

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique
جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1
كلية التكنولوجيا



MEMOIRE DE MASTER

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes Des Télécommunications

Département : d'Electronique

CONCEPTION D'UN NOUVEAU SYSTEME D'ANTENNE MIMO POUR LES APPLICATIONS DE LA 5G DANS LA BANDE MILLIMETRIQUE

Présenté par :

 Cherchali Yousra

Promoteur

 M.S. DAHMANI

Année : 2023/2024



Remerciements



Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie mon promoteur, Monsieur Dahmani, pour son soutien indéfectible, ses conseils avisés et son encadrement tout au long de ce projet. Son expertise et sa patience ont été inestimables pour le développement et la finalisation de ce travail.

Je souhaite également remercier mon co-promoteur, Monsieur Aliouat, pour ses suggestions constructives et son aide précieuse. Ses commentaires et discussions m'ont permis d'approfondir mes connaissances et de peaufiner mes idées.

Je suis particulièrement reconnaissante envers ma mère, pour son soutien moral constant, ses encouragements et son amour inconditionnel. Sans son appui, ce projet n'aurait pas été possible.

Je tiens également à exprimer ma gratitude et à rendre hommage à mon père, qui nous a quittés. Sa mémoire et ses valeurs continuent de m'inspirer chaque jour.

Un grand merci à mes deux sœurs, mes frères, en particulier Abdellah, et à Yousra, ainsi qu'à mes beaux-frères, pour leur soutien, leur patience et leurs encouragements tout au long de cette période. Leur présence et leurs mots réconfortants m'ont été d'une aide précieuse.

Enfin, je remercie toutes les personnes, nommées ou non, qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce mémoire. Votre aide et votre soutien ont été essentiels et grandement appréciés.

Dédicaces

À ma mère, qui est mon tout. Ton amour, ta force et ton soutien inconditionnel m'ont permis de réaliser ce projet. Ta présence est une source constante de motivation et d'inspiration.

À mes frères et sœurs, pour leur encouragement, leur solidarité et leur amour. Vous avez toujours été là pour moi, dans les moments de joies comme dans les moments de difficultés.

À mes amis, pour leur soutien indéfectible, leur camaraderie et leurs précieux conseils tout au long de ce parcours. Votre présence a rendu ce voyage beaucoup plus enrichissant.

À tous ceux qui croient en l'importance de l'innovation et de la recherche, ce

Travail vous est dédié.

Résumé

Le présent projet correspond à une proposition de recherches que nous entendons mener pour réaliser le mémoire de Master en télécommunication. Le travail qui nous a été confié consiste à étudier et concevoir nouveau système d'antenne MIMO pour les applications 5G.

Le projet allie travail théorique, méthodologique et conceptuel, devant aboutir à la conception et l'optimisation d'une antenne imprimée rectangulaire alimentée par une ligne micro ruban, qui résonne à la bande de fréquence 5G (22 – 30 GHz). La conception proposée consiste en la réalisation d'une antenne monopôle ULB à plans de masse partiels, suivie de la création d'une structure MIMO 2x2 à couplage mutuel réduit entre les deux antennes. Finalement, une configuration MIMO 4x4 est proposée, offrant d'excellentes performances en termes de bande passante et de capacité de communication. L'ensemble du système a été conçu et simulé à l'aide du logiciel CST Microwave Studio sur un substrat RT/Duroid 5880.

Abstract:

This project corresponds to a research proposal that we intend to carry out for the Master's thesis in telecommunications

The work entrusted to us is to study and design a new MIMO antenna system for 5G applications.

The project combines theoretical, methodological and conceptual work, leading to the design and optimization of a rectangular printed antenna powered by a micro ribbon line, which resonates at the 5G frequency band (22 – 30 GHz).

The design consists of the realization of a ULB monopole antenna with partial ground planes, followed by the creation of a 2x2 MIMO structure with reduced mutual coupling between the antennas Finally, a 4x4 MIMO configuration is proposed, offering excellent performance in terms of bandwidth The entire system was designed and simulated using CST Microwave Studio software on an RT/Duroid 5880 substrate.

ملخص:

يقوم هذا المشروع على تقديم مقترح بحثي ننوي القيام به لإنجاز رسالة الماجستير في الاتصالات. يتمثل العمل المؤكّل إلينا في دراسة وتصميم نظام جديد لهوائي MIMO لتطبيقات الجيل الخامس 5 G.

يجمع المشروع بين العمل النظري، المنهجي والمفاهيمي، بهدف تصميم وتحسين هوائي مستطيل مطبوع يتم تغذيته بخط شريطي دقيق، والذي يتناغم مع نطاق تردد الجيل الخامس (22 – 30 جيجاهرتز). يتضمن التصميم المقترح إنشاء هوائي أحادي القطب ULB بأرضية جزئية، يليه إنشاء بنية MIMO 2x2 مع تقليل التداخل المتبادل بين الهوائيين. وأخيراً، يتم اقتراح تكوين MIMO 4x4، الذي يوفر أداءً ممتازاً من حيث عرض النطاق الترددي وقدرة الاتصال. تم تصميم النظام بأكمله ومحاكاته باستخدام برنامج CST Microwave Studio على مادة RT/Duroid 5880.

TABLE DE MATIER

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE:	1
CHAPITRE1 : <u>Évolution des réseaux mobiles</u>	
1 Introduction	4
2 Évolution des réseaux mobiles	4
2.1 La 1ere génération :	6
2.2 La 2 eme génération	6
2.2.1 GSM	6
2.2.2 GPRS (2.5G)	7
2.2.3 EDGE (2.75G)	8
2.3 La 3eme génération :	8
2.4 La 4eme génération :	9
2.5 Cinquième génération des téléphones mobiles 5G	11
2.5.1 Présentation de la 5 éme génération	11
2.5.2 Objectifs de la 5 G	12
2.5.3 Catégories d'usages de la 5G :	12
2.5.4 TECHNOLOGIES EN COURS D'ETUDE DE 5G:	15
2.5.5 APPLICATIONS VISEES POUR LE RESEAU DE 5G	19
2.5.6 COMPARAISON ENTRE 4G ET 5G	20
3 Conclusion	21
CHAPITRE 2 : LES SYSTEMES MIMO ET MASSIVE MIMO	
1 Introduction	23
2 ANTENNE PATCH	23
2.1 Définition	23
2.2 Structure d'antenne patch	23
2.3 Technique d'alimentation d'antenne patch	24
2.3.1 Alimentation de la sonde coaxiale	25
2.3.2 Alimentation par ligne micro ruban	26
2.3.3 Alimentation par couplage d'ouverture	27
2.3.4 Alimentation par couplage de proximité	28
2.4 Technique d'adaptation d'antenne patch	29
2.5 Avantage et inconvénients	30
3 Antenne Ultra Large Bande	31
3.1 Definition	31
3.2 Pourquoi coupe-t-on le plan de masse dans une antenne ULB ?	31
3.3 Avantages de la technologie ULB	32
4 MIMO traditionnel	33
4.1 Principe du MIMO	33
4.2 Architectures des systèmes MIMO	34
4.2.1 MIMO – SISO	34
4.2.2 MIMO – SIMO	35
4.2.3 MIMO – MISO	36
4.2.4 MIMO	36

4.3	Avantage de la technologie MIMO.....	38
4.4	Capacité de canal d'un système MIMO.....	38
4.5	Choix de l'antenne MIMO.....	39
5	LE SYSTEME MASSIVE MIMO.....	40
5.1	Beamforming.....	41
5.2	MU-MIMO (Multi-Utilisateur MIMO).....	42
5.3	Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif.....	43
5.3.1	Nombre d'antenne.....	43
5.3.2	Le Full Duplex.....	44
5.3.3	Antennes actives et passives.....	45
5.3.4	Antennes adaptatives massive MIMO.....	46
5.3.5	Le gain.....	46
5.3.6	La taille.....	47
6	AVANTAGES DES ANTENNES MASSIVE MIMO.....	47
7	AVANTAGES DES SYSTEMES MASSIVE MIMO.....	48
8	PERFORMANCES DES ANTENNES MIMO EN DIVERSITE.....	50
8.1	couplage mutuel.....	50
8.2	Efficacité totale.....	50
8.3	Envelope Correlation Coefficient (ECC).....	50
9	Conclusion.....	51
	<u>CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET ANALYSE D'UNE NOUVELLE STRUCTURE D'ANTENNE MIMO</u>	
1	Introduction.....	53
2	Étapes de conception.....	53
2.1	Antenne de départ et ses performances.....	53
2.2	MIMO 2x2 à deux ports.....	56
2.3	MIMO 4 x 4 A QUATRE PORTS.....	59
2.4	COMPARAISON ENTRE LES DEUX MIMO.....	65
3	Conclusion.....	65

LISTE DES FIGURES	
CHAPITRE I : EVOLUTION DES RESEAUX DE TELEPHONIE MOBILE	
Figure 1 cycle des générations de téléphonie mobile	05
Figure 2 les cas d'usage de la 5G	14
Figure 3 les nouveaux usages de la 5G	14
Figure 4 spectre des fréquences 5G	16
Figure 5 illustration de la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output)	17
Figure 6 Différence entre l'accès OMA et l'accès NOMA	17
Figure 7 Illustration de full-duplex, comparé au FDD et TDD	19
Figure 8 Application de la 5G	20
CHAPITRE II : LES SYSTEMES MIMO ET MASSIVE MIMO	
Figure 9 Différentes formes d'une antenne patch	24
Figure 10 Alimentation par sonde coaxiale	26
Figure 11 Antenne patch alimenté par une ligne micro-ruban	26
Figure 12 Alimentation par couplage d'ouverture	28
Figure 13 Alimentation par le couplage par proximité	29
Figure 14 SISO-Single Input Single Output	34
Figure 15 SIMO-Single Input Multiple Output	35
Figure 16 MISO-Multiple Input Single Output	36
Figure 17 MIMO-Multiple Input Multiple Output	37
Figure 18 vue d'une antenne 2G – 3G ouverte et principe de rayonnement	40
Figure 19 Une illustration de MIMO massive	41
Figure 20 Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs	42
Figure 21 Antenne MIMO (4G) et Massive MIMO (5G)	44
Figure 23 illustration de la formation du faisceau par association des champs de chaque élément rayonnant	48
CHAPITRE III CONCEPTION ET ANALYSE D'UNE NOUVELLE STRUCTURE D'ANTENNE MIMO	
Figure 24 Géométrie de l'Antenne Monopole	54
Figure 25 coefficient de réflexion S11	55
Figure 26 coefficient de réflexion et de transmission	56

Figure 27 Géométrie de l'antenne proposée MIMO 2 x 2	57
Figure 28 coefficient de réflexion S11 et coefficient de transmission S21	57
Figure 29 ECC de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence	58
Figure 30 DG de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence	59
Figure 31 Gain en [dB] de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence	59
Figure 32 Géométrie de l'antenne proposée MIMO 4x4 à 4 ports	60
Figure 33 coefficient de réflexion S11	61
Figure 34 coefficient de réflexion S22	61
Figure 35 coefficient de réflexion S33	61
Figure 36 coefficient de réflexion S44	62
Figure 37 couplage entre les ports 1 et 2	62
Figure 38 couplage entre les ports 1 et 3	63
Figure 39 couplage entre les ports 1 et 4	63
Figure 40 Amplitudes des Coefficients de Réflexion et de Couplage	64
Figure 41 ECC de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence	64
Figure 42 DG de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence	64
Figure 43 Gain en [dB] de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence	65

LISTE DES TABLEAUX	
CHAPITRE II : LES SYSTEMES MIMO ET MASSIVE MIMO	
Tableau 1.1 4G versus 5G	21
CHAPITRE II : LES SYSTEMES MIMO ET MASSIVE MIMO	
Tableau 2.1 Comparison of feeding techniques.	25
CHAPITRE III CONCEPTION ET ANALYSE D'UNE NOUVELLE STRUCTURE D'ANTENNE MIMO	
Tableau 3.1 Composants des Antennes, leurs Matériaux, Dimensions et Rôles	53
Tableau 3.2 Paramètres de l'antenne	55
Tableau 3.3 Comparaison entre les deux antennes MIMO 2x2 et MIMO 4x4	65

LISTE DES ABREVIATIONS

- 1G** : la première génération du réseau mobile.
- 2G** : La deuxième génération du réseau mobile.
- 3G** : La troisième génération de réseaux mobiles.
- 3GPP**: 3rd Génération Partner hip Project.
- 4G** : La quatrième génération des téléphones mobiles.
- 5G** : La Cinquième génération des téléphones mobiles.
- AMPS**: Advanced Mobile Phone System.
- CDMA** : Code Division Multiple Access.
- DG**: Gain de Diversité.
- ECC**: Envelope Correlation Coefficient.
- EDGE**: Enhanced Data Rates for GSM Evolution.
- EMBB**: Enhanced Mobile Broadband.
- FDD**: Frequency Division Duplexing.
- FDMA**: Frequency Division Multiple Access.
- GoB** :Grid of Beams.
- IEEE**: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- IoT**: Internet of Things.
- L'EBB** : eigen-value based beamforming.
- LTE** : Long Term Evolution .
- MIMO** : Multiple Inputs - Multiple Outputs.
- MIMO** : Entrée multiple Sortie multiple.
- MISO** : Sortie unique à entrées multiples.
- mMTC** :Massive Machine Type Communications.

MU-MIMO : Multi-Utilisateur Multiple Inputs - Multiple Outputs.

NOMA : Non Orthogonal Multiple Access.

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

RF: radiofréquence.

SDMA: Spatial Division Multiple Access.

SIMO : Entrée unique Sortie multiple.

SISO : Single Input Single Output.

SNR: Signal-to-Noise Ratio.

SU-MIMO: Single-User MIMO.

TDD: Time Division Duplex.

ULB : Ultra Large Bande .

UMTS: Universal Mobile Télécommunications System.

UMTS: Universal Mobile Télécommunications System.

uRLLC :Ultra Reliable Low Latency Communications.

WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

L'avènement de la téléphonie mobile a profondément transformé notre société, rendant les communications sans fil omniprésentes et indispensables. Depuis les premiers réseaux analogiques de la première génération (1G) des années 1980, chaque nouvelle génération de technologie mobile a introduit des avancées significatives. La 2G a permis la numérisation des communications, offrant des services tels que les SMS et un meilleur cryptage. La 3G a marqué le début de l'Internet mobile avec des vitesses de données accrues, tandis que la 4G a encore amélioré ces capacités, rendant possibles les applications de streaming haute définition et les services de données intensifs.

Aujourd'hui, la 5G représente un changement de paradigme dans les communications mobiles. Elle promet non seulement des débits de données ultra-rapides, atteignant plusieurs gigabits par seconde, mais aussi une latence extrêmement faible, de l'ordre de quelques millisecondes. De plus, la 5G est conçue pour supporter une densité de connexion beaucoup plus élevée, facilitant le déploiement massif de l'Internet des objets (IoT), les applications de réalité augmentée et virtuelle, ainsi que les véhicules autonomes. Cette évolution nécessite des avancées technologiques significatives, en particulier dans la conception des systèmes d'antenne.

Les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output) et Massive MIMO, en particulier, sont au cœur de cette révolution. En exploitant de multiples antennes pour transmettre et recevoir des signaux, ces systèmes améliorent considérablement la capacité et la fiabilité des réseaux sans fil. Les bandes de fréquences millimétriques, essentielles pour la 5G, posent toutefois des défis spécifiques en termes de propagation du signal et de conception des antennes.

Ce mémoire se concentre sur la conception d'un nouveau système d'antenne MIMO pour les applications de la 5G dans la bande millimétrique. L'objectif est de développer des configurations d'antennes capables de maximiser les performances tout en minimisant les pertes et les interférences.

Pour structurer cette recherche, le mémoire est divisé en trois chapitres principaux :

Chapitre 1 : Une rétrospective sur l'évolution des réseaux de téléphonie mobile, depuis la 1G jusqu'à la 5G, mettant en lumière les avancées technologiques et les défis rencontrés à chaque génération.

INTRODUCTION GENERALE :

Chapitre 2 : Une exploration approfondie des systèmes MIMO et Massive MIMO, incluant une discussion sur les types d'antennes couramment utilisés, comme les antennes patch et les antennes ULB, avec un accent particulier sur les configurations MIMO.

Chapitre 3 : La présentation des résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel CST Studio. Ce chapitre détaille le processus de conception, de la création d'une antenne monopole de base à son évolution en configurations MIMO 2x2 puis 4x4, analysant leurs performances dans les bandes de fréquences millimétriques.

L'objectif de cette recherche est de contribuer à l'amélioration des performances des réseaux 5G en proposant des solutions d'antennes innovantes et efficaces, répondant aux exigences croissantes de notre société connectée.

CHAPITRE 1 :
EVOLUTION DES
RESEAUX DE TELEPHONIE
MOBILE

1 Introduction

La prolifération des appareils mobiles et des services mobiles a entraîné de nombreux changements dans notre façon de vivre. Aujourd'hui, notre société est fortement axée sur les applications. Ces changements dans nos habitudes de vie ont un impact significatif sur la conception, le déploiement et la gestion de nos réseaux. La qualité d'une application dépend en grande partie du réseau qui la supporte. Avec plus d'un milliard d'applications utilisant nos réseaux, il est essentiel que notre infrastructure réseau soit plus rapide, plus flexible, plus programmable, plus adaptable et plus intelligente.

2 Évolution des réseaux mobiles

Depuis son développement dans les années 1980, la technologie de communication mobile a subi cinq générations de changements depuis le grand frère 1G → le roi 2G Nokia → 3G CDMA → 4G LTE → 5G Internet of Everything. Le développement de chaque génération de technologie de communication mobile a apporté le temps. Les changements ont rendu nos vies plus pratiques et plus riches [1].

➤ 1G (1980s)

La première génération de réseaux cellulaires, la 1G, a été lancée dans les années 1980. Elle était basée sur la technologie analogique et offrait une qualité de voix médiocre. La 1G a permis les premiers appels mobiles, mais elle ne supportait pas les données.

➤ 2G (1990s)

La 2G, lancée dans les années 1990, a apporté une amélioration majeure en passant au numérique. Le réseau GSM, popularisé par la 2G, a permis une meilleure qualité de voix et a introduit la possibilité d'envoyer des SMS.

➤ 2.5G (2000s)

Le passage à la 2.5G a apporté des débits de données plus élevés grâce aux technologies GPRS et EDGE. Cela a permis l'essor des services mobiles WAP et de la navigation web rudimentaire.

➤ **3G (2000s)**

La 3G, lancée au début des années 2000, a marqué une révolution avec l'introduction de la vidéoconférence et du streaming multimédia. La 3G a permis l'essor des smartphones et des applications mobiles.

➤ **4G (2010s)**

La 4G, lancée dans les années 2010, a apporté des débits de données encore plus élevés et une meilleure latence. La 4G a permis le développement de la vidéo HD, des jeux en ligne et de la réalité augmentée.

➤ **5G (2020s)**

La 5G, la dernière génération de réseaux cellulaires, est en cours de déploiement. Elle promet des vitesses gigabit, une latence ultra-faible et une capacité massive. La 5G permettra de révolutionner des domaines comme l'industrie, la santé et les transports.

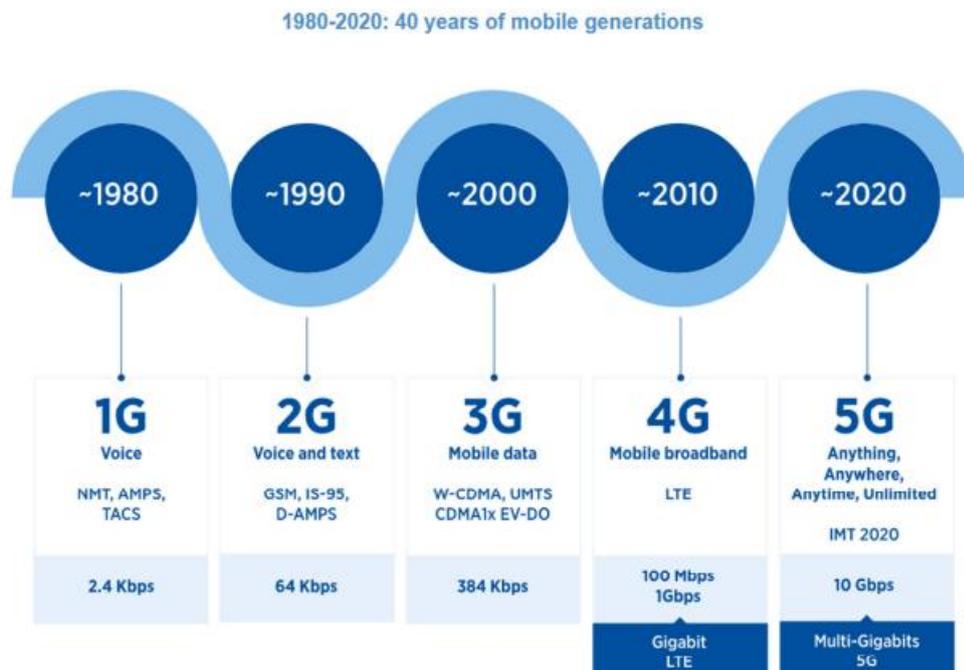


Figure 1 cycle des générations de téléphonie mobile[8]

2.1 La 1ere génération :

Le premier réseau cellulaire automatisé commercial, connu sous le nom de génération 1G [2], a été lancé au Japon par Nippon Telegraph and Telephone (NTT) en 1979, initialement dans la région métropolitaine de Tokyo. En l'espace de cinq ans, ce réseau a été étendu pour couvrir l'ensemble de la population japonaise, devenant ainsi le premier réseau 1G à l'échelle nationale.

En 1981, le système NMT a été lancé simultanément dans plusieurs pays nordiques tels que le Danemark, la Finlande, la Norvège et la Suède. NMT a été pionnier en proposant l'itinérance internationale. En 1983, le premier réseau 1G aux États-Unis a été lancé, utilisant la norme AMPS et commercialisé par Ameritech, basé à Chicago. Il utilisait des téléphones mobiles comme le Motorola DynaTAC.

La technologie 1G était principalement utilisée pour les appels vocaux sur un réseau sans fil, basé sur des normes de télécommunication analogiques. Les appels vocaux étaient transmis via des systèmes analogiques. Le Motorola DynaTAC 8000x était le premier téléphone mobile commercial permettant de passer des appels vocaux analogiques, mais il était assez grand et avait une faible autonomie.

Dans les réseaux 1G, le spectre était divisé en canaux, chaque utilisateur recevant un canal pour passer des appels vocaux, limitant ainsi le nombre d'utilisateurs pouvant passer des appels simultanément. Cependant, la qualité de la voix était souvent médiocre en raison d'interférences, les téléphones portables étaient encombrants et la couverture réseau était limitée.

En 2018, un service NMT limité en Russie reste le seul réseau cellulaire 1G encore en activité. La transition vers les normes 2G, qui utilisent des normes numériques, a apporté des améliorations significatives par rapport aux réseaux 1G.

2.2 La 2 eme génération

2.2.1 GSM

En 1991, l'organisme de normalisation Global System for Mobile Communications (GSM) a publié les normes pour la technologie 2G [2]. La technologie 2G a été lancée en 1992 et avait la capacité de gérer les appels vocaux sur des systèmes numériques. En plus des appels vocaux,

la 2G a également pris en charge les services de messagerie courte (SMS). La 2G offrait une couverture plus large que le réseau 1G. Il permettait aux utilisateurs de s'envoyer des messages texte via un réseau sans fil.

GSM est la technique 2G la plus populaire utilisée et domine le monde d'aujourd'hui. La vitesse de livraison de GSM est jusqu'à 9,6kbps et est conçue à partir de zéro.

124 canaux par cellule est utilisé à un taux de données de 9,6kbps. GSM peut être utilisé comme un système sans fil aussi parce qu'il peut être connecté à un PC et donc agit comme un modem pour l'e-mail, le télécopieur et la navigation sur Internet, etc.

- Il existe deux types de techniques sur lesquelles l'interface GSM est basée -

•**TDMA :**

La division des bandes de fréquence est faite. Les bandes de fréquence sont divisées en fuseaux horaires. Chaque utilisateur a son temps. Sur un multiplexeur radio unique qui est conçu pour supporter 16 canaux à demi-vitesse.

• **CDMA : (3^{ème} génération)**

Si le TDMA est utilisé par GSM, alors par qui est le CDMA utilisé dans 2G ?
Le meilleur exemple de 2G avec CDMA est IS 95[4].

Dans le CDMA, chaque utilisateur a un code unique tandis que dans le TDMA, chacun d'entre eux est affecté à un temps.

En comparaison avec TDMA, dans CDMA de nombreux utilisateurs peuvent être pris en charge.

2.2.2 GPRS (2.5G)

Le GPRS est porté par la plupart des utilisateurs GSM.

En théorie, la vitesse de 160 kbps peut être assurée par le GPRS. X.25 est pris en charge par GPRS. Les réseaux GSM et TDMA existants avec des capacités de commutation de paquets sont fournis par GPRS.

Les taux de données élevés sont offerts par le GPRS et les services Internet et des services à base de paquets sont également très appropriés

2.2.3 EDGE (2.75G)

EDGE se réfère aux taux de données améliorés pour GSM Evolution et est une phase suivante après GPRS. Des vitesses de données allant jusqu'à 500 kbps pouvaient être fournies par EDGE. Pour surmonter les limites du GPRS, EDGE a été conçu.

Les taux de données dans le GPRS sont beaucoup plus faibles qu'ils affichent ou annoncent cependant pour atteindre la transmission de données de 172,2kbps, un seul utilisateur nécessiterait tous les 8 timeslots.

GPRS est basé sur GMSK (Gaussian Modulation Shift Keying) tandis que EDGE est basée sur 8PSK (Eight-Phase Shift Keying). 3G utilise également 8PSK car il permet des taux de données plus élevés .

2.3 La 3eme génération :

Peu de temps après la mise en service de la 2G, les acteurs industriels préparaient déjà et discutaient des normes de génération sans fil suivantes. Parallèlement, l'Union internationale des télécommunications, Radio Communications (ITU-R) a élaboré les exigences pour les systèmes qui seraient admissibles à la classification International Mobile Télécommunications 2000 (IMT-2000). En janvier 1998, l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI) a adopté le CDMA en deux variantes (Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) et Time Division CDMA) en tant que système universel de communications mobiles. (UMTS). L'UMTS était le principal système de communication mobile 3G et l'un des premiers systèmes cellulaires qualifiés pour l'IMT-2000. Six interfaces radio ont été qualifiées pour satisfaire aux exigences de l'IMT-2000, y compris trois technologies basées sur CDMA, une version de GSM/EDGE connue sous le nom UWC-1362 et deux technologies fondées sur OFDMA . Dans le cadre du projet de partenariat de 3e génération (3GPP), de nouvelles spécifications ont été élaborées, connues conjointement sous le nom de 3G Evolution comme 3.5G. Pour cette évolution, deux approches de Radio Access Network (RAN) et une évolution du Core Network ont été suggérées.

La première approche RAN a été basée sur les étapes d'évolution de la CDMA 2000 dans le cadre de 3GPP2: 1xEV-DO et 1x EV-DV.

La deuxième approche RAN était l'accès à des paquets à haute vitesse (HSPA). HSPA est une combinaison de High Speed Downlink Packet Access (HSDPA), ajouté dans la version 5 de la 3GPP, et High Speed Uplink Packet Acces (HSUPA) ajouté à la version 6 . Les deux ont initialement amélioré la vitesse de données des paquets, à 14,6 Mbps dans le lien vers le bas et à 5,76 Mbps en haut, et ont rapidement évolué pour gérer des taux de données plus élevés avec l'introduction de MIMO. HSPA était basé sur le WCDMA et est complètement rétrocompatible avec le W CDMA. Le CDMA 1xEV-DO a commencé à être déployé en 2003, et le HSPA et le CDMA1x EV-DV sont entrés en service en 2006.

Toutes les normes 3GPP suivent la philosophie d'ajouter de nouvelles fonctionnalités tout en maintenant la compatibilité arrière. Ceci a été appliqué dans une évolution du HSPA connu sous le nom de HSPA+, qui prend en charge l'agrégation des transporteurs pour des taux de données de pointe plus élevés sans affecter les terminaux existants sur le marché [3].

2.4 La 4eme génération :

La deuxième évolution UMTS, commercialement acceptée sous le nom de 4G, s'appelle Long Term Evolution (LTE) [4], et se compose d'une nouvelle interface aérienne basée sur l'Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) et une nouvelle architecture et réseau de noyau (CN) appelée System Architecture Evolution/Evolved Packet Core (SAE/EPC). LTE n'est pas rétrocompatible avec l'UMTS et a été développé en prévision d'une allocation de blocs de spectre plus élevée que l'UMTS lors de la World Radio Conference (WRC) 2007. La norme a également été conçue pour fonctionner avec des transporteurs de fréquence de composants qui sont très flexibles dans l'arrangement, et prend en charge des porteurs de 1,4 MHz en largeur à 20MHz.

La norme LTE a offert des améliorations significatives de la capacité et a été conçue pour transitionner les réseaux cellulaires loin de la fonctionnalité de commutation de circuit, ce qui a fourni une réduction importante des coûts par rapport aux générations précédentes. À la fin de 2007, les premières spécifications LTE ont été approuvées dans 3GPP sous le nom de LTE Release 8. Le système LTE Release 8 a des vitesses de données maximales d'environ 326 Mbps, une efficacité spectrale accrue et une latence nettement plus courte (jusqu'à 20 ms) que les systèmes précédents. Parallèlement, l'ITU-T élabore les exigences pour IMT-Advanced, successeur de l'IMT-2000, et nominalement la définition de la quatrième génération. LTE

Release 8 n'était pas conforme aux exigences IMT-Advanced et était initialement considéré comme un précurseur de la technologie 4G.

Bien que cette déclaration ait été relâchée par la suite dans le discours commun et que LTE soit uniformément accepté comme 4G, 3GPP LTE Release 10 et IEEE 802.16 m (déployé sous le nom de WiMAX) ont été techniquement les premières interfaces aériennes développées pour répondre aux exigences IMT-Advanced. En dépit d'être une technologie 4G approuvée, WiMAX a eu des difficultés à obtenir une acceptation généralisée et est remplacé par LTE. LTE Release 10 a ajouté plusieurs caractéristiques techniques, telles que l'augmentation de la commande MIMO et l'agrégation du transporteur qui a amélioré la capacité et le débit de Release 8. L'agrégation des transporteurs jusqu'à 100 MHz de bande passante totale permet d'augmenter le taux de données de pointe à un maximum de 3 Gbps dans le downlink et 1,5 Gbps en uplink. Des configurations MIMO d'ordre supérieur jusqu'à 8×8 dans le downlink et 4×4 dans le uplink sont également impliquées dans l'amélioration des performances.

La normalisation 3GPP de LTE (c'est-à-dire de la version 11 à la version 13) se poursuit et devrait se poursuivre jusqu'à la version 13, et au-delà. La version 11 de LTE a amélioré certaines des capacités de la version 10, en améliorant l'agrégation des transporteurs, le relais et l'annulation des interférences.

De nouvelles bandes de fréquences ont été ajoutées et l'utilisation de la transmission et de la réception multipoint coordonnées (CoMP) a été définie. La version 12 de LTE, qui a été achevée en mars 2015, a ajouté plusieurs fonctionnalités pour améliorer le support des réseaux hétérogènes, le MIMO d'ordre encore plus élevé et l'agrégation entre les transporteurs FDD et Time Division Duplexing (TDD). Plusieurs caractéristiques pour le déchargement des réseaux de redressement et de base ont également été définies.

En outre, dans les versions LTE 12 et 13, de nouvelles solutions (connues sous le nom de LTE-M et Narrow-Band IoT (NB-IoT)) ont été introduites pour appuyer les appareils massifs de communication de type machine (MTC) tels que les capteurs et les actionneurs. Ces solutions offrent des améliorations en termes de couverture prolongée, de durée de vie de la batterie plus longue et de coût réduit. La version 13 vise également des taux de données à large bande extrêmes en utilisant l'agrégation de portefeuilles de jusqu'à 32 transporteurs [5].

Le marché mondial de la téléphonie mobile était d'environ 7,49 milliards d'abonnés à la mi-2015 [3], où la famille GSM/EDGE comprenant EGPRS pour la connectivité de données

est le réseau d'accès radio (RAN) dominant en usage. GSM a une part de marché mondiale de plus de 57% (correspondant à 4,26 milliards d'abonnés), est bien au-delà du pic d'utilisation et est actuellement en déclin. D'autre part, le nombre d'abonnés 3G, y compris HSPA, a augmenté depuis 2010 pour atteindre 1,94 milliard, ce qui représente 26% de la part de marché.

2.5 Cinquième génération des téléphones mobiles 5G

La norme technologique 5G est la cinquième génération des réseaux cellulaires à large bande, qui doit prendre la relève du réseau 4G [6]. Sa production a débuté en 2019.

Il s'agit d'infrastructures cellulaires où la zone de service est subdivisée en petites cellules. Les dispositifs 5G sans fil sont reliés à Internet et au réseau téléphonique grâce à des ondes radio via une antenne dédiée dans leur cellule. Les réseaux 5g offrent une vitesse de téléchargement accrue, une bande passante accrue et la capacité de connecter divers appareils, ce qui améliore la qualité des services Internet. L'augmentation de la bande passante entraîne l'utilisation des réseaux 5G comme fournisseurs de services Internet généraux (ISP) pour les ordinateurs.

2.5.1 Présentation de la 5^{ème} génération

La 5G, la cinquième génération de technologie sans fil, a été standardisée par le projet de partenariat de la 3e génération (3GPP) [2]. Elle offre des vitesses allant jusqu'à 1 Gbps, une latence de 1 à 10 millisecondes et peut prendre en charge un grand nombre d'appareils réseau. La technologie 5G a été normalisée en 2018 dans le cadre des spécifications de la version 15 du 3GPP.

La 5G apporte des améliorations significatives en termes de vitesse, de latence et de capacité. Son déploiement devrait avoir un impact majeur sur les fournisseurs de services, les entreprises, les consommateurs et la société dans son ensemble. Contrairement à une simple évolution de la technologie 4G, la 5G représente une révolution. Les changements les plus marquants se trouvent au niveau de la radio, avec l'introduction de la nouvelle spécification appelée 5G New Radio (5G NR) par le 3GPP. En outre, le 3GPP a repensé l'infrastructure du réseau de base pour répondre aux exigences de vitesse, de latence et de scalabilité de la 5G, en introduisant le 5G Next Generation Core (5G NG-Core). Ce dernier deviendra le cœur du réseau 5G, fournissant une expérience de service transparente à travers diverses technologies d'accès, qu'elles soient fixes ou sans fil.

2.5.2 Objectifs de la 5 G

Les objectifs de la 5G incluent [7] :

- Augmentation des débits et de la capacité des réseaux : La 5G vise à permettre des débits beaucoup plus élevés et une capacité réseau accrue par rapport à la 4G, avec des volumes de données échangées jusqu'à 1000 fois plus importants.
- Préparation pour l'internet des objets (IoT) : La 5G est conçue pour répondre aux besoins croissants de connectivité des appareils IoT en permettant la connexion de davantage d'appareils et en offrant une couverture réseau plus étendue.
- Amélioration de la vitesse de transmission : Les débits de la 5G peuvent atteindre jusqu'à 1 Gbps, offrant des vitesses significativement plus élevées que celles de la 4G, et parfois même comparables à celles des offres internet résidentielles basées sur la fibre optique.
- Réduction de la latence : La 5G vise à réduire le temps de latence, assurant ainsi une réactivité accrue du réseau, ce qui est essentiel pour des applications exigeant des temps de réponse très courts, comme la réalité virtuelle ou les voitures autonomes.
- Amélioration de l'efficacité énergétique : Les terminaux connectés à la 5G devraient bénéficier d'une meilleure autonomie de batterie grâce à une optimisation de la consommation d'énergie, permettant potentiellement une durée de vie jusqu'à dix fois plus longue pour une même charge.

En résumé, la 5G vise à offrir des débits plus élevés, une couverture plus large, une réactivité accrue du réseau et une meilleure efficacité énergétique pour répondre aux besoins croissants de connectivité des appareils et des applications modernes.

2.5.3 Catégories d'usages de la 5G :

La 5G marque une rupture par rapport aux générations précédentes de téléphonie mobile, car elle est conçue pour répondre à une gamme élargie de cas d'utilisation en plus des simples appels vocaux et de la transmission de données. Ces cas d'utilisation de la 5G peuvent être classés en trois catégories principales [8]:

➤ **eMBB (Enhanced Mobile Broad Band) :**

Ce type de cas d'utilisation concerne les communications mobiles à haut débit améliorées. Il s'agit de répondre à la demande croissante en termes de quantité de données et de vitesse de transfert. Les exemples incluent le streaming vidéo haute qualité, la réalité virtuelle et augmentée, où l'objectif est de permettre des transferts de données rapides et fluides.

➤ **mMTC (Massive Machine Type Communications) :**

Cette catégorie concerne les communications entre les objets, souvent associées à l'internet des objets (IoT). Elle vise à gérer un grand nombre de connexions simultanées, parfois jusqu'à un million par kilomètre carré. Bien que la quantité de données à transférer par connexion soit généralement limitée, la gestion de ces connexions à grande échelle est essentielle. Les applications typiques incluent les réseaux de capteurs pour les villes intelligentes et la gestion de services divers.

➤ **uRLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications) :**

Cette catégorie concerne les communications nécessitant une fiabilité extrême et des temps de réponse très courts. Les applications critiques telles que les véhicules autonomes et les services de sécurité et d'urgence en sont des exemples. Il est essentiel dans ces cas de minimiser les échecs de communication et d'assurer des temps de transmission aussi rapides que possible pour garantir la sécurité et la fiabilité des services.

Ainsi, la 5G est conçue pour répondre à ces différents besoins en fournissant des performances optimisées en termes de vitesse, de capacité, de fiabilité et de latence pour une variété d'applications et de scénarios d'utilisation.

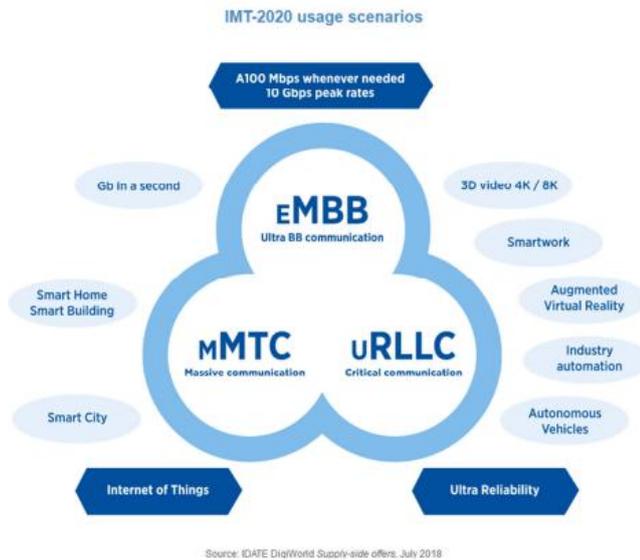


Figure 2 les cas d'usage de la 5G [8]

Ces trois catégories couvrent des usages très variés et reposent sur des critères de performances très ambitieux

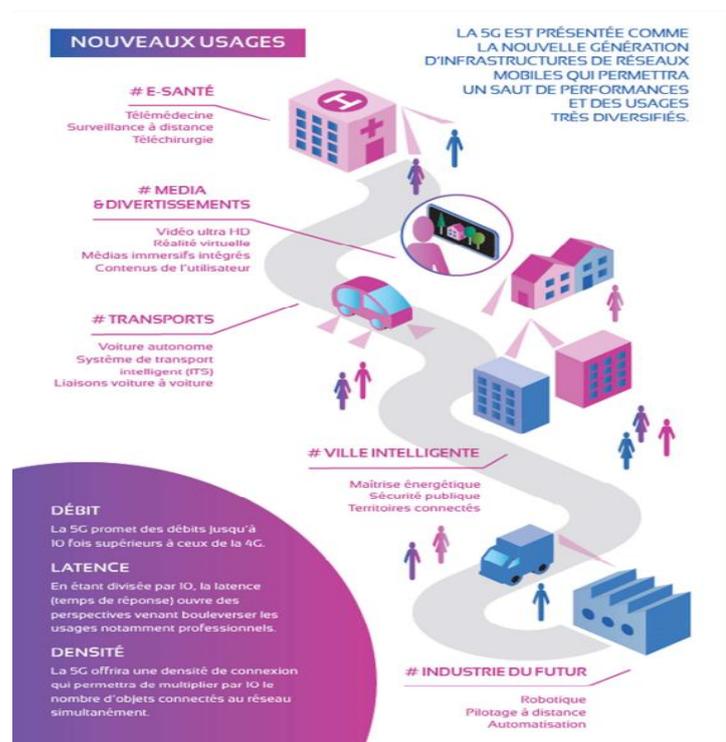


Figure 3 les nouveaux usages de la 5G [8]

Les spécifications de la 5G prévoient des améliorations significatives par rapport à la 4G, avec des débits jusqu'à 10 fois plus élevés pour les applications nécessitant un très haut débit (eMBB), une réduction de la latence d'un facteur de 10, soit de l'ordre de la milliseconde,

pour les applications critiques (uRLLC), et une capacité accrue pour connecter un nombre croissant d'objets pour l'internet des objets (mMTC).

2.5.4 TECHNOLOGIES EN COURS D'ETUDE DE 5G:

2.5.4.1 Bande millimétrique

La 5G utilise des fréquences qui peuvent être divisées en trois catégories principales [9]: les fréquences basses (<1 GHz), les fréquences moyennes (entre 1 et 6 GHz) et les fréquences les plus élevées (au-dessus de 20 GHz).

Les deux premières catégories de fréquences sont déjà utilisées par les générations précédentes de technologies sans fil (2G/3G/4G), ainsi que par le WiFi et d'autres technologies. Elles offrent un compromis entre débit et couverture, mais sont moins efficaces pour des débits très élevés. Ces fréquences sont appelées "millimétriques" en raison de leur courte longueur d'onde, de l'ordre du millimètre. Bien qu'elles permettent des débits élevés, elles sont sensibles aux perturbations et ont du mal à pénétrer à travers les bâtiments. Elles sont donc utilisées pour couvrir des zones de petite taille nécessitant des débits élevés ou avec une densité élevée d'utilisateurs, ce que l'on appelle des "small cells".

La 5G millimétrique, déployée sur des fréquences entre 24 et 30 GHz (26 GHz en France), offre des débits beaucoup plus élevés en raison de ses très hautes fréquences. Ces débits peuvent atteindre jusqu'à 10 Gbit/s, soit environ 500 fois plus rapide qu'une connexion ADSL.

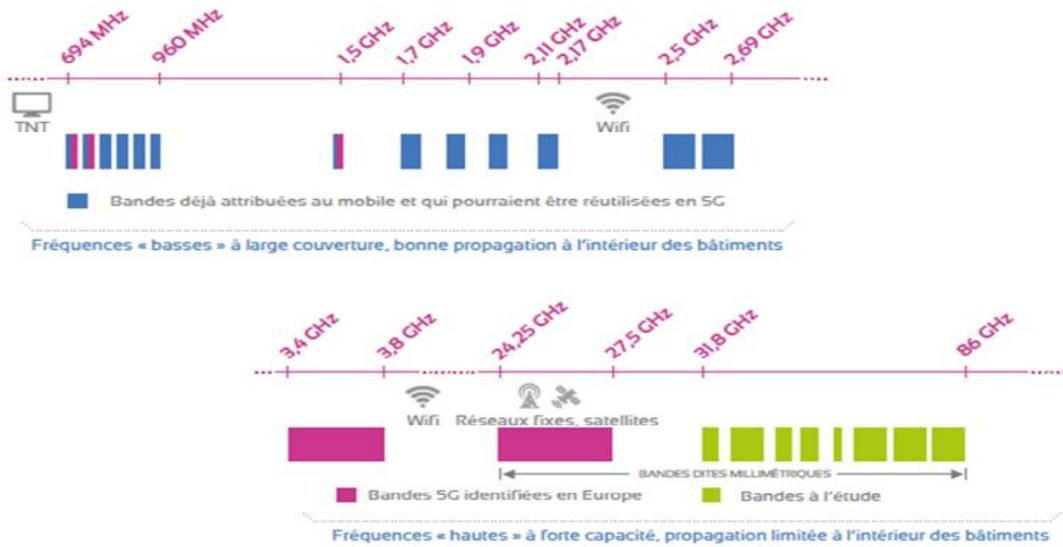


Figure 4 spectre des fréquences 5G [8]

2.5.4.2 MIMO

L'effet MIMO, ou Multiple Input Multiple Output, exploite la diversité spatiale du canal de transmission en utilisant plusieurs flux simultanés [8]. Les antennes massive MIMO permettent en outre de concentrer efficacement le rayonnement dans une direction spécifique. Dans la bande de fréquence 3 400 MHz - 3 800 MHz, les antennes 5G offrent un gain d'environ 24 dBi, soit environ cinq fois plus élevé que celui des antennes classiques 2G-3G-4G. Ce gain permet de concentrer le rayonnement dans un faisceau plus étroit, ce qui est connu sous le nom de beamforming. Les antennes peuvent gérer plusieurs faisceaux de manière indépendante et les diriger vers les utilisateurs. Deux techniques de beamforming sont utilisées : le GoB (« Grid of Beams »), où tous les faisceaux possibles sont prédéfinis dans un « codebook », et l'EBB (« eigen-value based beamforming »), où les faisceaux sont définis dynamiquement dans le temps.

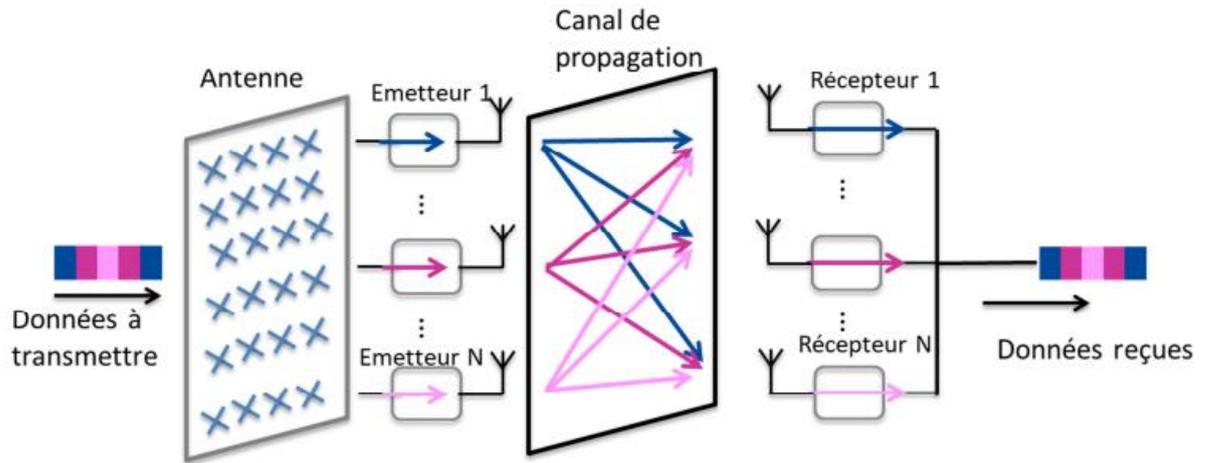


Figure 5 illustration de la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output) [8]

2.5.4.3 Multiplexage NOMA(Non Orthogonal Multiple Access)

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) [10] est une technique de transmission sans fil plus résiliente que l'OFDMA, et elle a été identifiée comme l'une des technologies clés potentielles pour les réseaux 5G par le groupe de promotion IMT-2020. Le principe fondamental de l'accès NOMA consiste à servir plusieurs utilisateurs en utilisant la même ressource, que ce soit en termes de temps, de fréquence, d'espace ou de code. Ces utilisateurs sont multiplexés soit dans le domaine de la puissance, soit dans celui du code. Pour séparer les utilisateurs à la réception, des algorithmes de détection multi-utilisateurs (MUD) sont employés, tels que l'annulation d'interférence successive (SIC).

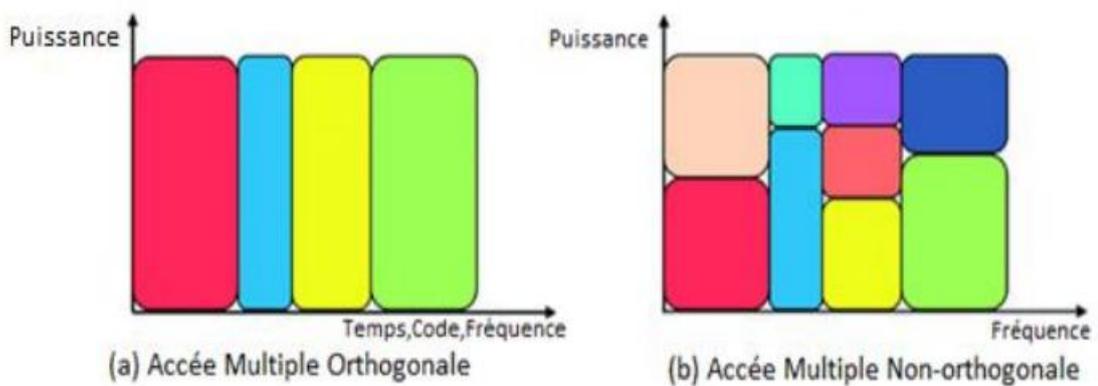


Figure 6 Différence entre l'accès OMA et l'accès NOMA [9]

➤ QAM256

La 4G, comme de nombreux systèmes de communication modernes, utilise la quadrature amplitude modulation (QAM) pour la transmission des données. En 4G, la modulation atteint généralement QAM64 [9], ce qui signifie que 6 bits d'information sont transmis simultanément. Cependant, la principale limitation sur l'ordre de la QAM dans les systèmes sans fil est le rapport signal-bruit, ce qui rend la transmission sensible aux perturbations lorsque beaucoup d'informations sont envoyées en même temps. Grâce à l'amélioration du bilan de liaison de la 5G, via des avancées en technologies antennaires ou de traitement du signal, la modulation pourra atteindre QAM256. Cela signifie que 8 bits d'information seront transmis à chaque instant, augmentant ainsi la capacité maximale de transmission de 33% dans des conditions idéales. Cette amélioration de la modulation sera également déployée sur les réseaux 4G évolués.

➤ Formes d'ondes IoT

Pour ce qui est des formes d'ondes IoT [11], de nouvelles études sont en cours pour le déploiement futur de l'IoT 5G dans les bandes mobiles. Bien que l'IoT de masse soit un objectif majeur de la 5G, aucun résultat concret n'a encore été publié. Des normes telles que EC-GSM, LTE-(e)MTC et NB-IoT, définies par le 3GPP, existent mais elles ne fournissent pas les niveaux de performance visés par les futurs réseaux 5G, notamment en termes d'autonomie, de couverture et de densité, car elles reposent sur les technologies 2G et 4G.

2.5.4.4 Full Duplex

Il existe deux modes de duplex fondamentaux dans les réseaux de communication sans fil : le TDD (duplexage par répartition dans le temps) et le FDD (duplexage par répartition de la fréquence) [10]. Actuellement, en raison d'une disponibilité limitée de séquences pilotes orthogonales, le mode TDD est largement privilégié dans la plupart des études portant sur le MIMO massif. Un système full-duplex, où les transmissions en direction montante (UL) et descendante (DL) se produisent simultanément, représente également une option prometteuse. Cependant, les recherches préliminaires sur les systèmes full-duplex se sont principalement concentrées sur des configurations avec un nombre restreint d'antennes, généralement trois. L'exploration de l'extension du concept de full-duplex aux systèmes MIMO massifs pourrait constituer un domaine d'intérêt pour les études futures.

Le principe du full duplex 5G est de permettre la transmission et la réception simultanées d'informations en utilisant les mêmes fréquences, au même endroit et au même moment. Cette capacité de duplex intégral en 5G présente plusieurs avantages, notamment en termes d'efficacité spectrale, de gestion des caractéristiques d'évanouissement, de filtrage, de développement de nouvelles solutions de relais et d'amélioration de la coordination pour réduire les interférences.

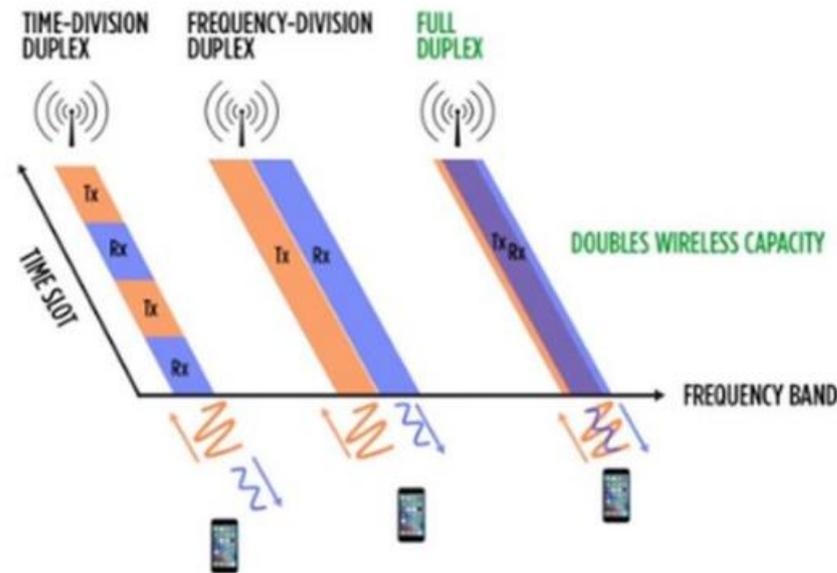


Figure 7 Illustration de full-duplex, comparé au FDD et TDD [9]

2.5.5 APPLICATIONS VISEES POUR LE RESEAU DE 5G

La 5G offre une large gamme de possibilités d'utilisation qui englobent les clients résidentiels, les entreprises, les communautés et les organismes gouvernementaux. En prenant en charge divers cas d'utilisation, la 5G ouvre de nouvelles opportunités de revenus pour les fournisseurs de services, au-delà des services traditionnels de téléphonie mobile. Par exemple, grâce à des cas d'utilisation comme le Private Wireless, les entreprises peuvent déployer leurs propres équipements mobiles sans fil basés sur la 5G, leur permettant ainsi de devenir elles-mêmes des fournisseurs de services [2].

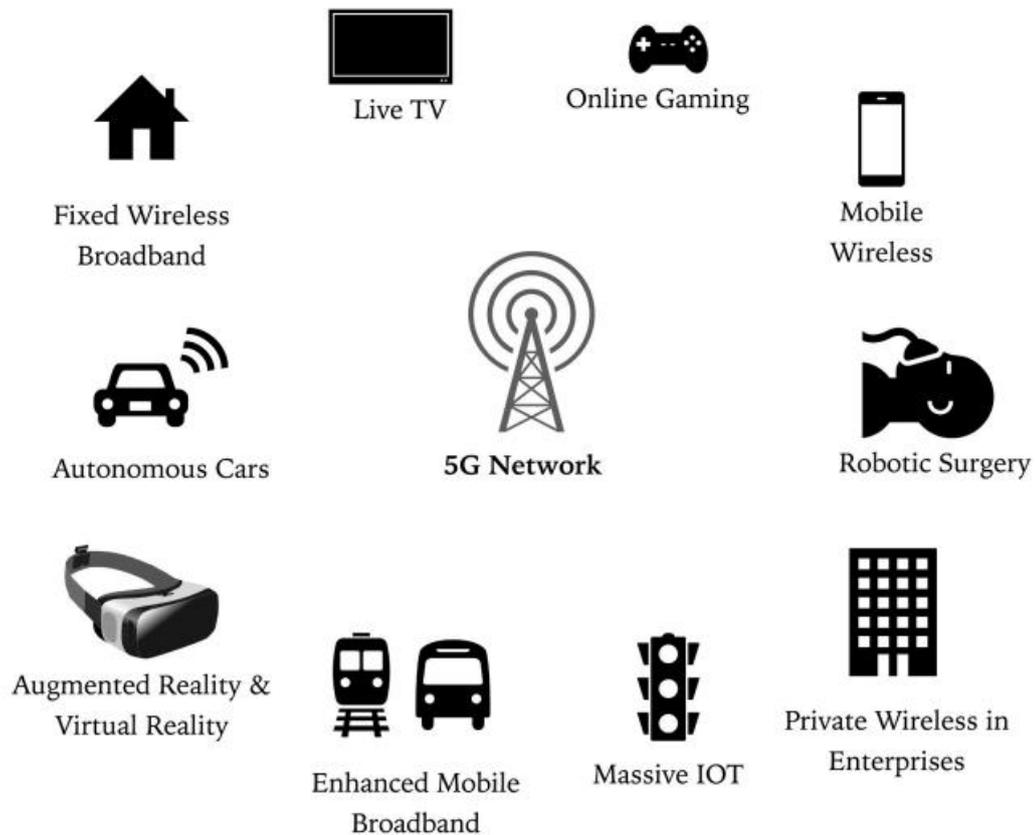


Figure 8 Application de la 5G [2]

2.5.6 COMPARAISON ENTRE 4G ET 5G

La technologie réseau 4G repose sur l'architecture Long Term Evolution (LTE), tandis que la technologie réseau 5G repose sur l'architecture 5G Next Generation Core (5G NG-Core) [2]. Il existe des distinctions notables entre ces deux technologies en termes de vitesse, de latence, de bande passante du spectre de fréquences, de cas d'utilisation pris en charge, de capacité de découpage réseau, d'architecture du réseau d'accès radio (RAN), ainsi que d'architecture du réseau central.

Le tableau 1.1 présente les différences entre les technologies 4G et 5G.

Criteria	4G	5G
Speed	300 - 400 Mbps (lab) 40 - 100 Mbps (real world)	1000 Mbps (lab) 300 - 400 Mbps (real world)
Latency	50 ms	1 - 2 ms
Frequency	2 - 8 GHz	Sub 6 GHz (5G macro optimized), 3-30 GHz (5G E small cells) 30-100 GHz (5G Ultra Dense)
Use Cases	Voice over LTE Mobile Broadband Online Video Online Gaming	Enhanced Mobile Broadband Augmented Reality / Virtual Reality Internet of Things (IOT) Holographic Calls Fixed Wireless Autonomous Cars Robotic Surgeries
Network Slicing	No	Yes
Cell Towers	Large Towers in concentrated communities	Small Cells installed in almost every street corner, in addition to mobile towers
Service Architecture	Connection Oriented	Service Oriented
Architecture	Long Term Evolution (LTE)	Next Generation Core (NG-Core) New Radio (NR)

Tableau 1 4G versus 5G [2]

3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue la technologie de communication mobile de 1ère, 2ème et 3ème génération et prédit les générations futures de 4ème et 5ème génération.

La 5G, avec ses caractéristiques avancées, est sur le point de révolutionner le paysage des réseaux sans fil. L'idée de super-noyau sera renforcée par la 5G, où tous les opérateurs seront interconnectés via un seul noyau et utiliseront une infrastructure commune, indépendamment de leurs technologies d'accès spécifiques. Le réseau 5G sera une fusion de différentes technologies améliorées pour répondre aux demandes d'un réseau plus efficace, offrant une capacité accrue et une meilleure qualité de service. Pour concevoir un tel réseau avec une qualité et une capacité optimale, l'utilisation intensive de petites cellules sera essentielle.

CHAPITRE 2 :
LES SYSTEMES MIMO
ET MASSIVE MIMO

1 Introduction

Avec l'avancement rapide des communications sans fil, la technologie spatiale a été largement étudiée au cours des dernières décennies. Les systèmes d'entrées multiples-sorties multiples (MIMO), comme technologie caractéristique du domaine spatial, ont un potentiel considérable pour offrir des débits d'information élevés et améliorer la fiabilité du système. Ainsi, ils ont été intégrés aux réseaux cellulaires de quatrième génération (4G). Cependant, pour répondre aux exigences élevées en termes d'efficacité spectrale, d'efficacité énergétique et de fiabilité des réseaux cellulaires de cinquième génération (5G), certaines avancées techniques sont nécessaires. C'est pourquoi la technologie massive MIMO a été proposée et est devenue une technique clé des réseaux cellulaires 5G, aux côtés d'autres techniques avancées telles que les réseaux denses et les communications à ondes millimétriques [12].

2 ANTENNE PATCH

2.1 Définition

Les antennes patch en microruban ont été introduites dans les années 1970 [13] et ont depuis gagné en popularité pour leurs performances remarquables dans diverses applications de communication. Leur adoption s'est étendue aux domaines commerciaux tels que les communications mobiles, les satellites, la télédétection et même les applications militaires, en raison de leurs avantages intrinsèques. Cependant, au cours de la dernière décennie, la recherche s'est concentrée sur l'amélioration de ces antennes, car elles présentent des limitations telles qu'une bande passante étroite, une efficacité réduite, un gain modéré et des ondes de surface [14]. Pour pallier ces défis, les chercheurs ont exploré de nouvelles approches telles que la conception de structures de sol défectueuses, qui ont émergé comme l'une des solutions les plus prometteuses.

2.2 Structure d'antenne patch

Typiquement, un patch rayonnant est fabriqué par photogravure sur la surface supérieure du matériau substrat. La longueur du patch est généralement choisie pour être environ la moitié de la longueur d'onde diélectrique, correspondant ainsi à la fréquence de résonance.

Bien qu'il existe différentes structures de patch telles que rectangulaires, carrées, triangulaires, dipôles, circulaires, en forme d'anneau et elliptiques pour les antennes microstrip,

les formes les plus couramment utilisées sont les rectangulaires, carrées, circulaires et dipôles en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication.

Ces formes offrent également d'excellentes propriétés de rayonnement, telles qu'un faible rayonnement croisé en polarisation.

Les structures de dipôle sont préférées pour les réseaux en raison de leurs bandes passantes plus larges et de leur faible empreinte spatiale. Les polarisations, qu'elles soient linéaires ou circulaires, peuvent être obtenues soit avec des éléments simples, soit avec des réseaux d'antennes microstrip.

Parmi toutes ces configurations, celle avec un patch rectangulaire est la plus répandue pour les antennes microstrip, en raison de sa facilité d'analyse à l'aide de modèles de ligne de transmission ou de cavité, fournissant ainsi des résultats précis, notamment pour les substrats minces [15].

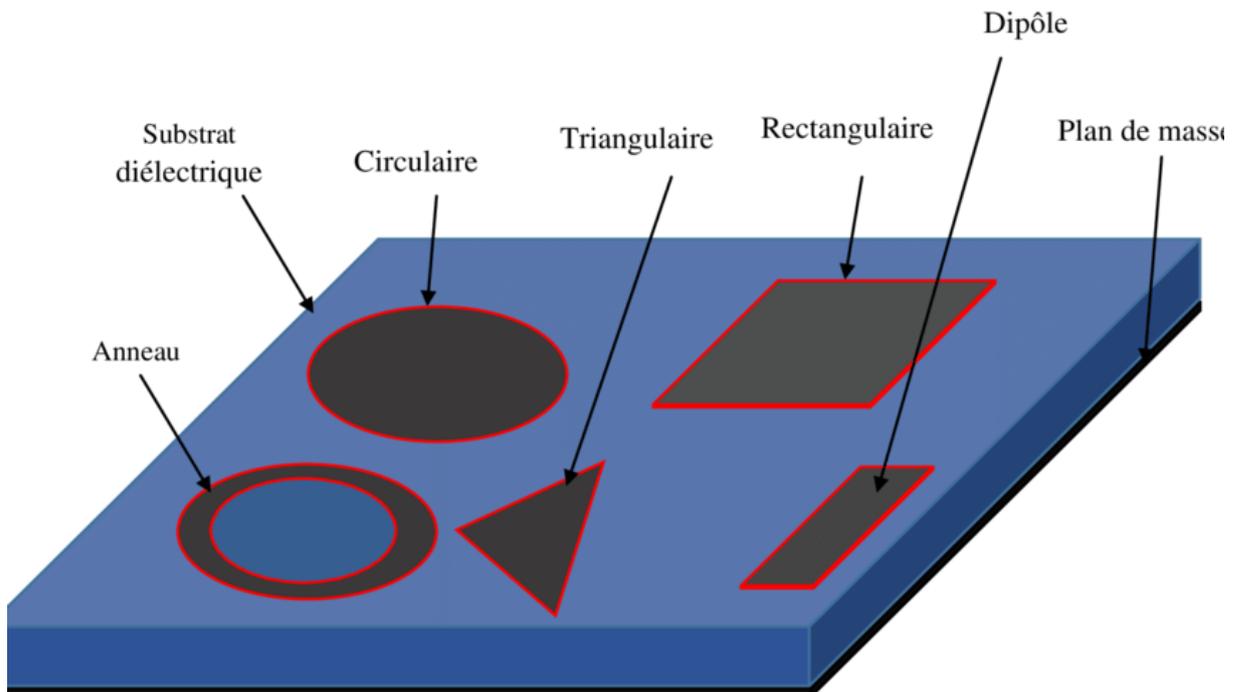


Figure 9 Différentes formes d'une antenne patch [16]

2.3 Technique d'alimentation d'antenne patch

Pour alimenter les antennes microstrip [16], une ligne d'alimentation est utilisée pour fournir soit l'excitation soit le rayonnement. Ces méthodes d'alimentation peuvent être classées en contact et non contact. Parmi celles-ci, les plus couramment utilisées incluent l'alimentation

coaxiale, l'alimentation microstrip, l'alimentation couplée par ouverture et l'alimentation couplée par proximité. Les méthodes d'alimentation par contact, comme la ligne microstrip et la sonde coaxiale, établissent un contact direct pour fournir l'énergie directement au patch via des éléments de connexion tels qu'une ligne microstrip. En revanche, les méthodes d'alimentation sans contact, telles que le couplage par ouverture et le couplage par proximité, transfèrent l'énergie au patch depuis la ligne microstrip en utilisant un couplage de champ électromagnétique.

Une brève comparaison a été effectuée dans le tableau .1. :

	Microstrip Line Feed	Coaxial fed	Aperture Coupled feed	Proximity coupled Feed
Spurious Feed Radiation	More	More	Less	Minimum
Reliability	Better	Poor due to soldering	Good	Good
Fabrication	Easy	Requires soldering and drilling	Requires Alignment	Requires Alignment
Impedance Matching	Easy	Easy	Easy	Easy
Bandwidth(with impedance matching)	2-5%	2-5%	2-5%	13%

Tableau 2 Comparison of feeding techniques. [17]

2.3.1 Alimentation de la sonde coaxiale

Dans cette méthode d'alimentation, le patch est relié au conducteur interne de la sonde coaxiale, tandis que le plan de masse est relié au conducteur externe de la sonde coaxiale.

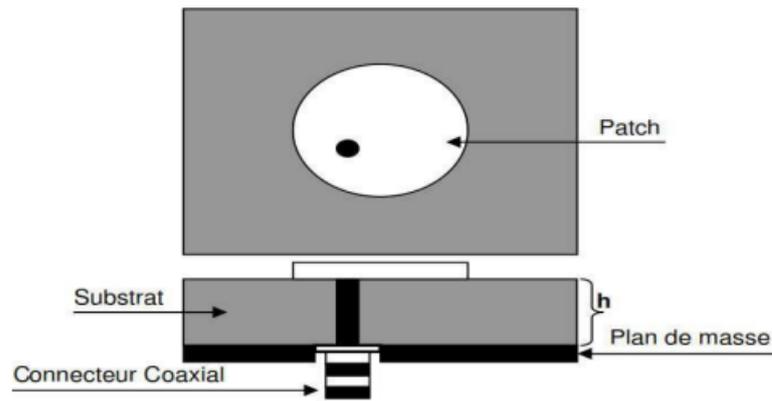


Figure 10 Alimentation par sonde coaxiale [13]

Avantages de l'alimentation par sonde coaxiale :

- Elle permet d'éliminer les rayonnements parasites.
- Sa fabrication est simple.
- L'adaptation peut être réalisée de manière aisée.

Inconvénients de l'alimentation par sonde coaxiale :

- Elle conduit à une bande passante étroite.
- La modélisation est complexe pour les substrats épais.
- Cette méthode présente des asymétries intrinsèques qui entraînent une polarisation croisée du rayonnement.

2.3.2 Alimentation par ligne micro ruban

Dans cette approche d'alimentation, le patch rayonnant est directement relié à une bande conductrice plus étroite, agissant comme une extension du patch.

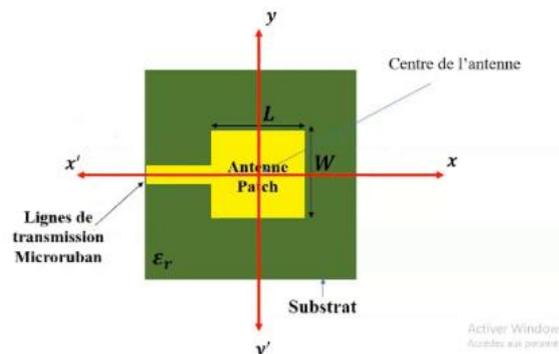


Figure 11 Antenne patch alimenté par une ligne micro-ruban [13]

Avantages de l'alimentation par ligne microstrip :

- Sa fabrication est simple et aisée.
- La modélisation est directe, et l'adaptation est réalisée en ajustant simplement la position d'encastrement.

Inconvénients de l'alimentation par ligne microstrip :

- L'augmentation de l'épaisseur du substrat entraîne une excitation accrue des ondes de surface et un rayonnement parasite, limitant ainsi la bande passante.
- La polarisation croisée peut survenir en raison du rayonnement.

2.3.3 Alimentation par couplage d'ouverture

Ce mode d'alimentation sans contact a été développé pour résoudre les problèmes associés aux méthodes d'alimentation par contact. Dans ce système, une séparation entre les deux substrats est assurée par un plan de masse. Une ligne d'alimentation microstrip est positionnée sur le côté inférieur du substrat inférieur pour permettre le couplage énergétique avec le patch en introduisant une ouverture de type fente dans la surface de masse. Habituellement, le substrat inférieur est composé d'un matériau mince à haute constante diélectrique, tandis que le substrat supérieur est constitué d'un matériau plus épais à faible constante diélectrique.

Un plan de masse est utilisé pour isoler les éléments rayonnants et d'alimentation et pour réduire les interférences dues au rayonnement parasite, ce qui améliore la polarisation et la formation du diagramme. Les dimensions de la ligne d'alimentation et de la fente sont soigneusement conçues pour faciliter l'adaptation et l'optimisation.

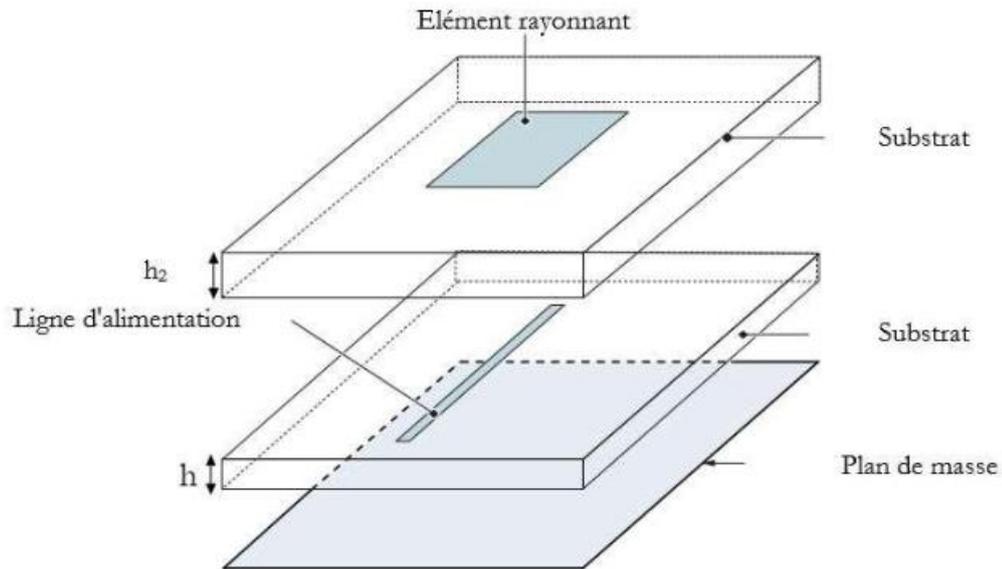


Figure 12 Alimentation par couplage d'ouverture [13]

Avantages de l'alimentation par couplage d'ouverture :

- L'optimisation de l'élément rayonnant et du mécanisme d'alimentation peut être réalisée de manière indépendante.
- La modélisation est simple et minimise le rayonnement parasite.
- Elle garantit une pureté de polarisation sans polarisation croisée.

Inconvénients de l'alimentation par couplage d'ouverture :

- Le processus de fabrication est plus complexe par rapport aux autres méthodes d'alimentation.
- La bande passante est limitée dans cette méthode.

2.3.4 Alimentation par couplage de proximité

Le couplage de proximité, également appelé couplage électromagnétique, est une méthode d'alimentation dans laquelle une ligne microstrip est positionnée entre les deux substrats diélectriques et l'élément patch. Cette ligne est gravée depuis la face supérieure du substrat supérieur. En ajustant simplement le rapport largeur/longueur du patch et la longueur du stub d'alimentation, il est possible d'atteindre une adaptation correcte.

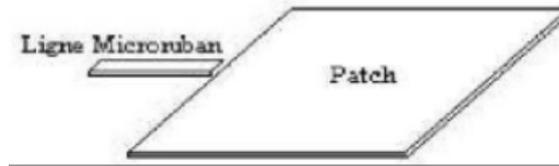


Figure 13 Alimentation par le couplage par proximité [13]

Avantages de l'alimentation par couplage de proximité :

- Cette méthode offre la plus grande bande passante parmi les quatre méthodes d'alimentation.
- La modélisation est simple et garantit un rayonnement sans parasites.

Inconvénients de l'alimentation par couplage de proximité :

- L'augmentation de l'épaisseur du substrat constitue un inconvénient.
- La fabrication est complexe.

2.4 Technique d'adaptation d'antenne patch

Les techniques d'adaptation des antennes patch sont utilisées pour optimiser les performances de l'antenne en garantissant une correspondance efficace entre l'impédance de l'antenne et celle du système d'alimentation ou du circuit électronique auquel elle est connectée. Voici quelques techniques couramment utilisées pour l'adaptation des antennes patch [18]:

Réseaux d'adaptation en ligne : Ces réseaux sont utilisés pour ajuster l'impédance de l'antenne à celle de la ligne d'alimentation. Ils peuvent être constitués de composants tels que des stubs, des transformateurs d'impédance ou des lignes de transmission en quart d'onde.

Transformateur d'impédance : Un transformateur d'impédance est utilisé pour transformer l'impédance de l'antenne à celle de la ligne d'alimentation. Il peut être réalisé sous différentes formes, telles que des lignes coaxiales, des stubs ou des circuits intégrés.

Réglage de la longueur du patch : En ajustant la longueur du patch, il est possible d'influencer l'impédance de l'antenne pour obtenir une meilleure correspondance avec la ligne d'alimentation.

Couplage électromagnétique : Cette technique implique le couplage de champs électromagnétiques entre l'antenne et la ligne d'alimentation pour ajuster l'impédance.

Utilisation de résonateurs : Les résonateurs peuvent être ajoutés à l'antenne pour ajuster sa réponse en fréquence et son impédance.

Optimisation de la géométrie du substrat : En modifiant les propriétés diélectriques du substrat ou sa géométrie, il est possible d'influencer l'impédance de l'antenne.

Techniques d'accord automatique : Des circuits électroniques peuvent être utilisés pour surveiller en temps réel les performances de l'antenne et ajuster automatiquement les paramètres d'adaptation en fonction des conditions environnementales ou des exigences du système.

Ces techniques peuvent être utilisées individuellement ou combinées pour obtenir une adaptation optimale de l'antenne patch à son environnement et aux exigences de performance spécifiques.

2.5 Avantage et inconvénients

Les antennes patch microstrip offrent divers avantages [16]:

- Leur profil bas, leur légèreté et leur configuration plane les rendent attrayantes.
- Elles peuvent être adaptées aux surfaces sur lesquelles elles sont installées.
- Leur fabrication est simple grâce à l'utilisation de la technologie des circuits imprimés, ce qui réduit les coûts.
- Leur robustesse mécanique leur permet d'être facilement montées sur des surfaces rigides.
- Elles peuvent être intégrées aux circuits micro-ondes.
- Elles permettent des opérations à plusieurs fréquences.

Les antennes patch microstrip sont aussi sujettes à certaines limitations :

- Leur bande passante est souvent limitée.
- Leur efficacité est moindre.
- Elles offrent un gain et une puissance réduits.
- Elles peuvent générer un rayonnement parasite lors de l'alimentation.
- L'excitation des ondes de surface peut dégrader les performances de l'antenne.

3 Antenne Ultra Large Bande

3.1 Definition

Les systèmes Ultra Large Bande (ULB) [19] se distinguent des autres systèmes de communication par leur utilisation d'impulsions RF très étroites pour transmettre des données entre l'émetteur et le récepteur.

Une antenne ULB est un dispositif d'émission dont les caractéristiques souhaitées demeurent constantes sur une large plage de fréquences.

Ces caractéristiques comprennent la largeur de bande d'impédance, le diagramme de rayonnement et la stabilité du centre de phase. Pour garantir un bon rendement, une telle antenne nécessite une transition d'adaptation efficace dans l'espace afin d'éviter toute réflexion d'énergie indésirable.

3.2 Pourquoi coupe-t-on le plan de masse dans une antenne ULB ?

Le plan de masse dans une antenne Ultra Large Bande (ULB) est parfois coupé pour plusieurs raisons techniques. Voici quelques explications [20]:

1. **Réduction des résonances parasites** : Le plan de masse peut induire des résonances parasites à certaines fréquences, perturbant ainsi les performances de l'antenne ULB. En coupant le plan de masse, on réduit la probabilité de ces résonances indésirables.
2. **Amélioration de la large bande** : En coupant le plan de masse, on permet à l'antenne ULB d'opérer sur une bande de fréquences plus large. Cela étend la gamme de fréquences sur laquelle l'antenne peut fonctionner efficacement.
3. **Réduction des pertes de propagation** : Le plan de masse peut causer des pertes de propagation à certaines fréquences en raison de phénomènes tels que l'absorption et la réflexion des ondes électromagnétiques. En coupant le plan de masse, on réduit ces pertes et on améliore l'efficacité de l'antenne ULB.
4. **Contrôle de la directivité et du diagramme de rayonnement** : En ajustant la forme et la taille du plan de masse, on peut contrôler la directivité et le diagramme de rayonnement de l'antenne ULB. Cela permet de diriger le faisceau dans une direction spécifique ou d'obtenir un motif de rayonnement souhaité.

En résumé, le fait de couper le plan de masse dans une antenne ULB permet d'améliorer ses performances en réduisant les résonances parasites, en élargissant la bande passante, en réduisant les pertes de propagation et en offrant un contrôle plus précis de la directivité et du diagramme de rayonnement.

3.3 Avantages de la technologie ULB

La technologie ULB (Ultra Large Band) offre plusieurs avantages significatifs dans divers domaines, notamment les communications sans fil, la détection radar, l'imagerie médicale et la géolocalisation. Voici quelques-uns de ces avantages [21]:

Large bande passante : La technologie ULB utilise des bandes de fréquences très larges, ce qui permet de transmettre ou de recevoir des signaux sur une gamme étendue de fréquences. Cela permet d'envoyer ou de récupérer des données à des débits très élevés, ce qui est particulièrement utile pour les applications nécessitant un transfert rapide de données.

Résolution temporelle élevée : Grâce à sa large bande passante, la technologie ULB offre une résolution temporelle élevée, ce qui permet de détecter et de distinguer des événements très rapprochés dans le temps. Cela peut être bénéfique dans les applications radar pour la détection d'objets en mouvement rapide ou dans les systèmes de communication pour minimiser les interférences entre les transmissions.

Capacité de pénétration dans les obstacles : Les signaux ULB ont une meilleure capacité de pénétration à travers les obstacles tels que les murs, les bâtiments ou le feuillage, comparativement aux signaux à bande étroite. Cela les rend utiles dans les applications de communication en intérieur, de localisation dans des environnements urbains denses, ou encore dans la détection à travers des matériaux non métalliques.

Faible probabilité d'interception et de détection : La large bande passante des signaux ULB peut rendre leur interception et leur détection plus difficiles pour les dispositifs non autorisés ou les systèmes de brouillage, car ils nécessiteraient une bande passante très large pour les capturer efficacement.

Polyvalence et flexibilité : La technologie ULB peut être utilisée dans une variété d'applications, allant des communications sans fil à haut débit à la détection radar, en passant par l'imagerie médicale et la géolocalisation. Sa polyvalence et sa flexibilité en font une solution attrayante pour de nombreuses industries et domaines d'application.

En résumé, la technologie ULB offre une large bande passante, une résolution temporelle élevée, une meilleure capacité de pénétration dans les obstacles, une faible probabilité d'interception et de détection, ainsi qu'une polyvalence et une flexibilité dans une variété d'applications, ce qui en fait une technologie prometteuse pour l'avenir des communications sans fil et de nombreux autres domaines.

4 MIMO traditionnel

La technologie MIMO a suscité un grand intérêt dans le domaine des communications sans fil en raison de ses capacités à accroître considérablement les débits de données et les distances de transmission, sans nécessiter de bande passante ou de puissance de transmission supplémentaires. Dès 1993 et 1994, une approche MIMO a été proposée, avec un brevet correspondant délivré, visant à améliorer les débits de liaison en utilisant plusieurs antennes d'émission colocalisées sur un même émetteur. Par la suite, le premier prototype de multiplexage spatial en laboratoire a été développé pour montrer que la technologie MIMO était réalisable en pratique. Aujourd'hui, le MIMO est reconnu comme l'une des technologies clés des systèmes de communication sans fil de quatrième et cinquième génération (4G/5G). Lorsqu'un nœud B évolué (eNB) équipé de plusieurs antennes communique avec plusieurs équipements utilisateur (UE) en utilisant les mêmes ressources temps-fréquence, cela constitue du MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO). Le MU-MIMO est capable d'améliorer soit le débit effectif, soit la fiabilité, en tirant parti des gains de multiplexage ou de diversité [12].

4.1 Principe du MIMO

Le principe du MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) repose sur l'utilisation simultanée de multiples antennes à la fois pour la transmission et la réception de signaux radio sur un même canal. Il exploite trois types de diversités [22]:

- **Diversité d'espace** : En utilisant plusieurs antennes à la fois, le MIMO peut exploiter les différentes trajectoires de propagation des ondes radio dans l'espace pour améliorer la qualité du signal et réduire les effets de l'affaiblissement du signal.
- **Diversité fréquentielle** : Le MIMO peut être utilisé avec différentes fréquences de porteuse pour transmettre les données, ce qui permet d'exploiter la diversité de propagation à différentes fréquences et d'améliorer la robustesse du système face aux effets de la sélectivité en fréquence du canal.

- **Diversité temporelle** : En utilisant des techniques telles que le codage spatial et la transmission à plusieurs instants dans le temps, le MIMO peut exploiter la diversité temporelle pour améliorer la fiabilité de la communication en surmontant les effets des fluctuations du canal dans le temps.

En combinant ces différentes formes de diversité, le MIMO permet d'améliorer significativement la capacité, la fiabilité et la qualité des communications sans fil.

4.2 Architectures des systèmes MIMO

Il y a quatre configurations fondamentales d'antennes, à savoir... [23]

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

4.2.1 MIMO – SISO

Dans le contexte du MIMO, la liaison radio la plus basique est appelée SISO (Single Input Single Output) [22], ce qui signifie qu'il n'y a qu'une seule antenne à l'émission et une seule antenne à la réception. Cette configuration représente un canal radio standard où aucune diversité n'est exploitée et aucun traitement supplémentaire n'est requis.

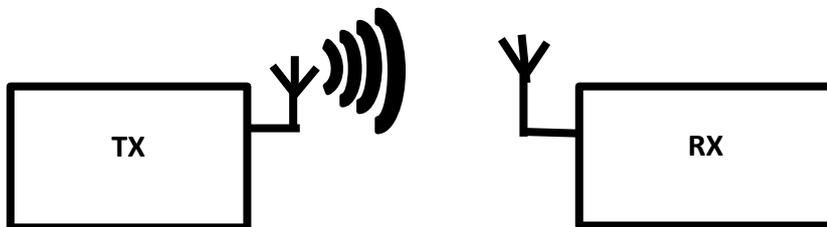


Figure 14 SISO-Single Input Single Output

L'avantage d'un système SISO est sa simplicité. Le système SISO ne nécessite aucun traitement en ce qui concerne les différentes formes de diversité qui peuvent être utilisées. Cependant, les performances du canal SISO sont limitées, car les interférences et

l'évanouissement ont un impact plus important sur le système qu'un système MIMO utilisant une certaine forme de diversité. Le débit dépend de la largeur de bande du canal et du rapport signal/bruit.

4.2.2 MIMO – SIMO

La variante SIMO (Single Input Multiple Output) du MIMO se produit lorsque l'émetteur est équipé d'une seule antenne tandis que le récepteur en possède plusieurs. Cette configuration, connue sous le nom de diversité de réception, est souvent utilisée pour permettre à un récepteur de système de gérer les signaux provenant de plusieurs sources indépendantes et de contrer les effets de l'évanouissement. Elle est fréquemment employée depuis de nombreuses années par les stations de réception d'ondes courtes pour atténuer les effets de l'évanouissement ionosphérique et des interférences.

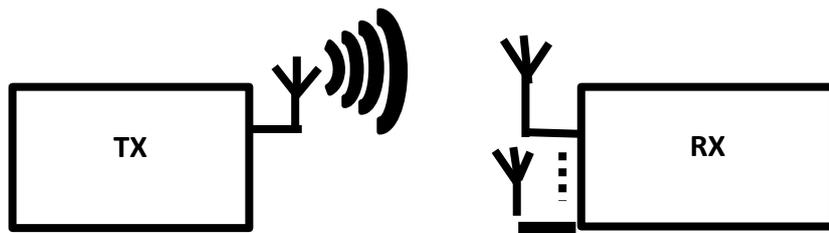


Figure 15 SIMO-Single Input Multiple Output

SIMO présente l'avantage d'être relativement simple à mettre en place, bien qu'il nécessite un certain traitement au niveau du récepteur, ce qui peut constituer un inconvénient. Bien que son utilisation puisse être adéquate dans de nombreuses applications, notamment dans des environnements fixes, elle peut poser des défis dans des appareils mobiles tels que les téléphones portables en raison des contraintes liées à la taille, au coût et à la consommation d'énergie de la batterie.

Diversité commutée SIMO : le système sélectionne l'antenne qui reçoit le signal le plus puissant et commute vers cette antenne.

La combinaison à rapport maximal SIMO : cette forme de SIMO combine les signaux reçus par deux antennes en les additionnant, ce qui permet aux signaux provenant de chacune des antennes de contribuer au signal global.

4.2.3 MIMO – MISO

La configuration MISO (Multiple Input Single Output) est souvent qualifiée de diversité d'émission. Dans ce scénario, les mêmes données sont envoyées simultanément par les deux antennes de l'émetteur de manière redondante. Cela permet au récepteur de recevoir le signal optimal, qu'il peut ensuite exploiter pour extraire les données nécessaires.

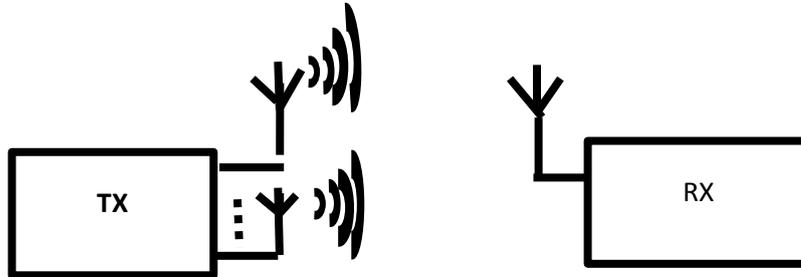


Figure 16 MISO-Multiple Input Single Output

L'avantage de l'utilisation de MISO est que les antennes multiples et le codage/traitement de la redondance sont déplacés du récepteur vers l'émetteur. Dans des cas tels que les UE de téléphones cellulaires, cela peut constituer un avantage significatif en termes d'espace pour les antennes et de réduction du niveau de traitement requis dans le récepteur pour le codage de redondance. Cela a un impact positif sur la taille, le coût et la durée de vie de la batterie, car le niveau de traitement inférieur nécessite une consommation moindre de la batterie.

4.2.4 MIMO

Le MIMO est une technologie d'antenne radio qui exploite plusieurs antennes à la fois au niveau de l'émetteur et du récepteur. Son objectif est de créer une diversité de chemins de signaux afin de transporter les données. Cette diversité est obtenue en choisissant des chemins distincts pour chaque antenne, ce qui permet l'utilisation simultanée de multiples trajets de signaux.

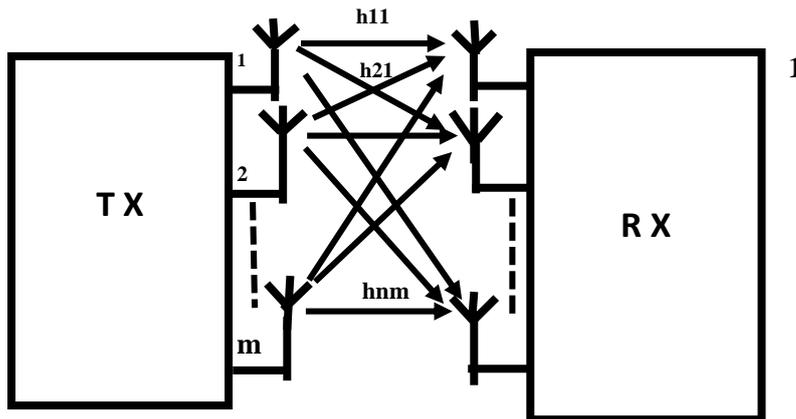


Figure 17 MIMO-Multiple Input Multiple Output

L'une des idées fondamentales des systèmes sans fil MIMO est le traitement des signaux spatio-temporels, qui intègre la dimension temporelle avec la dimension spatiale, résultant de l'utilisation d'antennes multiples réparties dans l'espace. Ces antennes multiples sont situées à des emplacements différents, ce qui permet aux systèmes MIMO d'exploiter une diversité de chemins de signaux. Ce concept peut être considéré comme une évolution des antennes intelligentes, qui sont utilisées depuis longtemps pour améliorer les systèmes sans fil. Plutôt que de simplement introduire des interférences, les multiples chemins de propagation sont désormais exploités de manière efficace grâce à la technologie MIMO. Ils peuvent renforcer la fiabilité de la liaison radio en améliorant le rapport signal/bruit et en augmentant la capacité de transmission de données.

Les deux principaux formats de MIMO sont présentés ci-dessous [22]:

- **La diversité spatiale :** La diversité spatiale, dans ce contexte spécifique, se réfère généralement à la diversité d'émission et de réception. Ces deux approches visent à améliorer le rapport signal/bruit et à accroître la fiabilité du système face aux divers phénomènes d'affaiblissement du signal.
- **Le multiplexage spatial :** une variante du MIMO, est déployé pour accroître la capacité de transmission de données en exploitant les divers chemins disponibles pour transporter du trafic additionnel. En d'autres termes, il vise à augmenter le débit de données en utilisant efficacement les différents trajets de transmission.

4.3 Avantage de la technologie MIMO

La technologie MIMO, basée sur l'utilisation de multiples antennes pour émettre et/ou recevoir des signaux, vise à exploiter la diversité spatiale afin d'améliorer la qualité de service [24], le débit et la portée des communications. Cette technologie est largement déployée dans les réseaux sans fil à haut débit tels que les WLAN (IEEE 802.11a, g, n), surtout dans des environnements où la propagation multi-trajet est fréquente en raison de nombreux obstacles. Contrairement aux méthodes précédentes qui se contentaient de sélectionner une antenne de réception en fonction du rapport signal/bruit, le MIMO envoie des signaux différents sur différentes antennes d'émission. Par exemple, dans un système MIMO composé de deux antennes d'émission et de réception, les signaux émis (E_1 et E_2) sont captés par les antennes de réception (R_1 et R_2) et multipliés par des coefficients de canal (H_{ij}).

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Pour reconstituer les trames originales, il faut résoudre le système d'équations résultant. La technologie MIMO utilise une modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) où le signal est réparti sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonales. Cette propriété permet de déterminer la fonction de transfert du canal et d'augmenter le débit de transmission. Le MIMO est devenu une norme dans la téléphonie mobile avec l'avènement des réseaux 4G.

4.4 Capacité de canal d'un système MIMO

La capacité de canal d'un système MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) représente la quantité maximale d'informations qu'il peut transmettre de manière fiable par canal de communication et par seconde [25], généralement exprimée en bits par seconde (bps). Elle dépend de plusieurs facteurs, notamment:

-Le nombre d'antennes d'émission (N_t) et de réception (N_r): Plus il y a d'antennes, plus la capacité de canal peut être élevée.

-Le rapport signal sur bruit (SNR): Plus le SNR est élevé, plus la capacité de canal peut être élevée.

-Les propriétés du canal de propagation: Le canal de propagation peut être modélisé par une matrice de canal qui décrit comment le signal se propage entre les antennes d'émission et de réception. La capacité de canal dépend de la singularité de cette matrice.

Formule de la capacité de canal MIMO:

La capacité de canal d'un système MIMO peut être approximée par la formule suivante :

$$C = \log_2(\det(\mathbf{I} + \mathbf{H} * \mathbf{H}^H * \text{SNR})) \quad (\text{II.2})$$

où:

C est la capacité de canal en bps/Hz

det est la fonction déterminant

I est la matrice identité de dimension $N_t \times N_t$

H est la matrice de canal de dimension $N_r \times N_t$

SNR est le rapport signal sur bruit en dB

4.5 Choix de l'antenne MIMO

Les antennes traditionnellement utilisées dans les réseaux 2G, 3G et 4G sont constituées d'empilements verticaux de dipôles élémentaires. La taille de chaque étage est déterminée par la longueur des dipôles élémentaires, qui représente environ la moitié de la longueur d'onde. Par exemple, à une fréquence de 900 MHz (avec une longueur d'onde d'environ 33 cm), la taille d'un étage est d'environ 15 cm. En empilant généralement une petite dizaine d'étages, ces antennes offrent un rayonnement couvrant une zone d'ouverture horizontale d'environ 65° et une ouverture verticale d'environ 10° . Le gain de ce type d'antenne, c'est-à-dire sa capacité de focalisation, est généralement d'environ 17 dBi [26].

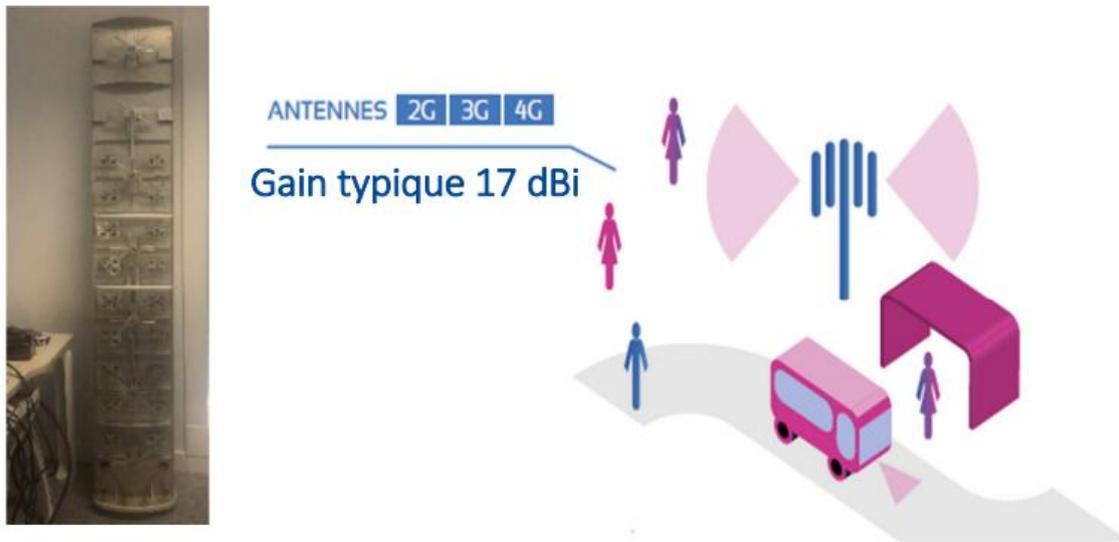


Figure 18 vue d'une antenne 2G – 3G ouverte et principe de rayonnement [26]

5 LE SYSTEME MASSIVE MIMO

MIMO est l'abréviation de Multiple-input multiple-output (entrées multiples, sorties multiples). Bien qu'elle fasse appel à de multiples technologies, la technologie MIMO se résume essentiellement à ce principe : un réseau sans fil qui permet la transmission et la réception de plusieurs signaux de données simultanément sur le même canal radio.

Les réseaux MIMO standard utilisent généralement deux ou quatre antennes. Le MIMO massif, quant à lui, est un système MIMO doté d'un nombre particulièrement élevé d'antennes., c'est un système de la technologie 5G de ≥ 100 radiateurs pour desservir un très grand nombre de terminaux et est une technologie à large bande. La recherche sur la MIMO massive se poursuit afin de fournir un débit de données de 10 Gbps pour les générations supérieures de systèmes de communication sans fil jusqu'en 2020.

Les avantages de la MIMO massive peuvent être accrus en la combinant avec la formation de faisceaux, c'est-à-dire la transmission à rapport maximal, la combinaison à rapport maximal et les techniques de forçage zéro. La MIMO massive a été intégrée aux technologies sans fil LTE et IEEE 802.11.

L'estimation du canal est effectuée dans le MIMO massif avec des séquences pilotes orthogonales. Par conséquent, des stratégies spéciales d'attribution de pilotes doivent être adoptées pour résoudre le problème de la contamination des pilotes due aux cellules du même

canal. Une telle approche permet d'obtenir une capacité de canal très élevée. Le MIMO massif est conçu uniquement pour le TDD.

Les avantages de la MIMO massive peuvent également être pris en compte dans les activités intérieures et extérieures. La MIMO massive offre une couverture garantie et gère intelligemment la mobilité des utilisateurs dans les environnements extérieurs. En revanche, il n'est pas nécessaire d'installer des stations de base à l'intérieur des bâtiments ou des locaux pour les activités intérieures. Certaines entreprises comme Ericsson, Huawei et ZTE ont testé la technologie MIMO massive en utilisant 64 à 128 antennes. L'AIR 6468 d'Ericsson, que l'entreprise présente comme "la première radio 5G NR au monde", utilise 64 antennes d'émission et 64 antennes de réception [27].

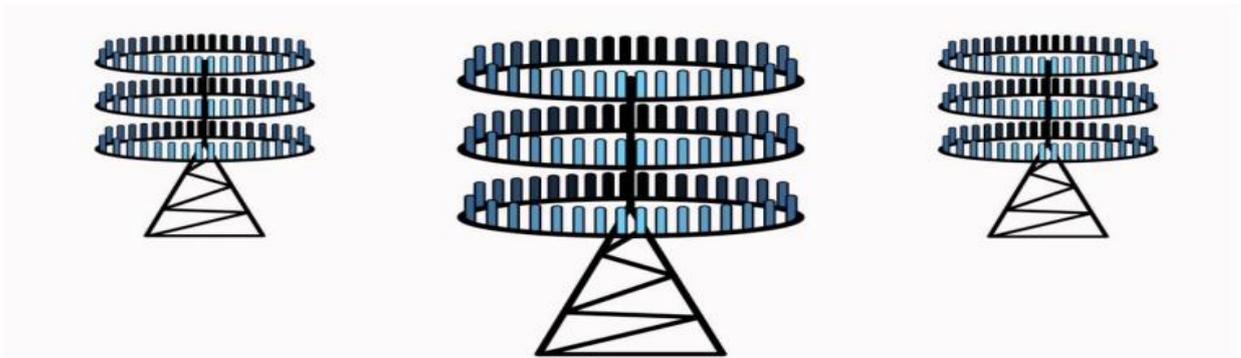


Figure 19 Une illustration de MIMO massive [27]

Massive MIMO propose deux innovations majeures :

- Beamforming
- MU-MIMO

5.1 Beamforming

Le beamforming est un système de gestion du trafic pour les stations de base cellulaires [28], qui sélectionne la voie de transmission la plus efficace pour chaque utilisateur afin de réduire les interférences avec les utilisateurs voisins. Dans les stations de base équipées de MIMO massif, des algorithmes de traitement du signal déterminent le meilleur chemin de transmission vers chaque utilisateur, en envoyant des paquets de données dans différentes directions pour contourner les obstacles tels que les bâtiments. En simplifiant, le MIMO massif

peut être comparé à une structure en 3D qui améliore les capacités de couverture à la fois horizontalement et verticalement.

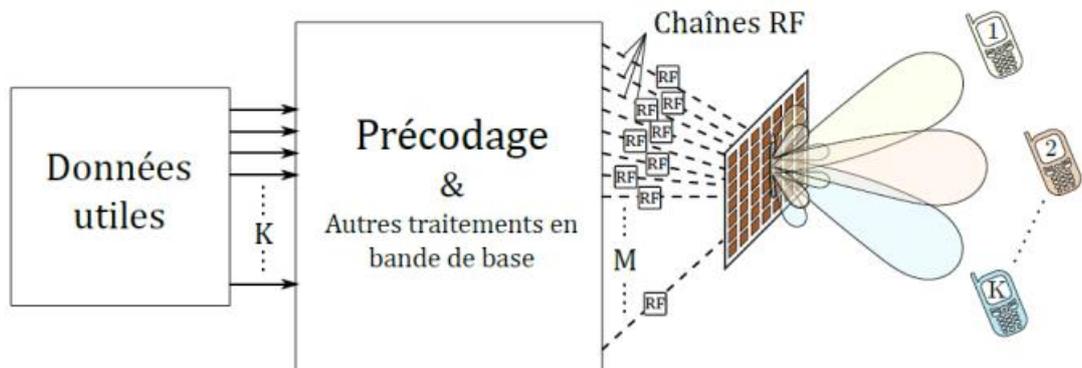


Figure 20 Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs [29]

Le beamforming en 5G se divise en deux techniques : le GoB (« Grid of Beams »), où tous les faisceaux possibles sont pré-définis dans un codebook, et l'EBB (« eigen-value based beamforming »), où les faisceaux sont dynamiquement définis dans le temps.

Grâce au beamforming, le traitement du signal par les antennes 5G est différent, car il permet de concentrer les ondes émises par une antenne vers un smartphone spécifique, plutôt que de diffuser le signal dans toutes les directions. Les antennes 5G, appelées antennes macro, sont conçues pour être directionnelles, agissant comme des phares qui dirigent le signal dans une direction précise. Cela représente une amélioration par rapport aux antennes 4G, qui diffusent le signal dans toutes les directions. De plus, les antennes 5G sont capables de maintenir cette fonctionnalité même lorsque les utilisateurs sont en mouvement [30].

5.2 MU-MIMO (Multi-Utilisateur MIMO)

Dans les systèmes MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) [31], une station de base (BS) avec M antennes d'émission est utilisée pour servir simultanément K utilisateurs à l'aide de la technique SDMA (Spatial Division Multiple Access), où chaque utilisateur peut avoir plusieurs antennes de réception (N au total, avec $K \leq N$). Ce système permet d'utiliser un équipement coûteux uniquement du côté de la station de base, tandis que les terminaux des utilisateurs peuvent être des appareils relativement bon marché à une seule (ou quelques) antennes.

De plus, en évitant la multiplexation temporelle ou fréquentielle, le système présente une latence réduite, une couche MAC simplifiée et une plus grande robustesse contre le brouillage

intentionnel. Les systèmes MU-MIMO sont censés atteindre une capacité similaire aux systèmes SU-MIMO (Single-User MIMO) $M \times N$, avec une performance généralement moins sensible à l'environnement de propagation en raison de la diversité multi-utilisateurs.

Deux approches principales sont envisagées pour les systèmes MU-MIMO, à savoir le traitement linéaire et la prédiction de capacité directe (DPC). Les techniques de traitement linéaire consistent à atténuer l'interférence multi-utilisateurs en inversant le canal.

Cependant, ces techniques ne conduisent pas toujours à une croissance linéaire de la capacité avec $\min(M, N)$, en raison de la matrice de canal mal conditionnée après inversion. Une autre solution est la technique DPC, qui est une méthode non linéaire basée sur le concept d'écriture sur papier sale. Cette technique permet de caractériser la capacité totale du système MU-MIMO et indique que la croissance linéaire de la capacité est réalisable. Cependant, les approches MU-MIMO classiques sont limitées à une dizaine d'antennes d'émission et d'utilisateurs en raison de la complexité élevée de la décomposition ou du codage du canal, ainsi que des contraintes de coordination centrale strictes.

5.3 Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif

5.3.1 Nombre d'antenne

MIMO traditionnel : Dans les systèmes MIMO traditionnels, le nombre d'antennes est limité et typiquement de l'ordre de quelques antennes pour chaque station de base et chaque terminal utilisateur. Par exemple, dans un système 4G LTE, les stations de base peuvent avoir entre 2 et 8 antennes, tandis que les terminaux utilisateur (tels que les smartphones) peuvent en avoir 1 à 4 [32] [33].

MIMO massif : En revanche, le MIMO massif exploite un grand nombre d'antennes à la fois du côté de la station de base et du côté des terminaux utilisateur. Le nombre d'antennes peut être de l'ordre de centaines voire de milliers. Cela permet d'augmenter considérablement la capacité du système, d'améliorer la couverture et de réduire l'interférence [32] [33].

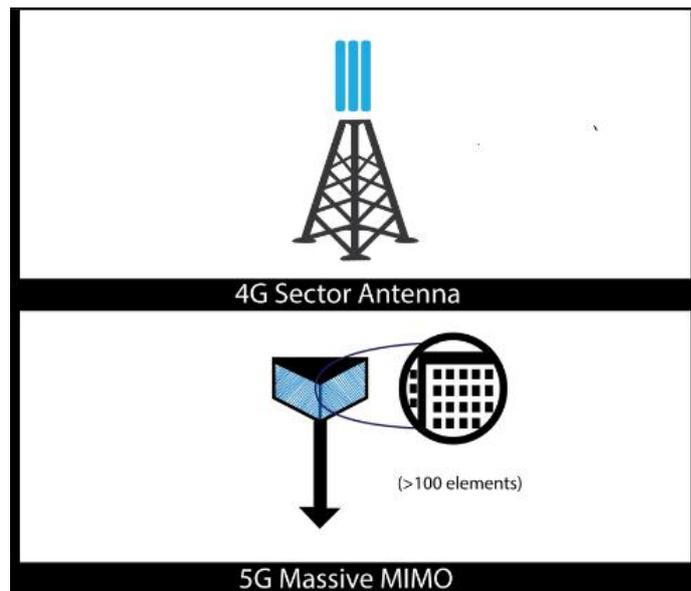


Figure 21 Antenne MIMO (4G) et Massive MIMO (5G) [34]

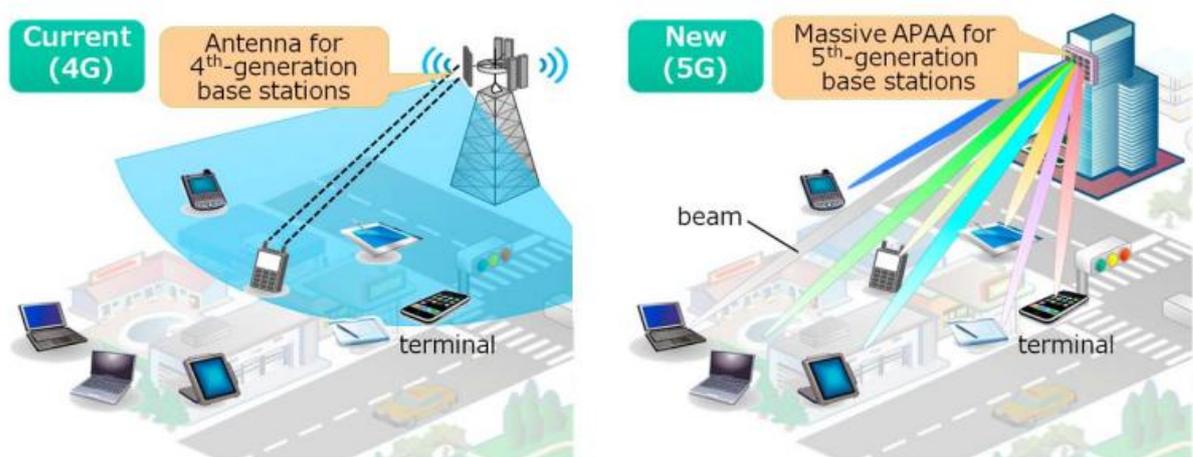


Figure 22 Antenne 4G et Antenne 5G [35]

5.3.2 Le Full Duplex

MIMO traditionnel : Dans les systèmes MIMO traditionnels, le fonctionnement en duplex intégral (full duplex) est généralement difficile à mettre en œuvre en raison de l'interférence entre les signaux de transmission et de réception. Par conséquent, la plupart des systèmes utilisent le duplexage en mode division du temps (TDD) ou en mode division de fréquence (FDD), où la transmission et la réception se font sur des plages de temps ou de fréquences différentes [17].

MIMO massif : Le MIMO massif peut bénéficier du full duplex en raison de son architecture à grande échelle, qui permet une séparation physique suffisante entre les antennes de

transmission et de réception. Cela rend le full duplex plus réalisable dans les systèmes Massive MIMO. Cependant, sa mise en œuvre reste complexe en raison des défis liés à la gestion de l'interférence et à la conception de circuits RF (radiofréquence) hautement isolés [36].

5.3.3 Antennes actives et passives

Dans la comparaison entre le MIMO traditionnel et le MIMO massif, la distinction entre antennes actives et passives est pertinente en ce qui concerne la complexité et les performances du système. Voici une comparaison basée sur cet aspect :

MIMO traditionnel [37]:

Antennes actives : Dans les systèmes MIMO traditionnels, les antennes actives sont souvent utilisées pour une meilleure performance en termes de gain, de directivité et de sensibilité. Ces antennes peuvent intégrer des amplificateurs de faible bruit (LNA) pour améliorer la sensibilité du récepteur et des amplificateurs de puissance pour renforcer le signal émis.

Avantages : Les antennes actives dans le MIMO traditionnel peuvent offrir une meilleure performance globale en raison de leur capacité à amplifier le signal, ce qui peut améliorer la portée et la qualité de la communication.

Inconvénients : Cependant, l'utilisation d'antennes actives peut augmenter la complexité du système et sa consommation d'énergie, ce qui peut poser des défis en termes de coût et de durée de vie de la batterie dans les appareils mobiles.

MIMO massif [38]:

Antennes passives : Le MIMO massif exploite souvent des antennes passives en raison de leur simplicité et de leur faible coût. Ces antennes peuvent être des éléments rayonnants simples, tels que des dipôles ou des antennes patch, qui n'intègrent pas d'amplificateurs actifs.

Avantages : Les antennes passives sont moins coûteuses à produire et à intégrer dans des matrices massives, ce qui les rend plus attractives pour les déploiements à grande échelle. De plus, leur simplicité peut contribuer à réduire la complexité du système et à améliorer l'efficacité énergétique.

Inconvénients : Cependant, les antennes passives peuvent avoir une sensibilité et un gain intrinsèquement plus faibles par rapport aux antennes actives, ce qui peut limiter la portée et la performance globale du système dans certaines situations.

En résumé, la différence entre l'utilisation d'antennes actives et passives dans le MIMO traditionnel et le MIMO massif reflète souvent un compromis entre la performance, la complexité et le coût du système. Alors que le MIMO traditionnel tend à privilégier les antennes actives pour une performance optimale, le MIMO massif se tourne souvent vers des antennes passives pour leur simplicité et leur économie.

5.3.4 Antennes adaptatives massive MIMO

Dans les systèmes de communication Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output), les antennes adaptatives jouent un rôle essentiel pour optimiser la qualité du signal et les performances du réseau [39]. Ces antennes permettent la formation de faisceau adaptative, dirigeant l'énergie du signal vers des directions spécifiques pour améliorer la communication et réduire les interférences. Elles suivent également dynamiquement les variations du canal de propagation, ajustant les paramètres pour maintenir une connexion optimale malgré les changements environnementaux. De plus, les antennes adaptatives contribuent à réduire l'interférence externe, augmentant ainsi l'efficacité spectrale et la capacité du système.

Enfin, en offrant une adaptation aux conditions du canal en temps réel, elles renforcent la fiabilité et la robustesse des communications, garantissant une expérience utilisateur plus cohérente et de meilleure qualité.

En résumé, les antennes adaptatives dans les systèmes Massive MIMO améliorent significativement les performances et la fiabilité des communications sans fil dans des environnements variés et dynamiques.

5.3.5 Le gain

Les antennes Massive MIMO offrent une capacité de focalisation nettement améliorée du rayonnement vers une direction précise. Pour la plage de fréquences située entre 3 400 MHz et 3 800 MHz, le gain des antennes 5G peut s'élever à environ 24 dBi [26], ce qui représente approximativement cinq fois le gain des antennes conventionnelles utilisées pour les réseaux 2G-3G-4G. Cela signifie que le rayonnement est concentré dans un faisceau beaucoup plus étroit qu'auparavant. De plus, ces antennes sont capables de gérer plusieurs faisceaux de manière

indépendante et de les orienter vers les utilisateurs, ce qui les rend qualifiables de "antennes intelligentes".

En résumé, le gain d'une antenne dans un système Massive MIMO est influencé par sa capacité à former des faisceaux directionnels, à exploiter la diversité spatiale et à minimiser les effets de corrélation et d'interférence entre les antennes. En utilisant efficacement ces techniques, les systèmes Massive MIMO peuvent obtenir un gain significatif en performances par rapport aux systèmes MIMO traditionnels.

5.3.6 La taille

Les antennes Massive MIMO dans les réseaux 5G présentent des caractéristiques de taille spécifiques qui leur permettent de fournir des performances optimales. Dans la bande de fréquences 3 400 MHz - 3 800 MHz, typique de la 5G, ces antennes peuvent offrir un gain d'environ 24 dBi, soit cinq fois plus que les antennes classiques 2G-3G-4G. Malgré ce gain élevé, ces antennes restent relativement petites en raison de la fréquence de fonctionnement plus élevée et de l'utilisation de technologies de miniaturisation. De plus, elles sont capables de focaliser le rayonnement dans des faisceaux plus étroits, ce qui améliore la précision du ciblage des utilisateurs. En outre, ces antennes peuvent gérer plusieurs faisceaux indépendamment, ce qui les rend qualifiables de "antennes intelligentes".

En résumé, les antennes Massive MIMO 5G combinent des performances élevées avec une taille compacte et une adaptabilité avancée pour répondre aux exigences croissantes des réseaux sans fil de nouvelle génération [26].

6 AVANTAGES DES ANTENNES MASSIVE MIMO

L'avantage d'un réseau MIMO par rapport à un réseau classique est qu'il peut multiplier la capacité d'une connexion sans fil sans nécessiter davantage de spectre. Des rapports font état d'améliorations considérables de la capacité, qui pourrait être multipliée par 50 à l'avenir.

Plus l'émetteur/récepteur est équipé d'antennes, plus les chemins de signaux possibles sont nombreux et meilleures sont les performances en termes de débit de données et de fiabilité de la liaison.

Un réseau Massive MIMO sera également plus réceptif aux appareils émettant dans des bandes de fréquences plus élevées, ce qui améliorera la couverture. En particulier, cela

présentera des avantages considérables pour l'obtention d'un signal fort à l'intérieur des bâtiments (bien que les fréquences plus élevées de la 5G posent leurs propres problèmes à cet égard).

Le plus grand nombre d'antennes dans un réseau Massive MIMO le rendra également beaucoup plus résistant aux interférences et au brouillage intentionnel que les systèmes actuels qui n'utilisent qu'une poignée d'antennes.

Il convient également de noter que les réseaux MIMO massifs utiliseront la technologie de formation de faisceaux, ce qui permettra une utilisation ciblée du spectre. Les réseaux mobiles actuels sont plutôt stupides dans leur façon de répartir une seule réserve de spectre entre tous les utilisateurs à proximité, ce qui entraîne un goulot d'étranglement des performances dans les zones densément peuplées. Avec la technologie Massive MIMO et la formation de faisceaux, ce processus est géré de manière beaucoup plus intelligente et efficace, de sorte que les vitesses de transmission des données et les temps de latence seront beaucoup plus uniformes sur l'ensemble du réseau [27].

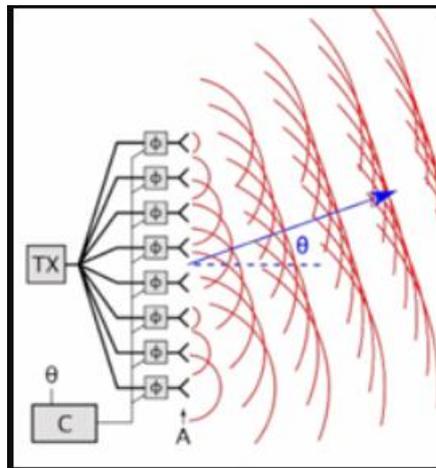


Figure 23 illustration de la formation du faisceau par association des champs de chaque élément rayonnant [40]

7 AVANTAGES DES SYSTEMES MASSIVE MIMO

Massive MIMO est la technologie clé de la 5G avec plus de 100 antennes dans les stations de base d'émission et de réception pour fournir de meilleurs services à l'utilisateur final. Elle présente les avantages suivants [41] :

1. **Amélioration de la capacité** : Une capacité plus élevée (10 fois ou plus) est attendue dans la communication sans fil 5G en raison du MIMO massif sans spectre supplémentaire. Les ressources de données totales disponibles sont utilisées par le plus grand nombre d'utilisateurs finaux pour répondre à des besoins spécifiques grâce à la MIMO massive. Le MIMO massif est la ressource clé pour les débits de données plus élevés de la 5G.
2. **Couverture étendue** : Les utilisateurs peuvent bénéficier d'une meilleure couverture à l'intérieur et à la périphérie d'une cellule. Des débits de données plus élevés sont ainsi obtenus partout. L'utilisation de la formation de faisceaux permet de créer le faisceau le plus approprié pour les utilisateurs stationnaires et mobiles dans le cadre de la MIMO massive.
3. **Expérience de l'utilisateur** : Les fichiers/données volumineux peuvent être chargés/téléchargés à l'aide de la technologie MIMO massive dans la 5G en raison de la grande capacité et de la grande couverture. On peut donc s'attendre à une meilleure expérience utilisateur avec le MIMO massif.
4. **Fiabilité de la liaison** : Un plus grand nombre de chemins possibles sont créés dans le MIMO massif entre l'émetteur et le récepteur en raison d'un grand nombre d'antennes aux deux extrémités. La fiabilité est donc améliorée.
5. **Résistance aux interférences et au brouillage** : Les chemins multiples et les faisceaux étroits résolvent le problème des interférences et du brouillage dans la MIMO massive.
6. **Utilisation ciblée du spectre** : La MIMO massive avec formation de faisceaux utilise intelligemment le spectre disponible, même dans les endroits denses.
7. **Faible consommation d'énergie** : Les stations de base avec formation de faisceau nécessitent une faible puissance pour couvrir l'utilisateur prévu, ce qui réduit le coût global du réseau. La station de base n'a besoin que du nombre d'antennes opérationnelles dans un faisceau particulier. L'efficacité énergétique est donc améliorée.
8. **Sécurité du système** : L'utilisateur prévu est couvert par le signal transmis par l'orientation du faisceau. Par conséquent, le vol de signal est minimal dans un système MIMO massif par rapport à un système conventionnel.

8 PERFORMANCES DES ANTENNES MIMO EN DIVERSITE

8.1 couplage mutuel

Le **couplage mutuel** [42] entre deux antennes se produit lorsque celles-ci sont proches l'une de l'autre et que l'une ou les deux sont excitées . Dans ce cas, une partie de l'énergie rayonnée par l'une des antennes est transférée à l'autre antenne, en particulier vers son impédance de charge. Ce phénomène a des conséquences importantes sur les performances des systèmes d'antennes.

Les facteurs qui influencent le couplage mutuel comprennent les caractéristiques de rayonnement des antennes, la distance entre elles, leur orientation relative et leur nature. Le couplage mutuel est pris en compte lors du calcul de l'efficacité totale du système, de l'enveloppe de corrélation et des performances en diversité. En somme, il joue un rôle essentiel dans la conception et l'optimisation des systèmes d'antennes.

8.2 Efficacité totale

Le gain important du réseau offert par Massive MIMO se traduit par des économies substantielles en puissance rayonnée [31]. Dans certains scénarios de déploiement, l'efficacité énergétique des réseaux sans fil est une préoccupation. La consommation totale d'énergie, qui comprend à la fois la puissance rayonnée et la puissance dissipée dans les circuits et dépensée pour le traitement du signal, est alors une mesure pertinente. Il existe un corpus de littérature qui donne un aperçu des aspects d'efficacité énergétique totale de Massive MIMO.

8.3 Envelope Correlation Coefficient (ECC)

Dans les systèmes MIMO, l'évaluation du couplage entre éléments rayonnants est cruciale et l'ECC constitue un paramètre essentiel à cet effet. Contrairement aux paramètres d'isolation, l'ECC prend en compte la perte de réflexion de tous les ports et l'isolation entre les différents ports pour caractériser le couplage mutuel complet des antennes. La valeur recommandée de l'ECC par l'UIT doit être inférieure ou égale à 0,5 pour les systèmes de communication mobile. De meilleures performances dans les systèmes MIMO sont indiquées par une faible valeur ECC, ce qui signifie un couplage réduit entre les éléments rayonnants. À l'inverse, une valeur ECC plus élevée peut avoir un effet négatif. L'ECC pour une efficacité de

rayonnement supérieure à 90 % peut être obtenue directement à partir du paramètre s et donnée sous la forme [41]:

$$\rho ECC(k,l,P) = \frac{\sum_{m=1}^P S_{*k,m} S_{m,l}}{\sqrt{\prod_{s(=k,l)} \{1 - \sum_{m=1}^P S_{*k,m} S_{m,s}\}}} \quad (\text{II.3})$$

ou $k = 1$ to m , $l = 1$ to m , $m = m$ th port, $s = s$ th port, et $P =$ number of antennas.

Le calcul de l'ECC pour une antenne dont l'efficacité de rayonnement est inférieure à 90 % implique les paramètres de champ lointain de l'antenne rayonnante.

$$\rho ECC = \frac{\iint [(\overline{F_1}(\theta, \phi)) \cdot (\overline{F_2}(\theta, \phi))]^2 d\Omega}{\iint (\overline{F_1}(\theta, \phi))^2 d\Omega \iint (\overline{F_2}(\theta, \phi))^2 d\Omega} \quad (\text{II.4})$$

Gain de Diversité (DG)

Le gain de diversité est un indicateur de la qualité et de la fiabilité des antennes MIMO dans les systèmes sans fil. Ainsi, pour assurer des performances optimales, le gain de diversité de l'antenne MIMO devrait être élevé (d'environ 10 dB) dans la plage de fréquences acceptables. Ce gain de diversité est déterminé par la valeur du coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) et peut être exprimé à l'aide de l'équation [43].

$$DG = 10 \times \sqrt{1 - |ECC_{qp}|^2} \quad (\text{II.5})$$

9 Conclusion

Ce chapitre a examiné les antennes patch, ULB et MIMO, chacune ayant ses propres avantages dans les systèmes de communication modernes.

Les antennes patch sont appréciées pour leur simplicité et leur faible coût, bien qu'elles aient des limitations en bande passante. Les antennes ULB offrent une très large bande passante, essentielle pour les communications à haut débit et les applications radar.

Les antennes MIMO améliorent l'efficacité spectrale et les débits de transmission en utilisant plusieurs antennes pour l'émission et la réception, ce qui est particulièrement bénéfique dans les environnements urbains denses et pour les réseaux 5G.

Ensemble, ces antennes jouent un rôle crucial dans l'évolution des technologies de communication, répondant aux exigences croissantes de performance et de fiabilité.

CHAPITRE 3 :
CONCEPTION ET ANALYSE
D'UNE NOUVELLE STRUCTURE
D'ANTENNE MIMO

1 Introduction

Avec l'essor de la technologie 5G, la bande millimétrique est devenue cruciale pour offrir des débits de données élevés.

Ce chapitre présente les simulations successives d'une antenne monopole, d'une antenne MIMO 2x2, et d'une antenne MIMO 4x4 réalisées avec CST Studio 2019.

L'antenne monopole sert de référence de base. Les configurations MIMO 2x2 et 4x4 sont étudiées pour leur capacité à améliorer la performance du système, tel que la bande passante, grâce à la diversité et au multiplexage spatial. Les simulations permettent de comparer la bande passante, l'efficacité et la directivité de chaque antenne.

Les résultats obtenus fourniront des aperçus précieux pour la conception d'antennes répondant aux exigences de la technologie 5G.

2 Etapes de conception

2.1 Antenne de départ et ses performances

Etude théorique :

Nous avons choisi une antenne monopole rectangulaire large bande, constituée d'un élément rayonnant rectangulaire alimenté par une ligne micro-ruban, imprimée sur un substrat de dimensions 13.83 x 15 x 0.79 mm³.

Composant	Matériau	Dimensions	Rôle dans l'antenne
Patch	Copper (annealed)	7.99 x 4.94 (mm)	Rayonnement et réception du signal
Plan de masse	Copper (annealed)	15 x 15 (mm)	Réflexion du signal , stabilisation
Substrat	RogersRT5880(lossfree)	13.83 x 15 x 0.79 mm ³	Support mécanique, isolation électrique

Tableau 1 Composants des Antennes, leurs Matériaux, Dimensions et Rôles

Cette conception a été préférée pour sa simplicité et sa compatibilité avec les bandes millimétriques de la technologie 5G.

Les dimensions spécifiques de l'antenne sont répertoriées dans le tableau :

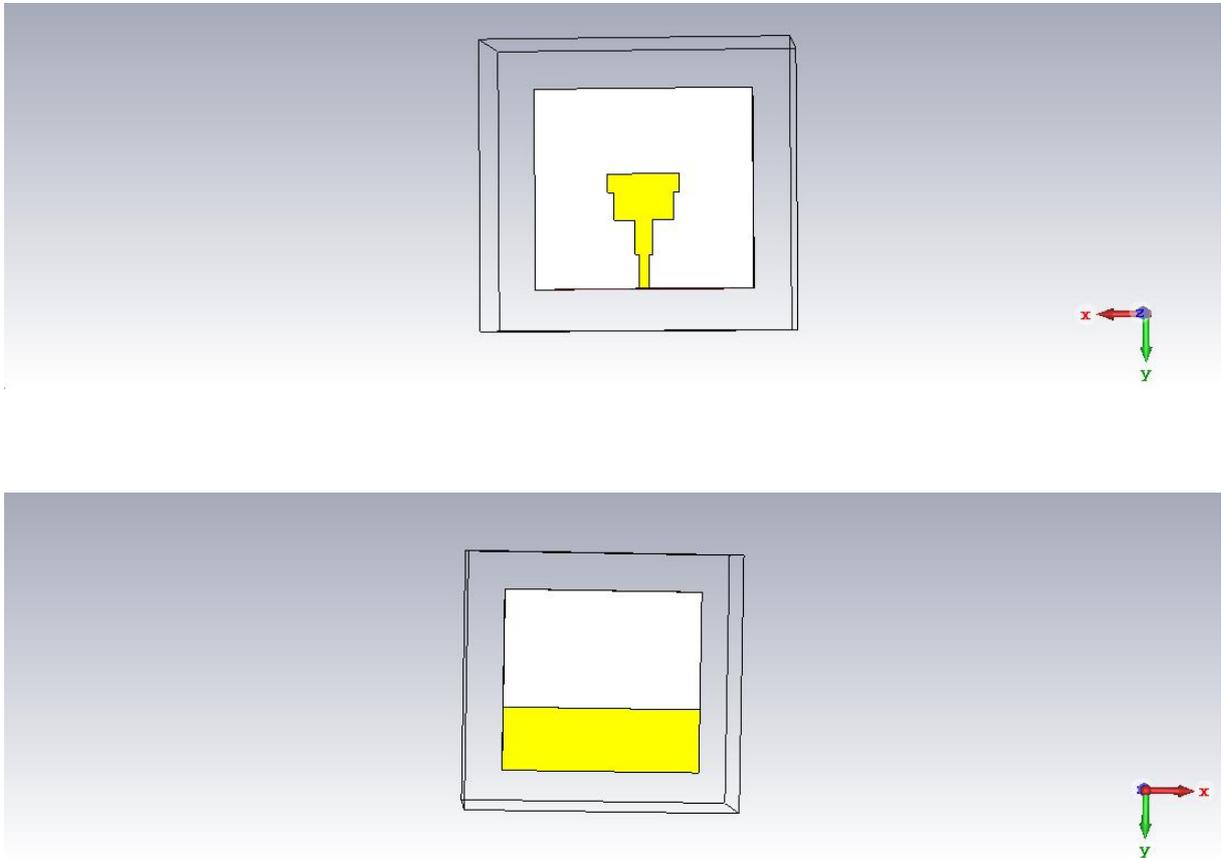


Figure 24 Géométrie de l'Antenne Monopole

PARAMETRES	DIMENSION (MM)
WG	15
LG	15
R	2.2
WP	4.93
HS	0.79
H	0.035
LP	3.2
WFM	1.2
LFM	2.37

Tableau 2 Paramètres de l'antenne

Coefficient de réflexion S11 :

La structure de l'antenne a été optimisée et simulée à l'aide du logiciel CST. La figure III.2 illustre le coefficient de réflexion S11. On observe à partir de cette figure que l'antenne proposée présente une large bande passante, s'étendant de 23.54 à 28.55 GHz, avec une largeur de bande de BP = 19 %.

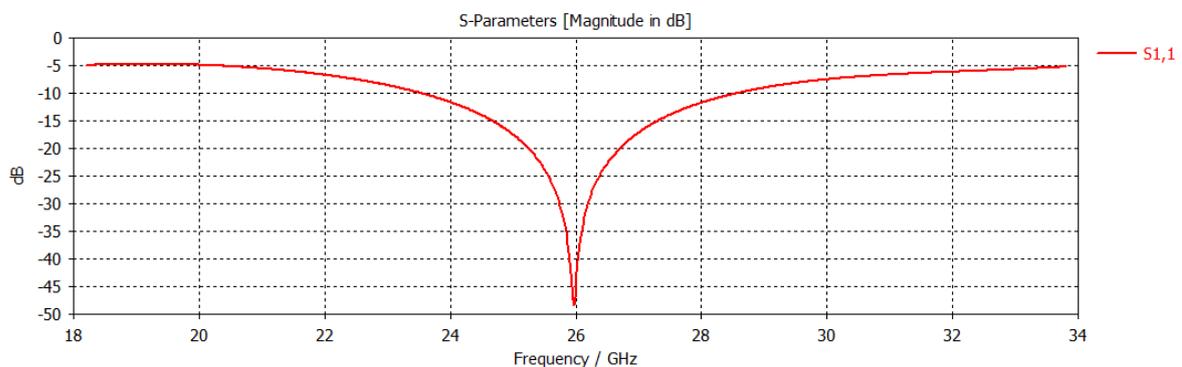


Figure 25 coefficient de réflexion S11

2.2 MIMO 2x2 à deux ports

Après avoir caractérisé et optimisé l'antenne monopole rectangulaire, nous avons étendu notre analyse à une configuration MIMO 2x2.

Cette configuration permet l'utilisation de deux éléments d'antenne de réception et de deux éléments d'antenne de transmission, offrant ainsi des avantages significatifs en termes de capacité et de fiabilité de la communication.

Lors des premières simulations, nous avons observé un couplage mutuel significatif entre les éléments de l'antenne, ce qui a affecté les performances globales du système.

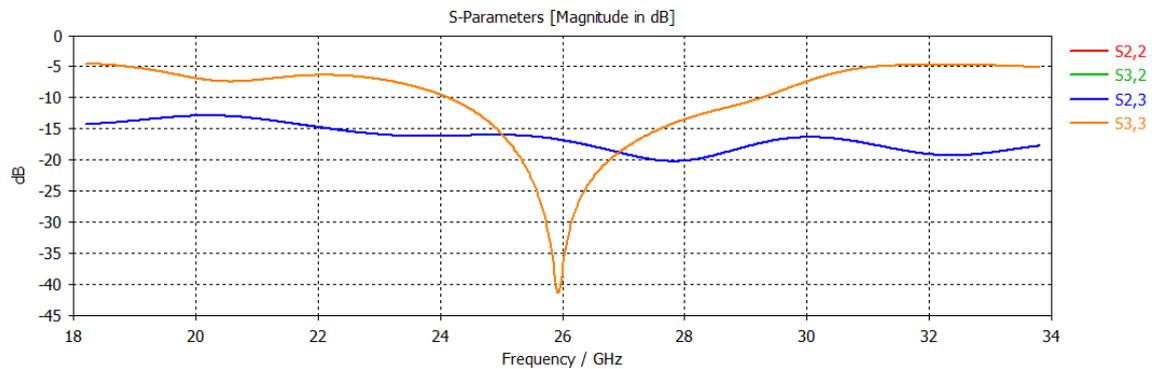
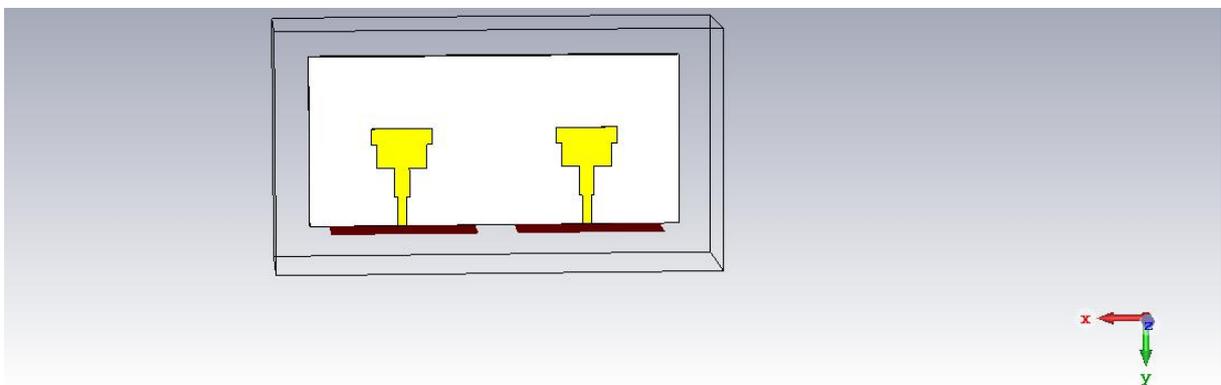


Figure 26 coefficient de réflexion et de transmission

Pour résoudre ce problème, des structures d'isolation ont été ajoutées entre les éléments de l'antenne au niveau de plan de masse.

Après l'ajout de ces isolateurs, les résultats finaux ont montré une amélioration notable des performances, avec une réduction effective du couplage mutuel.



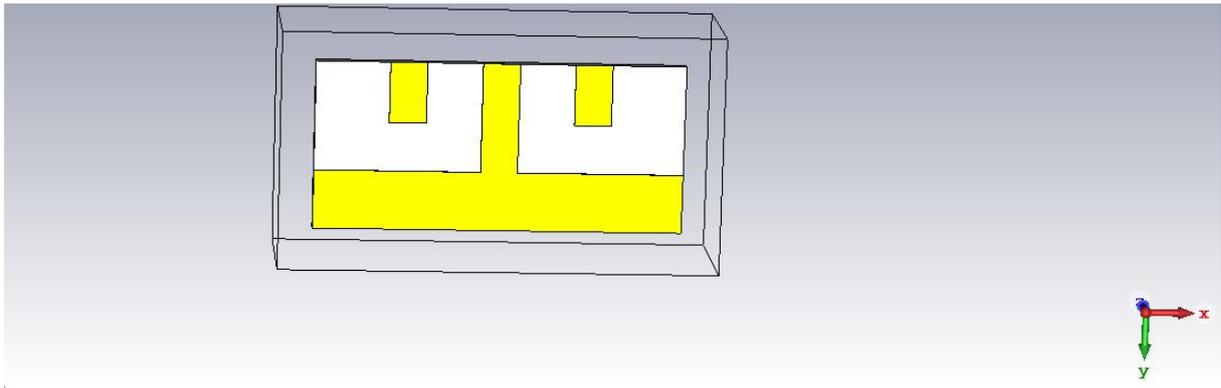


Figure 27 Géométrie de l'antenne proposée MIMO 2 x 2

Coefficient de réflexion S11 et coefficient de transmission S21 :

La figure III.4 présente les coefficients de réflexion (S11) et de transmission (S21) de l'antenne MIMO 2x2, confirmant sa large bande passante et son faible niveau d'interférence entre les éléments. Ces améliorations significatives démontrent l'efficacité de la conception optimisée de l'antenne et sa parfaite adéquation aux exigences des systèmes de communication 5G.

On observe à partir de cette figure que l'antenne proposée présente une large bande passante, s'étendant de 22.35 à 28.94 GHz, avec une largeur de bande de BP = 25 %. Le couplage mutuel a été réduit à -20 dB et on a également gagné dans la bande passante.

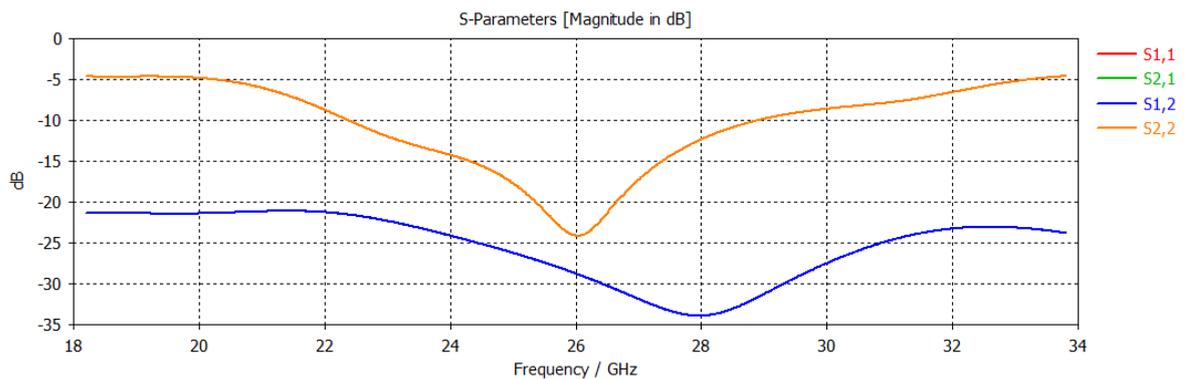


Figure 28 coefficient de réflexion S11 et coefficient de transmission S21

Coefficient de Corrélacion d'Enveloppe (ECC) et Gain de Diversité (DG) :**Coefficient de Corrélacion d'Enveloppe (ECC) :**

Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) est une mesure cruciale pour évaluer les performances des systèmes MIMO. Il quantifie le degré de corrélation entre les signaux reçus par les différents éléments d'antenne. Un ECC faible est souhaitable car il indique que les signaux sont suffisamment distincts, permettant ainsi une meilleure exploitation de la diversité spatiale.

Dans nos simulations, l'ECC de l'antenne MIMO 2x2 optimisée est inférieur à 0,018. Cette valeur extrêmement faible démontre une excellente indépendance entre les signaux des différentes antennes, assurant une performance supérieure du système MIMO en termes de capacité et de fiabilité de la communication. Un ECC aussi bas est bien en dessous des seuils typiquement requis pour les systèmes MIMO performants, soulignant l'efficacité de notre conception.

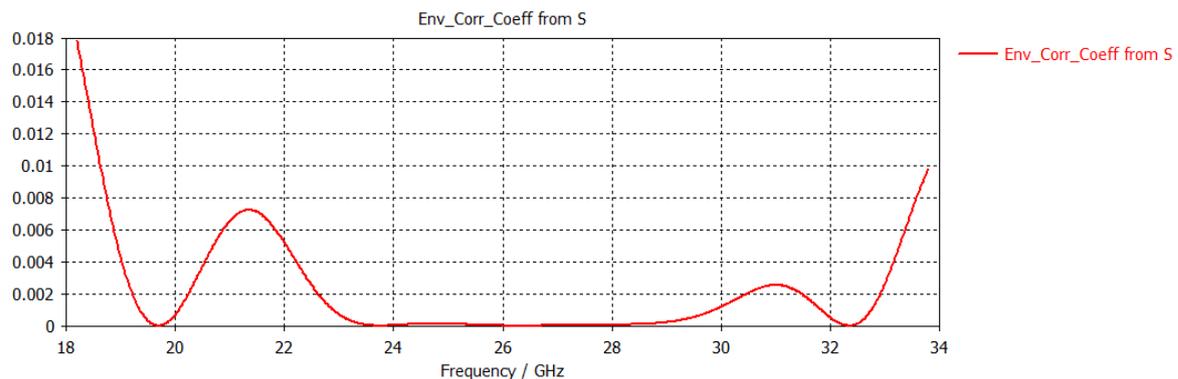


Figure 29 ECC de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence

Gain de Diversité (DG) :

Le gain de diversité (DG) mesure la capacité du système MIMO à améliorer la fiabilité de la communication en exploitant la diversité des chemins de propagation. Un DG élevé est indicatif d'une capacité efficace à atténuer les effets de l'évanouissement.

Les résultats de simulation montrent que le DG de notre antenne MIMO 2x2 se situe entre 9,91 et 10 dB. Cette plage de valeurs est très proche du gain de diversité idéal de 10 dB, ce qui indique une performance excellente. Un DG aussi élevé signifie que notre configuration

d'antenne est capable de fournir une communication fiable et robuste, même dans des environnements de propagation difficiles, ce qui est essentiel pour les applications 5G.

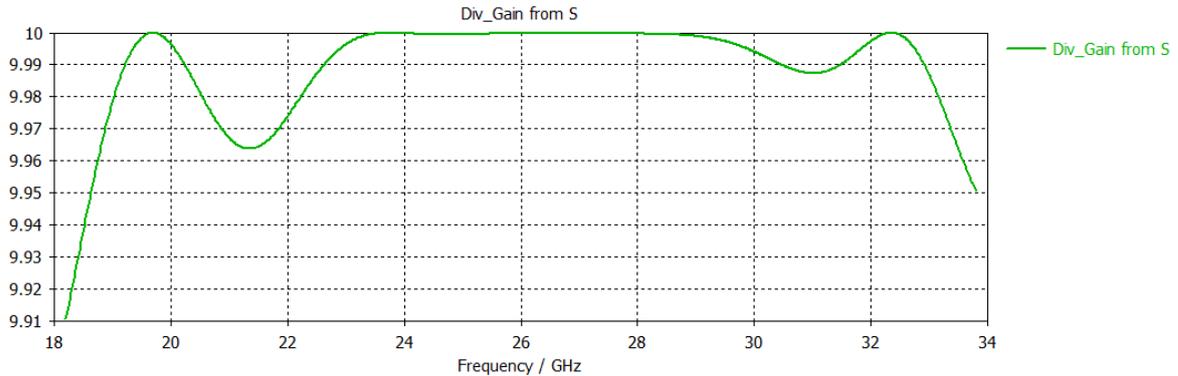


Figure 30 DG de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence

Le gain en fonction de la fréquence :

La figure illustre que le système MIMO 2x2 offre un gain amélioré par rapport aux antennes individuelles. Ce gain peut atteindre jusqu'à 4.5dB sur l'ensemble de la bande de fréquences, avec une variation entre 2.4dB et la valeur maximale mentionnée. Ce phénomène indique une réception de signal plus robuste, susceptible d'améliorer la qualité de la communication.

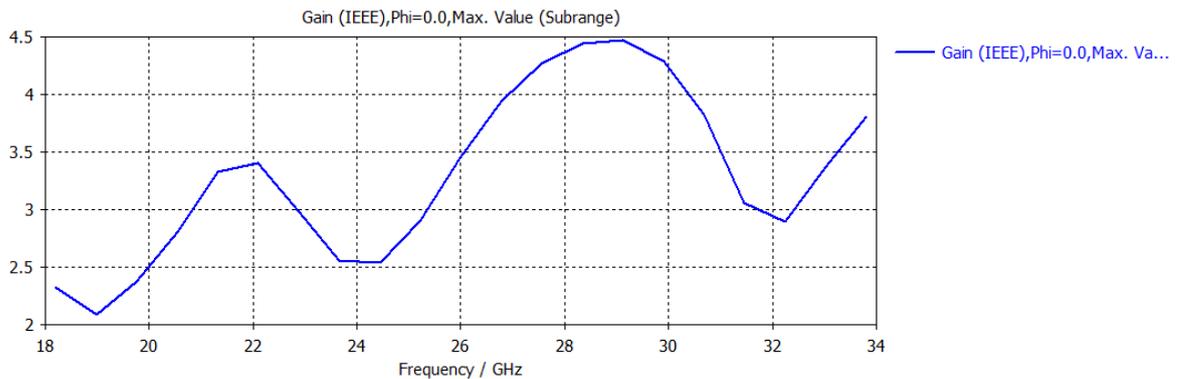


Figure 31 Gain en [dB] de l'antenne MIMO à deux ports en fonction de la fréquence

2.3 MIMO 4 x 4 A QUATRE PORTS

La figure 8 présente la configuration de notre système MIMO 4x4, comportant quatre antennes monopoles imprimées sur un substrat unique. Cette conception est une extension de

la structure précédente MIMO 2x2. Chaque antenne est connectée à un port individuel, totalisant quatre ports (Port 1, Port 2, Port 3 et Port 4).

Les antennes sont espacées de manière optimale pour minimiser le couplage mutuel et maximiser l'isolation entre elles, tout en maintenant une taille compacte de l'ensemble du dispositif.

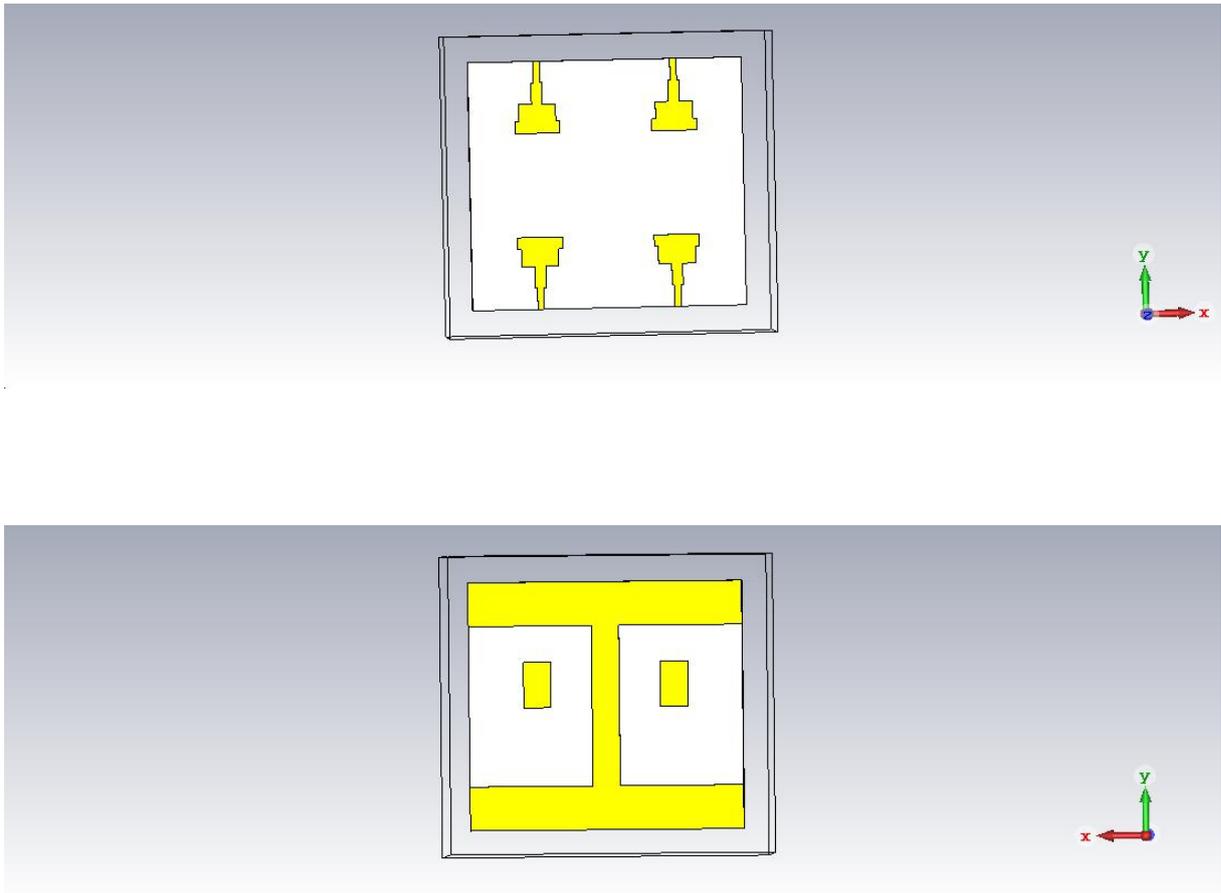


Figure 32 Géométrie de l'antenne proposée MIMO 4x4 à 4 ports

Amplitude de coefficient de réflexion S11, S22, S33 et S44 :

Les coefficients de réflexion (S11, S22, S33 et S44) des quatre ports du système MIMO 4x4 illustrés indiquent des pertes par réflexion minimales, démontrant une excellente adaptation d'impédance entre les antennes et le système. Cette adaptation optimale se traduit par une large bande passante de 22,41 à 28,74 GHz, soit 24% (BP = 24%).

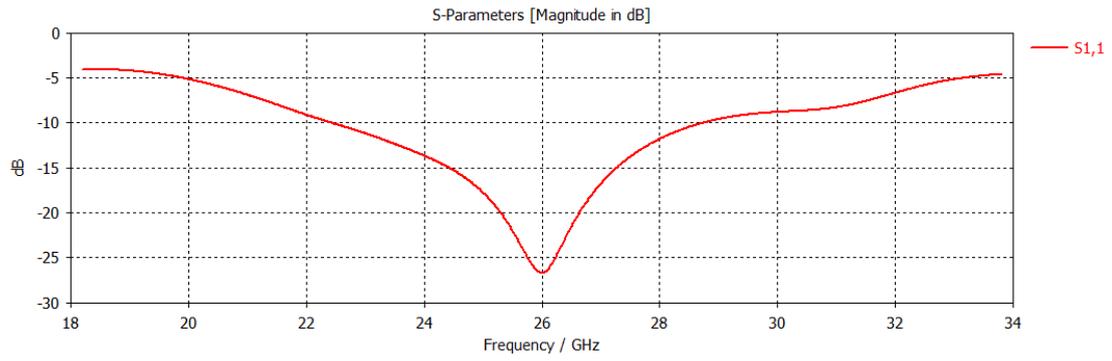


Figure 33 coefficient de réflexion S11

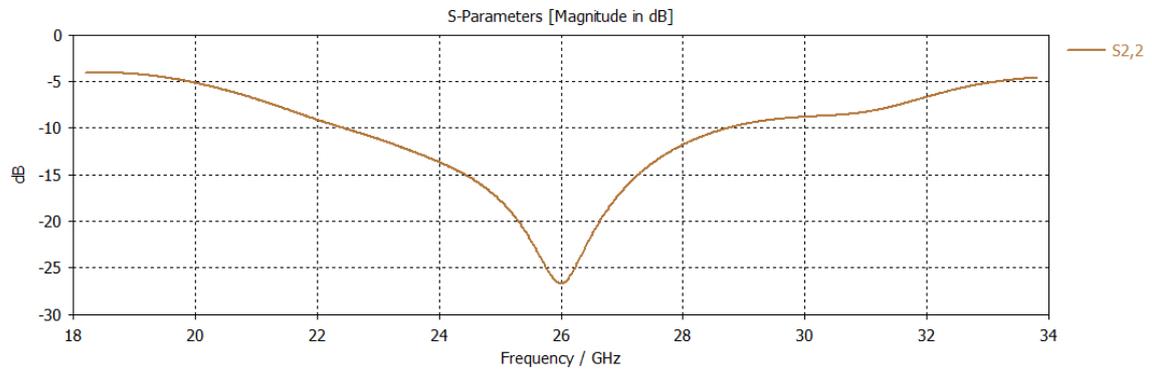


Figure 34 coefficient de réflexion S22

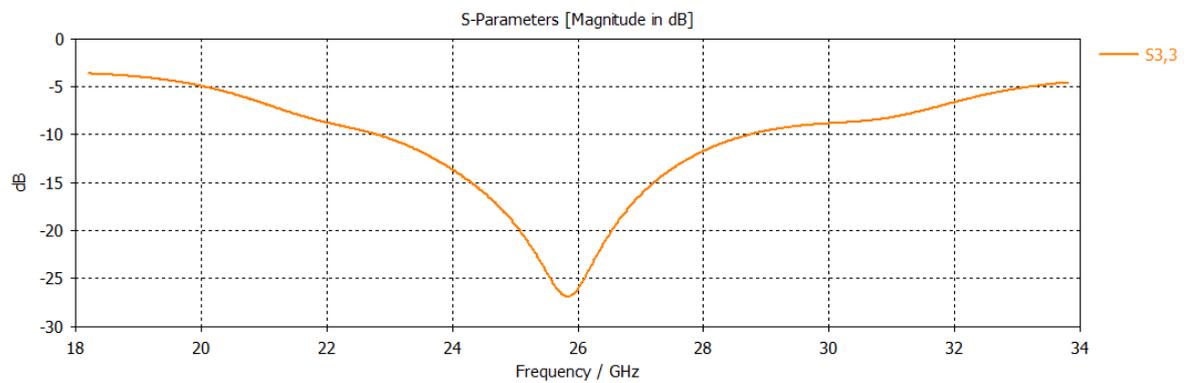


Figure 35 coefficient de réflexion S33

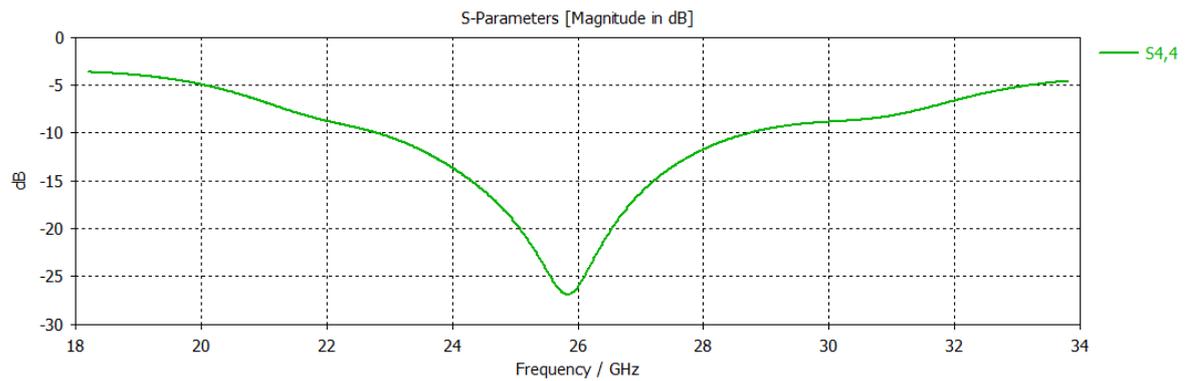


Figure 36 coefficient de réflexion S_{44}

Amplitude de couplage S_{12} , S_{13} et S_{14} :

Les figures montrent les amplitudes de couplage S_{12} , S_{13} et S_{14} de notre système MIMO 4x4, mesurant le couplage mutuel entre différentes antennes. Des valeurs faibles de ces paramètres indiquent un faible couplage mutuel, minimisant les interférences et améliorant la performance du système.

Les simulations montrent une bonne isolation entre les ports 1-3 et 1-4, mais un couplage notable entre les ports 1-2, avec des valeurs de S_{12} entre -18 et -30 dB pour les fréquences de 24 à 30 GHz. Cette situation est due à la proximité entre les antennes 1 et 2, entraînant une dissipation d'énergie entre elles.

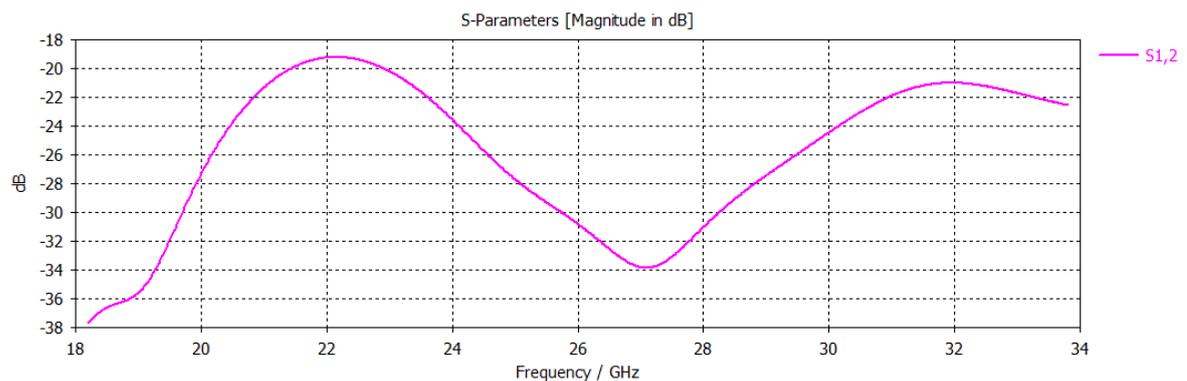


Figure 37 couplage entre les ports 1 et 2

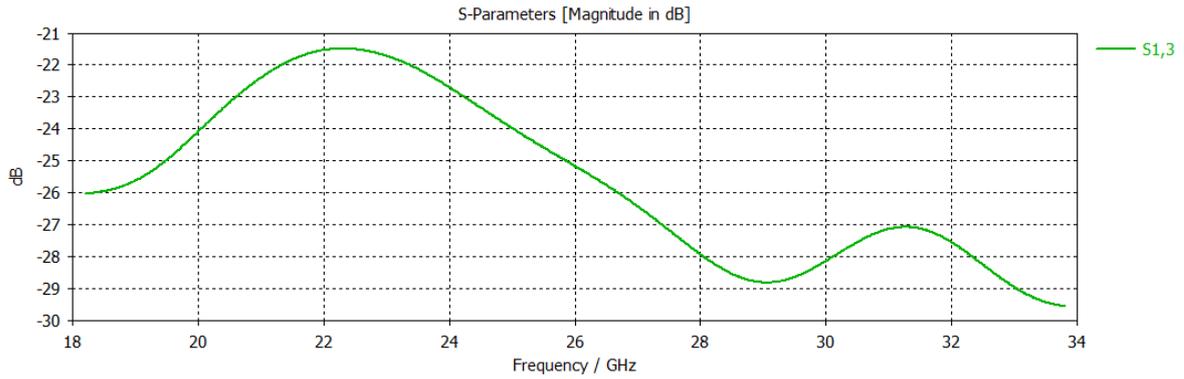


Figure 38 couplage entre les ports 1 et 3

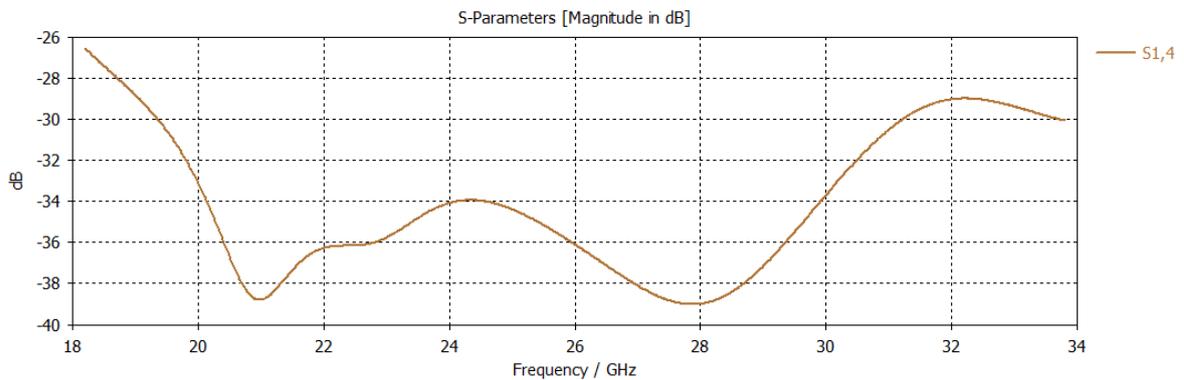


Figure 39 couplage entre les ports 1 et 4

Amplitudes des Coefficients de Réflexion et de Couplage :

La figure 16 présente les amplitudes des coefficients de réflexion et de couplage de notre système MIMO 4x4, incluant S_{11} , S_{21} , S_{31} , S_{41} , S_{12} , S_{22} , S_{32} , S_{42} , S_{13} , S_{23} , S_{33} , S_{43} , S_{14} , S_{24} , S_{34} et S_{44} . Les coefficients de réflexion (S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{44}) mesurent les pertes par réflexion à chaque port, tandis que les coefficients de couplage (S_{21} , S_{31} , S_{41} , S_{12} , S_{32} , S_{42} , S_{13} , S_{23} , S_{43} , S_{14} , S_{24} , S_{34}) indiquent le niveau de couplage mutuel entre les différentes antennes. Des valeurs faibles de réflexion et de couplage sont essentielles pour une adaptation d'impédance optimale et une isolation efficace entre les antennes, garantissant ainsi une performance élevée du système. Cette figure permet de visualiser les bandes de fréquence où l'adaptation et l'isolation sont maximales, fournissant des informations cruciales pour l'optimisation du système MIMO en termes de qualité de signal et d'efficacité de transmission.

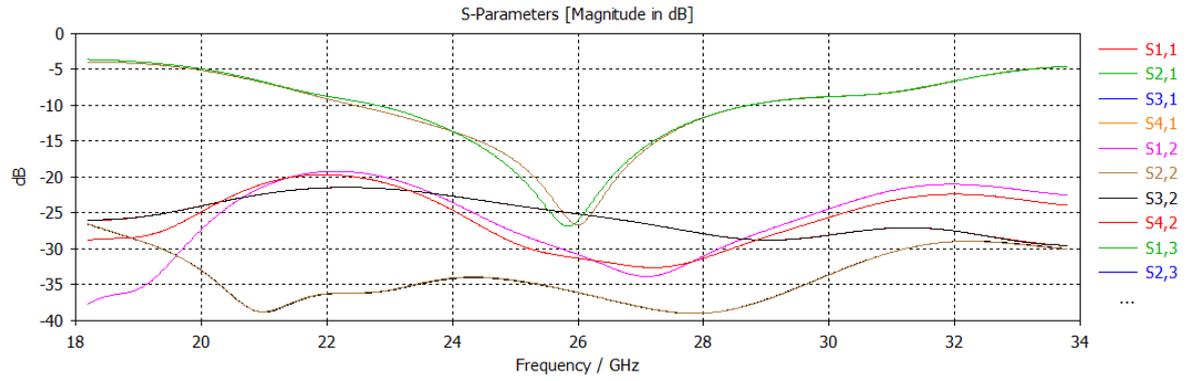


Figure 40 Amplitudes des Coefficients de Réflexion et de Couplage

Coefficient de Corrélacion d'Enveloppe (ECC) et Gain de Diversité (DG) :

Les figures ci-dessous montrent que l'ECC est égal à 0 et que le DG est de 10 entre les ports 1-3 et 1-4 sur toute la bande d'intérêt. De plus, les valeurs de couplage entre les ports 1-2 sont acceptables, ce qui démontre la performance exceptionnelle de l'isolation de l'antenne MIMO ULB à 4 ports proposée.

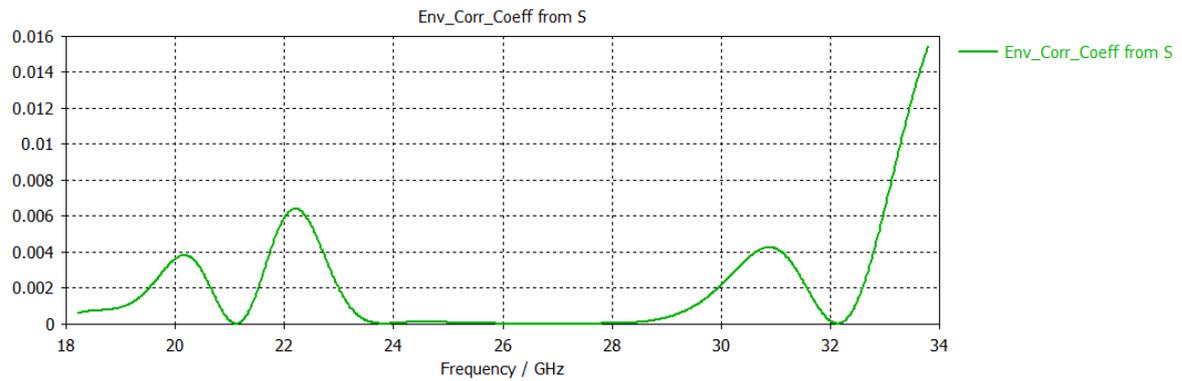


Figure 41 ECC de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence

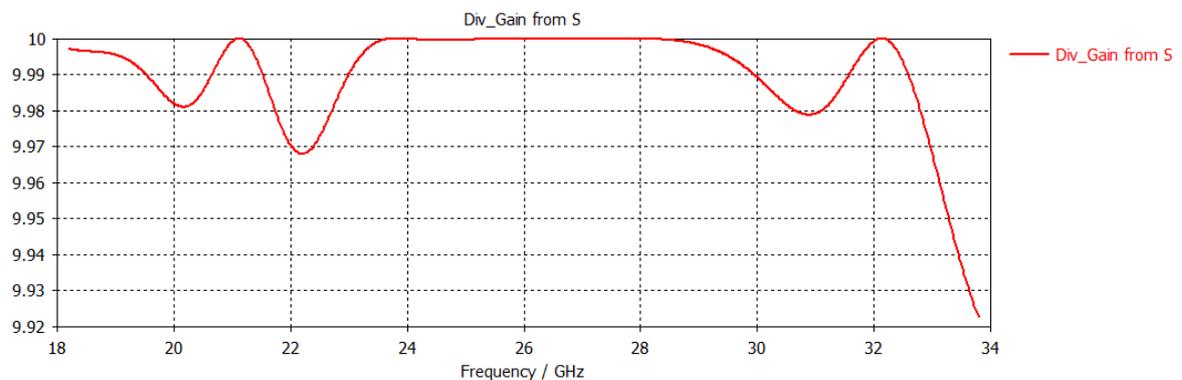
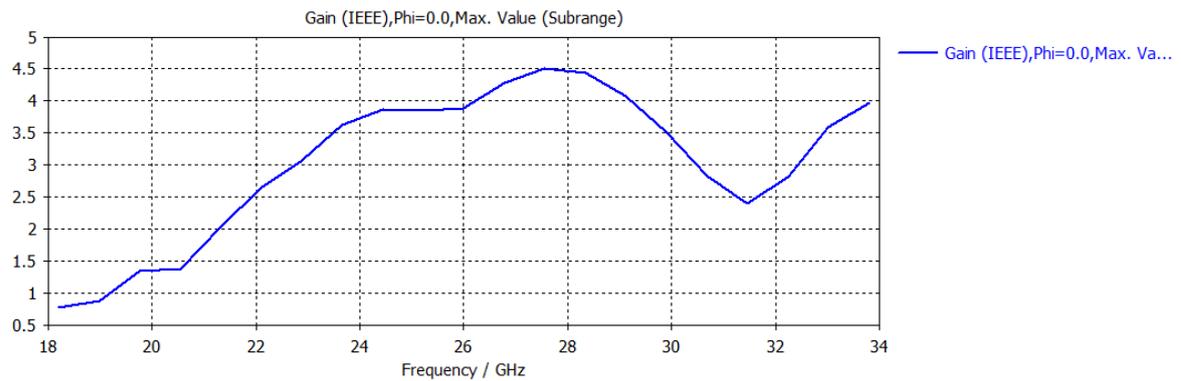


Figure 42 DG de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence

Gain en fonction de la fréquence :**Figure 43 Gain en [dB] de l'antenne MIMO à 4 ports en fonction de la fréquence****2.4 COMPARAISON ENTRE LES DEUX MIMO**

Paramètres	MIMO 2x2	MIMO 4x4
Bande passante	22.35-28.94 GHZ	22.62-28.6 GHZ
Couplage	<-20 dB	S12<-18 dB S13<-20 dB S14<-21 dB
ECC	0	0
DG	10	10
Gain	2.4dB - 4.5dB	2dB - 5dB

Tableau 3 Comparaison entre les deux antennes MIMO 2x2 et MIMO 4x4**3 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons conçu et analysé une antenne MIMO pour les applications 5G en bande millimétrique. Nous avons commencé par simuler une antenne patch rectangulaire monopole, puis nous avons progressé vers des configurations MIMO 2x2 et 4x4.

Résumé des Étapes :

Antenne Patch Monopole : La conception initiale a montré de bonnes performances en termes de réponse en fréquence, gain et directivité, validant son utilisation pour les applications 5G.

Configuration MIMO 2x2 : Cette configuration a amélioré la diversité de canal et la capacité, tout en maintenant un couplage mutuel acceptable.

Configuration MIMO 4x4 : Malgré des défis liés au couplage mutuel, cette configuration a démontré une bonne isolation pour les ports 1-3 et 1-4, avec un couplage plus notable entre les ports 1-2 dû à leur proximité physique.

Les résultats montrent que la nouvelle structure d'antenne MIMO est efficace pour les applications 5G, offrant des performances améliorées en capacité de canal et qualité de signal, malgré certains défis de couplage mutuel. Cela pose une base solide pour le développement futur de systèmes MIMO plus performants.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

Conclusion générale

Ce mémoire a exploré les avancées et les défis associés à la conception de systèmes d'antenne MIMO pour les applications 5G dans la bande millimétrique, un domaine crucial pour le déploiement des réseaux de nouvelle génération.

L'étude a été structurée en trois chapitres principaux, chacun abordant un aspect clé de cette technologie émergente.

Dans le Chapitre 1, nous avons retracé l'évolution des réseaux de téléphonie mobile, en mettant en lumière les innovations technologiques qui ont permis le passage de la 1G à la 5G. Chaque génération a apporté des améliorations significatives en termes de capacité, de vitesse et de fonctionnalités, posant les bases des technologies avancées que nous voyons aujourd'hui. La 5G, avec ses promesses de débits ultra-rapides, de latence extrêmement faible et de connectivité massive, représente une rupture technologique majeure, essentielle pour répondre aux besoins des applications futures telles que l'Internet des objets (IoT), la réalité augmentée et les véhicules autonomes.

Le Chapitre 2 a plongé dans les détails techniques des systèmes MIMO et Massive MIMO, qui sont au cœur de l'infrastructure 5G. Ces systèmes utilisent de multiples antennes pour améliorer la capacité et la fiabilité des transmissions sans fil, en exploitant efficacement les bandes de fréquences millimétriques. Nous avons discuté des différentes configurations d'antennes, notamment les antennes patch et les antennes ULB, et avons souligné l'importance des systèmes MIMO pour maximiser les performances du réseau.

Le Chapitre 3 a présenté les résultats des simulations réalisées à l'aide du logiciel CST Studio. Nous avons commencé par la conception d'une antenne monopole simple, puis avons évolué vers des configurations MIMO plus complexes, 2x2 et 4x4. Les simulations ont montré que ces configurations offrent des performances optimales dans les bandes millimétriques, essentielles pour les applications 5G. Les résultats obtenus démontrent la faisabilité et l'efficacité des systèmes MIMO pour améliorer la capacité, la couverture et la fiabilité des réseaux 5G.

En conclusion, ce mémoire a mis en évidence les défis et les opportunités associés à la conception de systèmes d'antenne pour les applications 5G. Les avancées présentées dans ce travail ouvrent de nouvelles perspectives pour l'optimisation des réseaux sans fil, en particulier

CONCLUSION GENERALE :

dans les environnements urbains denses où la demande de connectivité est élevée. Les configurations d'antennes développées et testées ici montrent une voie prometteuse pour la mise en œuvre effective de la 5G, contribuant ainsi à la transformation continue de notre infrastructure de communication.

Les travaux futurs pourront se concentrer sur l'optimisation de ces configurations d'antennes, l'intégration de nouvelles technologies de matériaux pour améliorer encore plus les performances, et l'exploration de techniques avancées de traitement du signal pour maximiser l'efficacité spectrale. De plus, des études sur l'impact environnemental et la durabilité des nouvelles infrastructures 5G seront cruciales pour assurer un développement responsable et durable de cette technologie.

BIBLIOGRAPHIE :

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rao, R. G. S. et Sai, R. A. V. A. L. I., «5G–Introduction & future of mobile broadband communication redefined,,» vol. 3, n° 14, pp. 119-124, 2013.
- [2] S. Velrajan, An Introduction to 5G Wireless Networks: Technology, Concepts and Use-Cases, 2020.
- [3] Afif Osseiran, J.F. Monserrat, Patrick Marsch et Olav Queseth, 5G Mobile and Wireless Communications Technology, cambridge university press, 2016.
- [4] Juha Meinilä, Pekka Kyösti, Lassi Hentilä, Tommi Jämsä, Essi Suikkanen, Esa Kunnari et Milan Narandžić, ««D5.3: WINNER+ Final Channel Models,,»» 2010.
- [5] Cabrejas Peñuelas, «Evaluation of 3GPP Technology Candidate Towards Fourth Generation Mobile,,» 2013.
- [6] Tech House, Challenges and everything you need to know about 5G a simplified guide, 2022.
- [7] «Terrafemina,,», «terrafemina,,» groupe Webedia, 23 11 2013. [En ligne].
- [8] agence nationale des frequences, ««Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G,,»» 2019.
- [9] Autorité de régulation des communications électron, ««LES ENJEUX DE LA 5G,,»» paris, 2017.
- [10] Liang, W., Ding, Z et Poor, H., Key Technologies for 5G Wireless Systems, Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press., 2017.
- [11] Capgemini,, «A View on 5G NR-IoT Devices,,» france, 2022.
- [12] Long Zhao, Hui Zhao, Kan Zheng et Wei Xiang, MIMO massif en 5G Réseaux : sélectionnés Applications, SpringerBriefs en électricité et informatique Ingénierie, 2018.

BIBLIOGRAPHIE :

- [13] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 2015.
- [14] M. Khaliluzzaman,, D. K. Chy et M. R. H. Chowdhury, «Enhancing the Bandwidth of a Microstrip Patch Antenna at 4 GHz for WLAN Using H-Shaped Patch,» *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, vol. 2, n° %112, pp. 231-237, 2015.
- [15] V. Mokal, P. S. R. Gagare et R. P. Labade, «Analysis of Micro Strip Patch Antenna Using Coaxial Feed and Micro Strip Line Feed for Wireless Application,» *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol. 12, n° %113, pp. 36-41, 2017.
- [16] Mark Clemente Arenas, Anne Claire Lepage et Xavier Begaud, «Contrôle du rayonnement d'une antenne patch à l'aide de la transformation d'espace.,» Telecom ParisTech - LTCI CNRS UMR 5141, 2015.
- [17] Yadwinder Kumar, Shrivishal Tripathi et Balwinder Raj, *Multifunctional MIMO Antennas Fundamentals and Applications*, CRC Press, 2022.
- [18] Ashish kumar et Reeta Verma, «Design Analysis of Different Types of Feed to Microstrip Patch Antenna,» *IRE journal*, vol. 1, p. 6, 2017.
- [19] Commissioners Capps and Martin issuing separate st, «Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems,» washington, 2002.
- [20] Nekoogar, Faranak, *Ultra-wideband communications : fundamentals and applications*, 2006.
- [21] Nicolas Fortino , *Conception et caractérisation d'antennes imprimées pour systèmes Ultra Large Bande impulsions*, 2006.
- [22] Leeladhar Malviya, Rajib Kumar Panigrahi et M.V. Kartikeyan, *MIMO Antennas for Wireless Communication Theory and Design*, CRC Press, 2021.
- [23] «*Study Paper on Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technology*»..

BIBLIOGRAPHIE :

- [24] magnetism, «Wireless MIMO Systems | How it works, Application & Advantages,,» 2021.
- [25] Ghais El Zein, Hanna Farhat et Yves LOSTANLEN, «*Caractérisation, modélisation, simulation et capacité du canal de transmission MIMO*, Actes des Journées Scientifiques de l'URSI France, 2010.
- [26] Agence Nationale des Fréquences, *Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G*, 2020.
- [27] Jon Mundy et Sacha Kavanagh, *What Is Massive MIMO Technology?*, 5G Comparison Site, 2022.
- [28] Noha Hassan et Xavier Fernando, *Massive MIMO Wireless Networks: An Overview*, Department of Electrical and Computer Engineering, Ryerson University, 350 Victoria Street, Toronto, ON M5B 2K3, Canada, 2017.
- [29] A. Rozé, *Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques*, 2016.
- [30] Josh Fruhlinger, «Une 5G plus efficace grâce au beamforming,» 2019.
- [31] Thomas L. Marzetta, Erik G. Larsson, Hong Yang et Hien Quoc Ngo, *Fundamentals of Massive MIMO*, Cambridge University Press, 2016.
- [32] «difference between mimo and massive mimo,» telecomtrainer, 2023.
- [33] Dan Oliver, «MIMO and Massive MIMO explained,» 5gradar, 2021.
- [34] Ali Sufyan, Dr. KB Khattak, Osama A. Khashan et Usama Mir, «From 5G to beyond 5G: A Comprehensive Survey of Wireless Network Evolution, Challenges, and Promising Technologies,» *electronics*, mai 2023.
- [35] MITSUBISHI ELECTRIC, «Mitsubishi Electric's New Multibeam Multiplexing 5G Technology Achieves 20Gbps Throughput,» *journal electronics*, 2016.

BIBLIOGRAPHIE :

- [36] George C., Alexandropoulos, Md Atiqul Islam et Besma Smida, *Full Duplex Massive MIMO Architectures: Recent Advances, Applications, and Future Directions*, arXiv, 2022.
- [37] A. Benyamina , «“Systèmes MIMO massifs et non massifs pour les liaisons "Beyond 5G" et la "6G"”»,» laboratoire Cédric, france, 2020.
- [38] «Quelle est la différence entre les antennes actives et passives ?»,» construire-logger.info, 2023.
- [39] «5G : antennes adaptatives massive MIMO, beamforming... À quoi ça sert ?»,» Réseaux Orange, 2017.
- [40] Frédéric Launay, univ-poitiers, 2023.
- [41] Tej Raj, Ranjan Mishra, Pradeep Kumar et Ankush Kapoor, «“Advances in MIMO Antenna Design for 5G: A Comprehensive Review”»,» *sensors*, 12 7 2023.
- [42] Jayshri Kulkarni, Arpan Desai, Heng Tung Hsu, Brian Garner, Yang Li, Chow-Yen-Desmond Sim et Vigneswaran Dhasarathan, *Transparent and Flexible MIMO Antenna Technologies for 5G Applications Transforming 5G with Transparent & Flexible MIMO Antennas*, Springer Innovations in Communication and Computing , 2024.
- [43] Preeti Sharma, Rakesh N. Tiwari, Prabhakar Singh , Pradeep Kumar et Binod K. Kanaujia, ««MIMO Antennas: Design Approaches, Techniques and Applications»,»» *sensors*, 14 10 2022.
- [44] mr jason, mimo avec 5g, 2016.