

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Télécommunication

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Par

- **Zeghdoud Aymen**
- **Rouabah Ali**

Intitulé

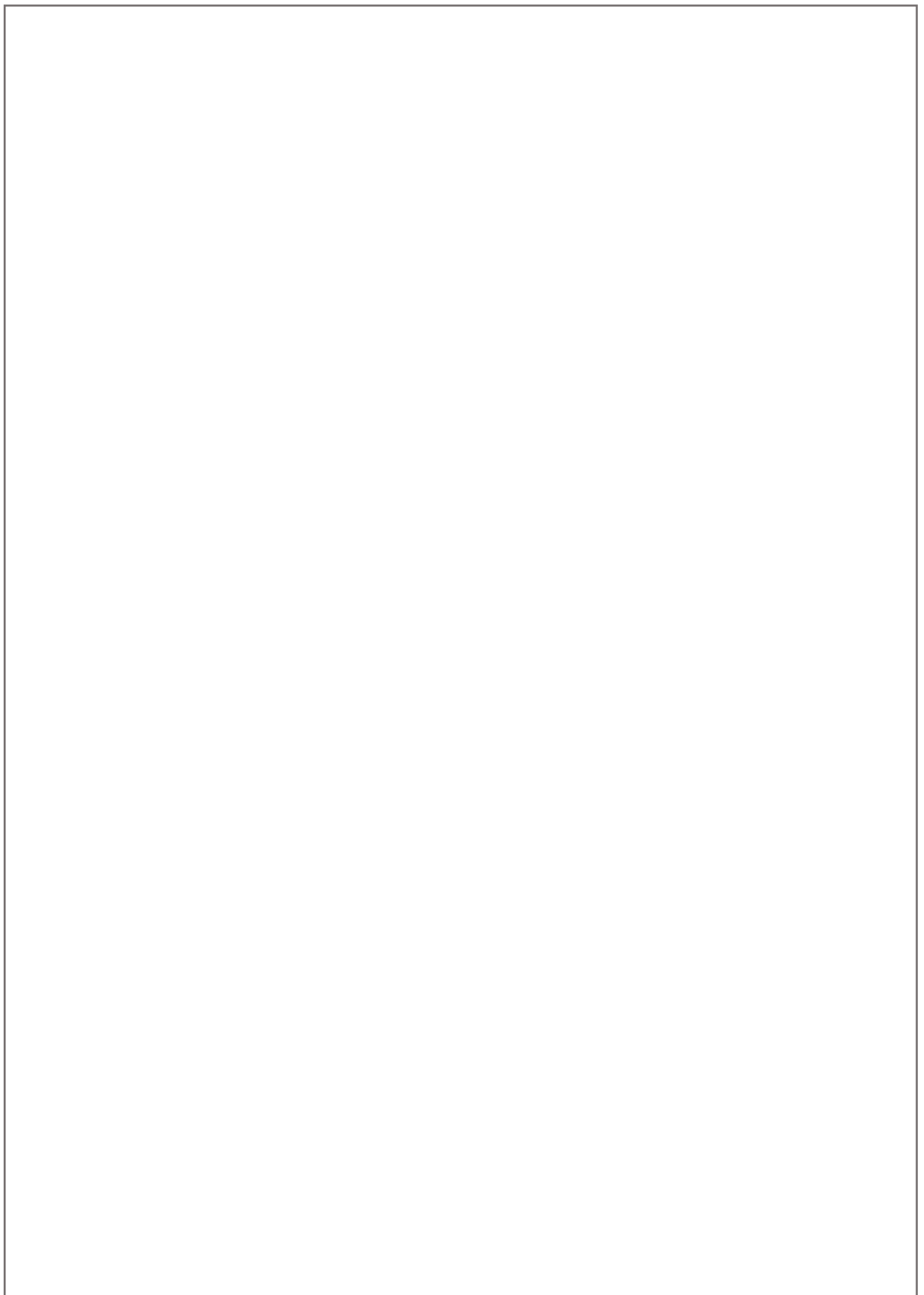
Etude et évaluation des performances d'une antenne MIMO 2×2 dédiée à la 5G

Soutenu le : 26 JUIN 2024

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mme.S.Aib</i>		<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.Attia Salim</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme.N.Mellizi</i>		<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2023/2022



Résumé en français

Le mémoire se concentre sur l'impact de la technologie 5G, notamment l'utilisation des antennes MIMO, sur les réseaux de télécommunications. Il examine en profondeur les caractéristiques clés de la 5G, telles que sa capacité accrue, sa faible latence et sa connectivité massive des appareils. En mettant l'accent sur les antennes MIMO, le mémoire explore comment cette technologie permet d'exploiter efficacement le multiplexage spatial pour améliorer la capacité et la qualité des communications sans fil. Il examine également les avantages des antennes MIMO massives, du beamforming et du spatio-temporel multiplexage dans le contexte de la 5G. Enfin, ce mémoire analyse les défis et les opportunités liés à l'intégration des antennes MIMO dans les réseaux 5G, et propose des recommandations pour une mise en œuvre réussie de cette technologie dans les réseaux de télécommunications modernes.

Résumé en Arabe

تركز المذكرة على تأثير تقنية الجيل الخامس بما في ذلك استخدام هوائيات المايمو على شبكات الاتصالات، وتفحص بعمق السمات الرئيسية للجيل الخامس مثل زيادة القدرة والتأخير المنخفض والاتصال الضخم للأجهزة ومع التركيز على هوائيات المايمو، تستكشف المذكرة كيفية استخدام هذه التقنية بكفاءة لاستغلال التعدد المكاني لتحسين القدرة وجودة الاتصالات اللاسلكية. كما تفحص أيضًا فوائد هوائيات المايمو الضخمة وتشكيل الشعاع وتعددية الزمان والمكان في سياق الجيل الخامس. وأخيرًا، تحلل هذه المذكرة التحديات والفرص المتعلقة بدمج هوائيات في شبكات الجيل الخامس وتقدم توصيات لتنفيذ ناجح لهذه التقنية في شبكات الاتصالات الحديثة

Résumé en Anglais

The paper focuses on the impact of 5G technology, particularly the use of MIMO antennas, on telecommunications networks. It thoroughly examines key features of 5G, such as its increased capacity, low latency, and massive device connectivity. By emphasizing MIMO antennas, the paper explores how this technology effectively exploits spatial multiplexing to enhance the capacity and quality of wireless communications. It also examines the advantages of massive MIMO antennas, beamforming, and spatio-temporal multiplexing in the context of 5G. Finally, the paper analyzes the challenges and opportunities associated with integrating MIMO antennas into 5G networks and proposes recommendations for successful implementation of this technology in modern telecommunications networks.

Remerciement

Nous remercions Dieu le Tout-Puissant pour nous avoir accordé la santé, la volonté, la patience et le courage durant ces longues années d'études. Tout d'abord, nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à notre encadrant et enseignant, **M. Salim Attia**, dont l'aide et la contribution ont été précieuses dans l'élaboration de ce travail. Nous saluons également son implication totale et son apport intellectuel tout au long de cette année.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers **Mr. Belazzoug Massinissa** et **Mr. Messaouden Idriss** pour leurs conseils avisés et les échanges enrichissants qui nous ont grandement aidés.

Nous tenons à remercier chaleureusement tous les enseignants qui ont influencé notre parcours universitaire, ainsi que ceux qui ont eu l'honneur de participer au jury de soutenance.

Nous n'oublions pas de remercier **Nos parents** pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Introduction Générale

Dans le domaine des technologies de télécommunications modernes, la communication sans fil subit des exigences de plus en plus complexes en termes d'application plus performantes et plus diversifiées. La dernière décennie a été marquée par une croissance exponentielle du nombre d'applications sans fil au sein d'une panoplie de domaines tels que le multimédia, le GSM, la voix sur protocole Internet (VOIP), bande passante/vidéo à la demande (BOD/VOD), signalisation routière automatique, l'industrie, la recherche, Internet des Objets (IoT) et les appareils électroménagers intelligents. A cet effet, Les chercheurs et les industriels se sont engagés avec force dans la production de masse des appareils à radiofréquence (RF) portables et compacts tout en améliorant constamment les performances.

Le choix du type d'antennes utilisées dans les récepteurs et les émetteurs des systèmes de communication sans fils a dû subir continuellement des changements dans le but d'atteindre la meilleure adaptation possible aux nouvelles exigences qui s'imposent pour ces systèmes. De nos jours, l'antenne classique « Single Input Single Output » (SISO), à cause d'un bon nombre d'inconvénients n'arrive plus à servir efficacement la qualité de performance recommandée. Ce sont les antennes « Multi Input Multi Output » (MIMO), de par leurs caractéristiques très appropriées, qui ont pris la relève. En effet, la demande drastique d'antennes MIMO a attiré des chercheurs, des académiciens, et les industriels. Diverses technologies sans fil ont été intégrées avec la technologie MIMO pour améliorer les débits de données, la capacité et limiter la bande passante et la puissance dans la communication Non-Line-Of-Sight (NLOS).

MIMO répond au besoin moderne de débits de données variables et d'une bande passante évolutive pour chaque application sans fil. Néanmoins, en raison de l'espace limité, la question du couplage mutuel nécessite une attention particulière. Des conceptions MIMO solides avec des techniques de réduction de la diversité et du couplage mutuel sont donc nécessaires.

Dans ce travail on s'intéresse, plus particulièrement à la cinquième génération de réseaux mobiles sans fil (la 5G), caractérisée par un débit plus élevé, une latence plus faible et une capacité plus élevée que la 4G. De plus, la 5G promet également une plus grande fiabilité, une meilleure efficacité énergétique et une reconfiguration plus facile du réseau pour déployer des services supplémentaires.

Le but du présent travail est d'étudier en détail la conception d'une antenne 2×2 MIMO dédiée à la 5G disposant de quatre radiateurs et donc d'un certain nombre de chemins de couplage mutuels. A cet effet, on présentera dans le premier chapitre des connaissances générales sur la technologie 5G ainsi que les dernières étapes de son évolution. Dans le deuxième chapitre seront étudiées, en détail, les différentes caractéristiques des antennes MIMO. Par ailleurs, dans le dernier chapitre, les travaux, réalisés dans la référence.¹ concernant la conception d'antenne MIMO double bande Chargé de SRR pour les applications 5G seront investigués et les résultats de simulation s'y afférant seront validés. Les caractéristiques ainsi que les avantages de l'antenne MIMO proposée seront présentés et discutés. Une attention particulière sera donnée à la prise en charge du problème de couplage mutuel relatif à l'antenne MIMO proposée.

¹ Smith, J., & Doe, A. (2023). "Dual Band Millimeter Wave MIMO Antenna Loaded with SRRs for 5G

Liste de figures

Figure 1 : Schématisation historiques des différentes générations de réseaux mobiles.	11
Figure 2 :Fréquences allouées à la 5G	18
Figure 3 :Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.....	26
Figure 4 : Structure d'une antenne patch rectangulaire	28
Figure 5 : Différentes formes de l'antenne patch	29
Figure 6 : Architecture d'émetteur MIMO.....	34
Figure 7 : Architecture de récepteur mimo	35
Figure 8 : Caractéristiques de l'antenne unique proposée	40
Figure 9 :Diagrammes de rayonnement de l'antenne unique proposée avec SRR	40
Figure 10 : Antenne MIMO à structure d'antennes opposées	41
Figure 11 : Antenne MIMO à structure d'antennes perpendiculaire	42

Table de matière

Résumé	03
Remerciement	04
Introduction générale	05
Liste de figure	07
Chapitre 1 : Les réseaux mobile	
1.1 Introduction	11
1.2 Historique et présentation des réseaux mobiles	12
1.2.1 Première génération des téléphones mobile (1G)	12
1.2.2 Deuxième génération des téléphones mobiles (2G)	12
1.2.3 Troisième génération des téléphones mobiles [3G]	14
1.2.4 Quatrième génération des téléphones mobiles (4G)	15
1.2.5 Cinquième génération des téléphones mobiles (5G)	16
1.2.5.1 La 5G	16
1.2.5.2 Avantages	16
1.2.5.3 Les solutions envisagées pour la 5G	17
1.2.5.4 Caractéristiques de la 5G	17
1.2.5.4.1 Les fréquences utilisées	17
1.2.5.4.2 Modulation	18
1.2.5.4.3 Duplexage	18
1.2.5.4.4 Débits ultra-élevés	19
1.2.5.4.5 Efficacité énergétique	19
1.2.5.4.6 Débit moyen par utilisateur	20
1.2.5.4.7 Capacité de trafic par zone	20
1.2.5.4.8 Mobilité	21
1.2.5.4.9 Latence	21
Chapitre 2 : Les systèmes MIMO	
2.1 Introduction	24
2.2 Généralités sur les antennes	24
2.2.1 Bande de transmission	24
2.2.2 Définition d'une antenne	25
2.2.3 Caractéristiques générales d'une antenne	25

2.2.3.1 Diagramme de rayonnement	25
2.2.3.2 Angle d'ouverture	26
2.2.3.3 Ouverture rayonnante et Rendement	26
2.2.3.3.1 Ouverture rayonnante	26
2.2.3.3.2 Rendement	26
2.2.3.4 La directivité de l'antenne	26
2.2.3.5 Gain	27
2.2.3.6 Polarisation	27
2.2.4. Les antennes Patch.....	
2.2.4.1. Définition d'antenne Patch.....	28
2.3 SYSTEMES MIMO	29
2.3.1 Définition du MIMO	29
2.3.2 Applications de MIMO	28
2.3.3 Type de MIMO	30
2.3.4 Caractéristiques de MIMO	31
2.3.5 Architectures des systèmes MIMO	34
2.3.5.1 Emetteurs MIMO	34
2.3.5.2 Récepteurs MIMO	35
2.3.6 Les avantages de MIMO	35
2.3.7 L'application de MIMO dans la 5G	36
Chapitre 03 : Antenne proposée	
3.1 Introduction	38
3.2 Etat de l'art	38
3.3 Conception à antenne unique proposée	39
3.4 Conception MIMO à quatre ports	41
Conclusion	43

Chapitre 01 

Les Réseaux mobile

1.1.Introduction

L'avènement des technologies mobiles a marqué un tournant majeur dans l'histoire de la communication humaine, transformant radicalement la manière dont nous interagissons et percevons le monde qui nous entoure. De la première génération (1G) à la cinquième (5G), l'évolution des réseaux mobiles a été une saga fascinante, jalonnée d'innovations technologiques, de défis techniques et de répercussions sociétales considérables. Dans ce chapitre, nous entreprendrons un voyage captivant à travers l'histoire et les caractéristiques des générations mobiles, en explorant leur développement, leurs particularités techniques et leurs implications sur notre quotidien. En scrutant les origines modestes de la 1G jusqu'aux promesses révolutionnaires de la 5G, nous comprendrons mieux comment ces générations successives ont façonné notre expérience de la connectivité et anticiperons les enjeux et les opportunités à venir dans ce domaine en constante évolution. Dans ce chapitre nous plongerons dans une exploration approfondie de l'évolution, de l'histoire et des caractéristiques des générations mobiles, depuis l'avènement de la 1G jusqu'à l'ère actuelle de la 5G.

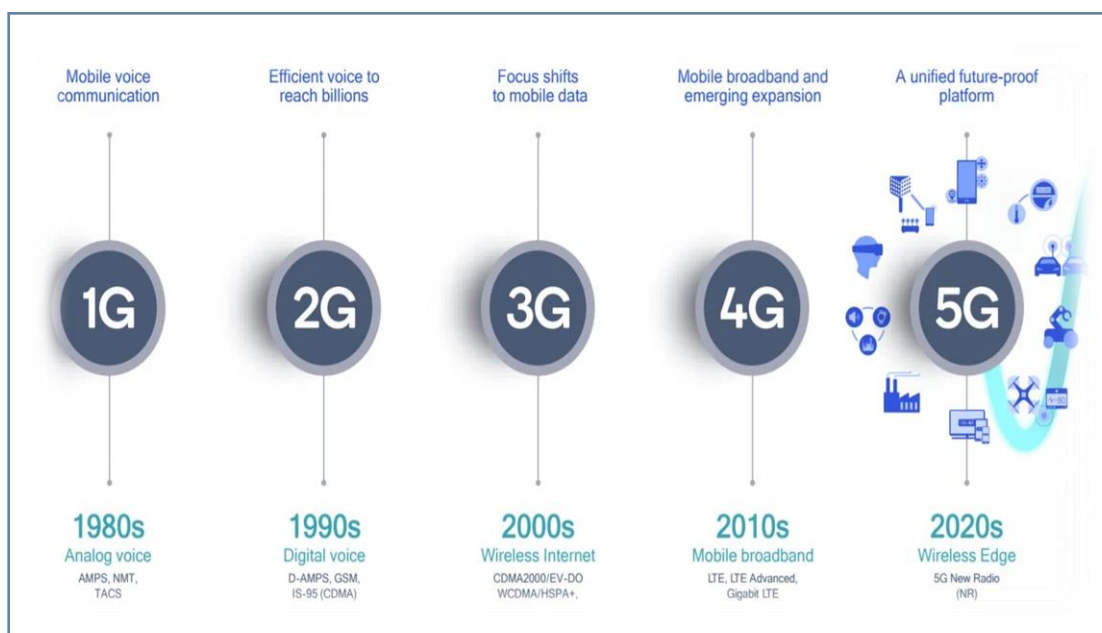


Figure 1.1 Schématisation historiques des différentes générations de réseaux mobiles.

Source : site français (frandroid) : Réseau 5G

1.2. Historique et présentation des réseaux mobiles

1.2.1. Première génération des téléphones mobile (1G)

La 1G est la première génération de technologie de communication mobile. Il a été formulé dans les années 1980. Il s'agit d'un système de téléphonie cellulaire sans fil basé sur la technologie analogique. Les systèmes sans fil 1G sont conçus pour transmettre uniquement le trafic vocal et sont limités par la capacité du réseau. AMPS est un représentant typique des réseaux 1G.²

Caractéristiques :

- Utilise des signaux radio analogiques pour la communication.
- Sa vitesse était simplement de 2,4 Kbps.
- Ne peut être utilisé que pour les appels vocaux.
- Avant la 1G, le téléphone nécessitait des connexions filaires pour la communication. Après ce développement, les gens leur était facile de sortir leur téléphone en plein air.
- La 1G a remplacé avec succès les technologies radio 0G, telles que le système de téléphonie mobile (MTS), le système de téléphonie mobile avancée (AMTS) et le Push to Talk (PTT), dominantes à cette époque.

La technologie *1G* utilisait un standard de réseau universel, appelé système AMPS (Advanced Mobile Phone System), qui prévaut encore de nos jours.³

Avantage :

- Première technologie sans fil commerciale.
- Répondait au besoin de téléphonie mobile.

Inconvénients :

- Faible vitesse de transfert de données (2,4 Kbps).
- Limité aux appels vocaux, sans possibilité de transmission de données.

1.2.2. Deuxième génération des téléphones mobiles (2G)

La 2G est la spécification technique de communication de téléphonie mobile de deuxième génération. Elle a changé le mode de communication analogique et a pris la technologie de transmission vocale numérique comme noyau, ouvrant la voie à la communication numérique.

² <https://fr.kbs-connector.com/info/what-is-1g-2g-3g-4g-5g-technology-61742042.html>

³ <https://fr.fibresplitter.com/news/difference-between-1g-2g-3g-vs-4g-and-5g-21559252.html>

Par rapport à la technologie de communication mobile (1G), la communication mobile (2G) présente un degré élevé de confidentialité et la capacité du système a été considérablement augmentée. En même temps, elle dispose de plus de services de transmission de données que la 1G. A partir de cette génération, les téléphones portables ont pu accéder à Internet. Les premiers messages texte SMS et messages multimédia (MMS) ont commencé également avec la 2G. Par ailleurs, l'ère 2G marque le début de la compétition pour les standards de communication mobiles. Le GSM (Global System for Mobile Communication), qui a débuté en Europe, est devenu le standard de communication mobile le plus largement adopté.⁴

Caractéristiques :

- Utilisation des signaux numériques pour la communication avec une tour radio.
- La vitesse de transfert du réseau 2G a été multipliée par plusieurs fois et a atteint un taux de transfert théoriquement maximal de 50 Kbps avec l'aide du service GPRS (General Packet Radio Service).
- La 2G nécessitait une faible charge de la batterie en raison de la faible consommation de celle-ci par les signaux numériques.
- Amélioration de la qualité du son et l'utilisateur ne fait face à aucun bruit de fond.
- Amélioration de la confidentialité des utilisateurs, les SMS et les MMS étant cryptés numériquement et seul l'utilisateur pouvant les ouvrir.
- Élimination de combinés clonés. La 2G a clôturé la possibilité de posséder deux combinés portant le même numéro et a donc mis fin à toute possibilité d'actes frauduleux impliquant deux numéros.

Avantage :

- Transition vers le numérique avec le GSM.
- Transmission de SMS et de sons à distance.

Inconvénients :

- Exposition élevée aux rayonnements des appareils.
- Limitations en termes de débit et de capacités de transmission de données.

Tonalité sonore réduite qui est dû à l'utilisation de la compression avec perte par les codes.

Les deux générations intermédiaires survenues entre la 2G et la 3G méritent aussi d'être mentionnées dans ce qui suit :

⁴ <https://fr.kbs-connector.com/info/what-is-1g-2g-3g-4g-5g-technology-61742042.html>

- 1- **La 2.5G**, défini comme 2G + GPRS, qui était plus efficace que ses prédécesseurs du fait qu'elle utilisait une technique de commutation de paquets en plus du domaine à commutation de circuits. Elle a permis une augmentation du taux de transfert de la technologie 2G et a facilité aux utilisateurs de naviguer sur le Web avec leurs téléphones portables.
- 2- **La 2,75G**, également appelés débits de données pour GSM Evolution améliorés (en anglais : Enhanced Data Rates for GSM Evolution : 'EDGE'). C'est plus rapide que le GPRS.

1.2.3. Troisième génération des téléphones mobiles [3G]

La 3G fait référence à un système de communication mobile de nouvelle génération qui combine la communication sans fil avec des communications multimédias telles qu'Internet. Le 7 janvier 2009, la Chine est entrée dans l'ère de la 3G en délivrant trois licences 3G, à savoir China Mobile's TD-SCDMA, China Unicom's W-CDMA et China Telecom's WCDMA2000.

La 3G dispose d'une bande passante plus élevée et d'une transmission stable. De plus la téléphonie vidéo et la transmission de données de masse sont plus courantes, et les communications mobiles ont également des applications plus diversifiées. En raison de la combinaison de la communication sans fil et d'Internet, les téléphones intelligents et les tablettes se sont développés rapidement avec la 3G qui fut alors considérée comme la clé pour ouvrir une nouvelle ère de communication mobile.⁵

Caractéristiques :

- La 3G offre une vitesse Internet rapide et qui dépend de la technologie utilisée par le fournisseur.
 - ✓ 144Kbps-2Mbps
 - ✓ WCDMA = 384Kbps
 - ✓ HSPA ou 3,5 G = 7,2 Mbps
 - ✓ HSPA+ ou 3,75 G = 21,6 Mbps
- Un Changement total du concept d'utilisation du téléphone mobile. Différentes applications mobiles telles que WhatsApp, IMO, peuvent être utilisées pour les appels vocaux et vidéo dans le monde entier. Un homme d'affaires peut envoyer et recevoir de

⁵ <https://fr.kbs-connector.com/info/what-is-1g-2g-3g-4g-5g-technology-61742042.html>

l'argent en utilisant les services bancaires par Internet uniquement à partir de son téléphone portable.

- **Un bon nombre de nouvelles applications** : GPS, télévision mobile, vidéo à la demande, vidéoconférence.
- **Nécessité d'une compatibilité avec l'appareil** : un utilisateur peut profiter d'une navigation Internet 3G uniquement sur des appareils compatibles 3G.
- **Nécessité d'abonnement** : un utilisateur doit contacter son fournisseur de services et s'abonner aux services 3G. Sinon, il ne pourra pas profiter de la communication 3G haute vitesse.⁶

Avantages :

- Offre de services de voix et de données à haut débit.
- Introduction de l'internet mobile et des smartphones.

Inconvénients :

- Débits variables selon les technologies utilisées.
- Limitations en termes de vitesse par rapport aux générations suivantes.

1.2.4. Quatrième génération des téléphones mobiles (4G)

La 4G n'est officiellement entrée dans la vue des gens qu'en 2013. Elle peut transmettre des images vidéo de haute qualité ainsi que des images de haute qualité. Dans l'ère de la 4G, les normes mondiales de communication mobile ont montré une tendance à une plus grande intégration. Son influence fondamentale sur le développement des réseaux mobiles est liée au fait d'être une technologie de communication spécialement conçue pour l'Internet mobile. En termes de vitesse, de capacité et de stabilité du réseau, la 4G s'est considérablement améliorée par rapport à la génération précédente (3G) et peut satisfaire presque tous les utilisateurs des services de communication sans fil. Par conséquent, des données telles que des images et des vidéos haute définition peuvent être transmises rapidement. L'Internet mobile a permis le développement d'industries et d'applications émergentes telles que le paiement mobile.⁷

Caractéristiques :

- La vitesse a été fixée au début de 2008 par l'UIT à 100 Mbps au minimum (en déplacement) et à 1 Gbps au maximum (à une position stationnaire).
- **Nouveaux champs d'applications** : TV HD, HD VOD, TV 3D et jeux.

⁶ <https://fr.kbs-connector.com/info/what-is-1g-2g-3g-4g-5g-technology-61742042.html>

⁷ <https://fr.kbs-connector.com/info/what-is-1g-2g-3g-4g-5g-technology-61742042.html>

A ce point on doit noter qu'à cause des difficultés d'atteindre le taux de transfert requis, l'organisme de réglementation avait introduit le LTE et LTE+ donnant naissance à la 4 G LTE qui est plus avancée en termes de taux de transfert.⁸

Avantages :

- Technologie avancée offrant des débits élevés.
- Prise en charge de services comme la TV HD et les jeux.

Inconvénients :

- Sensibilité à la congestion du réseau.
- Besoin d'une infrastructure adaptée pour des performances optimales.

1.2.5. Cinquième génération des téléphones mobiles (5G)

1.2.5.1. La 5G :

Alors que les générations précédentes de réseaux mobiles se sont principalement concentrées sur l'amélioration de la vitesse de transmission des données, la norme 5G se distingue en étant la seule capable de répondre aux besoins croissants de connectivité entre individus et objets (IoT (internet des objets)) au sein d'un environnement intelligent, notamment avec l'émergence de nouvelles applications telles que la réalité virtuelle.⁹

Du fait que la 5G constitue l'élément basique dans notre thème de recherche elle sera étudiée plus en détail dans la suite de ce chapitre.

1.2.5.2. Avantages :

Les avantages de la technologie 5G sont nombreux¹⁰; parmi les plus importants on peut citer :

- La réduction de la consommation d'énergie,
- Des débits plus élevés. En effet, comparativement à la 4G, la 5G offre des débits jusqu'à 10 fois supérieurs, facilitant ainsi des téléchargements, éditions et partages rapides de fichiers volumineux depuis des dispositifs mobiles.
- Une connectivité améliorée,
- L'optimisation du travail à distance et prolongation de la durée de vie des appareils.
- Une latence réduite permettant une transmission de données rapide et sans interruption.

⁸ <https://fr.fibresplitter.com/news/difference-between-1g-2g-3g-vs-4g-and-5g-21559252.html>

⁹ DAI, L., WANG, B., YUAN, Y., et al. "Non-orthogonal multiple access for 5G : solutions, challenges, opportunities, and future research trends," IEEE Communications Magazine, vol. 53, no 9, 2015, pp. 74-81.

¹⁰ DAI, L., WANG, B., YUAN, Y., et al. "Non-orthogonal multiple access for 5G : solutions, challenges, opportunities, and future research trends," IEEE Communications Magazine, vol. 53, no 9, 2015, pp. 74-81.

L'ensemble de ces avantages souligne la nécessité de technologies de pointe pour satisfaire les attentes des consommateurs tout en proposant des solutions rentables sur le plan de l'infrastructure.¹¹

1.2.5.3. Les solutions envisagées pour la 5G :

L'Arcep (l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse.) considère la 5G comme une avancée révolutionnaire qui va bien au-delà des limites des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, ouvrant ainsi la porte à de nouvelles opportunités. Cette technologie offre la possibilité d'accueillir une multitude d'applications et d'utilisations diverses, toutes convergentes au sein d'une même plateforme. En effet, la 5G est perçue comme un moteur essentiel de la transformation numérique de la société et de l'économie. Son objectif est de réaliser des progrès significatifs en termes de vitesse de transmission des données (en augmentant le débit jusqu'à 1000 fois plus rapide), de réduction des délais de transmission (en les réduisant à 1/45ème) et d'amélioration de la fiabilité des communications.¹²

1.2.5.4. Caractéristiques de la 5G :

1.2.5.4.1. Les fréquences utilisées

Le choix de la bande de fréquence pour les réseaux mobiles implique un équilibre délicat entre la couverture et la capacité. Les fréquences basses sont privilégiées pour étendre la couverture, car elles se propagent plus efficacement. En revanche, les fréquences élevées sont préférées pour augmenter la capacité, grâce à leur large bande passante permettant de gérer des volumes de trafic plus importants. Toutefois, il est crucial de noter que les fréquences élevées rencontrent des défis de propagation, notamment dans les espaces confinés où les signaux sont fortement atténués par les obstacles, réduisant ainsi leur portée. Par conséquent, le choix de la plage de fréquences doit être soigneusement évalué en fonction des exigences spécifiques de chaque service et des niveaux de qualité de service recherchés¹³⁻¹⁴. La figure 2 présente l'ensemble des bandes qui sont déjà opérationnelles ainsi que celles envisagées pour les futures utilisations.

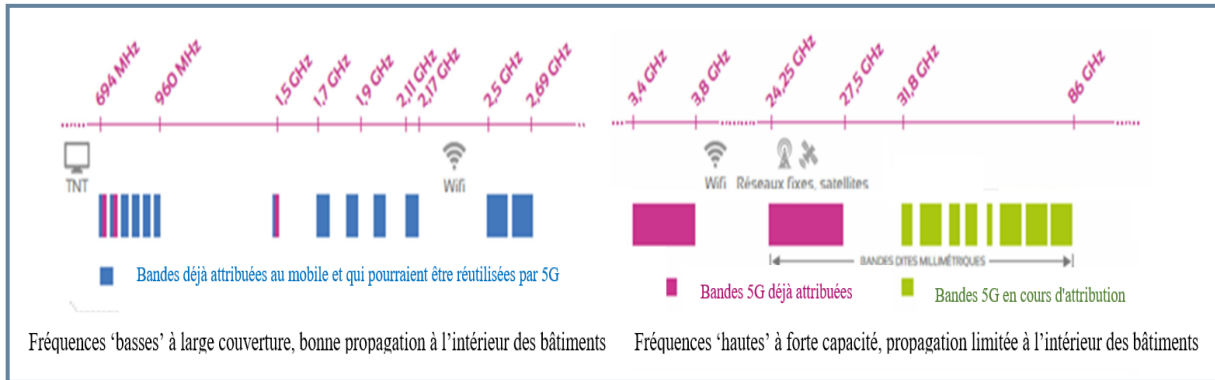
¹¹ DAI, L., WANG, B., YUAN, Y., et al. "Non-orthogonal multiple access for 5G : solutions, challenges, opportunities, and future research trends," IEEE Communications Magazine, vol. 53, no 9, 2015, pp. 74-81.

¹² ZHANG, P., YANG, X., CHEN, J., et al. "A survey of testing for 5G : Solutions, opportunities, and challenges," China Communications, vol. 16, no 1, 2019, pp. 69-85.

¹³ SIDDIQUE, U., TABASSUM, H., HOSSAIN, E., et al. "Wireless backhauling of 5G small cells: Challenges and solution approaches," IEEE Wireless Communications, vol. 22, no 5, 2015, pp. 22-31.

¹⁴Thèse doctorat Meriem Drissi 18/10/2023 univ Tunisie « Étude et conception d'antennes réseaux intelligente 5G pour les 'smal cell' »

Comme les pertes augmentent avec la fréquence, les bandes de fréquences les plus basses, en particulier 28 GHz et 38 GHz, sont préférées pour la communication. De plus, comme on verra dans le deuxième chapitre, des antennes à gain élevé et directives doivent être mise en œuvre avec un système d'antenne MIMO.



1.2.5.4.2. Modulation

La 5G, tout comme la 4G, utilise l'OFDMA, mais elle le fait avec une flexibilité accrue et une plus grande adaptabilité dans le découpage en termes de temps et de fréquence. Cela lui permet de répondre de manière plus efficace aux besoins diversifiés des utilisateurs.¹⁵ Avec la demande croissante de données pour les smartphones et l'avènement de nouvelles applications, notamment l'introduction de la réalité virtuelle, seule la nouvelle norme 5G peut répondre efficacement à ce besoin de connectivité entre individus et objets dans un environnement intelligent et interconnecté.

1.2.5.4.3. Duplexage

Le duplexage est le mode de transmission utilisé pour acheminer les données dans les deux sens, c'est-à-dire du côté de l'antenne relais vers l'utilisateur (sens descendant ou downlink) et du côté de l'utilisateur vers l'antenne relais (sens montant ou uplink). Dans les réseaux de téléphonie mobile 2G, 3G et 4G, le duplexage fréquentiel (FDD - Frequency Division Duplexing) est employé, ce qui implique une séparation des bandes de fréquences pour les transmissions en sens descendant et en sens montant. Ainsi, des blocs de fréquences sont spécifiquement assignés pour les transmissions downlink et d'autres blocs pour les

¹⁵ Saman. K.E, Sattar. O.H, Mudhaffer.M. A, "Microstrip patch antenna design, simulation and fabrication for 5G applications, Simulation Modelling Practice and Theory", Volume 116,2022.

transmissions uplink. Dans le cadre de la 5G, qui utilise déjà des bandes de fréquences allouées à la téléphonie mobile, le duplexage FDD sera également utilisé, assurant ainsi une séparation en fréquences des transmissions.¹⁶

1.2.5.4.4. Débits ultra-élevés

Les débits ultra-élevés se réfèrent à des vitesses de transmission de données largement supérieures à celles actuellement observées dans les réseaux mobiles. Le standard IMT-2020, qui établit les spécifications techniques de la 5G, fixe un débit maximal de 10 Gbit/s pour le haut débit mobile amélioré. Cependant, dans certaines situations telles que des environnements à faible densité d'utilisateurs et une utilisation optimale des fréquences, il est possible d'atteindre des débits encore plus élevés.¹⁷

1.2.5.4.5. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique se mesure par la quantité d'informations transmises pour chaque unité d'énergie consommée, exprimée en bit par joule. Une meilleure efficacité énergétique indique que le réseau peut fournir les mêmes services tout en consommant moins d'énergie. Cela peut avoir un impact bénéfique sur l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. La 5G est prévue pour apporter une amélioration significative de l'efficacité énergétique par rapport à la 4G, grâce à divers facteurs, notamment :

- L'utilisation de bandes de fréquences plus élevées, qui permettent de transmettre plus de données avec moins d'énergie.
- L'introduction de nouvelles technologies, telles que « beamforming » et le MIMO, qui permettent d'améliorer l'efficacité énergétique des réseaux 5G.
- L'utilisation de techniques de veille et de commutation de puissance, qui permettent de réduire la consommation d'énergie lorsque les appareils ne sont pas utilisés.

En améliorant l'efficacité énergétique par rapport à la 4G, les technologies de communication sans fil de nouvelle génération, comme la 5G, ont le potentiel d'augmenter considérablement la durée de vie des batteries des objets connectés, pouvant être jusqu'à 100 fois moins énergivores, tout en offrant des performances améliorées. Des efforts importants sont déployés pour optimiser l'efficacité énergétique sans compromettre les performances du réseau et des dispositifs. En effet, selon l'opérateur Huawei et le directeur du domaine de recherche connectivité ambiante d'Orange, la 5G se distingue par une plus grande efficacité, ce qui signifie

¹⁶ AMROUCHE, M. "La 5G pour l'Internet des Objets (IoT) : une révolution pour une nouvelle ère. Défis et challenges," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2020.

¹⁷ GE, X., YANG, J., GHARAVI, H., et al. "Energy efficiency challenges of 5G small cell networks," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no 5, 2017, pp. 184-191.

qu'elle consomme moins d'énergie pour traiter un volume équivalent de données. Concrètement, grâce à ce nouveau réseau mobile, il sera possible de faire transiter quatre fois plus de données sans que la consommation d'énergie ne soit accrue.¹⁸

1.2.5.4.6. Débit moyen par utilisateur

Le débit moyen par utilisateur représente la quantité moyenne de données qu'un utilisateur peut recevoir, exprimée en bits correctement reçus. Il revêt une importance particulière pour les applications nécessitant un transfert de données rapide, telles que le streaming vidéo, les jeux en ligne et la réalité virtuelle. Selon les spécifications techniques définies par l'IMT-2020 pour la 5G, le débit moyen par utilisateur visé varie en fonction des zones géographiques : il est prévu d'atteindre 100 Mbps dans les environnements urbains et suburbains, et au moins 10 Mbps partout ailleurs. Pour répondre à ces exigences, différentes technologies ont été développées, comprenant des améliorations dans les techniques de modulation et de codage, l'utilisation de fréquences plus élevées, le déploiement de petites cellules, la mise en œuvre de techniques de formation de faisceaux (beamforming) pour concentrer la puissance du signal, et l'optimisation des protocoles de communication.¹⁹

1.2.5.4.7. Capacité de trafic par zone

La capacité de trafic par zone se réfère au débit total de trafic desservi dans une zone géographique donnée, exprimé en Mbit/s/m². Les zones urbaines et les lieux très fréquentés comme les concerts et les stades sont des endroits privilégiés pour une densification du réseau en raison de la concentration élevée d'utilisateurs. Par exemple, la densité d'utilisateurs dans un stade peut atteindre 2 millions/km², soit deux utilisateurs par mètre carré. Même si seulement 10 % des utilisateurs sont actifs, le réseau doit être capable de prendre en charge 200 000 utilisateurs actifs/km². Pour répondre de manière rentable à cette demande de trafic, la 5G doit offrir des solutions permettant d'augmenter la capacité de 1 000 à 10 000 fois dans les zones à forte demande. Cette exigence est considérée comme l'une des plus cruciales et des plus difficiles à satisfaire pour les réseaux futurs.²⁰

¹⁸ GE, X., YANG, J., GHARAVI, H., et al. "Energy efficiency challenges of 5G small cell networks," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no 5, 2017, pp. 184-191.

¹⁹ ALVES, H., SOUZA, R. D., et PELLENZ, M. E. "Brief survey on full-duplex relaying and its applications on 5G," In Proceedings of the 2015 IEEE 20th International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), IEEE, 2015, pp. 17-21.

²⁰ PIRINEN, P., "A brief overview of 5G research activities," In Proceedings of the 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity, IEEE, pp. 17-22,2014.]

1.2.5.4.8. Mobilité

La mobilité représente l'une des exigences les plus critiques et les plus complexes pour les futurs réseaux. Pour la 5G, maintenir un niveau de qualité de service optimal dans des situations de mobilité à grande vitesse est essentiel, en particulier pour le développement des véhicules autonomes.

La 5G prend en charge quatre classes de mobilité, catégorisées en fonction de la vitesse maximale à laquelle un utilisateur peut se déplacer tout en conservant une connexion stable.

Ces classes sont définies comme suit :

- Stationnaire : 0 km/h
- Piéton : 0 km/h à 10 km/h
- Véhicule : 10 km/h à 120 km/h
- Véhicule à grande vitesse : de 120 km/h à 500 km/h

La classe 1 est la plus facile à gérer, car les utilisateurs se déplacent lentement et la propagation du signal est relativement stable. Les classes 2 et 3 sont plus complexes, car les utilisateurs se déplacent à des vitesses plus élevées, entraînant une propagation du signal plus volatile. La classe 4 est la plus difficile à prendre en charge, car les utilisateurs se déplacent à des vitesses très élevées, ce qui rend la propagation du signal très instable.

Pour améliorer la mobilité, la 5G utilise plusieurs technologies telles que le beamforming, le MIMO et l'extension de la bande passante.²¹

1.2.5.4.9. Latence

La latence représente le laps de temps entre l'envoi d'un paquet de données par la source et sa réception par la destination à travers le réseau radio, mesurée en millisecondes (ms). Une latence minimale est cruciale pour les applications exigeant une réponse immédiate, comme la télémédecine, la conduite autonome et la réalité augmentée.²²

L'IMT-2020, qui définit les spécifications techniques de la 5G, vise à fournir une latence de 1 ms via les voies hertziennes (OTA). Pour répondre à cette exigence, différentes technologies ont été développées, notamment :

L'IMT-2020, responsable de l'élaboration des spécifications techniques de la 5G, vise à garantir une latence de 1 ms via les voies hertziennes (OTA). Pour satisfaire à cette exigence, diverses technologies ont été développées, notamment :

²¹ Thèse doctorat Meriem Drissi 18/10/2023 univ Tunisie « Étude et conception d'antennes réseaux intelligente 5G pour les 'small cell' »

²² DEBAILLIE, B., et al., "In-band full-duplex transceiver technology for 5G mobile networks," in Proceedings of the European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC), Octobre 2015, pp. 84-87.

- **Le Full Duplex :** Le Full Duplex permet aux stations de base d'émettre et de recevoir des données en même temps, ce qui double la capacité du réseau.
- **Le Massive MIMO :** Le Massive MIMO utilise de nombreuses antennes pour transmettre et recevoir des données, ce qui permet d'améliorer la qualité du signal et de réduire la latence.
- **Les Small Cells :** Les Small Cells sont de petites stations de base qui sont installées à proximité des utilisateurs, ce qui permet d'améliorer la couverture et la capacité du réseau.

Chapitre 02 
Les systèmes MIMO

2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous plongerons dans l'univers passionnant des systèmes MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), une technologie révolutionnaire qui a profondément transformé le paysage des communications sans fil. Les systèmes MIMO, en exploitant intelligemment plusieurs antennes à la fois pour l'émission et la réception des signaux, représentent une avancée majeure dans l'optimisation des performances des réseaux sans fil. Notre exploration débutera par une analyse approfondie des principes fondamentaux sous-tendant les systèmes MIMO, mettant en lumière leur fonctionnement, leurs avantages et leurs limitations. Nous examinerons ensuite l'évolution historique de cette technologie, depuis ses premiers concepts théoriques jusqu'à son déploiement à grande échelle dans les réseaux de communication actuels. En outre, nous aborderons les différentes techniques et méthodes de traitement de signal utilisées dans les systèmes MIMO pour améliorer la qualité de la transmission, optimiser l'utilisation du spectre et augmenter les débits de données. Enfin, nous nous pencherons sur les perspectives d'avenir des systèmes MIMO, en explorant les défis technologiques à relever et les opportunités d'innovation dans un contexte de développement rapide des réseaux 5G et au-delà. À travers cette plongée approfondie dans les systèmes MIMO, nous aspirons à éclairer les lecteurs sur les avancées révolutionnaires et les implications de cette technologie pour les communications sans fil modernes.

2.2. Généralités sur les antennes

2.2.1. Bande de transmission :

Plusieurs classifications de bandes de transmission sont disponibles, chacune étant définie par sa longueur d'onde spécifique ou par l'antenne utilisée.

- Pour un grand nombre d'applications, on peut citer : ²³
Les ondes kilométriques (30KHz-300KHz) et hectométriques (300KHz-3MHz) sont employées dans la radiodiffusion à modulation d'amplitude ainsi que dans les liaisons avec les sous-marins.
- Les ondes décamétriques (3 MHz - 30 MHz) sont employées pour les communications radios intercontinentales ou maritimes.
- Les ondes métriques (30 MHz - 300 MHz) sont exploitées dans la radiodiffusion à modulation de fréquence, la télévision et la radionavigation.

²³ P. F. Combes, «Circuits Passifs, Propagation, Antennes,» Micro-ondes Tome 2, Dunod, 1997

- Les ondes décimétriques (300 MHz - 3 GHz) sont employées dans la télévision, le radar et les communications avec les téléphones mobiles.
- Les ondes centimétriques (3 GHz - 30 GHz) sont mises à profit dans les communications terrestres par faisceaux hertziens, les liaisons spatiales avec les satellites artificiels ou les sondes spatiales, la radiodiffusion, la télédétection par satellite artificiel, et autres applications.
- Les ondes millimétriques (30 GHz - 300 GHz) sont exploitées en radioastronomie et dans certains radars. Leur utilisation est également motivée par la congestion du domaine des radiofréquences et des hyperfréquences.

Concernant la technologie 5G, d'après la figure (2), on constate que toute la bande millimétrique allant jusqu'à 86 GHz est en cours d'attribution.

2.2.2. Définition d'une antenne :

Le terme "antenne" désigne tout dispositif qui convertit l'énergie électrique en énergie électromagnétique lors de l'émission ou de la réception, facilitant ainsi la transmission de l'information. Elles peuvent être perçues comme des adaptateurs d'impédance entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur.²⁴

2.2.3. Caractéristiques générales d'une antenne

Elles sont définies par rapport à une source de référence, qui est une source ponctuelle émettant sa puissance d'alimentation de manière uniforme dans toutes les directions, ce qui constitue la source de référence idéale.²⁵

La puissance rayonnée $P_o(\theta, \varphi)$ par unité d'angle solide, dans une direction spécifique définie par les deux angles (θ, φ) , est exprimée par la relation suivante :

$P_o(\theta, \varphi) = P_a / (4\pi)$, où P_a représente la puissance d'alimentation.

2.2.3.1. Diagramme de rayonnement

Sauf pour les antennes omnidirectionnelles dans certains plans, les antennes ne diffusent pas leur puissance de manière uniforme dans toutes les directions de l'espace. Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente donc les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. Habituellement, une grande partie de

²⁴ Thèse doctorat Abderahman Agouzoul out 2013 « Conception et réalisation d'une antenne à résonateur diélectrique à 60 GHz pour les applications souterraines »

²⁵ P. F. Combes, « Circuits Passifs, Propagation, Antennes, " Micro-ondes Tome 2, Dunod, 1997. »

la puissance rayonnée est concentrée autour d'une direction de rayonnement maximale, tandis que le reste est réparti autour de directions secondaires.

2.2.3.2. Angle d'ouverture

Cet angle représente la séparation entre les deux directions du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximale.

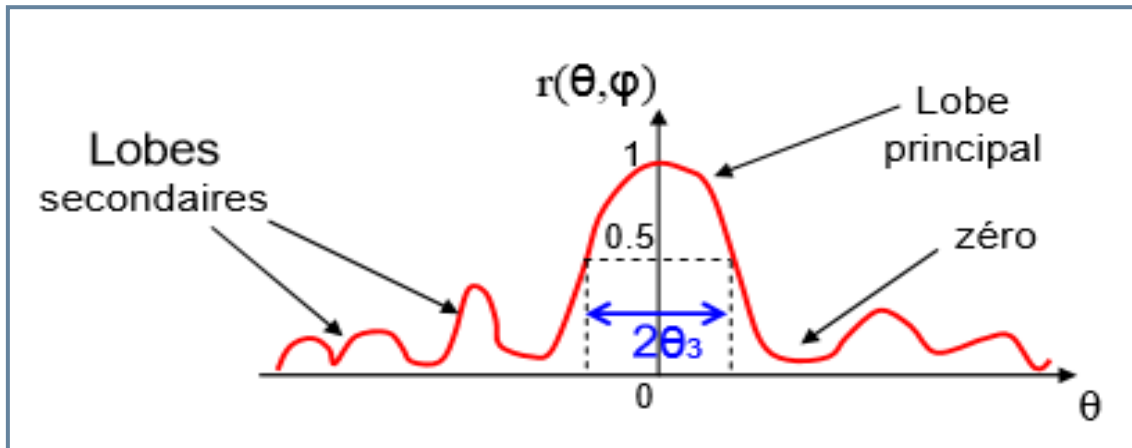


Figure 3: Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.

Source : https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-rayonnement-et-angle-douverture_fig3_331478338

2.2.3.3. Ouverture rayonnante et Rendement

2.2.3.3.1. Ouverture rayonnante :

C'est la surface effective de rayonnement d'une antenne, qui correspond également à la surface qui reçoit l'énergie des ondes électromagnétiques transmises.

2.2.3.3.2. Rendement :

Dans le cas d'une antenne donnée, la puissance rayonnée P est généralement inférieure à la puissance d'alimentation P_a . Le rendement de l'antenne est ainsi défini comme le rapport entre la puissance totale P qu'elle émet et sa puissance d'alimentation P_a .

Le rendement (η) est défini comme suit : $\eta = P/P_a$

2.2.3.4. La directivité de l'antenne

La directivité d'une antenne indique les directions où la densité de puissance est meilleure ou moins bonne que celle d'une antenne isotrope.²⁶ Elle est calculée comme le rapport entre la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans une direction spécifique (θ, φ) et la puissance

²⁶ Thèse doctorat Abderahman Agouzoul out 2013 « Conception et réalisation d'une antenne à résonateur diélectrique à 60 GHz pour les applications souterraines »

qui serait rayonnée par une source isotrope de référence par unité d'angle, pour une même puissance totale rayonnée. La formule est la suivante :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{(4\pi * P(\theta, \varphi))}{(T * Pa)}$$

2.2.3.5. Gain

En général, une antenne émet une puissance qui varie en fonction de la direction considérée. Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction spécifique (θ, φ) est le rapport entre la puissance $P(\theta, \varphi)$ dans cette direction et la puissance $P_0(\theta, \varphi)$ qui serait rayonnée par une source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation. Il est défini par la relation suivante :

$G(\theta, \varphi) = (4\pi * P(\theta, \varphi)) / Pa$. Le gain et la directivité sont liés par l'équation suivante :

$$G(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) / \eta.^{27}$$

2.2.3.6. Polarisation

La polarisation d'une antenne est déterminée par la direction du champ électrique E . Elle est considérée comme rectiligne lorsque la direction du champ électrique reste constante dans le temps. Par exemple, les antennes dipôles rayonnantes utilisées en ondes métriques et décimétriques présentent une polarisation rectiligne

Cependant, il existe des antennes qui émettent un champ électrique dont la direction varie avec le temps. Dans ce cas, lors de la représentation schématique des positions successives de E , l'extrémité du vecteur représentatif décrit un cercle ou une ellipse. Le champ rayonné est alors qualifié de polarisation circulaire (CP) ou elliptique. Ces types de polarisation sont couramment observés dans les antennes utilisées en radars et en télécommunications spatiales.²⁸

²⁷ Thèse doctorat Abderahman Agouzoul out 2013 « Conception et réalisation d'une antenne à résonateur diélectrique à 60 GHz pour les applications souterraines».

²⁸ P. F. Combes, «Circuits Passifs, Propagation, Antennes," Micro-ondes Tome 2, Dunod, 1997.

2.2.4. Les antennes patch

L'évolution du domaine des télécommunications a mis en évidence la nécessité croissante de développer des dispositifs micro-ondes à la fois économiques et compacts, utilisant une technologie facile à manipuler. Les systèmes micro-ondes à structure micro-ruban ont ainsi conduit à la création des antennes imprimées.

Les antennes imprimées sont largement utilisées car elles répondent à de nombreuses contraintes des systèmes de transmission. Leur petite taille facilite leur intégration sur divers appareils mobiles, tels que les téléphones portables et les avions.

Ce chapitre propose une présentation générale des antennes patches, en détaillant leurs caractéristiques, les différentes méthodes d'alimentation, et leur principe de fonctionnement, pour finir par aborder leurs avantages et limitations.

2.2.4.1. Définition d'antenne patch :

Une antenne patch est une ligne microbande constituée d'une pièce métallique rayonnante (matériau conducteur, patch ou élément rayonnant) de forme arbitraire, déposée sur un substrat diélectrique. Un plan de masse recouvre la surface inférieure de ce substrat.

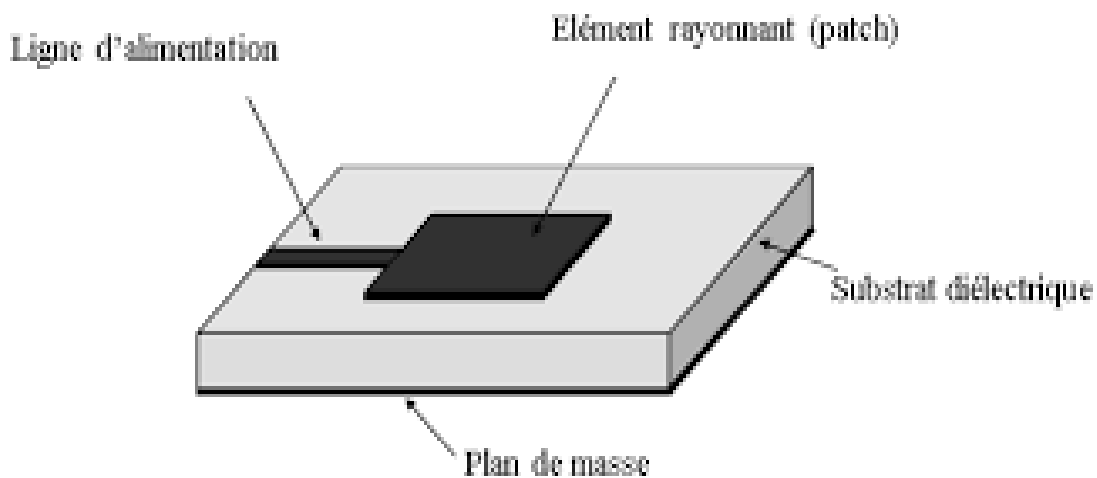


Figure 4: Structure d'une antenne patch rectangulaire
Source : Auteur

Le patch est généralement fabriqué à partir d'un matériau conducteur comme le cuivre ou l'or, et peut prendre diverses formes. L'élément rayonnant et les lignes d'alimentation sont photogravés sur le substrat diélectrique.^{29 30}

²⁹] G. Kumar and K. P. Ray, "Broadband microstrip antennas," Artech House Boston. London 2003

³⁰ V. Planisamy and R. Garg, "Analysis of arbitrarily shaped microstrip patch antennas using segmentation technique and cavity model," IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. AP-34, N°. 10, Octobre 1986.

L'antenne patch rectangulaire est la plus courante, car elle est facile à modéliser et permet de comprendre les mécanismes de rayonnement des antennes microbandes.

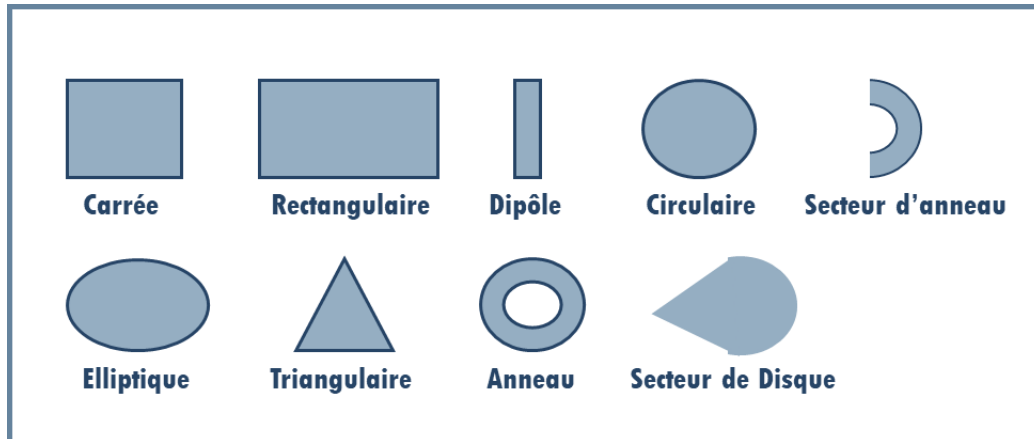


Figure 5: Différentes formes de l'antenne patch
Source : Auteur

2.3.SYSTEMES MIMO

2.3.1. Définition du MIMO

MIMO (Multiple Input/Multiple Output) est un concept dans les réseaux sans fil qui implique l'exploitation d'antennes multiples à la fois au niveau de l'émetteur et du récepteur. Cette approche vise à accroître le débit de données tout en améliorant la portée et la fiabilité des communications. Les bénéfices du MIMO incluent des performances réseau supérieures sur de plus longues distances et une réduction des interférences grâce à l'utilisation d'antennes multiples.³¹

2.3.2. Applications de MIMO

Les fonctions MIMO sont classées dans les catégories principales suivantes :

1. **Précodage** : Dans le cadre du MIMO avec plusieurs antennes, le signal est transmis de manière à maximiser sa puissance au récepteur. Ce processus, appelé précodage, implique l'utilisation de valeurs appropriées de gain et de phase. Il peut également être désigné sous les termes de formage de faisceau ou de flux unique. Le précodage consiste en une combinaison de plusieurs flux, d'où son appellation de formage de faisceau multi-flux. Pour tirer parti du précodage, il est essentiel que l'émetteur et le récepteur disposent de l'information d'état du canal ((CSI) pour Channel State Information en anglais). Au récepteur, les différents flux se combinent de manière constructive pour améliorer le gain, permettant de contrôler les effets néfastes de la propagation multi-

³¹ <https://www.capterra.fr/glossary/1003/mimo-multiple-inputmultiple-output>

trajets. Contrairement au formage de faisceau de transmission qui utilise des faisceaux conventionnels et ne peut égaliser le gain au récepteur, le précodage est privilégié dans les systèmes sans fil modernes.

2. **Multiplexage spatial (SM)** : Dans le domaine des communications sans fil, le multiplexage spatial désigne la transmission de flux de données uniques et indépendants, chacun étant codé de manière unique et utilisant des antennes distinctes. Au niveau du récepteur, ces flux sont traités comme des canaux parallèles en raison de la signature spatiale propre à chaque émetteur. Le nombre de flux dépend directement du nombre d'émetteurs impliqués. Le multiplexage spatial sans l'information d'état du canal (CSI) améliore la capacité du canal, tandis que le multiplexage spatial avec précodage vise à maximiser le gain au récepteur et à accroître la capacité. Cette technique peut être mise en œuvre dans les systèmes d'accès multiple par répartition dans l'espace ainsi que dans les systèmes MIMO multi-utilisateurs, avec une diversité de méthodes de transmission.³²
3. **Codage de diversité** : Dans cette méthode, le codage espace-temps est employé pour l'encodage du flux de signal, avec un seul flux émis par chaque émetteur. En combinant le codage de diversité avec le multiplexage, on peut améliorer les performances du canal sans fil.

2.3.3. Types de MIMO

1. **MIMO pour un seul utilisateur (SU-MIMO)** : Lorsqu'une seule station de base équipée de la technologie MIMO communique avec un seul récepteur également équipé de MIMO, on parle de MIMO pour un seul utilisateur. Le SU-MIMO a été introduit lors de la troisième génération en 2009, avec un débit de données de 384 kbps. Le SU-MIMO, même sans information sur l'état du canal (CSI), est capable d'offrir un débit de données élevé, de réduire les interférences et d'améliorer le débit dans des conditions de faible rapport signal/bruit (SNR). Il est particulièrement adapté aux smartphones hautement sophistiqués dotés de plusieurs antennes de réception.³³
2. **MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO)** : Le MU-MIMO désigne la communication entre un ensemble de stations de base équipées de la technologie MIMO et un utilisateur unique ou plusieurs utilisateurs. Il permet à plusieurs utilisateurs d'accéder simultanément au

³² Noha Hassan and Xavier Fernando, 'Massive MIMO Wireless Networks: An Overview,' Electronics, vol. 63, no. 6, pp. 1–29, 2017.

³³ Noha Hassan and Xavier Fernando, 'Massive MIMO Wireless Networks: An Overview,' Electronics, vol. 63, no. 6, pp. 1–29, 2017.

réseau, similairement à l'accès multiple par répartition orthogonale des fréquences (OFDMA). Introduit avec la quatrième génération en 2012, le MU-MIMO offre un débit de données de 100 Mbps. Grâce au multiplexage multi-utilisateur, il génère un gain direct, tout en étant moins impacté par les pertes de liaison et les problèmes de couplage mutuel. Toutefois, le MU-MIMO requiert une connaissance parfaite de l'état du canal pour optimiser la capacité, le multiplexage et le débit, surtout dans des conditions de rapport signal/bruit (SNR) élevé. Cette exigence de CSI permet une utilisation maximale de la largeur de bande disponible. Différentes variantes du MU-MIMO, telles que le SDMA, le MIMO massif, le MIMO multi-point coordonné et le MIMO ad-hoc, permettent de fournir une variété de services à plusieurs utilisateurs. Le MU-MIMO a été intégré aux normes 3GPP et WiMAX par plusieurs entreprises telles que Samsung, Ericsson, Nokia et Intel, entre autres. Il est adapté aux téléphones mobiles moins complexes équipés de moins d'antennes de réception, mais une version améliorée nécessite des techniques de décodage et de précodage avancées. Le MU-MIMO est principalement conçu pour les duplexages par répartition dans le temps (TDD) et de fréquence (FDD).³⁴

3. Le MIMO point à point est facile à mettre en œuvre mais fortement affecté par les conditions de propagation. Moins de temps est nécessaire pour l'information sur l'état du canal (CSI) ici, mais la sélection de l'utilisateur n'est pas flexible dans le MIMO point à point. De plus, le précodage complexe, le gain de débit moins élevé, un taux d'erreur plus élevé, et seule l'information sur l'état du canal en liaison montante sont certaines limitations du MIMO point à point.³⁵

2.3.4. Caractéristiques de MIMO

Dans le cadre du MU-MIMO, il est essentiel de disposer de connaissances sur l'CSI tant en liaison montante qu'en liaison descendante afin de prédire le canal. Le MU-MIMO est moins sensible aux variations environnementales et offre une plus grande souplesse dans la sélection des utilisateurs. De plus, il permet d'atteindre un débit plus élevé, un taux d'erreur réduit, mais il implique également une complexité croissante en termes de codage et de décodage. L'acquisition de l'CSI nécessite un temps suffisant et le MU-MIMO utilise des techniques de précodage simples.³⁶

³⁴ Noha Hassan and Xavier Fernando, 'Massive MIMO Wireless Networks: An Overview,' *Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 1–29, 2017.

³⁵ Noha Hassan and Xavier Fernando, 'Massive MIMO Wireless Networks: An Overview,' *Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 1–29, 2017.

³⁶ T. L. Marzetta, 'Massive MIMO : An Introduction,' *Bell Labs Tech. J.*, vol. 20, pp. 11–20, 2015.

À l'heure actuelle, avec l'essor technologique, le MIMO est perçu comme un pilier des applications sans fil tant en intérieur qu'en extérieur. Il propose une multitude d'applications répondant aux exigences suivantes :

1- Amélioration du débit de données :

Le MIMO, caractérisé par une faible largeur de bande et une efficacité spectrale élevée, résout les défis rencontrés par les utilisateurs à la fois à haute et basse vitesse. En utilisant le MIMO, il est possible d'atteindre un débit de données de 1 Gbit/s avec une bande passante de seulement 20 MHz. En combinant différentes techniques de modulation telles que la modulation par décalage de phase binaire (BPSK), la modulation par décalage de phase en quadrature (QPSK) et la modulation d'amplitude en quadrature (QAM), le MIMO offre une gamme étendue de débits de données.

2- Extension de portée :

Les réflexions multitrajets, la diffraction et la diffusion sont elles-mêmes responsables de l'extension de portée. En raison de ces propriétés, le signal atteint l'objet désiré.

3- Large étendue de couverture :

L'augmentation du débit de données conduit à une couverture étendue. En augmentant le débit de données, un nombre croissant d'utilisateurs peut être pris en charge. De plus, le spectre du MIMO est capable d'atteindre de longues distances.

4- Efficacité spectrale élevée :

En raison de son efficacité spectrale très faible, le SISO nécessite une large bande passante pour atteindre un débit de données élevé. En revanche, le MIMO offre une efficacité spectrale très élevée.

5- Économie de la largeur de bande :

Alors que le SISO nécessite une largeur de bande très étendue pour atteindre un débit de données élevé, le MIMO parvient à obtenir un débit de données élevé avec une bande passante considérablement réduite. La technologie 4G LTE offre une bande passante évolutive adaptée à diverses configurations de liaisons montantes et descendantes en **TDD** et **FDD**.

6- Économie d'énergie :

La consommation d'énergie en SISO dépend du rapport signal/bruit (SNR). Comparativement au SISO, le MIMO consomme moins d'énergie, ce qui permet des économies d'énergie pour les applications sans fil.

7- Augmentation de la capacité :

Le MIMO offre une capacité très élevée qui n'est pas entièrement dépendante de la largeur de bande. Sa capacité augmente de manière linéaire, la capacité est influencée par le rapport signal/bruit. Par conséquent, dans les environnements de propagation multitrajets, l'CSI joue un rôle crucial dans la détermination de la capacité effective du système.

8- Fiabilité de la liaison et amélioration des services dédiés :

Malgré une propagation complexe à trajets multiples, le MIMO garantit la fiabilité de la liaison et des liaisons dédiées grâce à l'utilisation de techniques de diversité de motifs et de polarisation. Il se distingue également par des délais courts, une latence réduite et un gain élevé, offrant ainsi des services de haute qualité.

9- Rééquilibrage de la polarisation :

Les antennes à polarisation circulaire (CP) du MIMO assurent la réception des signaux dans les directions verticales et horizontales, sans être affectées par la polarisation de l'émetteur.

10- Utilisations sans fil :

MIMO-LTE, WLAN-MIMO, WiMAX-MIMO, MIMO-UWB, MIMO-OFDM, MIMO-OFDMA, MIMO-SDMA, MIMO-beamforming, SU-MIMO, MU-MIMO, Massive MIMO sont quelques-unes des applications du MIMO avec les normes sans fil actuelles. Chaque jour, l'importance des applications MIMO augmente en raison de leurs caractéristiques.

11- Le radar MIMO

Il constitue une réponse aux limites d'identification du radar à antenne unique. Il a récemment captivé les utilisateurs pour la détection, l'estimation et l'identification. Le MIMO est également utilisé dans d'autres applications radar telles que le radar à ouverture synthétique et l'imagerie radar.

12- Communication filaire :

L'UIT-T G.9963 illustre un exemple de communication par courant porteur qui exploite le MIMO pour véhiculer des signaux à travers plusieurs fils alternatifs, incluant la phase, le neutre et la terre.³⁷

³⁷ Leeladhar Malviya, Rajib Kumar Panigrahi, M.V. Kartikeyan « MIMO ANTENNAS FOR WIRELESS COMMUNICATION - Theory and Design » Livre; published in 2021 by CRC Press.

2.3.5. Architectures des systèmes MIMO

2.3.5.1. Émetteurs MIMO

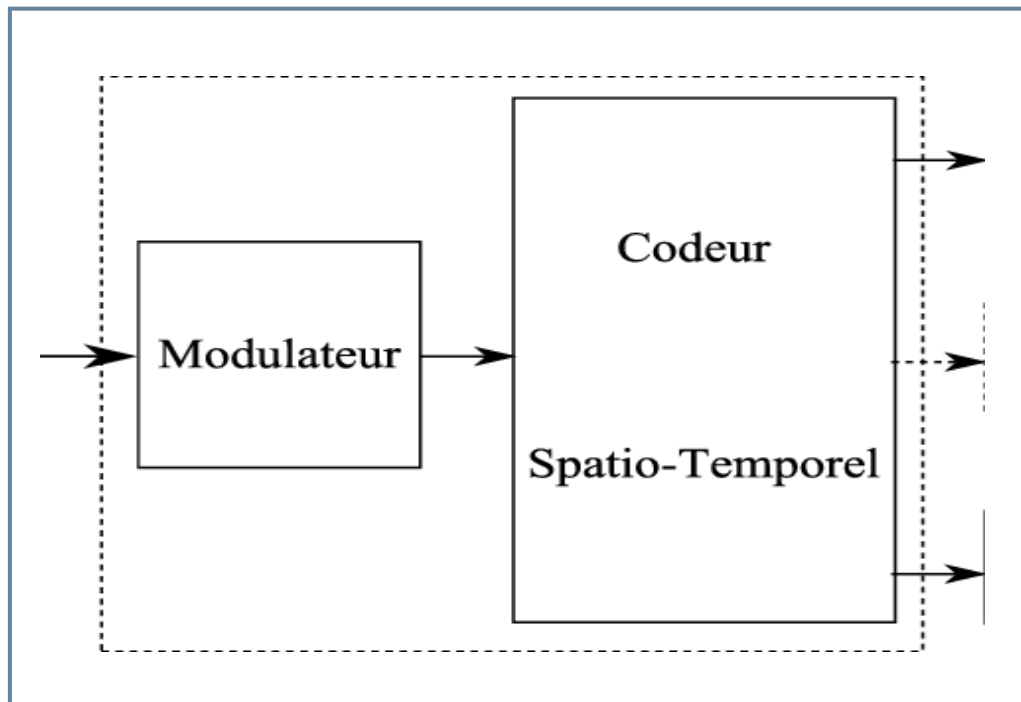


Figure 6: Architecture d'un antenne émetteur

Source : <https://www.researchgate.net>

L'architecture d'un émetteur MIMO commence par la représentation initiale du message à transmettre sous forme d'un flux binaire, une séquence de 0 ou de 1. Ce flux binaire est ensuite dirigé vers un modulateur qui le transforme en symboles. Une fois modulés, ces symboles sont répartis en n flux d'échantillons par le codeur spatio-temporel.

Enfin, le dispositif radiofréquence se charge de convertir chaque flux en ondes électromagnétiques.

2.3.5.2. Récepteurs MIMO

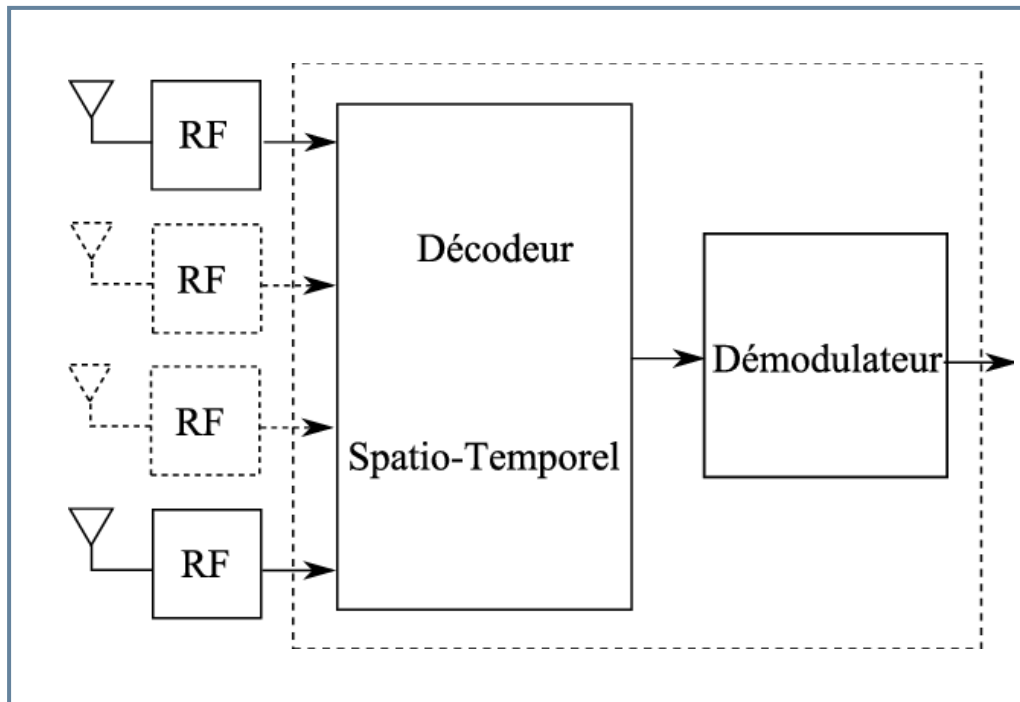


Figure 7 : Architecture d'un antenne récepteur
Source : <https://www.researchgate.net>

Architecture d'un récepteur MIMO : Lors de la réception, à la fois l'émetteur et le standard utilisé sont identifiés. Ce standard prévoit notamment l'envoi de trames pilotes, qui permettent au récepteur d'évaluer le canal de transmission. En tirant parti de ces données, le récepteur utilise les décodeurs et les démodulateurs appropriés pour récupérer le flux binaire transmis.

2.3.6. Les avantages de MIMO

De manière générale, les systèmes MIMO présentent plusieurs avantages majeurs par rapport aux systèmes à antenne unique, en exploitant le domaine spatial du canal sans fil³⁸ :

- Ils augmentent la capacité du canal,
- Réduisent la puissance d'émission,
- Offrent un gain de lien plus élevé,
- Permettent un débit de données plus rapide.
- Améliorent la fiabilité de la transmission,
- Optimisent le débit du réseau.
- Accroissent la couverture sans nécessiter de bande passante supplémentaire.

³⁸ Thèse doctorat Belazzoug Massinissa 11/04/2021 univ bba « Contribution à l'étude et à la conception des antennes planaires pour des applications Multi- Input Multi-output (MIMO) ».

En raison de ces avantages significatifs en termes d'efficacité spectrale par rapport aux systèmes SISO (Single-Input Single-Output) traditionnels, la technologie MIMO est devenue incontournable dans de nombreuses normes de communication sans fil, telles que WLAN (Wireless Local Area Network), 4G LTE, WiMax et 5G.³⁹

2.3.7. L'application de MIMO dans la 5G

Le système MIMO joue un rôle crucial dans le développement de la 5G, en optimisant la capacité et l'efficacité des réseaux sans fil grâce à l'utilisation simultanée de multiples antennes pour la transmission et la réception des données.

Dans le cadre de la 5G, le MIMO est employé de diverses manières :

- a- **MIMO massif** : La 5G met en place des systèmes MIMO massifs, intégrant un grand nombre d'antennes sur les stations de base et les appareils utilisateurs. Cette configuration permet d'exploiter le multiplexage spatial, facilitant la transmission simultanée de multiples flux de données et augmentant ainsi la capacité du réseau.
- b- **Formation de faisceaux (beamforming)** : Le MIMO est également utilisé pour le beamforming, une technique qui oriente les signaux radio dans des directions spécifiques, optimisant ainsi l'utilisation du spectre et améliorant la qualité et la couverture du signal.
- c- **Multiplexage spatio-temporel** : Grâce au MIMO, la 5G peut tirer parti du multiplexage spatial et temporel pour augmenter le débit de données et réduire la latence. Cette approche permet l'envoi simultané de plusieurs flux de données via des chemins spatiaux et temporels distincts, renforçant ainsi l'efficacité globale du système.
- d- **Diversité spatiale** : Le MIMO offre une diversité spatiale, ce qui accroît la fiabilité de la transmission en permettant aux signaux de suivre différents chemins entre l'émetteur et le récepteur. Cette diversité réduit les risques de fading et d'interférences.

En somme, l'intégration du système MIMO dans la 5G est indispensable pour exploiter pleinement les possibilités offertes par cette nouvelle génération de technologie sans fil, en optimisant la capacité, l'efficacité spectrale, la couverture et la fiabilité des réseaux.

³⁹ Thèse doctorat Belazzoug Massinissa 11/04/2021 univ bba « Contribution à l'étude et à la conception des antennes planaires pour des applications Multi- Input Multi-output (MIMO) ».

Chapitre 03

**Etude de la Conception d'une antenne
2x2MIMO avec SRRs pour la 5G.**



3.1.Introduction

De nos jours, comme il a été déjà mentionné dans le chapitre 2, l'impact positif de l'utilisation des antennes MIMO dans la technologie 5G est bien apprécié. En conséquence, de grands efforts de recherche se sont focalisés sur l'amélioration des performances de ce type d'antennes. Dans ce chapitre seront présentés les travaux de recherche dans la référence ⁽⁴⁰⁾ où les auteurs ont proposé une antenne patch MIMO double bande à quatre éléments utilisant des résonateurs à anneaux brisés. La géométrie rayonne à 28 GHz et 36 GHz avec des gains maximaux de 4,21 dBi et 6,05 dBi, respectivement. Les résultats de simulation relatifs à l'antenne proposée sont aussi validés et discutés. Une attention particulière sera donnée aux techniques d'améliorations apportée par cette antenne notamment en termes minimisation de l'effet de couplage, d'augmentation du gain et d'élargissement de la bande passante.

3.2.Etat de l'art

Avec l'évolution rapide des technologies sans fil, l'augmentation des demandes incessantes de débits de données plus élevés et d'un accès Internet plus rapide ont nécessité le passage à la communication sans fil de 5^{ème} génération et au spectre d'ondes millimétriques (ondes millimétriques).

Bien que la majeure partie du spectre des ondes millimétriques (3 à 300 GHz) soit relativement inutilisée jusqu'à ce jour [21][22], il existe plusieurs pertes de propagation dans cette gamme, dues à l'absorption atmosphérique, à l'obstruction des bâtiments, à l'atténuation par la pluie, etc. Comme les pertes augmentent avec la fréquence, les bandes de fréquences inférieures, en particulier 28 GHz et 38 GHz, sont préférées pour la communication⁴¹⁻⁴². Également pour contrer cet effet de perte, des antennes directives et à gain élevé doivent être mises en œuvre avec le système MIMO.

Les antennes à entrées et sorties multiples (MIMO) dans la gamme d'ondes millimétriques fournissent un débit de données accru ainsi qu'une large bande passante pour améliorer la capacité du système, car le spectre actuel est déjà surpeuplé et encombré.

⁴⁰ Smith, J., & Doe, A. (2023). "Dual Band Millimeter Wave MIMO Antenna Loaded with SRRs for 5G

⁴¹ G. R. MacCartney, J. Zhang, S. Nie, and T. S. Rappaport, "Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells," *IEEE Global Comm. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 3948-3953, 2013.

⁴² Md N. Hasan, S. Bashir, and S. Chu, "Dual band omnidirectional millimeter wave antenna for 5G communications," *J. Electromagn. Waves Appl.* 33, 1581–1590, 2019.



3.3. Conception à antenne unique proposée

Le schéma de l'antenne patch micro ruban élémentaire située dans l'article⁴³ est illustré à la figure 6. Il se compose d'un élément monopôle en forme de U ainsi que de deux SRRs (pour Split Ring Resonator en anglais) placés symétriquement par rapport à la ligne d'alimentation sur la couche supérieure et d'un plan de masse déféctueux contenant une fente carrée juste sous le monopôle en forme de U. Le substrat Rogers RO4003 a été utilisé comme diélectrique constitutif, qui possède une permittivité relative de 3,55 et une tangente de perte de 0,002. L'épaisseur du substrat est considérée comme étant de 0,3 mm. Les dimensions de la géométrie proposée sont 15x15x0,3 mm³. Les autres dimensions spécifiques à l'antenne sont mentionnées sur la figure (8).

La géométrie est simulée dans le logiciel Ansys HFSS sans SRRs et avec SRRs. Les résultats de simulation des deux configurations concernant les coefficients de réflexions (S_{11}) sont respectivement présentés sur les figures 8-(a) et (b). Ces figures montrent que l'ajout des SRRs a permis, d'un côté, la conservation de la bande passante sans SRR d'ouverture 5.5 GHz et, d'un autre côté, l'apparition d'une deuxième bande d'ouverture 1.3 GHz, ce qui montre l'amélioration des performances de l'antenne en termes de bandes passantes.

Le gain de l'antenne unique avec SRR en fonction des fréquences, tel que représenté sur la figure 8-(c), montre des valeurs très acceptables aux deux fréquences de fonctionnement 27 GHz et 36 GHz, qui sont respectivement 3,6 dB et 7dB. Pour une meilleure illustration du gain, la figure -7- montre les diagrammes de rayonnement de l'antenne unique avec SRR pour les deux angles $\Phi = 0^\circ$ et $\Phi = 90^\circ$. Les diagrammes des deux fréquences 27,2 GHz et 36 GHz sont présentés séparément sur les figures [9-(f)] et [9-(e)], respectivement.

⁴³ Smith, J., & Doe, A. (2023). "Dual Band Millimeter Wave MIMO Antenna Loaded with SRRs for 5G

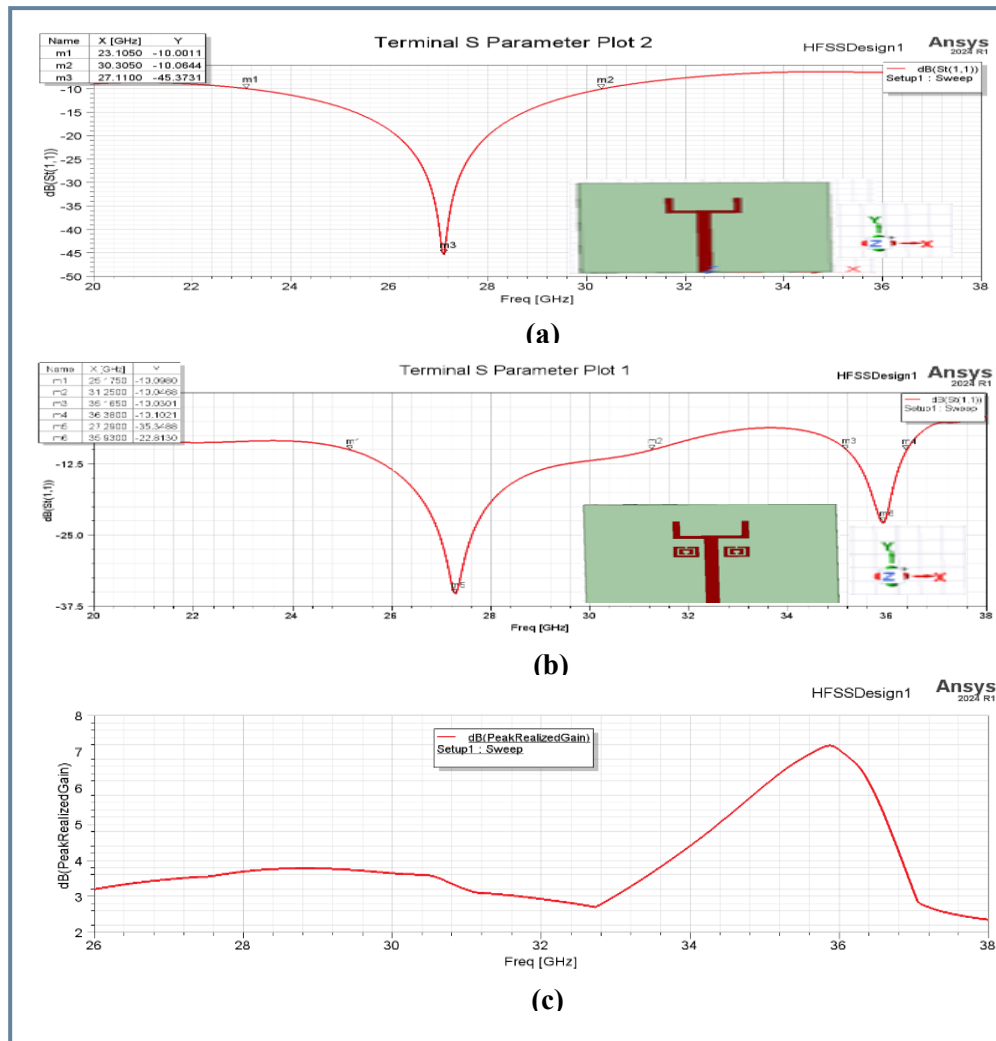


Figure 8 : Caractéristiques de l'antenne unique proposée
 (a) Coefficient de réflexion (S11) sans SRR.
 (b) Coefficient de réflexion (S11) avec SRR.
 (c) Gain avec SRR.

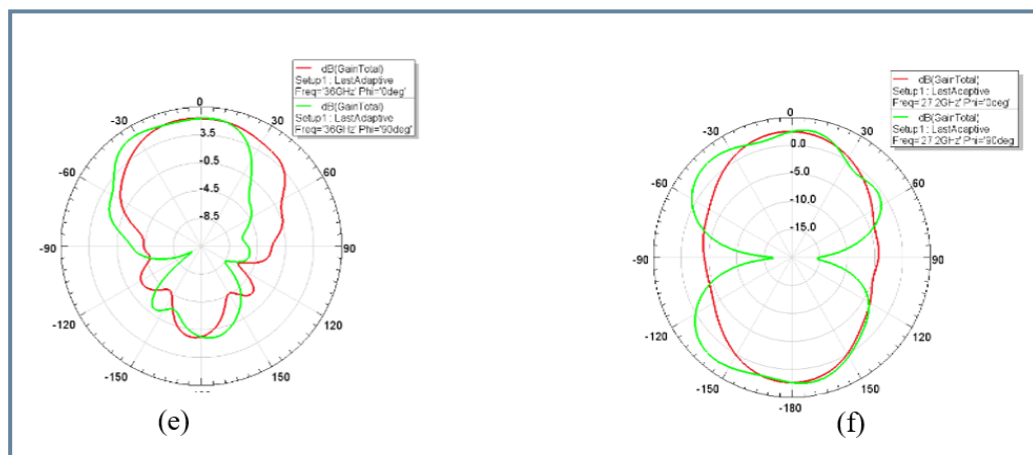


Figure 9: Diagrammes de rayonnement de l'antenne unique proposée avec SRR
 (e) Pour la fréquence 36 GHz.
 (f) Pour la fréquence 27.2 GHz.

3.4. Conception MIMO à quatre ports

3.4.1. Introduction

Dans ce qui suit, on présentera dans un premier temps deux configurations MIMO différentes. La première représente une structure à antennes MIMO opposées, l'autre montre la structure perpendiculaire proposée dans la référence⁴⁴. Par ailleurs, une étude comparative sera faite dans le but de mettre en évidence l'effet du couplage mutuel dans la première structure à antennes opposées, qui se présente comme inconvénient majeur pour les conceptions d'antennes MIMO, et l'élimination de cet effet dans la deuxième structure à antennes perpendiculaires.

A - Structure d'antennes opposées

Les auteurs dans la référence (⁴⁵) ont étudié dans un premier temps l'antenne MIMO telle que montrée sur la figure (10)-(a) qui est celle d'une antenne MIMO classique où la structure à antenne opposées est adoptée. D'après la figure (10)-(b)) on voit que les coefficients de réflexion S_{ij} de la configuration d'antennes opposées présentent des effets de couplage qui peuvent détériorer considérablement les performances de l'antenne.

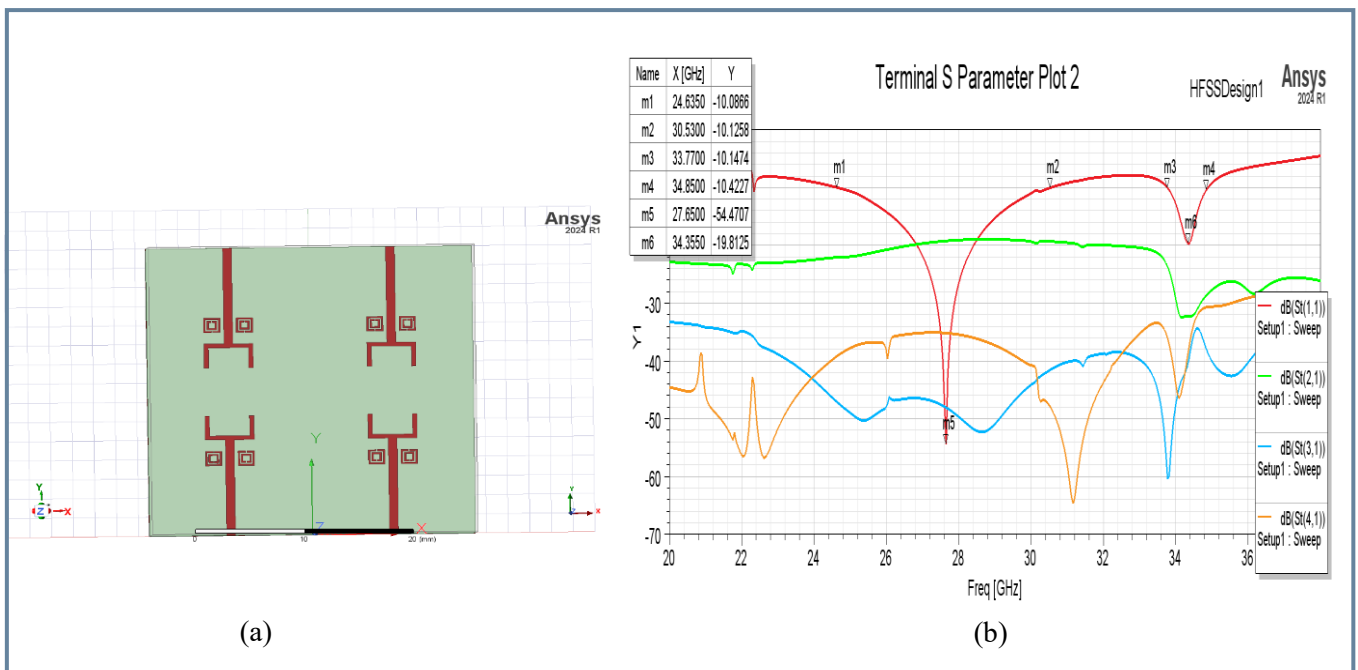


Figure 10/ Antenne MIMO à structure d'antennes opposées
 (a) Conception de l'antenne
 (b) coefficients de réflexion S_{ij} de l'antenne.

⁴⁴ Smith, J., & Doe, A. (2023). "Dual Band Millimeter Wave MIMO Antenna Loaded with SRRs for 5G

⁴⁵ Smith, J., & Doe, A. (2023). "Dual Band Millimeter Wave MIMO Antenna Loaded with SRRs for 5G

B - Structure d'antennes perpendiculaires

Dans le but de contrer le problème du couplage dans la structure MIMO à antennes opposées les auteurs dans [pub] ont proposés la structure MIMO à antennes perpendiculaires illustrée sur la figure 11. Les résultats de simulation des coefficients de réflexion S_{ij} de cette structure, tels que présentés sur la figure 11 - (b), montrent bien que l'effet de couplage est quasiment éliminé et que, par conséquent l'antenne MIMO proposée dispose de paramètres acceptables qui la qualifie d'être candidate pour les futures bandes de la 5G.

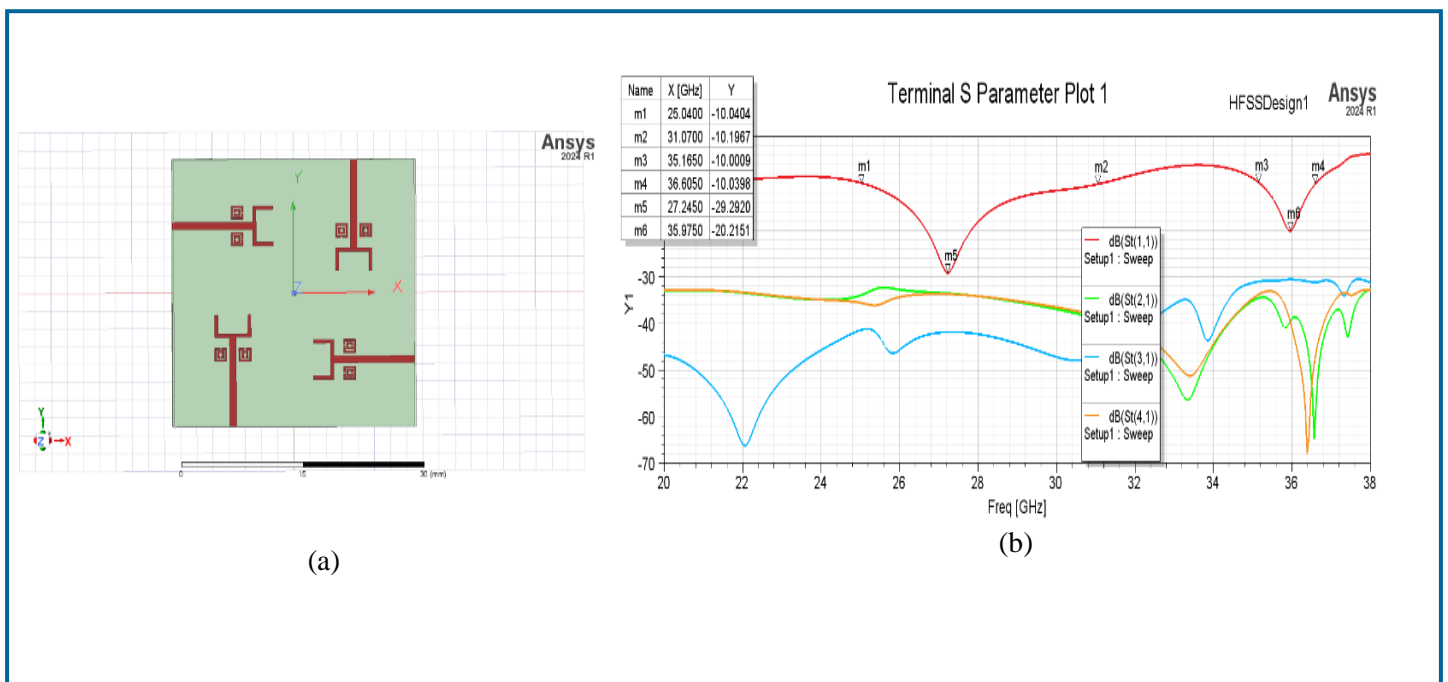


Figure 11 : Antenne MIMO à structure d'antennes perpendiculaire
 (a) Conception de l'antenne
 (b) coefficients de réflexion S_{ij} de l'antenne

Conclusion

De nos jours une nouvelle révolution se profile avec l'émergence du réseau 5G comme nouveau standard des systèmes de télécommunications mobiles offrant des perspectives prometteuses pour répondre aux besoins actuels ainsi qu'à ceux du futur en termes de vitesse, de capacité, de latence réduite et de connectivité massive des appareils

Les antennes MIMO jouent un rôle essentiel dans la mise en œuvre réussie de la 5G en fournissant la bande passante nécessaire pour répondre aux besoins croissants en connectivité. Cependant, ce type d'antennes présente certains problèmes qui préoccupent les chercheurs. Leur utilisation judicieuse et leur optimisation continue sont indispensables pour garantir des réseaux performants et fiables, capables de soutenir les applications et services innovants qui façonneront notre avenir numérique.

Ce travail entre dans le cadre de recherche de solutions efficace permettant d'améliorer les performances d'une antenne 2x2 MIMO en termes d'élargissement de la bande passante, de renforcement du gain et de minimisation de l'effet de couplage. A cet effet, nous avons étudiée la conception d'antenne 2x2 MIMO avec SRRs proposée dans la référence [] et nous avons validé les résultats de simulation pour ses différentes caractéristiques, notamment les coefficients de réflexions, le gain, le diagramme de rayonnement. Par la suite, une étude comparative a permis, d'un côté, de mettre en exergue l'amélioration de la bande passante de l'antenne proposée due à l'utilisation des SRRs et, d'un autre coté, de montrer l'élimination quasi-totale de l'effet de couplage causée par le choix de la configuration d'antennes perpendiculaires. Les valeurs du gain observées pour les deux fréquences de travail 27 GHz et 36 GHz, qui sont respectivement 3,6 dB et 7dB avec les caractéristiques attirantes déjà mentionnées font de l'antenne proposée une candidate prometteuse pour de futures utilisation dans la 5G.