the growing demand for higher data rates, improved reliability, and massive device connectivity. Massive MIMO relies on the use of **dozens or even hundreds of antennas** at the base station to significantly enhance **network capacity** while reducing interference and latency.

The first part of the thesis provides an overview of the **evolution of mobile networks** from 1G to 5G, the **key features of 5G**, and the **underlying technologies** such as millimeter waves, beamforming, and, most importantly, Massive MIMO.

The second part focuses on a **MATLAB-based simulation** of a Massive MIMO system, implementing and comparing two signal detection algorithms:

- **Zero Forcing (ZF)**: which cancels inter-user interference at the cost of potential noise amplification.
- **Minimum Mean Square Error (MMSE)**: which strikes a balance between interference suppression and noise control.

The main goal is to **compare the performance of ZF and MMSE** in terms of **Bit Error Rate (BER)**, **channel capacity**, and **efficiency under varying SNR conditions**.

Simulation results confirm that Massive MIMO can greatly enhance the performance of mobile networks. Moreover, **MMSE generally proves to be more robust** than ZF in noisy environments. However, the increasing complexity associated with a large number of antennas introduces new technical and practical challenges.

This work contributes to a better understanding of how Massive MIMO functions and highlights its limitations, offering insights into its optimization for future mobile networks.

Keywords :

- 5G• Massive MIMO• Zero Forcing (ZF)• Minimum Mean Square Error (MMSE)

Résumé :

Ce mémoire porte sur la **technologie Massive MIMO**, une composante essentielle des réseaux de communication **5G**, visant à répondre à la forte croissance de la demande en connectivité, en débit et en fiabilité. Le MIMO massif repose sur l'utilisation de **dizaines, voire de centaines d'antennes** sur les stations de base pour améliorer de manière significative la **capacité du réseau**, tout en réduisant les interférences et la latence.

Dans une première partie, le mémoire présente une vue d'ensemble de l'**évolution des réseaux mobiles** (de la 1G à la 5G), les caractéristiques clés de la 5G, et les technologies sous-jacentes telles que les ondes millimétriques, le beamforming, et bien sûr le Massive MIMO.

La seconde partie se concentre sur une **simulation MATLAB** d'un système Massive MIMO, avec l'implémentation et la comparaison de deux algorithmes de détection de signal :

- **Zero Forcing (ZF)** : qui élimine les interférences au prix d'un possible renforcement du bruit,
- **Minimum Mean Square Error (MMSE)** : qui trouve un compromis entre réduction du bruit et atténuation des interférences.

L'objectif est de **comparer les performances de ces deux techniques** en termes de **taux d'erreur binaire (BER)**, **capacité du canal** et **efficacité en fonction du SNR**.

Les résultats de la simulation confirment que le Massive MIMO améliore considérablement les performances du réseau mobile, tout en montrant que **MMSE est généralement plus robuste** que ZF dans les environnements bruités. Cependant, la complexité croissante des systèmes à grand nombre d'antennes soulève de nouveaux défis techniques et pratiques.

Ce travail contribue à une meilleure compréhension du fonctionnement et des limites du Massive MIMO, en vue de son optimisation dans les réseaux mobiles de demain.

Mots-clés :

- 5G• Massive MIMO• Zero Forcing (ZF)• Minimum Mean Square Error (MMSE)

ملخص المذكرة :

يتناول هذا البحث تقنية **MIMOالضخمة** (Massive MIMO), وهي أحد العناصر الأساسية في شبكات الاتصالات من الجيل الخامس(5G) ، والتي تهدف إلى تلبية النمو الكبير في الطلب على الاتصال والسرعة والموثوقية. تعتمد تقنية MIMO الضخمة على استخدام عشرات أو حتى مئات الهوائيات في المحطات الأساسية من أجل تحسين كبير في سعة الشبكة، مع تقليل التداخل والكمون.(latency)

في الجزء الأول، يقدم البحث نظرة شاملة على تطور الشبكات المحمولة من الجيل الأول (1G) إلى الجيل الخامس(5G) ، ويستعرض الخصائص الرئيسية للجيل الخامس، بالإضافة إلى التقنيات الأساسية مثل **الموجات المليمترية، توجيه الحزمة (Beamforming)**، و **MIMOالضخمة**.

أما الجزء الثاني، فيركز على محاكاة باستخدام برنامج MATLAB لنظام MIMO الضخم، من خلال تنفيذ ومقارنة خوارزميتين للكشف عن الإشارة:

- **Zero Forcing (ZF) :** والتي تزيل التداخل ولكن قد تُضخّم الضوضاء.
- **Minimum Mean Square Error (MMSE) :** التي تحقق توازناً بين تقليل الضوضاء وتقليل التداخل.
- الهدف هو مقارنة أداء هاتين الطريقتين من حيث معدل الخطأ في البتات(BER) ، وسعة القناة، والكفاءة حسب نسبة الإشارة إلى الضوضاء.(SNR)

أظهرت نتائج المحاكاة أن تقنية MIMO الضخمة تُحسّن بشكل كبير من أداء الشبكات المحمولة، كما بيّنت أن خوارزمية MMSEأكثر موثوقية من ZF في البيئات ذات الضوضاء العالية. ومع ذلك، فإن تعقيد الأنظمة ذات عدد الهوائيات الكبير يطرح تحديات تقنية وعملية جديدة.

يساهم هذا العمل في فهم أعمق لكيفية عمل تقنية MIMO الضخمة وحدودها، وذلك من أجل تحسين استخدامها في شبكات الاتصال المستقبلية.

الكلمات المفتاحية :

- 5G• Massive MIMO• Zero Forcing (ZF)• Minimum Mean Square Error (MMSE)

Remerciements

La réalisation de ce mémoire de fin d'études n'aurait pas été possible sans la Grâce de Dieu, qui nous a donné la force et le courage nécessaires pour mener ce travail à bien.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, ***Dr. KALACHE Mohammed Aissa****, pour sa patience, sa disponibilité, et la pertinence de ses conseils tout au long de cette aventure.*

Nos sincères remerciements vont également à mes parents pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants.

À mes sœurs, merci pour votre appui précieux.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants et le personnel administratif de l'Université de Dr. YAHIA Fares a Médéa pour leur accompagnement.

Enfin, nous adressons notre reconnaissance à toutes les personnes, de près ou de loin, ayant contribué à la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci à tous.

BELAID Rabah

Table des matières

Table des matières i

Liste des tableaux iv

Liste des figures v

Introduction Générale 1

I Introduction à la Technologie 5G 2

I.1 Évolution des réseaux mobiles ... 3

I.1.1 Première génération (1G) ... 3

I.1.2 Deuxième génération (2G) ... 3

I.1.3 Troisième génération (3G) ... 4

I.1.4 Quatrième génération (4G) ... 4

I.2 Caractéristiques clés de la technologie 5G ... 4

I.2.1 Vitesse élevée ... 5

I.2.2 Latence basse ... 5

I.2.3 Connectivité massive ... 5

I.2.4 Segmentation de réseau ... 6

I.3 Technologies sous-jacentes ... 6

I.3.1 Onde millimétrique (mmWave) ... 6

I.3.2 Formage de faisceau ... 6

I.3.3 Calcul en périphérie ... 7

I.4 Applications de la technologie 5G ... 7

I.4.1 Santé ... 7

I.4.2 Transport ... 8

I.4.3 Divertissement ... 8

I.4.4 Fabrication ... 8

I.4.5 Villes intelligentes ... 8

I.5 Défis et limites ... 9

I.5.1 Coûts d'infrastructure ... 9

I.5.2 Allocation du spectre ... 9

I.5.3 Risques de sécurité ... 9

I.5.4 Consommation d'énergie ... 9

I.6 Perspectives futures ... 9

I.7 Conclusion 10

II Système Massive MIMO (Multiple Entrées, Multiple Sorties Massif) 11

II.1 Introduction 12
II.1.1 Évolution des Systèmes MIMO 12
II.1.2 Contexte Économique et Stratégique 14
II.2 Principes Fondamentaux du Massive MIMO 14
II.2.1 Définition 14
II.2.2 Multiplexage Spatiale 15
II.2.3 Theorie de l'information et Capacité de Canal 15
II.2.4 Chaine de Transmission et Récéption a base de MIMO 15
II.2.5 Formation de Faisceaux (Beamforming) 16
II.2.6 Taxonomie Des Techniques de Beamforming 16
II.3 Algorithmes de Précodage et Décodage 17
II.3.1 Zéro Forcing 17
II.3.2 Minimum Mean Square Error 18
II.3.3 Diversité Spatiale 18
II.3.4 Réciprocité du Canal et Duplixage (TTD) 19
II.3.5 Analyse Comparative TDD vs FDD 19
II.4 Modèles de Canaux et Propagation 20
II.4.1 Caractérisation du Canal Massive MIMO 20
II.4.2 Modèles Déterministes vs Stochastiques 20
II.4.3 Propagation en Ondes Milimétriques 21
II.5 Avantages de Massive MIMO 21
II.5.1 Efficacité Spectrale Accrue 21
II.5.2 Comparaison des Gains D'efficacité Spectrale 21
II.5.3 Efficacité Enèrgitique 22
II.5.4 Analyse Quantitative De L'efficacité Enèrgitique 22
II.5.5 Réduction et Intérfèrences 23
II.5.6 Amélioration de la Couverture 23
II.5.7 Extension de Couverture Quantifiée 23
II.5.8 Robustesse au Fading 23
II.6 Défis Techniques 23
II.6.1 Estimation du Canal 23
II.6.2 Contamination de Pilotes 24
II.6.3 Complexité Materielle et Consomation Enèrgitique 25
II.6.4 Synchronisation et Calibration 25
II.6.5 Méthodes de Calibration 26
II.7 Applications et Cas D'usage 26
II.7.1 Intérgration dans le Réseaux 5G et Beyond 26
II.7.2 Intégration avec l'IA et l'Apprentissage Machine 26

II.7.3 Déploiment Indisturiels et Verticaux 27
II.7.4 Réseaux Privés et Campus 27
II.8 Evolutions et Perspectives 28
II.8.1 Holographique MIMO vs MIMO Déstribué 28
II.8.2 Comparaison des Technologies MIMO Avanceés 28
II.8.3 L'intergration avec L'AI et l'Apprentissage Machine 28
II.8.4 Applications de L'AI Dans le Massive MIMO 29
II.8.5 L'intégration avec Les Surfaces Intélligentes Réconfigurable (RIS) 29
II.8.6 Synérgies Massive MIMO et RIS 29
II.9 Conclusion 30

III Résultats et Simulation 31
III.1 Introduction 32
III.1.1 Définition de Canal de Rayleigh 32
III.2 Principe de Base du Travail 32
III.2.1 BER et SNR 32
III.2.2 BER (Bit Error Rate) 32
III.3 Objectif de la Simulation 32
III.3.1 Paramètre de Simulation 32
III.3.2 Scénario de la Simulation 33
III.4 Résultats Observé 34
III.4.1 Influence de Pré-Codage 39
III.4.2 Influence de nombre d'antennes 40
III.4.3 Influence de type de Modulation 40
III.5 Conclusion 41

Conclusion Générale 42

Bibliography 43

Liste des tableaux

I.1 Évolution des générations de réseaux mobiles 4
I.2 Comparaison des performances entre la 4G et la 5G 6
I.3 Applications spécifiques de la 5G par secteur 8
I.4 Résumé des avantages et défis de la technologie 5G 10

II.1 Évolution des systèmes MIMO à travers les générations de réseaux mobiles..... 12
II.2 Analyse économique comparative des systèmes MIMO 14
II.3 Comparaison des techniques de beamforming..... 17
II.4 Algorithmes de précodage en Massive MIMO..... 17
II.5 Compromis entre diversité et multiplexage 19
II.6 Comparaison TDD vs. FDD pour le Massive MIMO..... 20
II.7 Modèles de canaux pour systèmes Massive MIMO..... 21
II.8 Caractéristiques de propagation selon les bandes de fréquence..... 21
II.9 Comparaison des efficacités spectrales (bits/s/Hz)..... 22
II.10 Efficacité énergétique des systèmes MIMO..... 22
II.11 Extension de couverture par technologie 23
II.12 Techniques d'estimation de canal en Massive MIMO..... 24
II.13 Techniques d'atténuation de la contamination de pilotes 25
II.14 Architectures d'implémentation Massive MIMO..... 25
II.15 Techniques de calibration en Massive MIMO..... 26
II.16 Contribution du Massive MIMO aux cas d'usage 5G..... 27
II.17 Applications sectorielles du Massive MIMO..... 27
II.18 Évolutions des technologies MIMO 28
II.19 Applications de l'IA dans les systèmes Massive MIMO 29
II.20 Synergies entre Massive MIMO et RIS 29
III.1 Paramètre de Simulation..... 33

Table des figures

Figure I.1	Impact transformationnel de la technologie 5G sur différents secteurs …....	3
Figure I.2	Progression des vitesses à travers les générations de réseaux mobiles (échelle logarithmique)……..	4
Figure I.3	Caractéristiques fondamentales de la technologie 5G… … … … … …	5
Figure I.4	Évolution de la latence à travers les générations de réseaux mobiles …….	5
Figure I.5	Technologies sous-jacentes et composants de l'architecture 5G ……	6
Figure I.6	Comparaison entre la diffusion traditionnelle et le formage de faisceau….	7
Figure I.7	Applications sectorielles de la technologie 5G …….	7
Figure I.8	Défis majeurs du déploiement de la technologie 5G …….	9
Figure I.9	Évolution future des technologies de communication mobile ……...	10
Figure II.1	Chaine de Transmission et réception à base de MIMO……..	10
Figure III.1	Influence de Type Pré-Codage……	34
Figure III.2	Efficacité Spectrale En Fonction de SNR (dB)……	35
Figure III.3	Influence de Nombre d'antennes…….	36
Figure III.4	Influence de Pré-codage…….....	38

Liste des abréviation

Abréviation	Signification
5G	Cinquième génération des réseaux mobiles
8-PSK	Modulation par déphasage en 8 états
16-QAM	Modulation d'amplitude en quadrature 16 états
AI	Intelligence Artificielle
ASIC	Circuit intégré spécifique à une application
BER	Taux d'erreur binaire
BPSK	Modulation par déphasage binaire
CNN	Réseau de neurones convolutif
CSI	Information sur l'état du canal
eMBB	Haut débit mobile amélioré
FDD	Duplexage par répartition en fréquence
FPGA	Circuit logique programmable sur site
IoT	Internet des objets
LTE	Évolution à long terme (4G)
LSTM	Mémoire à long et court terme (type de réseau de neurones)
Massive MIMO	Multiple entrées, multiple sorties massif
MIMO	Multiple entrées, multiple sorties
MMSE	Erreur quadratique moyenne minimale
mmWave	Onde millimétrique
OFDM	Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence
QPSK	Modulation par déphasage en quadrature
RF	Radiofréquence
RIS	Surface intelligente reconfigurable
SNR	Rapport signal sur bruit
TDD	Duplexage par répartition dans le temps
UE	Équipement utilisateur
URLLC	Communications ultra-fiables à faible latence
ZF	Forçage à zéro (Zero Forcing)

Introduction Générale

L'évolution rapide des technologies de communication mobile a profondément transformé la manière dont les individus et les entreprises interagissent avec leur environnement numérique. Après les percées réalisées avec les générations précédentes, de la 1G à la 4G, la cinquième génération (5G) représente une avancée technologique majeure, non seulement en termes de débits et de latence, mais aussi par sa capacité à supporter un très grand nombre d'appareils connectés avec une fiabilité et une efficacité énergétique accrues.

Parmi les technologies clés qui permettent à la 5G d'atteindre ses objectifs ambitieux, le **Massive MIMO** (Multiple Input, Multiple Output massif) occupe une place centrale. Cette technique consiste à équiper les stations de base d'un nombre très élevé d'antennes, permettant ainsi de diriger de manière précise les signaux vers plusieurs utilisateurs en simultané. Elle offre des gains spectaculaires en termes de débit, de couverture et d'efficacité spectrale, répondant ainsi aux exigences des applications modernes telles que les véhicules autonomes, la réalité virtuelle, la télémédecine ou encore les villes intelligentes.

Cependant, l'intégration du Massive MIMO dans les réseaux 5G soulève de nombreux défis techniques, notamment en ce qui concerne l'estimation du canal, la contamination de pilotes, la consommation énergétique ou encore la complexité des algorithmes de traitement du signal. Ce mémoire vise à étudier en profondeur les fondements théoriques, les avantages, les limites et les performances pratiques du Massive MIMO dans le contexte des réseaux 5G, à travers une analyse bibliographique détaillée et des simulations réalisées sous MATLAB.

L'objectif est de démontrer que le Massive MIMO ne constitue pas uniquement une évolution du MIMO traditionnel, mais bien une **révolution technologique** qui redéfinit les standards des communications mobiles, tout en ouvrant la voie vers les futures générations comme la 6G.

Chapitre I

Introduction à la Technologie 5G

Introduction

La technologie 5G, cinquième génération de réseaux mobiles, représente un jalon important dans l'évolution des communications sans fil [12]. Elle promet des vitesses sans précédent, une latence ultra-basse et une connectivité massive, permettant des applications innovantes dans divers secteurs. Des véhicules autonomes aux villes intelligentes et à la télémédecine, la 5G est prête à transformer notre interaction avec la technologie et entre nous.

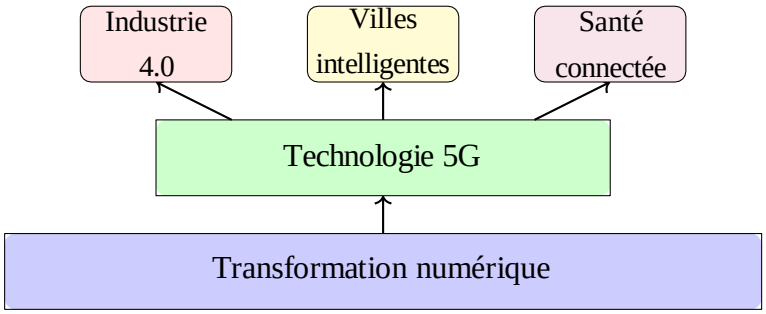


Fig. I.1 : Impact transformationnel de la technologie 5G sur différents secteurs

Ce chapitre présente les concepts fondamentaux de la technologie 5G, son développement historique et son impact potentiel sur la société.

I.1 Évolution des réseaux mobiles

Le voyage vers la 5G a commencé avec la première génération (1G) de réseaux sans fil dans les années 1980, qui offrait des services vocaux de base. Les générations suivantes ont introduit la messagerie texte (2G), l'internet mobile (3G) et la large bande haute vitesse (4G). Chaque génération a amélioré la précédente en termes de vitesse, de capacité et de fonctionnalité.

La transition vers la 5G marque un changement de paradigme dans la communication sans fil. Contrairement à ses prédécesseurs, la 5G est conçue pour supporter un large éventail d'appareils et d'applications simultanément tout en maintenant une haute fiabilité et efficacité.

I.1.1 Première génération (1G)

La première génération a été introduite dans les années 1980 et offrait des services vocaux analogiques. Elle a été limitée par sa capacité et sa qualité de transmission.

I.1.2 Deuxième génération (2G)

La deuxième génération a été lancée dans les années 1990 et a introduit la messagerie texte (SMS) et les appels vocaux numériques. Elle a également permis une meilleure qualité de transmission et une sécurité accrue.

Tab. I.1 : Évolution des générations de réseaux mobiles

Caractéristique	**1G**	**2G**	**3G**	**4G**
Période de déploiement	1980s	1990s	2000s	2010s
Technologie	Analogique	Numérique	CDMA, UMTS	LTE, WiMAX
Vitesse maximale	2.4 Kbps	64 Kbps	2 Mbps	100 Mbps
Services principaux	Voix	Voix, SMS	Voix, SMS, Internet	Voix, SMS, Internet HD
Bande de fréquence	800-900 MHz	850-1900 MHz	850-2100 MHz	700-2600 MHz

I.1.3 Troisième génération (3G)

La troisième génération, déployée dans les années 2000, a apporté l'internet mobile avec des vitesses pouvant atteindre jusqu'à 2 Mbps. Elle a permis l'accès à des services de données mobiles, tels que la navigation web et les emails.

I.1.4 Quatrième génération (4G)

La quatrième génération, lancée dans les années 2010, a offert des vitesses bien plus élevées, atteignant jusqu'à 100 Mbps. Elle a permis des applications telles que la diffusion en ligne de vidéos haute définition et les jeux en ligne.

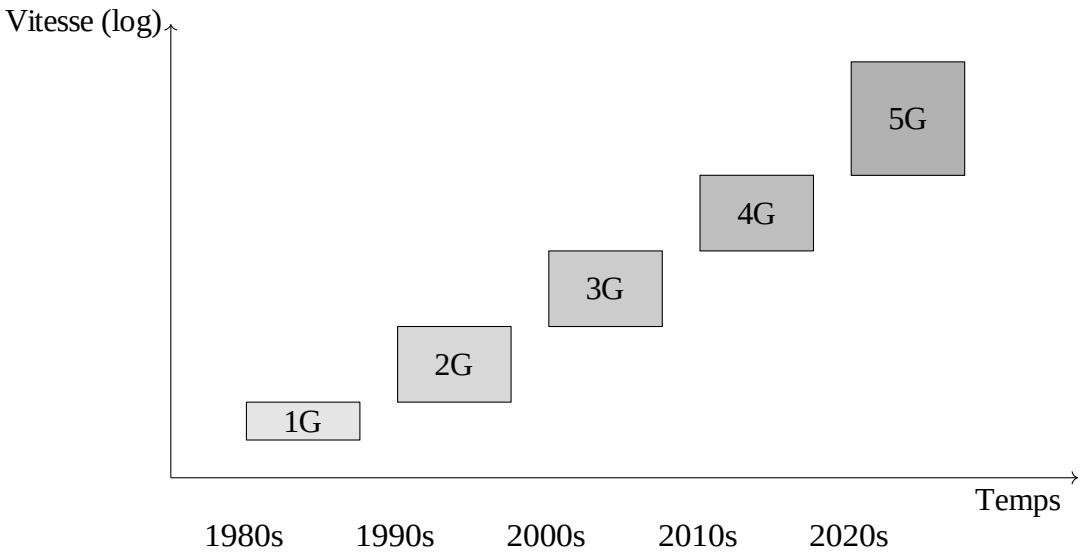


Fig. I.2 : Progression des vitesses à travers les générations de réseaux mobiles (échelle logarith- mique)

I.2 Caractéristiques clés de la technologie 5G

La 5G se distingue par plusieurs caractéristiques clés qui la rendent unique par rapport à ses prédécesseurs.

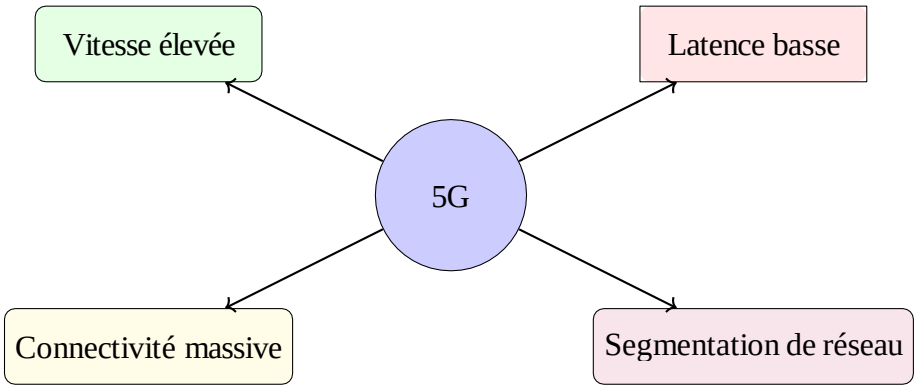


Fig. I.3 : Caractéristiques fondamentales de la technologie 5G

I.2.1 Vitesse élevée

Les réseaux 5G offrent des vitesses de téléchargement maximales pouvant atteindre jusqu'à 10 Gbps, permettant un transfert de données plus rapide pour des applications comme la diffusion en ligne de vidéos ultra-haute définition et la réalité virtuelle.

I.2.2 Latence basse

La latence dans les réseaux 5G est réduite à seulement 1 milliseconde, ce qui la rend idéale pour des applications en temps réel comme les véhicules autonomes et la chirurgie à distance.

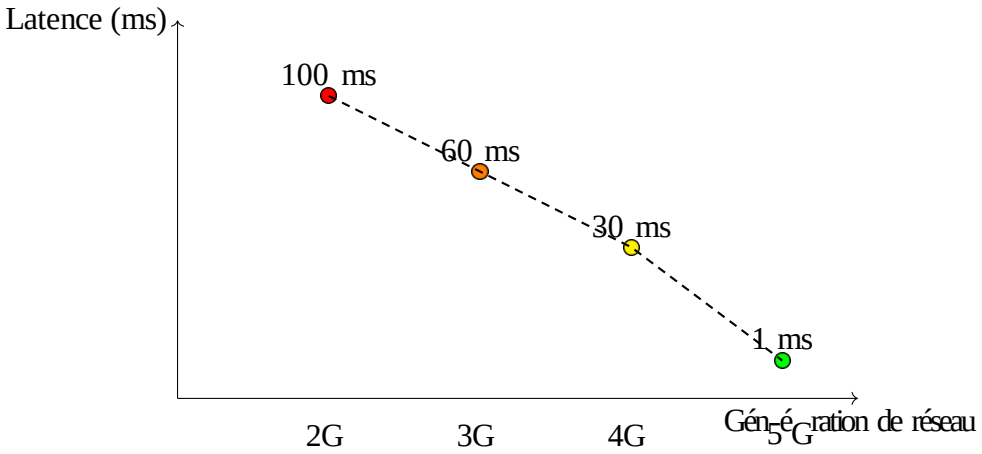


Fig. I.4 : Évolution de la latence à travers les générations de réseaux mobiles

I.2.3 Connectivité massive

Grâce à des technologies d'antennes avancées comme Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output), la 5G peut connecter des millions d'appareils simultanément sans compromettre les performances.

I.2.4 Segmentation de réseau

La segmentation de réseau permet aux opérateurs de créer des réseaux virtuels adaptés à des cas d'utilisation spécifiques, tels que l'automatisation industrielle ou les services d'urgence [14].

Tab. I.2 : Comparaison des performances entre la 4G et la 5G

Paramètre	**4G**	**5G**
Vitesse maximale	100 Mbps	10 Gbps
Latence	30-50 ms	1-10 ms
Densité de connexion	100K appareils/km²	1M appareils/km²
Efficacité énergétique	Base	90% plus efficace
Mobilité	Jusqu'à 350 km/h	Jusqu'à 500 km/h
Bande passante	20 MHz	Jusqu'à 100 MHz (FR1), 400 MHz (FR2)

I.3 Technologies sous-jacentes

Plusieurs technologies sous-jacentes rendent possibles les fonctionnalités avancées de la 5G.

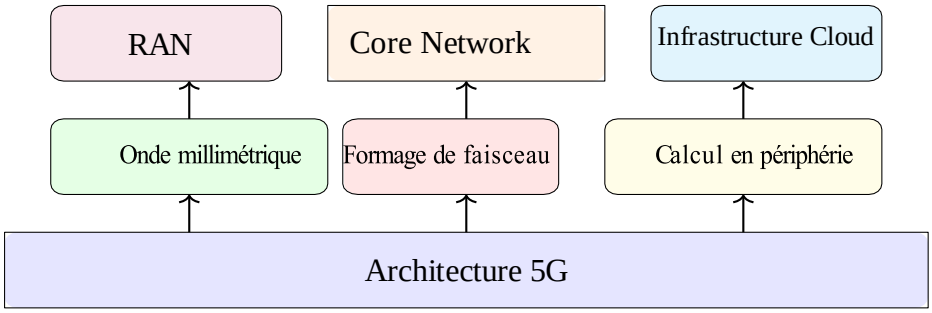


Fig. I.5 : Technologies sous-jacentes et composants de l'architecture 5G

I.3.1 Onde millimétrique (mmWave)

Opérant sur des bandes de fréquence élevées (24–47 GHz), mmWave permet un transfert de données ultra-rapide mais nécessite une densification de l'infrastructure en raison de sa portée limitée [13].

I.3.2 Formage de faisceau

Le formage de faisceau dirige les signaux vers des appareils spécifiques plutôt que de les diffuser largement, améliorant la force du signal et réduisant les interférences.

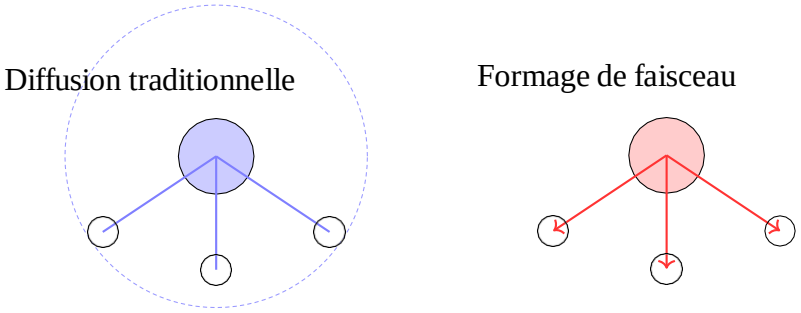


Fig. I.6 : Comparaison entre la diffusion traditionnelle et le formage de faisceau

I.3.3 Calcul en périphérie

Le calcul en périphérie traite les données plus près de la source plutôt que de s'appuyer sur des serveurs centralisés, réduisant la latence et améliorant l'efficacité.

I.4 Applications de la technologie 5G

La polyvalence de la 5G la rend adaptée à divers secteurs.

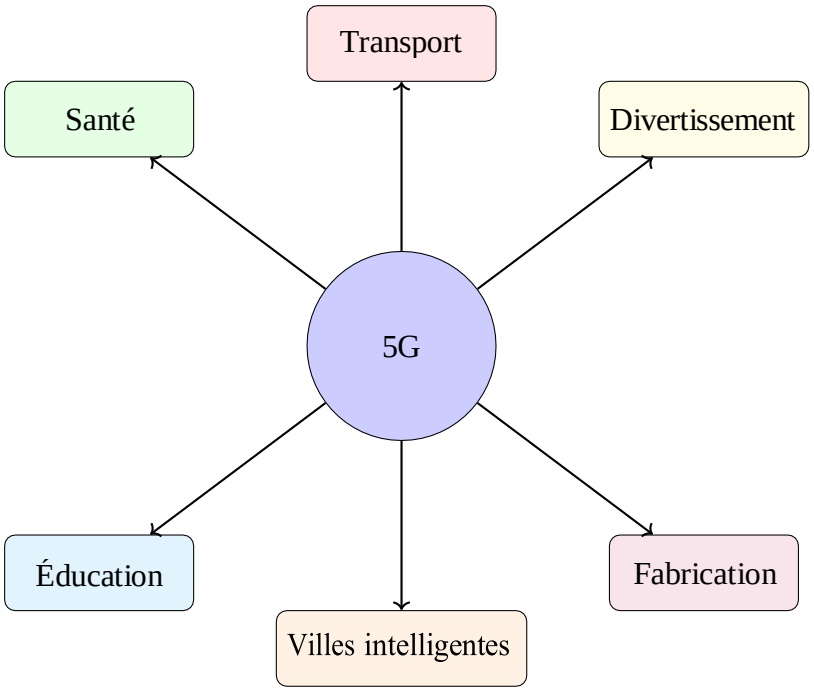


Fig. I.7 : Applications sectorielles de la technologie 5G

I.4.1 Santé

La 5G permet la chirurgie à distance et la télémédecine avec une communication en temps réel, améliorant ainsi l'accès aux soins médicaux.

I.4.2 Transport

Elle facilite les véhicules autonomes et les systèmes de circulation intelligents, contribuant à une mobilité plus sûre et efficace.

I.4.3 Divertissement

La 5G soutient des expériences immersives en réalité augmentée (AR) et virtuelle (VR), révolutionnant l'industrie du divertissement.

I.4.4 Fabrication

Elle alimente l'Internet des objets (IoT) industriel pour des processus automatisés, augmentant la productivité et l'efficacité.

I.4.5 Villes intelligentes

La 5G améliore la gestion urbaine grâce à une infrastructure connectée, permettant une meilleure gestion des ressources et des services publics.

Tab. I.3 : Applications spécifiques de la 5G par secteur

Secteur	Applications potentielles
Santé	Télémédecine, chirurgie à distance, surveillance des patients en temps réel, intervention d'urgence améliorée.
Transport	Véhicules autonomes, systèmes de gestion du trafic, diagnos- tic à distance des véhicules, navigation précise.
Divertissement	Réalité virtuelle/augmentée, streaming 8K, jeux en nuage, contenu holographique.
Fabrication	Automatisation industrielle, maintenance prédictive, robo- tique collaborative, jumeaux numériques.
Villes intelligentes	Gestion de l'énergie, surveillance environnementale, sécurité publique, gestion des déchets intelligente.
Éducation	Classes virtuelles immersives, formation pratique en AR/VR, apprentissage à distance collaboratif.

I.5 Défis et limites

Malgré son potentiel transformateur, le déploiement de la 5G fait face à plusieurs défis.

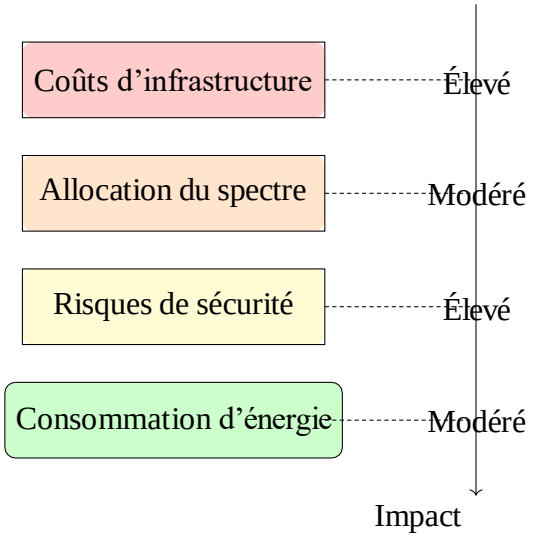


Fig. I.8 : Défis majeurs du déploiement de la technologie 5G

I.5.1 Coûts d'infrastructure

La construction de réseaux denses avec des tours cellulaires nécessite un investissement important.

I.5.2 Allocation du spectre

La disponibilité limitée des bandes de fréquence élevées pose des contraintes.

I.5.3 Risques de sécurité

Une connectivité accrue augmente la vulnérabilité aux cyberattaques.

I.5.4 Consommation d'énergie

Les opérations à haute fréquence nécessitent plus de puissance.

I.6 Perspectives futures

L'évolution vers la 6G est déjà en cours, se concentrant sur des vitesses encore plus élevées, une latence plus basse et une intégration plus grande avec l'IA. Alors que les industries continuent à adopter la technologie 5G, son impact s'étendra davantage dans des domaines comme l'exploration spatiale et l'informatique quantique.

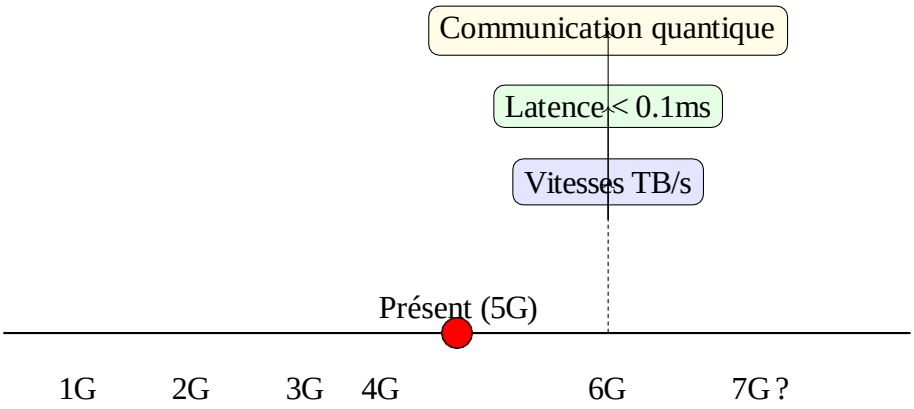


Fig. I.9 : Évolution future des technologies de communication mobile

I.7 Conclusion

La technologie 5G n'est pas juste une mise à niveau incrémentale ; elle représente une avancée révolutionnaire qui redéfinira les normes de connectivité mondiales. Sa capacité à supporter diverses applications dans plusieurs secteurs en fait un élément clé pour l'innovation technologique future. Bien que des défis subsistent, les avantages l'emportent largement sur les limites. Alors que nous regardons vers la prochaine génération de communication sans fil, les fondations posées par la 5G joueront un rôle crucial dans l'élaboration de notre avenir numérique.

Tab. I.4 : Résumé des avantages et défis de la technologie 5G

Avantages	**Défis**
Vitesses ultra-rapides jusqu'à 10 Gbps	Coûts d'infrastructure élevés
Latence ultra-basse (1ms)	Couverture limitée des ondes millimé- triques
Connectivité d'un million d'appareils/km²	Problèmes potentiels de sécurité et de confidentialité
Fiabilité et disponibilité accrues	Consommation d'énergie plus élevée
Segmentation du réseau pour différents cas d'utilisation	Fragmentation des standards
Support d'applications innovantes (IoT, AR/VR)	Nécessité de mise à niveau des appareils

Chapitre II

Système Massive MIMO (Multiple Entrées, Multiple Sorties Massif)

II.1 Introduction

La demande mondiale en connectivité mobile a connu une croissance spectaculaire au cours de la dernière décennie. Cette évolution est principalement stimulée par l'explosion des services de données, tels que la vidéo en streaming à haute définition, les jeux en ligne, les services cloud, les applications industrielles critiques, la communication véhicule-à-véhicule (V2V), et l'Internet des objets (IoT), qui exigent des réseaux sans fil des performances de plus en plus élevées. Ces exigences portent sur une latence ultra-faible, une fiabilité quasi-parfaite, une efficacité spectrale élevée, ainsi qu'une densité massive de connexions.

Dans ce contexte, les technologies traditionnelles d'accès radio montrent leurs limites. Le paradigme actuel impose une transformation profonde des systèmes de télécommunication sans fil. Le **Massive MIMO** (Multiple-Input Multiple-Output massif) apparaît alors comme une technologie clé, capable de répondre à ces nouvelles contraintes tout en s'intégrant dans l'architecture des réseaux 5G et au-delà (6G) [8].

II.1.1 Évolution des Systèmes MIMO

L'évolution des systèmes MIMO s'est déroulée en plusieurs phases significatives depuis l'introduction des premières configurations à antennes multiples. Le tableau II.1 présente cette progression historique en détaillant les caractéristiques de chaque génération.

Tab. II.1 : Évolution des systèmes MIMO à travers les générations de réseaux mobiles

Génération	**Configuration MIMO**	**Caractéristiques**	**Applications principales**
3G	MIMO 2×2	Diversité spatiale limitée	Amélioration de la fiabilité
4G	MIMO 4×4	Multiplexage spatial de base	Augmentation du débit de données
5G Phase 1	MIMO 8×8 à 32×32	Beamforming avancé	Services eMBB (Enhanced Mobile Broadband)
5G Phase 2	Massive MIMO 64×64 à 128×128	Focalisation spatiale précise	Services URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications)
6G (Prévision)	Ultra-Massive MIMO >1024 éléments	Holographie RF, surfaces intelligentes	Réalité étendue, interfaces cerveau-machine

Contrairement aux architectures MIMO classiques où quelques antennes (typiquement 2 à 8) sont déployées à la station de base, le Massive MIMO introduit

l'idée de disposer de dizaines voire de centaines d'antennes sur une même unité d'émission-réception. Cette multiplication du nombre d'antennes offre une gestion intelligente et fine du spectre radio, capable de cibler plusieurs utilisateurs simultanément via des techniques de spatialisation avancée. Grâce à cela, il devient possible d'augmenter considérablement la capacité d'un réseau sans consommer davantage de bande passante ni augmenter la puissance transmise [9].

II.1.2 Contexte Économique et Stratégique

Le déploiement du Massive MIMO s'inscrit dans un contexte économique et stratégique particulier. La pression exercée sur les opérateurs pour maximiser l'utilisation du spectre, ressource rare et coûteuse, pousse à l'adoption de technologies toujours plus efficientes. Le coût d'acquisition des licences spectrales représente souvent plusieurs milliards d'euros pour les opérateurs, ce qui justifie l'investissement dans des technologies qui optimisent l'utilisation de cette ressource.
À titre d'exemple, une analyse économique comparative démontre que le déploiement de systèmes Massive MIMO peut représenter un investissement initial supérieur d'environ 30% par rapport aux technologies conventionnelles, mais offre un retour sur investissement accéléré grâce à l'augmentation de la capacité du réseau et la réduction des coûts énergétiques opérationnels. Ces éléments sont présentés dans le tableau II.2.

Tab. II.2 : Analyse économique comparative des systèmes MIMO

Paramètre	**MIMO Conventionnel**	**Massive MIMO**	**Différence relative**
Coût d'installation initial	Base de référence	+30%	+30%
Coût opérationnel énergétique	Base de référence	-25%	-25%
Capacité du réseau	Base de référence	+500%	+500%
Délai de retour sur investissement	5-7 ans	3-4 ans	-40%

Le Massive MIMO ne se contente pas de suivre l'évolution technologique, il redéfinit fondamentalement l'approche des communications sans fil, en plaçant la spatialisation au cœur de la transmission.

II.2 Principes Fondamentaux du Massive MIMO

II.2.1 Définition

Massive MIMO **(MIMO massif) est une technologie clé de la 5G qui consiste à équiper les stations de base d'un grand nombre d'antennes (parfois plusieurs dizaines à centaines) pour** envoyer et recevoir plusieurs signaux simultanément**. Cela permet une** augmentation significative du débit**, une** meilleure couverture**, et une** capacité réseau accrue**.**

II.2.2 Multiplexage Spatial

Le multiplexage spatial est au cœur de l'efficacité du Massive MIMO. Dans un environnement sans fil conventionnel, les multiples trajets entre l'émetteur et le récepteur sont souvent perçus comme des sources d'interférences. Or, en MIMO massif, ces trajets deviennent des canaux indépendants que le système peut exploiter pour transmettre plusieurs flux de données simultanés.

II.2.3 Théorie de l'Information et Capacité du Canal

La capacité théorique d'un système Massive MIMO peut être modélisée mathématiquement. Pour un système comportant M antennes à la station de base et servant K utilisateurs, la capacité totale du système peut s'exprimer comme :

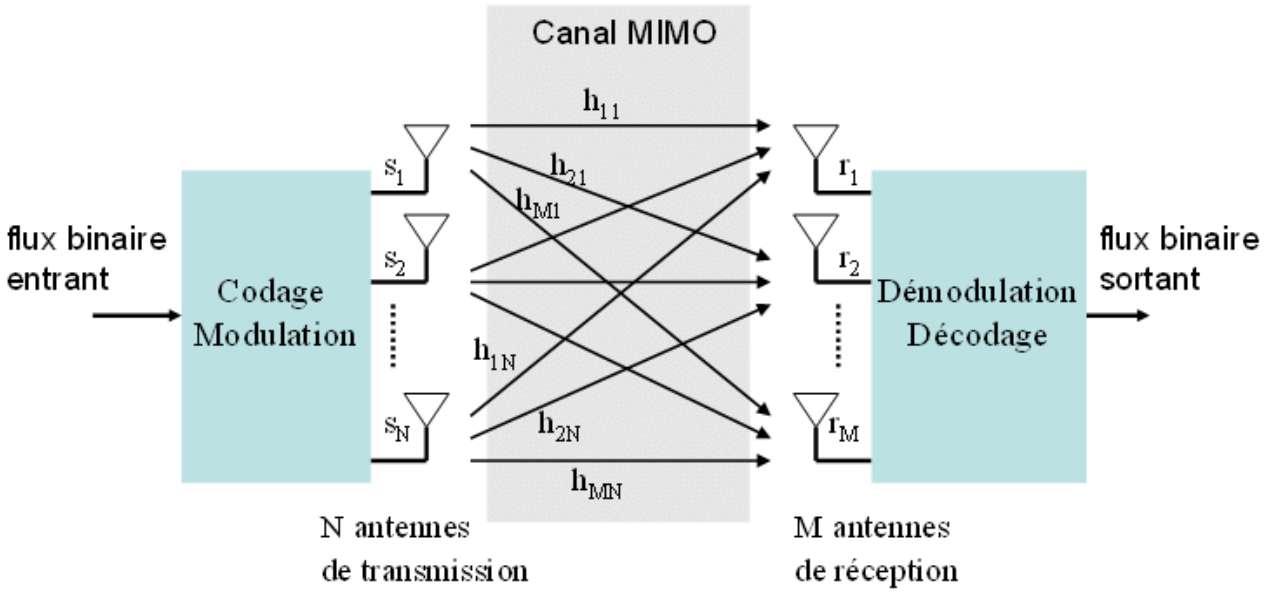
$$C = B \log_2 \det\left(\mathbf{I}_k + \frac{\rho}{K}\right) \mathbf{H}\mathbf{H}^H \qquad \text{(II.1)}$$

où B représente la bande passante, $\mathbf{I}_K$ est la matrice identité de dimension K, ρ est le rapport signal sur bruit, et $\mathbf{H}$ est la matrice du canal de dimension $K \times M$.

Une propriété remarquable du Massive MIMO est que lorsque $M \gg K$, les vecteurs de canal

des différents utilisateurs deviennent asymptotiquement orthogonaux, ce qui permet d'éliminer presque totalement les interférences inter-utilisateurs sans nécessiter de précodage complexe. Chaque utilisateur bénéficie ainsi de sa propre « voie » de transmission, même s'ils partagent le même spectre. Grâce à la résolution spatiale offerte par un grand nombre d'antennes, il devient possible de dissocier efficacement les signaux des différents utilisateurs. Cette capacité à superposer spatialement les flux de données entraîne une amélioration exponentielle de l'efficacité spectrale du système [8].

II.2.4 Chaine de transmission et réception à base de MIMO



II.2.5 Formation de Faisceaux (Beamforming)

Le beamforming est une technique essentielle qui consiste à diriger de manière intelligente les signaux radio vers des cibles précises dans l'espace. Cela permet d'amplifier le signal utile tout en minimisant les interférences inter-utilisateurs. Le beamforming repose sur la capacité du système à ajuster dynamiquement les phases et amplitudes des signaux émis par chaque antenne.

II.2.6 Taxonomie des Techniques de Beamforming

Les techniques de beamforming peuvent être catégorisées selon plusieurs approches, comme résumé dans le tableau II.3.

- **Le beamforming analogique** repose sur un réseau de phaseurs qui modifient la phase des signaux RF (radiofréquence). Il est plus économe en énergie, mais moins flexible.
- **Le beamforming numérique**, en revanche, s'opère sur les signaux traités numériquement. Il offre une flexibilité maximale, permettant d'adapter les faisceaux de manière rapide selon les conditions du canal.

Une combinaison des deux approches, appelée beamforming hybride, est souvent utilisée dans les systèmes pratiques. Elle offre un compromis entre performance, coût, et complexité [10].

Tab. II.3 : Comparaison des techniques de beamforming

Type de beamforming	**Avantages**	**Inconvénients**	**Applications**
Analogique	Faible consommation d'énergie, simplicité du matériel	Flexibilité limitée, adaptation lente	Systèmes mm-Wave, réseaux à faible puissance
Numérique	Flexibilité maximale, adaptation rapide	Consommation énergétique élevée, complexité hardware	Stations de base macro, environnements dynamiques
Hybride	Bon compromis énergie/performance	Complexité de conception accrue	Déploiements 5G pratiques
Adaptatif par apprentissage	Robustesse aux erreurs d'estimation	Temps d'apprentissage, puissance de calcul	Environnements très variables

II.3 Algorithmes de Précodage et Décodage

Les algorithmes de précodage constituent le cœur du beamforming et déterminent en grande partie l'efficacité du système. Plusieurs approches existent, comme illustré dans le tableau II.4.

Tab. II.4 : Algorithmes de précodage en Massive MIMO

Algorithme	**Principe**	**Complexité**	**Performance**
ZF (Zero-Forcing)	Annule complètement les interférences inter-utilisateurs	Moyenne	Haute à SNR élevé
MMSE (Minimum Mean Square Error)	Minimise l'erreur quadratique moyenne	Moyenne	Optimale dans la plupart des cas
MRT (Maximum Ratio Transmission)	Maximise le SNR sans considérer les interférences	Faible	Limitée en environnement multi-utilisateurs
RZF (Regularized Zero Forcing)	Version régularisée de ZF, plus robuste au bruit	Moyenne à élevée	Très bonne dans la plupart des cas
Précodage non-linéaire (DPC, THP)	Techniques avancées éliminant les interférences	Très élevée	Quasi-optimale

II.3.1 Zero-Forcing

Le **précodage ZF** est une technique qui vise à annuler les interférences inter-utilisateurs en inversant la matrice du canal. Il force les signaux indésirables à zéro, mais amplifie le bruit, ce qui

le rend moins performant à faible SNR. [1]

$$\textbf{(I)} \quad \boldsymbol{W_{ZF} = H = (H^H H)^{-1} H^H}$$

II.3.2 Minimum Mean Square Error

Le **précodage MMSE** est une méthode plus robuste qui cherche à **minimiser l'erreur quadratique moyenne** entre le signal transmis et reçu. Contrairement à ZF, il prend en compte à la fois les interférences et le bruit, offrant de meilleures performances en conditions bruitées. [2]

$$\textbf{(II)} \quad \boldsymbol{W_{MMSE} = H^H (H H^H + \sigma^2 I)^{-1}}$$

II.3.3 Diversité Spatial

La diversité spatiale exploite les multiples chemins qu'un signal peut emprunter entre l'émetteur et le récepteur. Plutôt que de subir les effets négatifs de la propagation multi-trajet (comme l'évanouissement), le système les utilise pour améliorer la fiabilité de la communication.

Gain de Diversité vs. Gain de Multiplexage

Un aspect fondamental des systèmes MIMO est le compromis entre gain de diversité et gain de multiplexage. Le tableau II.5 illustre cette relation.

Tab. II.5 : Compromis entre diversité et multiplexage

Approche	**Objectif principal**	**Impact sur BER**	**Impact sur débit**
Diversité maximale	Réduire la probabilité d'erreur	Amélioration significative	Aucun gain
Multiplexage maximal	Augmenter le débit de données	Aucune amélioration	Gain proportionnel au min(M,N)
Équilibre diversité-multiplexage	Compromis optimal	Amélioration modérée	Gain modéré

En Massive MIMO, la grande quantité d'antennes permet une combinaison intelligente des signaux reçus, ce qui réduit drastiquement la probabilité que toutes les voies soient simultanément affectées par un évanouissement. Cette redondance augmente la robustesse du système, notamment en environnements urbains denses ou industriels [11].

II.3.4 Réciprocité du Canal et Duplexage TDD

Dans les systèmes Massive MIMO, la transmission en mode TDD (Time Division Duplexing) est privilégiée par rapport au FDD (Frequency Division Duplexing). En TDD, le canal montant (uplink) et descendant (downlink) partagent la même bande de fréquence à des instants différents. Cela permet de supposer une réciprocité du canal : les caractéristiques du canal mesurées en montée peuvent être utilisées pour la descente.

II.3.5 Analyse Comparative TDD vs. FDD

Le tableau II.6 présente une comparaison détaillée entre les approches TDD et FDD pour les systèmes Massive MIMO.

Tab. II.6 : Comparaison TDD vs. FDD pour le Massive MIM

Critère	**TDD**	**FDD**
Complexité d'estimation du canal	Proportionnelle au nombre d'utilisateurs (K)	Proportionnelle au produit du nombre d'utilisateurs et d'antennes ($K \times M$)
Surcharge pilote	Faible, indépendante du nombre d'antennes	Élevée, croît avec le nombre d'antennes
Latence	Peut être plus élevée en raison du partage temporel	Potentiellement plus faible grâce aux transmissions simultanées
Exploitation de la réciprocité	Naturelle, facilite le précodage	Nécessite un retour d'information explicite
Problèmes spécifiques	Calibration RF précise requise	Surcharge de signalisation élevée

Ce principe est d'une importance capitale pour le Massive MIMO, car il permet de réduire significativement la charge liée à l'estimation du canal en aval. Cependant, cela nécessite une calibration minutieuse de la chaîne radiofréquence (RF) pour garantir la cohérence entre les canaux montants et descendants [8].

II.4 Modèles de Canaux et Propagation

II.4.1 Caractérisation du Canal Massive MIMO

La modélisation précise du canal de propagation est cruciale pour l'analyse et la conception des systèmes Massive MIMO. Plusieurs modèles ont été développés avec différents niveaux de complexité et de précision.

II.4.2 Modèles Déterministes vs. Stochastiques

Le tableau II.7 compare les principales approches de modélisation.

Tab. II.7 : Modèles de canaux pour systèmes Massive MIMO

Type de modèle	Caractéristiques	Précision	Complexité de calcul
Ray-tracing	Basé sur l'optique géométrique, capture les spécificités de l'environnement	Très élevée	Très élevée
Géométrique stochastique (GSCM)	Combine approches statistiques et spécificités géométriques	Élevée	Moyenne à élevée
Corrélation spatiale	Modélise les interdépendances entre antennes	Moyenne	Moyenne
i.i.d. Rayleigh	Modèle simplifié, canal riche en diffusion	Faible	Très faible
3GPP-3D	Standard industriel, modèle de référence	Élevée	Élevée

II.4.3 Propagation en Ondes Millimétriques

Avec l'avènement de la 5G et l'utilisation croissante des bandes millimétriques (mmWave), la compréhension des phénomènes de propagation spécifiques à ces fréquences devient essentielle pour les systèmes Massive MIMO.

Tab. II.8 : Caractéristiques de propagation selon les bandes de fréquence

Bande	Atténuation	Pénétration	Implications pour Massive MIMO
Sub-6 GHz	Modérée	Bonne	Configuration classique, beamforming modéré
mmWave (28-38 GHz)	Élevée	Faible	Beamforming crucial, densification nécessaire
mmWave (60 GHz)	Très élevée	Très faible	Beamforming ultra-précis requis
Sub-THz (90-300 GHz)	Extrême	Quasi-nulle	Réseaux ultra-denses, beamforming holographique

II.5 Avantages du Massive MIMO

II.5.1 Efficacité Spectrale Accrue

Grâce à la capacité de transmettre plusieurs flux simultanément sur un même canal, le Massive MIMO permet d'atteindre des débits très élevés, souvent multipliés par un

facteur 10 ou plus par rapport aux systèmes traditionnels. Chaque utilisateur reçoit son propre faisceau spatial, sans interférer significativement avec les autres. Cette approche maximise l'utilisation du spectre, ressource précieuse et coûteuse [8].

II.5.2 Comparaison des Gains d'Efficacité Spectrale

Le tableau II.9 présente une comparaison quantitative des gains d'efficacité spectrale.

Tab. II.9 : Comparaison des efficacités spectrales (bits/s/Hz)

Technologie	**Efficacité théorique**	**Efficacité pratique**	**Gain vs. SISO**	**Scénario optimal**
SISO	3-4	2-3	Base de référence	Zones rurales, faible densité
MIMO 4×4	8-12	6-8	×2-3	Zones suburbaines
Massive MIMO 64×16	20-30	15-22	×5-7	Zones urbaines, hots-pots
Massive MIMO 128×32	35-50	25-40	×8-13	Environnements très denses

II.5.3 Efficacité Énergétique

En focalisant l'énergie uniquement vers les utilisateurs ciblés, plutôt que de rayonner dans toutes les directions, le Massive MIMO réduit la puissance nécessaire pour maintenir une qualité de signal suffisante. Cela engendre une baisse de la consommation énergétique à la station de base, et prolonge la durée de vie des composants électroniques soumis à moins de contraintes thermiques [8].

II.5.4 Analyse Quantitative de l'Efficacité Énergétique

Le tableau II.10 quantifie les gains énergétiques selon différentes configurations.

Tab. II.10 : Efficacité énergétique des systèmes MIMO

Système	**Efficacité énergétique (bits/Joule)**	**Réduction de puissance d'émission**	**Consommation totale**
SISO	Base de référence	Base de référence	Base de référence
MIMO 4×4	×1.5-2	-20%	+5% (électronique suppl.)
Massive MIMO 32×8	×4-6	-60%	-30%
Massive MIMO 128×32	×7-12	-85%	-45%

II.5.5 Réduction des Interférences

L'isolement spatial qu'offre le beamforming permet de minimiser les interférences inter-utilisateurs, y compris dans des scénarios de haute densité (par exemple dans les stades, gares, centres commerciaux). Cette capacité d'adaptation en temps réel permet d'optimiser le réseau même dans des environnements fortement dynamiques [8].

II.5.6 Amélioration de la Couverture

L'utilisation de nombreux éléments rayonnants améliore le gain total de l'antenne. Ainsi, les signaux peuvent atteindre des zones éloignées ou mal desservies par les réseaux traditionnels. Ceci est particulièrement bénéfique pour les zones rurales, montagneuses, ou les zones industrielles éloignées, contribuant ainsi à une couverture universelle [8].

II.5.7 Extension de Couverture Quantifiée

Le tableau II.11 illustre l'amélioration de la couverture.

Tab. II.11 : Extension de couverture par technologie

Technologie	**Gain d'antenne**	**Extension de portée**	**Impact sur planification cellulaire**
SISO	0 dBi (référence)	Base de référence	Déploiement dense requis
MIMO 4×4	6 dBi	+35%	Réduction modérée du nombre de sites
Massive MIMO 64×16	12-15 dBi	+70-90%	Réduction de 30-40% du nombre de sites
Massive MIMO 256×64	18-22 dBi	+110-140%	Réduction de 50-60% du nombre de sites

II.5.8 Robustesse au Fading

Le Massive MIMO améliore considérablement la résilience aux variations rapides du canal (fading), grâce à la redondance spatiale. Le système peut sélectionner ou combiner dynamiquement les antennes les plus fiables, assurant ainsi une stabilité accrue même en conditions extrêmes (mobilité élevée, conditions météorologiques défavorables, etc.) [8].

II.6 Défis Techniques

II.6.1 Estimation du Canal

L'augmentation du nombre d'antennes rend l'estimation du canal particulièrement exigeante. Plus le système est massif, plus il devient difficile de transmettre et de traiter les signaux pilotes nécessaires à cette estimation. Des méthodes innovantes telles que les réseaux de neurones convolutifs (CNN) ou les réseaux récurrents (RNN) sont en cours d'étude pour optimiser cette étape de manière plus efficace [8]

Techniques Avancées d'Estimation de Canal

Le tableau II.12 compare différentes approches d'estimation de canal.

Tab. II.12 : Techniques d'estimation de canal en Massive MIMO

Technique	**Principe**	**Complexité**	**Précision**
Least Squares (LS)	Estimation directe sans hypothèse a priori	Faible	Modérée, sensible au bruit
MMSE	Exploite les statistiques du canal	Moyenne	Élevée, optimale sous certaines conditions
Compressed Sensing	Exploite la parcimonie du canal	Élevée	Très élevée pour canaux parcimonieux
Deep Learning	Utilise des réseaux neuronaux pour apprendre les caractéristiques du canal	Très élevée (apprentissage), modérée (inférence)	Potentiellement supérieure dans des scénarios complexes

II.6.2 Contamination de Pilotes

Dans les réseaux cellulaires denses, les séquences pilotes doivent parfois être réutilisées dans différentes cellules par manque de ressources. Cette réutilisation engendre des interférences qui biaisent l'estimation du canal, un phénomène critique connu sous le nom de *contamination de pilotes*. Il s'agit de l'un des principaux verrous à l'évolutivité du Massive MIMO. Diverses stratégies de coordination inter-cellules ou de conception de codes orthogonaux sont proposées pour l'atténuer [8].

Tab. II.13 : Techniques d'atténuation de la contamination de pilotes

Stratégie	Principe	Avantages	Inconvénients
Méthodes basées sur l'apprentissage	Utilisation de réseaux de neurones pour identifier et supprimer les interférences	Adaptation dynamique aux environnements changeants	Nécessite des données d'entraînement importantes, coût computationnel élevé
Coordination multi-cellulaire	Partage d'informations entre stations de base pour mitiger les interférences	Très efficace dans les déploiements denses	Augmente significativement le trafic de signalisation
Pilotes non orthogonaux	Utilisation de séquences non orthogonales avec décodage avancé	Augmente le nombre d'utilisateurs supportés	Complexité algorithmique élevée

II.6.3 Complexité Matérielle et Consommation Énergétique

L'implémentation d'un système Massive MIMO implique un nombre important de chaînes RF (Radio Fréquence), incluant convertisseurs analogique-numérique (CAN), amplificateurs de puissance, et circuits de traitement numérique du signal. Cette multiplication des composants engendre des défis considérables en termes de coût, de consommation énergétique, et de dissipation thermique [9].

Architectures d'Implémentation

Le tableau II.20 présente une comparaison des principales approches architecturales pour les systèmes Massive MIMO.

II.6.4 Synchronisation et Calibration

Dans un système comportant des centaines d'antennes, maintenir une synchronisation parfaite entre les éléments rayonnants devient un défi majeur. Les variations de phase et d'amplitude entre les différentes chaînes RF peuvent compromettre les performances du beamforming et du multiplexage spatial [10].

Tab. II.14 : Architectures d'implémentation Massive MIM

Architecture	Description	Coût relatif	Consommation énergétique
Entièrement numérique	Une chaîne RF complète par antenne	Très élevé	Très élevée
Hybride à sous-réseaux	Partage des chaînes RF entre groupes d'antennes	Modéré	Modérée
Hybride à commutation	Commutation dynamique des chaînes RF selon les besoins	Modéré à élevé	Faible à modérée
Analogique à faisceau fixe	Faisceaux préconfigurés avec peu de capacités adaptatives	Faible	Très faible

II.6.5 Méthodes de Calibration

Le tableau II.20 compare les principales techniques de calibration utilisées dans le Massive MIMO.

Tab. II.15 : Techniques de calibration en Massive MIMO

Méthode	Principe	Précision	Complexité d'implémentation
Calibration relative	Utilise un élément de référence pour aligner les autres	Modérée	Faible
Calibration par dispositif externe	Émetteur/récepteur dédié pour la calibration	Élevée	Modérée
Auto-calibration	Échanges de signaux entre antennes co-localisées	Modérée	Faible
Calibration OTA (Over-The-Air)	Utilisation de balises spécifiques dans l'environnement	Très élevée	Élevée

II.7 Applications et Cas d'Usage

II.7.1 Intégration dans les Réseaux 5G et Beyond

Le Massive MIMO constitue l'une des technologies fondamentales de la 5G, contribuant de manière significative à l'atteinte des objectifs de performance définis par l'UIT-R pour les
IMT-2020. Dans les réseaux 5G, le Massive MIMO est principalement déployé dans les bandes mid-band (3,3-4,2 GHz) et high-band (24-28 GHz), permettant ainsi d'exploiter pleinement les avantages du beamforming et du multiplexage spatial [9].

Cas d'Usage selon les Catégories de Service 5G

Le tableau II.20 illustre la contribution du Massive MIMO aux différentes catégories de service définies pour la 5G.

Tab. II.16 : Contribution du Massive MIMO aux cas d'usage 5G

Catégorie	Exigences	Contribution du Massive MIMO	Exemples d'applications
eMBB (Enhanced Mobile Broadband)	Débits élevés, large couverture	Fondamentale (×5-10 en efficacité spectrale)	Streaming vidéo 8K, réalité virtuelle
URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications)	Fiabilité >99,999%, latence <1ms	Modérée à importante (diversité spatiale)	Véhicules autonomes, chirurgie à distance
mMTC (Massive Machine Type Communications)	Densité massive de connexions	Importante (beamforming multi-utilisateur)	Smart cities, capteurs industriels

II.7.2 Déploiements Industriels et Verticaux

Le Massive MIMO trouve des applications spécifiques dans divers secteurs industriels, où les exigences de connectivité deviennent de plus en plus strictes. Ces déploiements se caractérisent souvent par des configurations sur mesure, adaptées aux environnements particulièrement contraignants [11].

Applications Sectorielles

Le tableau II.20 présente les principales applications verticales du Massive MIMO.

II.7.3 Réseaux Privés et Campus

Les réseaux privés 5G basés sur le Massive MIMO émergent comme une solution privilégiée pour les environnements exigeant un contrôle total sur la qualité de service, la sécurité, et la personnalisation. Ces déploiements, typiquement circonscrits à des zones géographiques limitées comme des campus universitaires, des complexes industriels, ou des infrastructures critiques, permettent d'optimiser la configuration du Massive MIMO selon des besoins très spécifiques [10].

Tab. II.17 : Applications sectorielles du Massive MIMO

Secteur	Exigences spécifiques	Configuration Massive MIMO adaptée	Bénéfices clés

Industrie 4.0	Fiabilité ultra-élevée, densité importante	Déploiement indoor, focalisation précise	Remplacement des câbles, flexibilité
Transport intelligent	Mobilité élevée, couverture continue	Beamforming adaptatif rapide	Communication V2X fiable
Smart cities	Déploiement à grande échelle, efficacité énergétique	Antennes multi-secteurs à faible consommation	Gestion optimisée des ressources urbaines
Événements temporaires	Capacité instantanée massive	Systèmes transportables à déploiement rapide	Support de pics de trafic exceptionnels

II.8 Évolutions et Perspectives

II.8.1 Holographic MIMO et MIMO Distribué :

L'évolution naturelle du Massive MIMO conduit vers des configurations encore plus ambitieuses, où le nombre d'antennes peut atteindre plusieurs milliers, distribuées sur des surfaces importantes. Ces systèmes, qualifiés de MIMO Holographique ou de MIMO Extrêmement Massif (XL-MIMO), promettent des performances sans précédent en termes d'efficacité spectrale et de focalisation spatiale [9].

II.8.2 Comparaison des Technologies MIMO Avancées

Le tableau II.20 compare les différentes évolutions du concept MIMO.

II.8.3 Intégration avec l'IA et l'Apprentissage Machine

L'intelligence artificielle transforme profondément la conception et l'exploitation des systèmes Massive MIMO. Des phases d'estimation du canal à l'allocation des ressources, en passant par la formation adaptative des faisceaux, les algorithmes d'apprentissage automatique démontrent leur capacité à optimiser les performances tout en réduisant la complexité computationnelle [10].

Tab. II.18 : Évolutions des technologies MIMO

Technologie	**Nombre d'antennes**	**Distribution spatiale**	**Caractéristiques distinctives**
MIMO conventionnel	2-8	Co-localisée	Base de référence
Massive MIMO	32-256	Co-localisée	Beamforming multi-utilisateur

Cell-free Massive MIMO	100-1000	Distribuée	Coordination distribuée, pas de limites cellulaires
Holographic MIMO	>1000	Surface continue	Manipulation du champ électromagnétique complet

II.8.4 Applications de l'IA dans le Massive MIMO

Le tableau II.20 détaille les principales applications de l'IA dans les systèmes Massive MIMO.

Tab. II.19 : Applications de l'IA dans les systèmes Massive MIMO

Fonction	**Technique d'IA**	**Amélioration de performance**	**Réduction de complexité**
Estimation de canal	CNN, LSTM	+20-30% en précision	×5-10
Précodage adaptatif	Apprentissage par renforcement	+15-25% en SINR	×2-3
Détection de signaux	Réseaux de neurones profonds	Réduction du BER d'un facteur 10	Variable
Gestion des ressources	Optimisation multi-agents	+30-40% en débit système	Non applicable

II.8.5 Intégration avec les Surfaces Intelligentes Reconfigurables (RIS)

Les Surfaces Intelligentes Reconfigurables (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS) émergent comme une technologie complémentaire au Massive MIMO. Ces métasurfaces, composées de nombreux éléments réflecteurs passifs contrôlables électroniquement, permettent de manipuler l'environnement électromagnétique pour améliorer la propagation des signaux. Leur association avec le Massive MIMO ouvre la voie à des réseaux 6G véritablement programmables au niveau de leur couche physique [11].

II.8.6 Synergies Massive MIMO et RIS

Le tableau II.20 illustre les complémentarités entre ces technologies.

Tab. II.20 : Synergies entre Massive MIMO et RIS

Aspect	Contribution du Massive MIMO	Contribution du RIS	Gain combiné
Couverture	Amélioration par beamforming actif	Extension par réflexion passive	×3-5
Efficacité énergétique	Modérée (composants actifs)	Très élevée (éléments passifs)	×7-10
Densité de connexion	Élevée (multiplexage spatial)	Support indirect (meilleure couverture)	×2-3
Complexité d'implémentation	Élevée	Modérée	Non applicable

II.9 Conclusion

Le Massive MIMO représente une évolution fondamentale dans la conception des systèmes de communication sans fil. En exploitant pleinement la dimension spatiale, cette technologie repousse les limites théoriques et pratiques des réseaux cellulaires conventionnels. Son intégration réussie dans les déploiements 5G actuels confirme sa maturité technique, tout en ouvrant la voie à des développements encore plus ambitieux pour les réseaux 6G à l'horizon 2030. Les défis qui subsistent, notamment en termes de complexité matérielle, de consommation énergétique, et de traitement du signal en temps réel, font l'objet d'intenses efforts de recherche. L'émergence de nouvelles architectures hybrides, plus efficientes, et l'intégration croissante de l'intelligence artificielle dans toutes les couches du système laissent entrevoir des solutions prometteuses à ces obstacles. À plus long terme, la convergence du Massive MIMO avec d'autres technologies émergentes comme les surfaces intelligentes reconfigurables, les réseaux cell-free, et les communications en ondes terahertz, définira probablement la prochaine génération de systèmes de communication sans fil. Cette évolution continuera de repousser les frontières de la connectivité globale, soutenant ainsi l'émergence de nouveaux cas d'usage et applications qui semblent aujourd'hui futuristes. En définitive, le Massive MIMO illustre parfaitement comment une avancée théorique majeure en traitement du signal peut se transformer en une technologie transformative à l'échelle mondiale, redéfinissant les possibilités des communications sans fil pour les décennies à venir.

Chapitre III

Résultats de Simulation

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats issus de la simulation Matlab d'un système MIMO massif appliqué à une communication 5G, en considérant un canal de Rayleigh. L'objectif est d'évaluer les performances du système en fonction du taux d'erreur binaire (*Bit Error Rate*, BER) pour différentes valeurs de SNR (dB). Les simulations permettent d'observer l'impact du nombre d'antennes et des techniques de la détection « *Beamforming »* sur le BEE.

III.1.1 Définition du Canal de Rayleigh

Le canal de Rayleigh est un modèle statistique utilisé pour représenter les variations d'amplitude d'un signal radio en environnement sans ligne de vue directe. Il est particulièrement adapté aux communications mobiles, où les signaux subissent des réflexions, diffractions et diffusions. Le coefficient de canal suit une distribution complexe de Rayleigh, ce qui rend l'analyse plus réaliste dans les cas de propagation urbaine dense.

III.2 Principe de base du travail

III.2.1 BER et SNR

BER (Bit Error Rate) est une mesure de la qualité d'un système de communication, représentant le ratio entre les bits erronés reçus et le nombre total de bits transmis**.**

III.2.2 SNR (Signal-to-Noise Ratio)

en dB quantifie le rapport entre la puissance du signal utile et celle du bruit. Plus le SNR est élevé, plus la qualité de réception est bonne.

III.3 Objectif de la simulation

L'objectif principal de cette simulation est d'évaluer les performances d'un système massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) et de comparer les performances entre les techniques de pré-codage du MIMO tels que le Zero-Forcing (ZF) et le Minimum Mean-Square-Error (MMSE). Le paramètre clé étudié ici est le taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR), exprimé en dB.

III.3.1 Paramètres de Simulation

Le script MATLAB a été conçu selon les paramètres représenté dans le tableau III.1 :

Tab I.1 Paramètre de Simulation

Paramètre	**Valeur**
Modulation	BPSK
Type de pré-codage	Zero-Forcing (ZF) Minimum Mean-Square-Error (MMSE)
Nombre d'antennes BS (M)	8, 16, 32, 64, 128, 256
Nombre d'utilisateurs (K)	
Longueur des données (L)	100 bits
Nombre d'itérations Monte Carlo	1000 itérations
Plage de SNR (en dB)	de -10 dB à 20 dB (pas de 5 dB)
Canal simulé	Rayleigh à fading plat

III.3.2 Scénario de simulation

- **Canal :** Une matrice de canal aléatoire Rayleigh (K × M) est générée pour chaque itération.

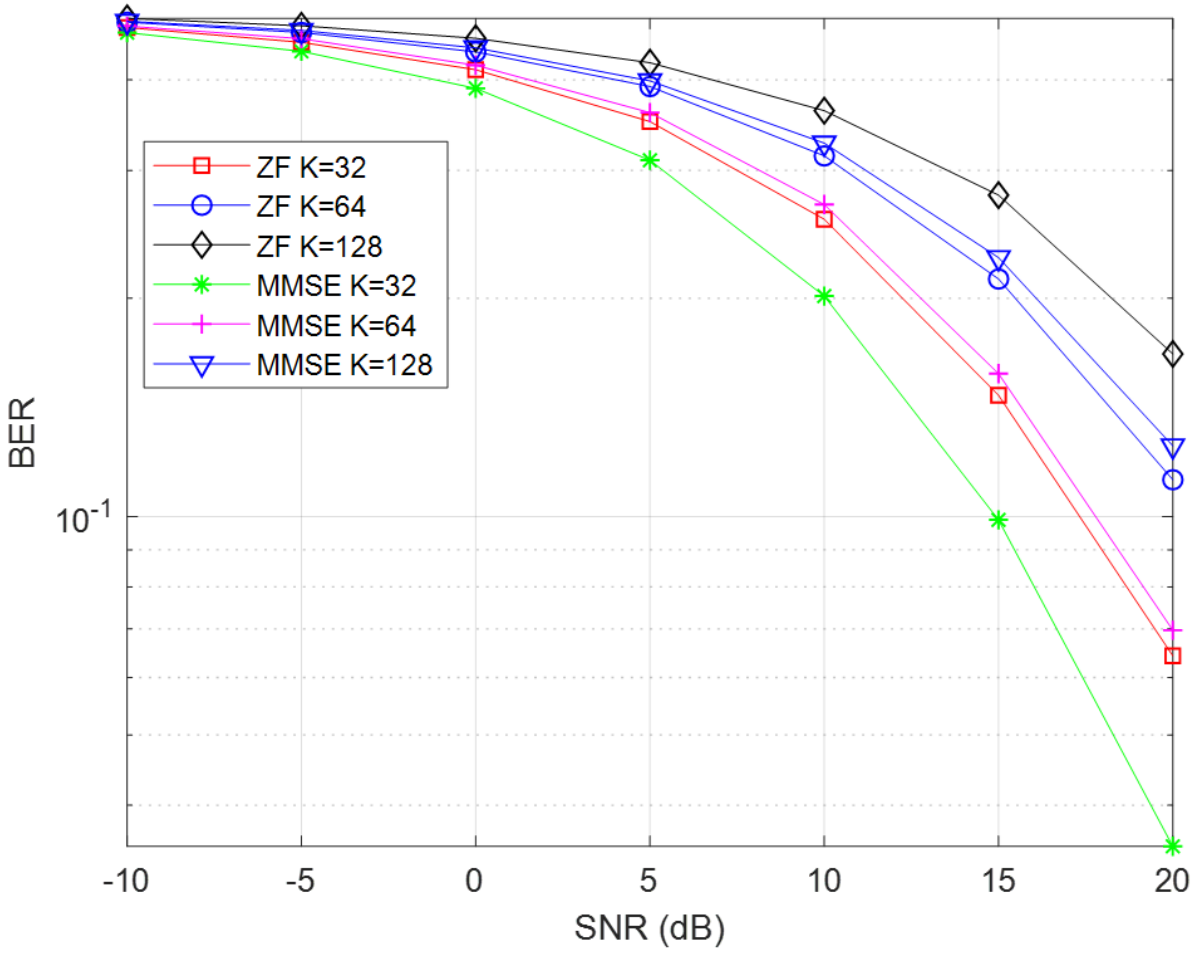
- **Transmission :** Les bits BPSK sont générés aléatoirement, mappés, puissance normalisés et passés à travers le canal avec un bruit Gaussien Additif.

- **Réception :** La matrice de pré-codage ZF et MMSE est calculée et appliquée aux signaux reçus.

- **Démodulation :** Les signaux sont démodulé, puis comparés aux bits transmis pour calculer le

taux d'erreur binaire (BER).

III.4 Résultats Observés



III.1 Influence du type pré-codage

Cette figure **III.1** compare les performances en termes de **BER (Bit Error Rate)** pour deux techniques de précodage :

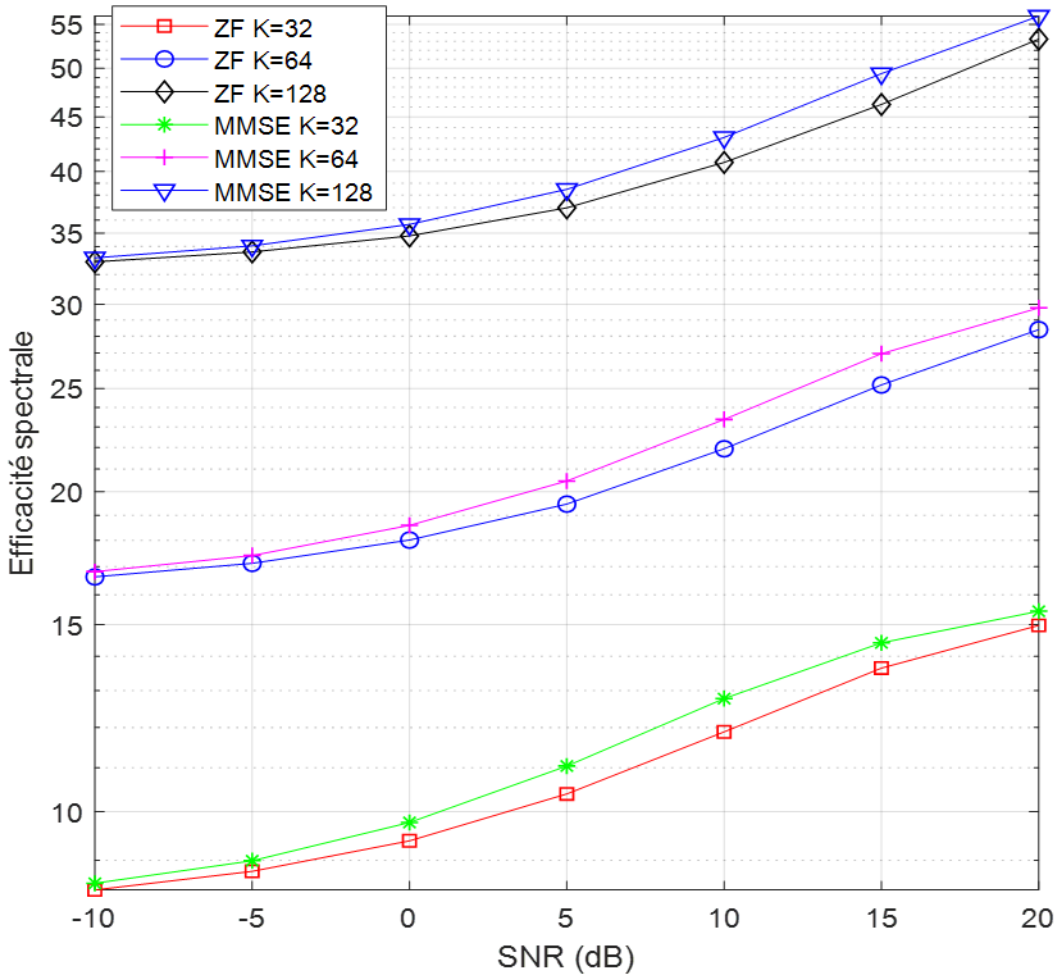
- **ZF (Zero Forcing)**
- **MMSE (Minimum Mean Square Error)**
  Pour trois valeurs de **K** (nombre d'utilisateurs ou de flux) : 32, 64 et 128.

- **Tendance observée**

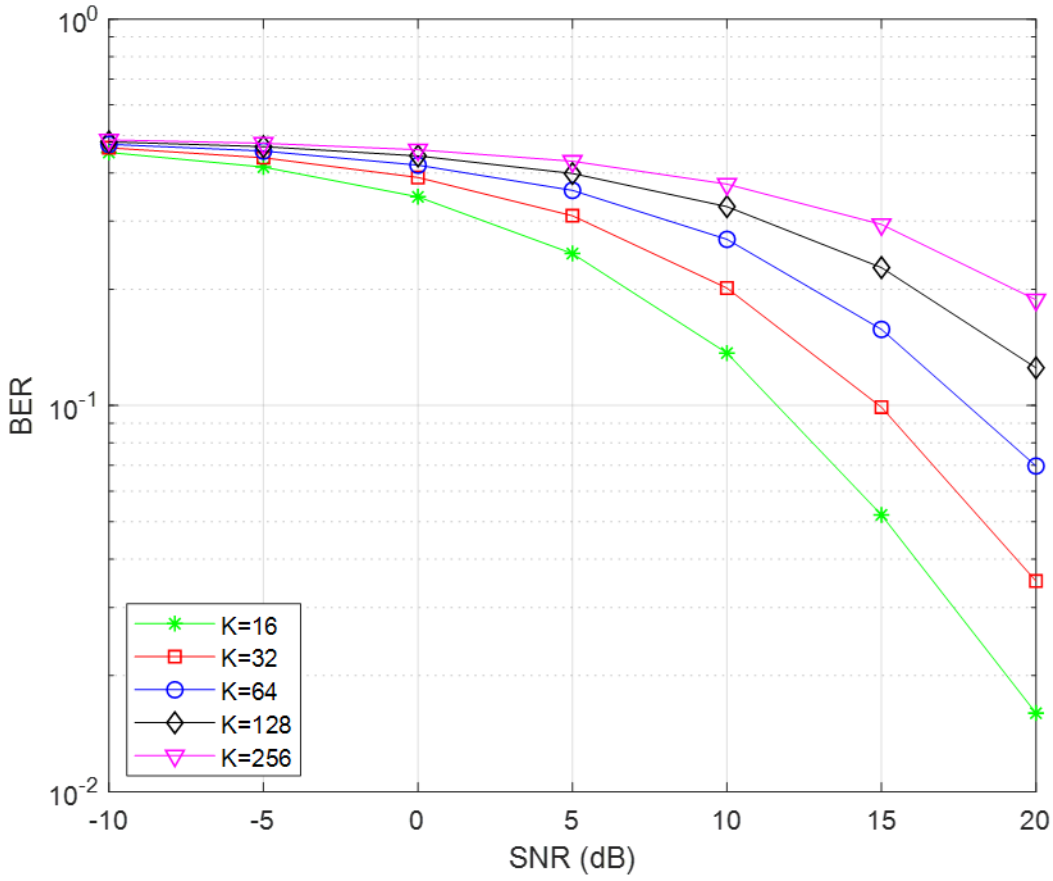
- Le **BER diminue avec l'augmentation du SNR**, ce qui est attendu.
- La méthode **MMSE surpasse ZF** en termes de performance, surtout à **bas SNR**, car MMSE est plus robuste au bruit.
- Plus **K augmente**, plus le BER est élevé, ce qui s'explique par une augmentation des interférences inter-utilisateurs.

• Conclusion

- Le **MMSE est plus adapté** dans les environnements bruités (SNR faible).
- Le **ZF devient compétitif à fort SNR**, mais reste moins performant globalement.
- Limiter le nombre de flux simultanés (K) peut améliorer la qualité du lien.



III.2 Efficacité Spectrale En Fonction De SNR (dB)



III.3 Le Taux D'erreur (BER) En Fonction de SNR (dB) Influence du nombre d'antennes

Cette figure **III.2** représente **l'efficacité spectrale** (axe vertical) en fonction du **rapport signal sur bruit (SNR en dB)** (axe horizontal) pour deux techniques de détection :

- **ZF (Zero Forcing)**
- **MMSE (Minimum Mean Square Error)**

Elle compare également trois valeurs différentes de **K**, c'est-à-dire le nombre d'utilisateurs :

- K = 32
- K = 64
- K = 128

Commentaires clés :

1. **Tendance générale**

- L'efficacité spectrale augmente avec le **SNR** pour toutes les configurations, ce qui est attendu : un meilleur SNR permet une meilleure qualité de transmission.

2. **Comparaison MMSE vs ZF :**
   - Pour chaque valeur de K, **MMSE offre une efficacité spectrale supérieure** à celle de ZF, en particulier à faibles et moyens niveaux de SNR.
   - Cette différence met en évidence la **meilleure gestion du bruit** par la méthode MMSE.

Tendance observée

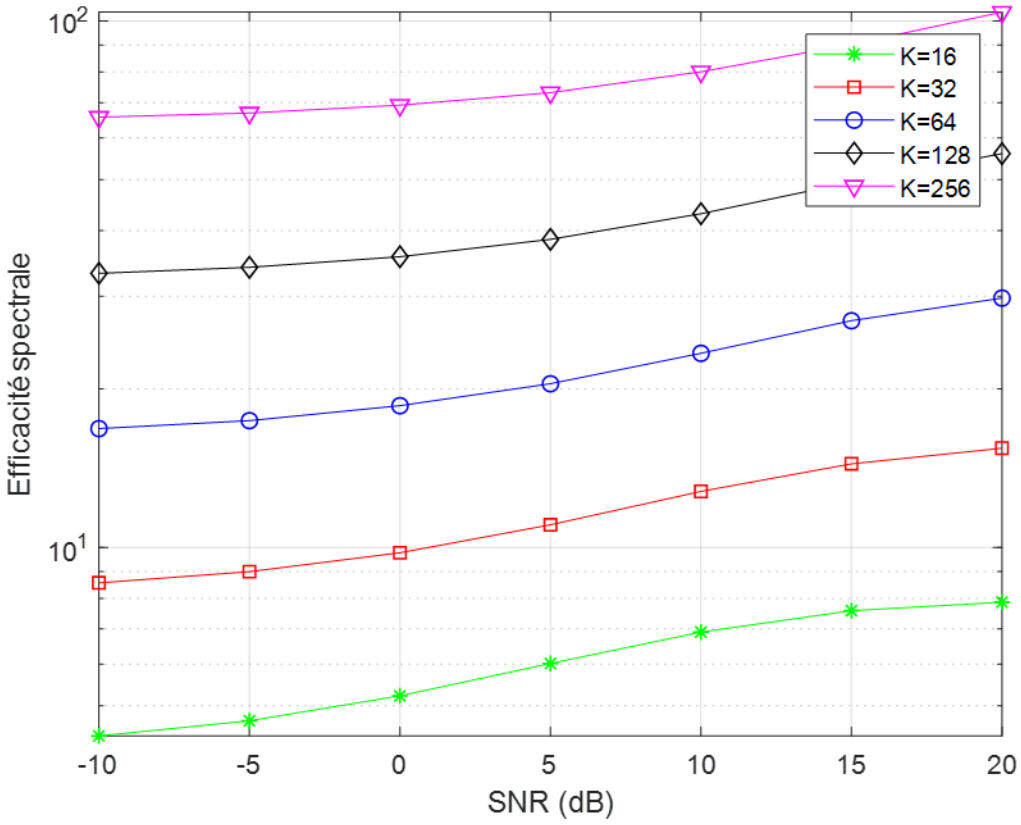
- L'efficacité spectrale **augmente avec le SNR** pour toutes les configurations.
- **MMSE offre systématiquement de meilleures performances** que ZF, surtout à faible SNR.
- Lorsque **le nombre d'utilisateurs K augmente**, l'efficacité spectrale **diminue**, quelle que soit la technique utilisée.
- **ZF devient moins efficace** lorsque le SNR est faible ou que le nombre d'utilisateurs est élevé, ce qui souligne sa sensibilité au bruit.

Conclusion

La simulation montre que la **technique MMSE est plus robuste et plus performante** que ZF dans les systèmes Massive MIMO, en particulier dans des conditions de bruit et de forte densité d'utilisateurs. Cela confirme que **MMSE est mieux adapté aux environnements complexes** des réseaux 5G réels, où le compromis entre interférences et bruit est crucial.

Cette figure **III.3** montre l'évolution du **BER** selon le **SNR**, pour différents **nombres d'antennes (K = 16 à 256)**.

- ## Tendance observée
  - L'augmentation du nombre d'antennes **réduit significativement le BER**, notamment à **haut SNR**.
  - Les courbes se séparent de plus en plus avec le SNR, montrant que l'avantage du nombre d'antennes est **plus marqué en environnement favorable** (fort SNR).
  - À **K = 256**, le BER devient négligeable à partir de SNR ≈ 10 dB.
- ## Conclusion
  - L'augmentation du nombre d'antennes améliore **le gain spatial** et **réduit les erreurs de transmission**.
  - C'est l'un des grands avantages du **Massive MIMO**, notamment dans les cas de **multiplexage spatial massif**.



III.4 Influence de pré-codage :

La figure **III.4** représente la courbe du BER en fonction du SNR pour différent techniques de précodage (ZF et MMSE), pour les valeurs de SNR allant de -10 dB à 20 dB, la modulation utilisé est BPSK et le nombre d'antenne 32,64, et 128. Voici quelques commentaires importants :

• **Tendance décroissante du BER :** Comme attendu, on observe une réduction significative du BER à mesure que le SNR augmente. Cela signifie que le système devient plus fiable avec l'augmentation de SNR.

- **Comparaison entre ZF et MMSE :** La méthode Zero Forcing (ZF) et la méthode Minimum Mean Square Error (MMSE) sont deux techniques d'égalisation utilisées dans les systèmes de communication, notamment en MIMO. La méthode ZF vise à éliminer totalement l'interférence entre les signaux en inversant la matrice du canal, mais elle est très sensible au bruit, surtout lorsque la matrice du canal est mal conditionnée, ce qui peut fortement dégrader la qualité du signal. À l'inverse, la méthode MMSE cherche à minimiser l'erreur quadratique moyenne entre le signal reçu et le signal estimé, en tenant compte à la fois du bruit et de l'interférence. Bien que plus complexe, elle offre de meilleures performances globales, en particulier dans des environnements bruités, car elle équilibre atténuation de l'interférence et réduction du bruit. Ainsi, MMSE est souvent préférée en pratique, tandis que ZF reste utile dans des conditions idéales ou pour des analyses théoriques.

III.4.2 Influence de nombre d'antennes

La figure 3-2 représente la courbe du BER en fonction du SNR pour la technique de pré-codage MMSE, pour les valeurs de SNR allant de -10 dB à 20 dB, la modulation utilisée est BPSK et le nombre d'antenne 8, 16, 32,64, 128 et 256. Voici quelques commentaires importants :

III.4.3 Influence de type de modulation

La figure 3-2 représente la courbe du BER en fonction du SNR pour la technique de pré-codage MMSE, pour les valeurs de SNR allant de -10 dB à 20 dB, les type modulation utilisée sont BPSK, QPSK, 8-PSK, 16QAM et le nombre d'antenne 64. Voici quelques commentaires importants :

- **Commentaires**
  - **ZF vs autres techniques** : Le ZF est simple à implémenter et efficace en régime de haut SNR, mais il serait intéressant de comparer ces résultats avec la performance du pré-codage MMSE (Minimum Mean Square Error), surtout pour les faibles SNR.
  - **Nombre d'antennes** : Ici, M = K = 6. Pour une vraie configuration Massive MIMO (M >> K), on s'attendrait à de meilleures performances (moins d'interférences et plus de diversité).

- **Améliorations possibles** :
    - Ajouter le calcul du **Spectral Efficiency** (commenté dans le code).
    - Étudier l'impact du nombre d'antennes BS.
    - Simuler d'autres types de modulation (QPSK, 16-QAM).
    - Ajouter des schémas de codage canal.

III.5 Conclusion

Les simulations réalisées dans ce chapitre ont permis d'évaluer les performances d'un système Massive MIMO appliqué à la 5G à travers différents scénarios. En analysant le **taux d'erreur binaire (BER)** en fonction du **rapport signal sur bruit (SNR)**, plusieurs enseignements ont pu être tirés.

Tout d'abord, la comparaison entre les techniques de précodage **Zero Forcing (ZF)** et **Minimum Mean Square Error (MMSE)** montre que **MMSE** offre de meilleures performances globales, notamment en environnements bruités (faible SNR). Bien que ZF devienne compétitif à fort SNR, sa sensibilité au bruit le rend moins fiable dans des conditions réelles.

Ensuite, il a été observé que **l'augmentation du nombre d'antennes** à la station de base améliore significativement les performances du système. Plus le nombre d'antennes est élevé, plus le **gain spatial** est important, ce qui se traduit par une **réduction du BER** et une **meilleure efficacité spectrale**. Cette observation confirme l'un des principaux avantages du Massive MIMO : sa capacité à exploiter la dimension spatiale pour améliorer la qualité de transmission sans consommer davantage de spectre.

Enfin, l'étude de différentes **modulations** (BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-QAM) a permis de mettre en évidence le compromis entre **robustesse au bruit** et **capacité de transmission**. Les modulations plus complexes offrent de meilleurs débits, mais sont plus sensibles aux erreurs, surtout à bas SNR.

Ces résultats confirment que le Massive MIMO, lorsqu'il est associé à des techniques de précodage adaptées et un dimensionnement adéquat du nombre d'antennes, constitue une solution efficace pour relever les défis de performance des réseaux 5G.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons exploré en profondeur le rôle central de la technologie **Massive MIMO** dans le déploiement des réseaux **5G**, en mettant l'accent sur son impact sur les performances des **réseaux téléphoniques modernes**. Cette étude a permis de démontrer que l'augmentation massive du nombre d'antennes au niveau de la station de base permet non seulement de **servir simultanément un grand nombre d'utilisateurs**, mais aussi de **réduire considérablement le taux d'erreur binaire (BER)**, tout en **améliorant l'efficacité spectrale**.

Les simulations réalisées ont permis d'analyser différentes **techniques de précodage**, principalement **Zero Forcing (ZF)** et **Minimum Mean Square Error (MMSE)**. Il a été observé que :

- Le **précodage MMSE** offre de **meilleures performances en conditions de faible SNR**, grâce à sa capacité à prendre en compte à la fois le bruit et les interférences.
- Le **ZF**, bien que plus simple à implémenter, montre ses limites dans des environnements fortement bruités, mais devient plus performant à **fort SNR**.
- L'**augmentation du nombre d'antennes (K)** permet une nette amélioration des performances globales du système, à condition de bien dimensionner les ressources.

Par ailleurs, l'étude a montré que l'**efficacité spectrale** croît significativement avec le nombre d'antennes, ce qui confirme la **scalabilité du Massive MIMO** pour répondre aux besoins croissants en débit et en connectivité des réseaux 5G.

En conclusion, le **Massive MIMO** s'impose comme une **technologie clé** pour l'évolution des réseaux mobiles, notamment en matière de capacité, fiabilité et efficacité spectrale. Toutefois, il reste encore des **défis à relever**, notamment en ce qui concerne la **complexité du traitement du signal**, la **gestion du canal**, et la **consommation énergétique**. Ces aspects constituent des pistes intéressantes pour de futurs travaux de recherche et d'optimisation.

[1] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, 2014.

[2] E. Björnson et al., "Towards 6G MIMO : Massive Spatial Multiplexing, Dense Arrays, and Interplay Between Electromagnetics and Processing," *arXiv preprint arXiv :2401.02844*, 2024.

[3] T. Dreifuerst et al., "Massive MIMO Beamforming : Techniques and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 1, pp. 1–30, 2023.

[4] Y. Huo et al., "Technology Trends and Challenges in Terahertz Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 1, pp. 38–44, 2023.

[5] D. Nguyen et al., "Leveraging Machine Learning for Massive MIMO Systems," *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, no. 2, pp. 112–119, 2022.

[6] T. Gong et al., "Holographic MIMO Communications : Theoretical Foundations, Enabling Technologies, and Future Directions," *TechRxiv*, 2022.

[7] IEEE Communications Society, "Will Holograms Drive 6G's Performance Leap ?" *IEEE ComSoc Technology News*, 2024.

[8] Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., Marzetta, T. L. (2014). Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 186-195.

[9] Björnson, E., Sanguinetti, L., Wymeersch, H. (2024). Towards Next-Generation Wireless Networks : Recent Advances in Massive MIMO. *IEEE Wireless Communications*, 31(1), 56-62.

[10] Dreifuerst, M., Heath, R. W., Ghosh, M. (2023). Massive MIMO and mmWave for 6G : Challenges and Opportunities. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 25(1), 15-38.

[11] Huo, Y., Dong, X., Xu, W. (2023). Technology Evolution of Massive MIMO for 5G-Advanced and 6G Wireless Communications. *IEEE Communications Magazine*, 61(3), 112-118.

[12] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, “5G : A Tutorial Overview of the Next Generation of Wireless Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 84–91, 2014.

[13] M. J. Marcus and H. D. Pfister, “Millimeter Wave Propagation : Spectrum Management Implications,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 7, pp. S54–S62, 2014.

[14] J. Ordonez-Lucena, P. Ameigeiras, D. Lopez, J. J. Ramos-Munoz, J. Lorca, and J. Folgueira, “Network Slicing for 5G : Challenges and Opportunities,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 92–97, 2017.

[15] GSMA Intelligence. (2023). *The Mobile Economy Report 2023*. GSMA.

[16] Ericsson. (2022). Ericsson Mobility Report. Ericsson AB.

[17] ITU-R. (2021). IMT Vision – Framework and overall objectives of the future *development of IMT for 2020 and beyond*. International Telecommunication Union.

[18] Nokia Bell Labs. (2023). *Future X Network : A Bell Labs Perspective*. Nokia Corporation.

[19] Huawei Technologies. (2022). *5G : A Technology Vision*. Huawei Technologies Co., Ltd.

[20] Qualcomm. (2023). *The 5G Economy : How 5G will contribute to the global economy*. Qualcomm Technologies, Inc.

[21] Tse, David, and Pramod Viswanath. *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.

[22] Kay, Steven M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory. Prentice Hall, 1993.

[23] Emil Björnson, Jakob Hoydis, and Luca Sanguinetti. "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency." *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 11, no. 3–4, pp. 154–655, 2017.