

الجمهورية الجزائرية الشعبية الديمقراطية
LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMMAR TELIDJI DE LAGHOUAT



كلية التكنولوجيا
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

Mémoire de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Télécommunication

Option : Systèmes de télécommunication

Réalisé par :

Lina koudri

Imane Guerroudje

Thème

**Application des surfaces intelligentes
reconfigurables (RIS) dans le domaine des ondes
millimétriques pour les futures générations 5G, 6G**

Soutenue publiquement le 27/06/2024 devant les membres de jury composé de :

Mr. Reguiegue Mourad

Président

Mr. Birane Mouhoub

Examineur

Mr. Merrah Hocine

Encadreur

Mme Mesri mokhtaria Merad

Co-encadrice

Année universitaire 2024/2025



Remerciement

Nous tenons remercier notre encadreur monsieur « Merrah Hocine »
et notre co-encadrice « Mesri mokhtaria Merad » pour leur soutien et leur encadrement
tout au long de ce projet.

Votre expertise, vos conseils avisés et votre disponibilité ont été essentiels pour la réussite
de ce travail.

Merci pour votre patience, votre compréhension et pour avoir toujours été présents pour
répondre à nos questions et nous aider à surmonter les défis rencontrés.

Votre encadrement nous a permis de grandir professionnellement et personnellement.

Nous sommes reconnaissants pour le temps et les efforts que vous avez investis dans
mon projet.

Votre engagement et votre passion pour ce domaine sont une véritable source
d'inspiration.

Avec toute notre reconnaissances...

Kouidri Lina & Guerroudje Imane



Dédicaces

Je dédie ce projet...

À mes chers parents, pour leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours académique.

À mes amis, pour leur présence et leurs encouragements.

À mes professeurs, pour leur enseignement précieux et leurs conseils avisés.

Ce travail est le fruit de vos efforts combinés, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Kouidri Lina





Dédicaces

Avant tout, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la force et la patience durant toutes ces années d'étude.

Je dédie ce travail...

À mes chers parents, tous les mots ne sauraient exprimer mon amour et ma gratitude envers vous, pour vos encouragements et votre amour sans limite. Qu'Allah, le Tout-Miséricordieux, vous accorde la santé, le bonheur et vous protège de tout mal.

À mes frères et sœurs merci d'être mes compagnons de route dans ce voyage appelé vie.

À mon binôme de travail extraordinaire, je te remercie d'être une source constante de motivation et de bonne humeur. Travailler ensemble est une expérience véritablement gratifiante.

Enfin Je veux me remercier d'avoir cru en moi, de ne jamais avoir pris de pause, de n'avoir jamais abandonné. Je suis fière de moi et de chaque pas que j'ai accompli.

Guerroudje Imane



ملخص

تفحص هذه الأطروحة تطبيقات الأسطح الذكية القابلة لإعادة التشكيل (RIS) في سياق موجات المليمتر للأجيال القادمة من شبكات الاتصالات، بما في ذلك 5G و6G. توفر موجات المليمتر، بترددها العالي، فرصاً لمعدلات بيانات عالية، لكنها محدودة بفقدان الانتشار والعقبات المادية. تظهر RIS كحل واعد لتحسين انتشار وتغطية هذه الموجات تستكشف الدراسة مبادئ تشغيل RIS، والتي تتكون من أسطح اصطناعية تتكون من عناصر عاكسة يمكن التحكم فيها بشكل فردي. يمكن لهذه الأسطح تعديل طور وسعة موجات الحادث، مما يسمح بالتحكم الدقيق في الانتشار. يمكن استخدام RIS للتعويض عن خسائر الانتشار وتقليل التداخل وتحسين تغطية الإشارات في البيئات المعقدة. التطبيقات المحتملة لـ RIS في شبكات اتصالات 5G و6G واسعة. يمكن نشرها لتحسين الاتصال داخل المباني، في المناطق الحضرية الكثيفة وفي البيئات المتنقلة، مما يوفر اتصالاً موثوقاً وعالي السرعة للمستخدمين النهائيين. بالإضافة إلى ذلك، يمكن استخدام RIS لتطبيقات محددة مثل الواقع المعزز والتطبيب عن بعد والمركبات ذاتية القيادة، حيث يكون من الضروري انخفاض زمن الوصول والموثوقية العالية. في الختام، تمثل الأسطح الذكية القابلة لإعادة التشكيل تقنية واعدة لتحسين أداء شبكات الاتصالات في الأجيال القادمة 5G و6G تفتح قدرتها على التحكم ديناميكياً في انتشار الموجات المليمترية فرصاً جديدة لشبكات لاسلكية أسرع وأكثر موثوقية تتكيف مع احتياجات التطبيقات الناشئة.

الكلمات المفتاحية: الأجيال المستقبلية 5G و6G ، الأسطح الذكية القابلة لإعادة التشكيل، انتشار الموجات

المليمترية، إنترنت الأشياء، الأسطح الخارقة.

Résumé

Ce mémoire examine les applications des surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) dans le contexte des ondes millimétriques pour les futures générations de réseaux de communication, notamment la 5G et la 6G. Les ondes millimétriques, avec leur haute fréquence, offrent des opportunités pour des débits de données élevés, mais elles sont limitées par des pertes de propagation et des obstacles physiques. Les RIS émergent comme une solution prometteuse pour améliorer la propagation et la couverture de ces ondes.

L'étude explore les principes de fonctionnement des RIS, qui consistent en des surfaces artificielles composées d'éléments réfléchissants contrôlables individuellement. Ces surfaces peuvent modifier la phase et l'amplitude des ondes incidentes, permettant ainsi un contrôle précis de la propagation. Les RIS peuvent être utilisées pour compenser les pertes de propagation, réduire les interférences et améliorer la couverture des signaux dans des environnements complexes.

Les applications potentielles des RIS dans les réseaux de communication 5G et 6G sont vastes. Elles peuvent être déployées pour améliorer la connectivité à l'intérieur des bâtiments, dans les zones urbaines denses et dans les environnements mobiles, offrant ainsi une connectivité fiable et à haute vitesse pour les utilisateurs finaux. De plus, les RIS peuvent être utilisées pour des applications spécifiques telles que la réalité augmentée, la télémédecine et les véhicules autonomes, où une faible latence et une fiabilité élevée sont essentielles.

En conclusion, les surfaces intelligentes reconfigurables représentent une technologie prometteuse pour améliorer les performances des réseaux de communication dans les futures générations 5G et 6G. Leur capacité à contrôler de manière dynamique la propagation des ondes millimétriques ouvre de nouvelles perspectives pour des réseaux sans fil plus rapides, fiables et adaptés aux besoins des applications émergentes.

Mots clés : *Les futures générations 5G et 6G, les surfaces intelligentes reconfigurables, propagation des ondes millimétriques, IoT, metasurfaces.*

Abstract

This thesis examines applications of reconfigurable smart surfaces (RIS) in the context of millimeter waves for future generations of communication networks, including 5G and 6G. Millimeter waves, with their high frequency, offer opportunities for high data rates, but they are limited by propagation losses and physical obstacles. RIS are emerging as a promising solution to improve the propagation and coverage of these waves.

The study explores the operating principles of RIS, which consist of artificial surfaces composed of individually controllable reflective elements. These surfaces can modify the phase and amplitude of incident waves, allowing precise control of propagation. RIS can be used to compensate for propagation losses, reduce interference and improve signal coverage in complex environments.

The potential applications of RIS in 5G and 6G communication networks are vast. They can be deployed to improve connectivity inside buildings, in dense urban areas and in mobile environments, providing reliable, high-speed connectivity for end users. In addition, RIS can be used for specific applications such as augmented reality, telemedicine and autonomous vehicles, where low latency and high reliability are essential.

In conclusion, reconfigurable smart surfaces represent a promising technology to improve the performance of communication networks in future generations 5G and 6G. Their ability to dynamically control millimeter wave propagation opens up new opportunities for faster, more reliable wireless networks that are adapted to the needs of emerging applications.

Keywords: *Future 5G and 6G generations, reconfigurable smart surfaces, millimeter wave propagation, IoT, metasurfaces.*

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I ÉTAT DE L'ART SUR LES RÉSEAUX 5G/6G	2
I.1 Introduction	2
I.2 Internet des objets	2
I.3 Le Réseau Cinquième Génération (5G)	3
I.3.1 Le réseau 5G NR	3
I.3.2 Objectif de la 5G	4
I.4 Le réseau la sixième génération (6G)	4
I.4.1 Différents piliers technologiques fondamentaux façonneront le 6G	5
I.4.2 Des nouveaux services 6G impossibles à réaliser avec les technologies 5G	6
I.5 Chaîne de transmission	6
I.5.1 Schéma d'une chaîne de transmission	7
I.6 Massive MIMO (Multiple-input Multiple-output)	9
I.7 La modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation)	10
I.7.1 La UF-OFDM	12
I.8 Conclusion	12
CHAPITRE II PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS L'ESPACE LIBRE	14
II.1 Introduction	14
II.2 Les ondes radioélectriques	14
II.2.1 Le spectre des ondes électromagnétiques	15
II.2.2 Les ondes électromagnétiques dans les réseaux 5G ,6G	16
II.2.3 Les phénomènes physiques de la propagation radioélectrique	17
II.2.3.1 La réflexion et la transmission	18
II.3 Les ondes millimétriques	19

II.3.1 Le spectre des ondes millimétriques _____	20
II.3.2 Les avantages et les inconvénients des ondes millimétriques _____	20
II.3.3 Limitation des ondes millimétriques _____	21
II.3.4 Les applications des ondes millimétriques _____	22
II.3.5 Potentiel des ondes millimétrique _____	24
II.4 Le rôle des ondes millimétriques dans les technologies 5G, 6G _____	24
II.4.1 Les antennes mmWave pour communications 5G/6G _____	24
II.4.2 MmWave Antennes pour 5G BS _____	25
II.4.3 MmWave Antennes pour 5G UT _____	25
II.4.4 MmWave Antennas for 6G Communications _____	26
II.5 Conclusion _____	27
CHAPITRE III RECONFIGURABLES SURFACES INTELLIGENTES _____	29
III.1 Introduction _____	29
III.2 Le RIS _____	30
III.3 Architecture de RIS (Reconfigurables intelligentes surfaces) _____	31
III.4 Principe Fondamental Du RIS _____	32
III.5 Le RIS dans l’environnement _____	32
III.6 Les applications du RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces) _____	33
III.6.1 L’association des ondes millimétriques dans le RIS _____	33
III.6.2 Réseaux multicellulaires assistés par RIS _____	33
III.6.3 Informations et alimentation sans fil simultanées assistées par RIS Réseaux de transfert (SWIPT) _____	34
III.6.4 Réseaux MEC (Mobile Edge Computing) assistés par RIS _____	34
III.6.5 Réseaux de sécurité de la couche physique (PLS) assistés par RIS _____	35
III.7 Les techniques d’estimation des canaux pour les communications RIS _____	35
III.7.1 Modèle de canal structuré pour RIS _____	36
III.8 Gestion des faisceaux pour les systèmes assistés par RIS _____	37
III.8.1 Architecture MIMO massive _____	38
III.9 Modèle et spécifications du système _____	39

III.9.1 Scénarios et paramètres	39
III.10 Conclusion	40
CHAPITRE IV LES RÉSULTATS DE SIMULATION	41
IV.1 Introduction	41
IV.2 L'Analyse de simulation d'un RIS	41
IV.3 Le réseau transmise (TA)	42
IV.3.1 La Géométrie et le diagramme de rayonnement	43
IV.3.2 Profile de rayonnement	43
IV.3.3 Le réseau réfléchié RA	45
IV.4 La Conception Des Faisceaux Analytiques	47
IV.4.1 Analyse	49
IV.5 Faisceau dans différentes directions	50
IV.6 Optimisation du faisceau avec des algorithmes génétiques	50
IV.6.1 Première approche d'optimisation	51
IV.6.2 Le GA avec contrainte	52
IV.7 Conclusion	54
CONCLUSION GÉNÉRALE	55

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I. 1 - Internet des objets.</i>	3
<i>Figure I. 2- Indicateurs de rendement clés pour la future technologie 6G.</i>	6
<i>Figure I. 3- Schéma d'une chaîne de transmission.</i>	7
<i>Figure I. 4- Massive Multiple Output–Multiple Output (MIMO).</i>	9
<i>Figure II. 1- Le spectre des ondes électromagnétiques.</i>	15
<i>Figure II. 2- Classement des spectres électromagnétique.</i>	17
<i>Figure II. 3- Les mécanismes de propagations.</i>	18
<i>Figure II. 4- Le spectre des ondes millimétriques.</i>	20
<i>Figure III. 1- Les applications émergentes du RIS pour les réseaux sans fil 5G,6G.</i>	30
<i>Figure III. 2- L'architecture de RIS. [49].</i>	31
<i>Figure III. 3- Exemple d'environnement assisté par RIS.</i>	32
<i>Figure III. 4- Les applications du RIS dans divers systèmes émergents de sous-6 GHz.</i>	34
<i>Figure III. 5- Modèle de canal d'une liaison descendante [58].</i>	37
<i>Figure III. 6- Architecture de faisceaux analogiques, numériques et hybrides [61]</i>	39
<i>Figure III.7- Système de communication assisté par RIS [62].</i>	40
<i>Figure IV. 1- Distribution de phase sur le réseau émetteur dans le cas (a) de phases continues, (b) de compensation de phase 1 bit, (c) de compensation de phase 2 bits, (d) et de compensation de phase 3 bits. (e) la compensation de phase sur les schémas de rayonnement.</i>	49
<i>Figure IV. 2- Diagramme de rayonnement en direction large dans le plan (u, v) pour (a)1 bit, (b) 2 bits et (c) configurations de phase continue.</i>	49
<i>Figure IV. 3- Faisceaux dans différentes directions dans le cas de (a) phases continues, (b) phase 1 bit compensation.</i>	51
<i>Figure IV. 4- Diagramme de rayonnement dans la direction $(\theta, \varphi) = (30^\circ, 90^\circ)$ pour (a) les configurations à 1 bit, (b) à 2 bits et (c) à phase continue.</i>	52
<i>Figure IV. 5- Les paramètres utilisés dans la fonction F_{obj}.</i>	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1- L'avancement des technologies de communication mobile au fil des ans. 11

Tableau II. 1- Les catégories des ondes électromagnétiques. _____ 16

Tableau IV. 1- La Directivité, le gain, SLL et HPBW pour différents modes de quantification _____ 50

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- **1G:** One Generation
- **2G:** Two Generation
- **3D:** Three Dimensions.
- **4G:** Fourth Generation.
- **5G:** Fifth Generation of mobile communication systems.
- **6G:** Sixth-Generation of mobile communication systems.
- **ADSL:** Asymmetric Digital Subscriber Line.
- **BS:** Base Station.
- **BDMA:** Bureau of Data Management and Analysis.
- **CP:** Cyclic Prefix.
- **CDMA:** Code Division Multiple Access.
- **FDMA:** Frequency Division Multiple Access.
- **FPGA:** Field-Programmable Gate Array.
- **GSM:** Global System for Mobile Communication.
- **IA:** Intelligence Artificielle.
- **IOT:** Internet Of Thing.
- **IFFT:** Inverse Fast Fourier Transform.
- **IM:** Information Management.
- **IEEE:** Institute for Electrical and Electronics Engineers.
- **IPV4:** Internet Protocol Version 4.
- **LTE:** Long Term Evolution.
- **LAN:** Local Area Network.
- **MIMO:** Multiple-Input Multiple-Output.
- **MEC:** Mobile Edge Computing.
- **Mm Wave:** Millimeter Wave.
- **MPLS:** Multiprotocol Label Switching.
- **NR:** New Radio.

- **OFDM:** Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.
- **OFDMA:** Orthogonal Frequency-Division Multiple Access.
- **OSI:** Open Systems Interconnection.
- **PLS:** Physical Layer Security.
- **QAM:** Quadrature Amplitude Modulation.
- **QOS:** Quality Of Service.
- **RIS:** Reconfigurable Intelligent Surface.
- **SE:** Spectral Efficiency.
- **SINR:** Signal-To-Interference-Plus Noise Ratio.
- **SWIPT:** Simultaneous Wireless Information and Power Transfer.
- **SISO:** Single Input Single Output.
- **SNR:** Signal Noise Ratio.
- **RTCP:** Real-Time Transport Control Protocol.
- **RF:** Radio Frequency.
- **SDWAN:** Software-Defined Wide Area Network.
- **TDMA:** Time Division Multiple Access.
- **UF:** Ultra Filtration.
- **VR:** Virtual Reality.
- **WLAN:** Wireless Local Area Network.
- **WAN:** Wide Area Network.
- **WCDMA :** Code Division Multiple Access.
- **WIMAX:** Worldwide Interoperability for Microwave Access.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La demande d'une connectivité sans fil toujours plus rapide, plus fiable et plus étendue ne cesse à croître, les chercheurs et les ingénieurs explorent de nouvelles approches pour répondre aux besoins croissants de données et aux exigences de performances des réseaux mobiles de prochaine génération. Au cœur de cette exploration se trouvent les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS), une technologie innovante qui promet de révolutionner le paysage des communications sans fil, en particulier dans le domaine des ondes millimétriques [1].

Les réseaux mobiles de cinquième génération (5G) ont une connectivité ultrarapide et de faible latence, ouvrant la voie à une multitude d'applications allant des véhicules autonomes à l'Internet des objets (IoT). Cependant, pour exploiter pleinement le potentiel de la 5G et anticiper les besoins des futurs réseaux 6G, de nouvelles solutions doivent être envisagées pour relever les défis inhérents aux hautes fréquences millimétriques, notamment la propagation limitée et la sensibilité aux obstacles[2].

C'est là qu'interviennent les surfaces intelligentes reconfigurables. En introduisant des surfaces artificielles dotées de propriétés électromagnétiques dynamiquement ajustables, les RIS offrent la possibilité de manipuler et de contrôler les ondes électromagnétiques de manière précise et efficace. Ces surfaces peuvent être utilisées pour améliorer la couverture, augmenter la capacité et réduire l'interférence dans les réseaux sans fil, en particulier dans les bandes de fréquences millimétriques où les pertes de propagation sont plus prononcées[1].

Dans cette introduction, nous explorerons les applications potentielles des surfaces intelligentes reconfigurables dans le contexte des ondes millimétriques pour les futures générations de réseaux mobiles, en mettant l'accent sur les défis actuels, les opportunités émergentes et les perspectives de recherche prometteuses. En examinant les avancées récentes dans ce domaine et en anticipant les tendances technologiques à venir, nous espérons offrir un aperçu éclairant sur le rôle crucial que les RIS joueront dans la réalisation de réseaux sans fil plus performants et plus adaptatifs pour les années à venir[3].

I.1 Introduction

Les technologies sans fil sont d'une importance capitale pour les sociétés d'aujourd'hui et les futurs réseaux de communication pour les générations 5G et 6G devraient relever de nombreux défis sociétaux et technologiques. Alors que les infrastructures de communication ont un impact environnemental croissant qui doit être réduit, les futurs réseaux devront non seulement permettre un transfert d'informations plus efficace, mais aussi répondre au besoin croissant de capacité d'échange de données. C'est notamment le rôle des cas d'utilisation de l'internet des objets, où un nombre massif de capteurs permet de surveiller des systèmes complexes [1].

L'Internet des objets (IoT) est ce que nous avons comme une grande percée dans le réseau 5G. Bien que le réseau 5G puisse prendre en charge plusieurs services IoE (Internet of thing), 6G est le réseau qui prend pleinement en charge cela.

Ce chapitre est une étude présentant la technologie 5G et IoT et les défis à venir, le réseau 6G étant le nouveau réseau alternatif à venir pour résoudre ces problèmes et les limites auxquelles nous sommes confrontés avec la 5G [2].

I.2 Internet des objets

La technologie IoT est considérée comme une émergence du futur Internet, certain définir comme un objet doté d'une identité et d'une personnalité virtuelles, opérant dans des espaces intelligents et en utilisant des interfaces intelligentes pour se connecter et communiquer dans une variété d'environnements d'utilisation [3].



Figure I. 1 - Internet des objets[3].

I.3 Le Réseau Cinquième Génération (5G)

La 5G est une technologie cellulaire sans fil, offrant des vitesses de chargement et de téléchargement plus élevées, des connexions plus cohérentes et une capacité de données améliorée par rapport aux réseaux précédents (4G). La 5G est beaucoup plus rapide et plus fiable que les réseaux 4G actuellement populaires et a le potentiel de transformer la façon dont nous utilisons l'internet pour accéder aux applications, aux réseaux sociaux et aux informations [4][5].

I.3.1 Le réseau 5G NR

Il existe diverses caractéristiques clés des systèmes 5G NR que nous ne trouvons pas dans les systèmes précédents, qui aident la 5G à fournir les services promis. Pour cette proposition, la 5G compte sur certaines caractéristiques connues des systèmes précédents, par exemple, l'agrégation de porteuses, la modulation multi-porteuse et les transmissions MIMO. Au-delà de l'amélioration des fonctionnalités déjà existantes, les systèmes 5G compteront également sur de nouvelles fonctionnalités améliorant la capacité.

I.3.2 Objectif de la 5G

Il a plusieurs objectifs, parmi lesquels l'augmentation de la vitesse et de la capacité des réseaux, mais aussi la préparation de l'évènement majeur qu'est l'Internet des objets, qui va nous permettre de construire un monde complètement connecté [6] [7].

- a. **Des forfaits donnés plus volumineux** : Le volume de données échangeables sur ce réseau de future devra être supérieur à ce que la norme 4G (LTE, Long Term Evolution) ne peut pas supporter [6] [7].
- b. **Un débit de 1Gbps** : les meilleurs débits qui peuvent être offrir actuellement par la 4G génération sont 10 fois inférieurs. Il peut être équivalent ou même supérieur à celui proposé dans certaines offres Internet résidentielles basées sur la fibre optique [6].
- c. **Faible Latence** : Le temps de latence est le temps entre le moment où nous cliquons sur un lien, envoyons des informations via le réseau, et la réponse de serveur, un temps de latence très court donne l'impression que le réseau est très réactif, temps de latence très courtes est très important dans les applications en temps réel (Vidéoconférence, jeux vidéo, ...etc.) [6].

Le but de cette technologie vise à améliorer les avantages des systèmes MIMO traditionnels. Elle fait référence à un scénario dans lequel des composants technologiques spécifiques permettent le déploiement rentable de systèmes cellulaires exploitant des centaines d'antennes dans les stations de base cellulaires. Cette technique est une approche visant à augmenter la capacité du canal et à fournir des gains élevés de multiplexage et de diversité dans les directions de liaison montante et descendante. Ces performances dépendront fortement du nombre d'antennes dans la station de base par rapport au nombre d'utilisateurs [11].

I.4 Le réseau la sixième génération (6G)

Tandis que la 5G continue de se déployer pour atteindre sa pleine maturité, apportant des technologies de rupture et ouvrant la voie à de nombreux usages, la recherche sur la 6G a débuté.

Cette évolution intervient généralement pour répondre à certains besoins utiles à l'humanité et parfois pour des raisons de souveraineté.

Il s'accompagne généralement d'une augmentation des performances, offrant de nouveaux services et applications. Pour cette raison, une nouvelle technologie de communication nommée 6G est prévue pour 2030. Cette future technologie de communication devrait fournir de meilleures connexions pour les gens et les choses. Ainsi, l'évolution continue des scénarios initiés en Cinquième Génération (5G) tels que l'IA et la détection sont envisagés comme deux nouveaux usages scénarios dans 6G [12].

I.4.1 Différents piliers technologiques fondamentaux façonneront le 6G

- a. **IA native** : L'un des principaux objectifs de 6G est de soutenir l'IA dans tous ses aspects. Il est prévu que l'IA soit à la fois un service et une partie fondamentale des systèmes de communication 6G. être comme un système intelligent qui combine les technologies de communication, d'information et de données pour prendre en charge diverses applications d'IA comme la protection des informations sensibles [8][9].
- b. **Détection en réseau** : à l'avenir, la technologie 6G aura de meilleures capacités de détection dans son réseau. Les systèmes 6G détectent les signaux sans fil et communiquent. Cette signifie que le système de communication peut également fonctionner comme un capteur, nous aidant à comprendre le monde physique en étudiant comment les ondes radio voyagent et rebondissent. Cela conduira à de nouveaux services utiles tels que le jumeau numérique [8][9].
- c. **Connectivité extrême** : la **figure I.2**, illustre les indicateurs de performance clés attendus pour 6G. Il offrira des connexions sans fil ultra-rapides et fournira des vitesses très élevées, atteignant un taux de données de pointe de 1 Tbit / s avec 10 à 100 Gbit / s en moyenne. La latence devrait être très courte, et il y aura plus de connexions que la 5G. De plus, il peut localiser les choses et sera très fiable. Toutes ces améliorations rendront non seulement des services étonnants pour les gens, mais aideront également les industries à devenir plus numériques et productives [8] [9].

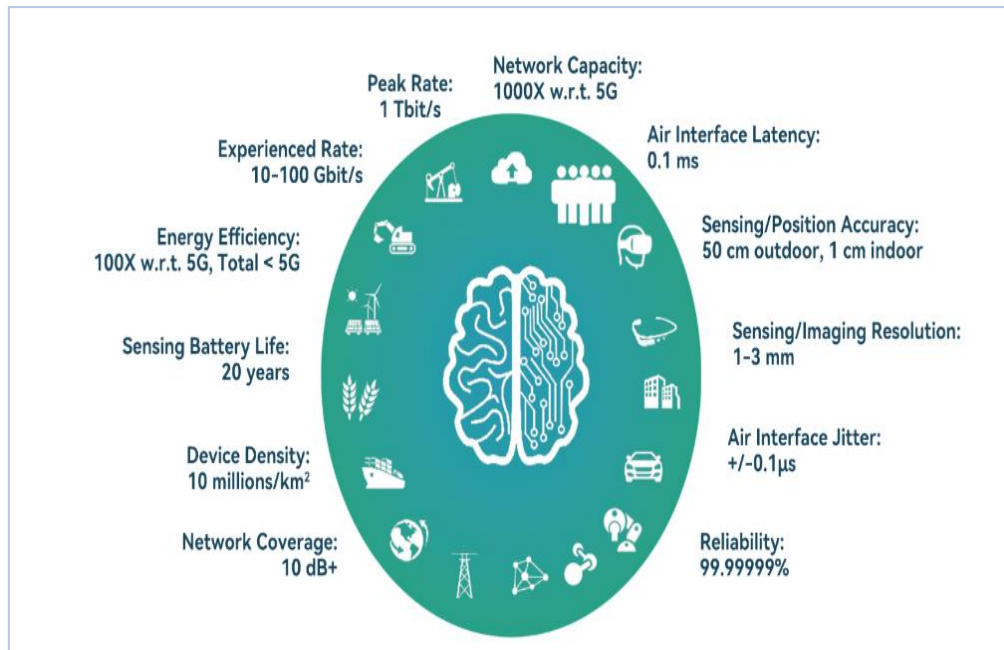


Figure I. 2- Indicateurs de rendement clés pour la future technologie 6G[6].

Les réseaux 6G représentent la prochaine étape dans l'évolution des communications sans fil, visant à offrir des performances et des capacités nettement supérieures à celles des réseaux 5G. Même si la définition exacte de la technologie 6G n'est pas encore universellement acceptée, il est clair que ces réseaux seront plus complexes et étendus grâce à l'intégration de satellites dans le réseau. Cela ouvrira la voie à une connectivité mondiale plus solide et à de nouvelles applications passionnantes.

I.4.2 Des nouveaux services 6G impossibles à réaliser avec les technologies 5G

- La réalité étendue réellement immersive (truly immersive extended reality).
- L'hologramme mobile à haute-fidélité 3D (high-fidelity mobile hologram).
- Les répliques numériques de personnes et d'objets réels ou jumeaux numériques (digital replica).

I.5 Chaîne de transmission

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou, encore, la propagation sur un canal radioélectrique, propagation millimétrique. Les

signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...etc.) mais convertis sous une forme numérique [13].

I.5.1 Schéma d'une chaîne de transmission

Les communications concernent donc la transmission d'information d'un point vers un autre. La source émet un message numérique sous la forme d'un vidéo, message ou bien audio vers le récepteur [13].

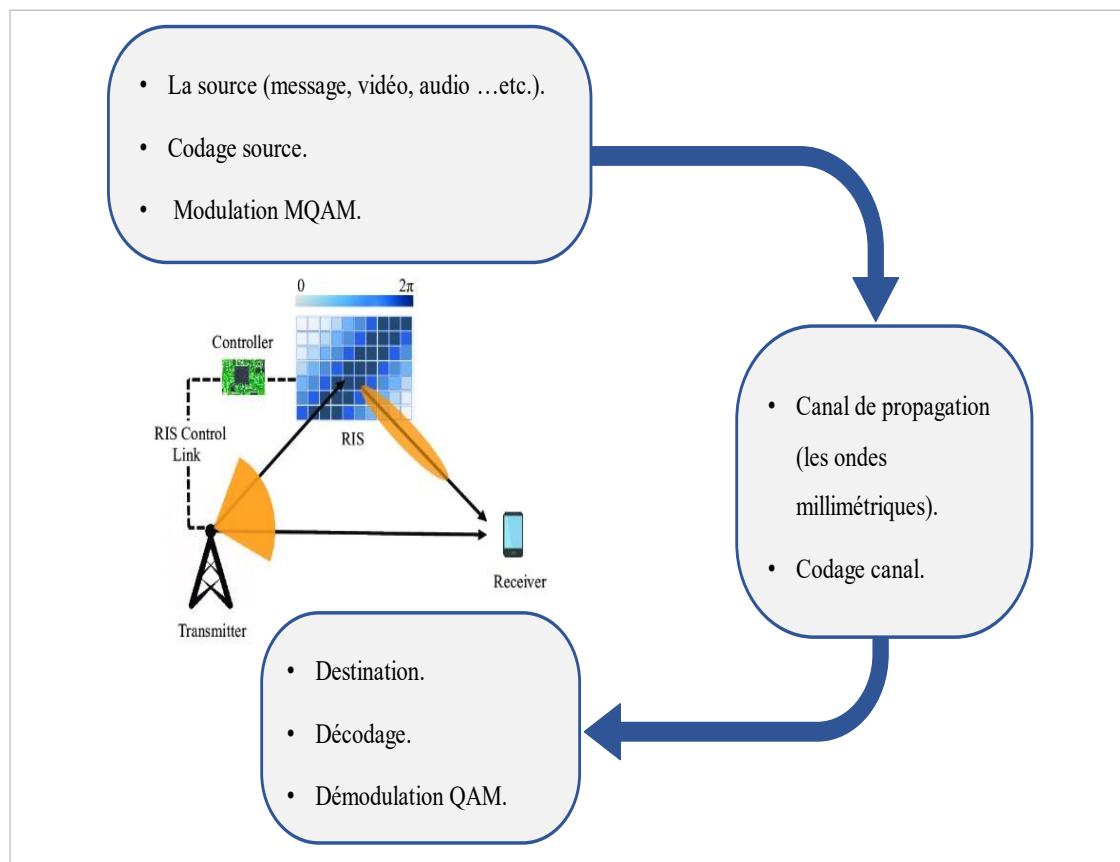


Figure I. 3- Schéma d'une chaîne de transmission.

Cette transmission requiert en toute généralité un certain nombre d'étapes :

I.5.1.1 Source

C'est le premier maillon de la chaîne de transmission. Il fournit le message porteur de l'information qui peut être soit de nature analogique ou numérique.

I.5.1.2 Codage source

Le codage de source ou compression des données sert à fournir une représentation efficace des données (un taux de compression important) tout en préservant l'information essentielle qu'elles portent.

I.5.1.3 Codage canal

C'est l'encodage du message dans une forme compatible avec le canal de transmission. Il comprend le codage contre les erreurs et la modulation. L'étape précédente, à savoir le codage de source, vise à ce que le signal prenne le moins de place possible pour une qualité donnée.

I.5.1.4 La Modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

La modulation QAM est une technologie couramment utilisée pour transmettre des données dans les communications numériques. Il peut représenter des informations numériques en modifiant simultanément la phase et l'amplitude du signal, permettant ainsi une transmission efficace des données [16].

I.5.1.5 Le décodage de canal

C'est l'opération inverse de codage canal. Le récepteur doit compenser ou inverser un certain nombre d'opérations effectuées par l'émetteur. Tout d'abord la démodulation qui consiste à retirer le message du signal reçu, ensuite le décodage contre les erreurs qui consistent à retirer la redondance introduite tout en en profitant pour corriger si possible les erreurs commises.

I.5.1.6 Canal de propagation

Il représente une liaison entre l'émetteur et le récepteur et un système de transmission radioélectrique permet de transformer un signal émis $e(t)$ en signal reçu $s(t)$ par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Le canal de propagation est l'endroit qui transforme les ondes électromagnétiques lors de leur propagation.

I.5.1.7 Le décodage de source

C'est l'opération inverse de codage. Il s'agit de reconstituer au mieux le signal de départ sur base de l'information reçue.

I.6 Massive MIMO (Multiple-input Multiple-output)

Massive Multiple-input Multiple-output (MIMO) est une extension du MIMO traditionnel déjà utilisé dans les réseaux 4G, il est utile pour fournir une connexion massive dans les réseaux 5G,6G.

De nos jours, les systèmes MIMO utilisent deux ou quatre antennes, mais l'idée de la 5G est de déployer un réseau d'antennes géographiquement dispersées qui ont des dizaines ou des centaines d'unités d'antennes. L'objectif principal du MIMO massif est de profiter des avantages de MIMO, cependant à grande échelle.

Massive MIMO est une technologie évolutive des réseaux de prochaine génération, qui apporte un énorme gain de capacité au système, il est économe en énergie, robuste, sécurisé et économe en spectre [10], au détriment du coût accru de l'infrastructure.

Avec l'augmentation du nombre d'antennes de station de base, le nombre d'estimations de canaux augmentera considérablement pour chaque terminal. Il provoquera une augmentation du nombre de transmissions en retour des réponses du canal à la station de base [20][21]

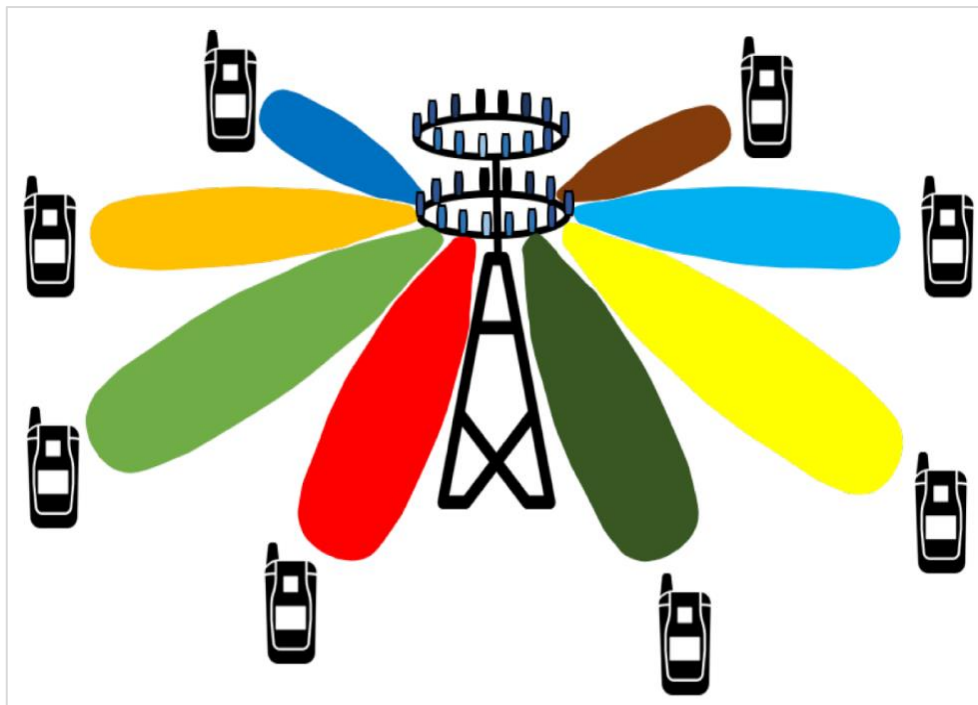


Figure I. 4- Massive Multiple Output–Multiple Output (MIMO) [10].

I.7 La modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation)

La technique de modulation OFDM est une évolution des techniques de multiplexage par répartition en fréquence (FDM), elle se repose sur l'utilisation des formes d'impulsions orthogonales pour multiplier les données dans le domaine fréquentiel [22].

Le multiplexage par division de fréquence orthogonale est une technique de modulation multi-porteuse couramment utilisée dans l'industrie [15] [16].

Le principe de l'OFDM consiste à subdiviser la bande de fréquences disponible en plusieurs sous-bandes appelées sous-porteuses sur lesquelles les données sont transmises en parallèle.

Le **tableau I.1** ci-dessous nous l'explique l'avancement des technologies de communications mobile avec les modulations utilisées. Cependant, malgré l'intérêt que les chercheurs attachent à cette technique, elle souffre de certains inconvénients tels que l'interférence entre les symboles et un débit inférieur. Pour pallier ces inconvénients, plusieurs variantes de modulation OFDM sont apparues ces dernières années.

Tableau I. 2- L'avancement des technologies de communication mobile au fil des ans.

Génération	1G	2G	3G	4G	5G	6G
Technologies	Analog	GSM	CDMA 2000, W-CDMA	LTE, LTE-A, WiMAX	5G, NR, IPv6, LAN, WAN, PAN	SD WAN, Cloud Edge computing, MPLS network, Optical network
Technique de modulation	FDMA	TDMA	TDMA, CDMA	OFDMA	OFDMA, BDMA	CP-OFDM, OTFS, Smart OFDMA plus IM
Taux	2.4 à 14.4 kb/s	14.4 à 64 kb/s	3.1 à 14.7 kb/s	100Mb/s à 1Gb/s	1Gb/s et plus	1Tb/s
Types d'antenne	SISO	SISO	SISO	MIMO	Massive MIMO	Massive MIMO, Surface intelligente
Réseau central	RTPC	RTPC	Paquet	Internet	IoT	IoT
Service	Voix	Voix et SMS	Data et Voix	Video	VoIP/Ultra HD	Tactile/IA/ML
Groupe	Narrow	Narrow	Large	Ultra-large	Ultra-large	Ultra-large
Commutation	Circuit	Packet/Circuit	Packet	All- Packet	All- Packet	All- Packet

Les modulations l'OFDM [18] ont pour principe de répartir des symboles complexes X_k sur N sous-porteuses.

La largeur des sous-porteuses et le débit des symboles sont respectivement $1/T_d$ et $1/T_s$, avec $T_s = NT_d$.

Les symboles complexes X_k sont issus d'un alphabet fini (mapping) qui été choisi de l'ensemble de constellation de la modulation numérique de la technique M-QAM, modulé par la K^{eme} sous porteuse. L'expression du signal OFDM sur l'intervalle temporel $[0, T_s]$ peut s'exprimer comme [17] :

$$X(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k \Delta f t}, \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad (I, 1)$$

Avec Δf est la différence de fréquence entre les sous-porteuses et il est mis à $\Delta f = 1/T_s$ afin de produire des sous porteuses orthogonales, où T_s est la durée de symbole OFDM. Le signal OFDM peut être produit par une opération de transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) suivie d'une conversion numérique-analogique. Autrement-dit, on peut remplacer la variable t en l'équation (I,1) par la variable nT_s/N , nous obtenons la relation suivante [19] :

$$x(n) = \sum_{K=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k \frac{n}{N}} \quad , 0 \leq n \leq N - 1 \quad (I, 2)$$

Où le terme en droite dans l'équation (I,2) c'est exactement l'opération IFFF. Donc elle peut être réécrite sous la forme :

$$x(n) = IFFT\{X_0, X_1, \dots, X_{N-1}\} \quad (I, 3)$$

I.7.1 La UF-OFDM

La forme d'onde UF-OFDM est une autre modulation multi-porteuse prometteuse pour la 5G, car elle combine les avantages de l'OFDM avec un meilleur confinement spectral et une résistance améliorée contre les décalages temps/fréquence. Cependant, son principal défaut réside dans sa complexité calculatoire coté émetteur, qui peut atteindre 200 fois la complexité d'un émetteur OFDM, si aucune simplification n'est appliquée.

Des techniques ont été proposées dans la littérature, mais celles-ci reposent sur un compromis entre la complexité et le niveau de dégradation du confinement spectral à cause des erreurs d'approximation du signal généré. Dans ce contexte, un nouvel émetteur UF-OFDM de faible complexe et sans approximation du signal est proposé.

Pour des tailles de sous-bande faibles, la complexité devient comparable à OFDM, indépendamment du nombre de sous-bandes alloués. De plus, l'architecture de l'émetteur proposée est flexible et peut être facilement adaptée pour supporter la modulation OFDM.

I.8 Conclusion

Le 1^{er} chapitre nous avons décrit les dernières générations sans fil qui sont la 5G ,6G et leur fonctionnement, les avantages et les inconvénients. Avec le déploiement à grande échelle des systèmes de communication mobile de cinquième génération (5G), il est maintenant crucial de développer des technologies habilitantes pour les systèmes de communication de sixième génération (6G). Dans l'ensemble, on s'attend à ce que les systèmes 6G répondent à des exigences plus strictes en matière de capacité de transport, de fiabilité, de latence, couverture, consommation d'énergie et densité de connexion. Les techniques existantes en 5G, telles que les communications à ondes millimétriques (mmWave), les réseaux hétérogènes à entrées multiples massives (MIMO), se concentrent principalement sur la conception du système côté émetteur et récepteur, dont le but est de faire face à l'environnement de propagation sans fil défavorable. Récemment, la surface intelligente reconfigurable (RIS), également appelée surface réfléchissante intelligente, est devenue une technologie prometteuse pour sa capacité à configurer un environnement de propagation sans fil [5][19]. Une telle technologie offre aux concepteurs des degrés supplémentaires de liberté pour répondre aux exigences strictes de 6G. Alors que la 5G est actuellement déployée dans le monde.

CHAPITRE II

PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS L'ESPACE LIBRE

II.1 Introduction

Dans le domaine des réseaux sans fil, le canal caractérisant la propagation de l'onde électromagnétique dans l'espace libre présente une importance distinctive. Il est donc essentiel d'avoir une connaissance des mécanismes en jeu sur le canal de propagation et ses interactions avec l'environnement pour pouvoir prédire les chances et les conditions d'établissement d'une liaison radio entre l'émetteur et le récepteur.

Ce chapitre est d'analyse l'espace libre qui est à propos des ondes électromagnétiques et spécifiquement les ondes millimétriques avec leur spectre, les avantages, les phénomènes physique et on se termine par le rôle de ces ondes dans la communication sans fil.

II.2 Les ondes radioélectriques

Une onde radio est notamment caractérisée par sa fréquence, qui s'exprime en Hertz (Hz). Le spectre total des ondes radio est relativement large ce qui employé par la technologie (5G) et (6G).

Les ondes radioélectriques correspondent à des fréquences comprises entre 10 kHz et 2 GHz, un émetteur diffuse ces ondes captées par des récepteurs dispersés géographiquement contrairement aux faisceaux hertziens, il n'est pas nécessaire d'avoir une visibilité directe entre émetteur et récepteur, car celui-ci utilise l'ensemble des ondes réfléchies et diffractées en revanche, la qualité de la transmission est moindre car les interférences sont nombreuses et la puissance d'émission est beaucoup plus faible [19].

II.2.1 Le spectre des ondes électromagnétiques

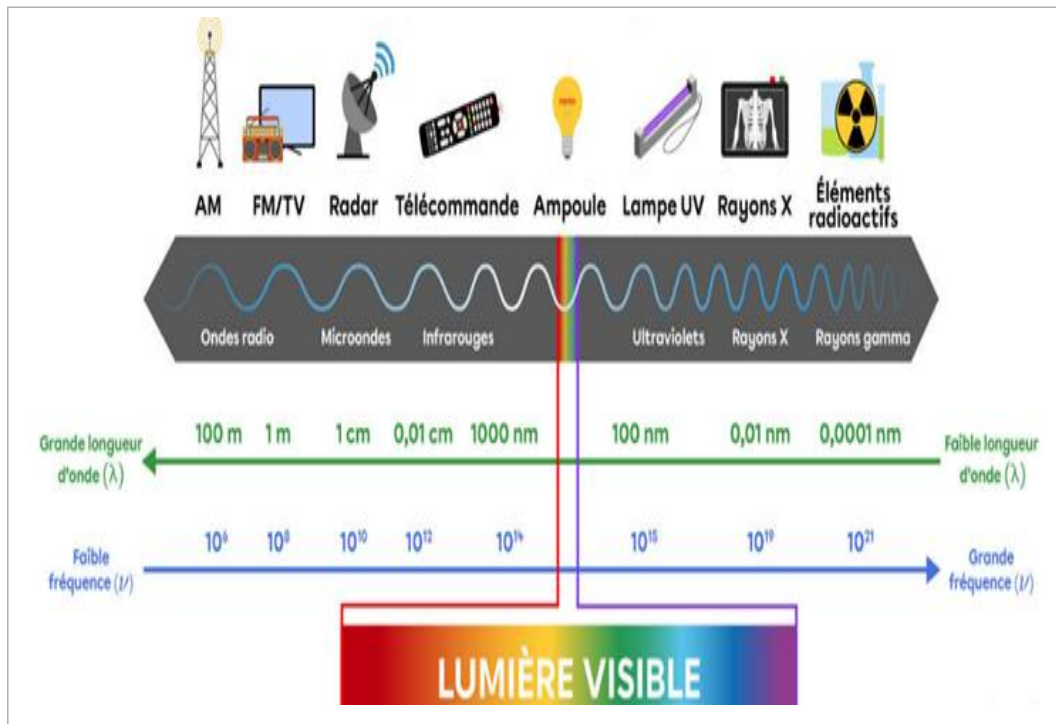


Figure II. 1- Le spectre des ondes électromagnétiques[19].

Tableau II. 1- Les catégories des ondes électromagnétiques.

Longueur d'onde (mètre)	Fréquence (Hertz)	Catégorie d'onde électromagnétique
< 10 picomètres (ie 1 000 milliards de fois plus petit qu'un mètre)	30×10^{18} Hz	Les rayons gamma, produits par des transitions nucléaires
10 picomètres – 10 nanomètres (ie 1 000 millions de fois plus petit qu'un mètre)	30×10^{18} – 30×10^{15} Hz	Les rayons X, qui permettent de faire des radiographies du corps humain
10 nanomètres – 400 nanomètres	30×10^{15} - 750×10^{12} Hz	Les rayons ultra-violet (UV), qui proviennent majoritairement du Soleil et sont responsables par exemple du bronzage ou des coups de soleil.
400 – 800 nanomètres	750×10^{12} – 375×10^{12} Hz	La lumière visible avec toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.
800 nanomètres – 0,1 millimètre	375×10^{12} – 3×10^{12} Hz	Les rayons infrarouges, qui captent la chaleur des objets, de l'environnement.
1 millimètre - 30 kilomètres	300×10^9 Hz - 10 Hz	Les ondes radio, responsables des moyens de télécommunications qu'on connaît aujourd'hui : les radars et satellites, le réseau Wi-Fi, le téléphone portable, la télévision hertzienne et la radio.

II.2.2 Les ondes électromagnétiques dans les réseaux 5G ,6G

Les télécommunications sans fil sont basées sur une liaison hertzienne entre deux émetteurs-récepteurs. Cette liaison s'effectue via une onde électromagnétique qui se propage, par exemple entre un smartphone et une station de base appelée antenne-relais.

Les ondes électromagnétiques (EM) térahertz (THz) correspondent au domaine spectral situé entre l'infrarouge lointain et les hyperfréquences. Bien qu'exploré depuis les travaux initiaux de Rubens au début du XX^e siècle, les difficultés techniques ont longtemps freiné les études et le développement technologique à ces fréquences. Cela peut s'expliquer simplement par des raisons physiques.

La détection des ondes se réalise par absorption et en particulier par photo génération de porteurs. Dans le domaine hyperfréquence, la réponse électromagnétique prépondérante est celle des électrons libres (courant de conduction) et nombre de dispositifs sont métalliques pour faciliter l'écoulement de ces courants de conduction. Par exemple, l'onde est détectée grâce aux courants induits dans des antennes [23].

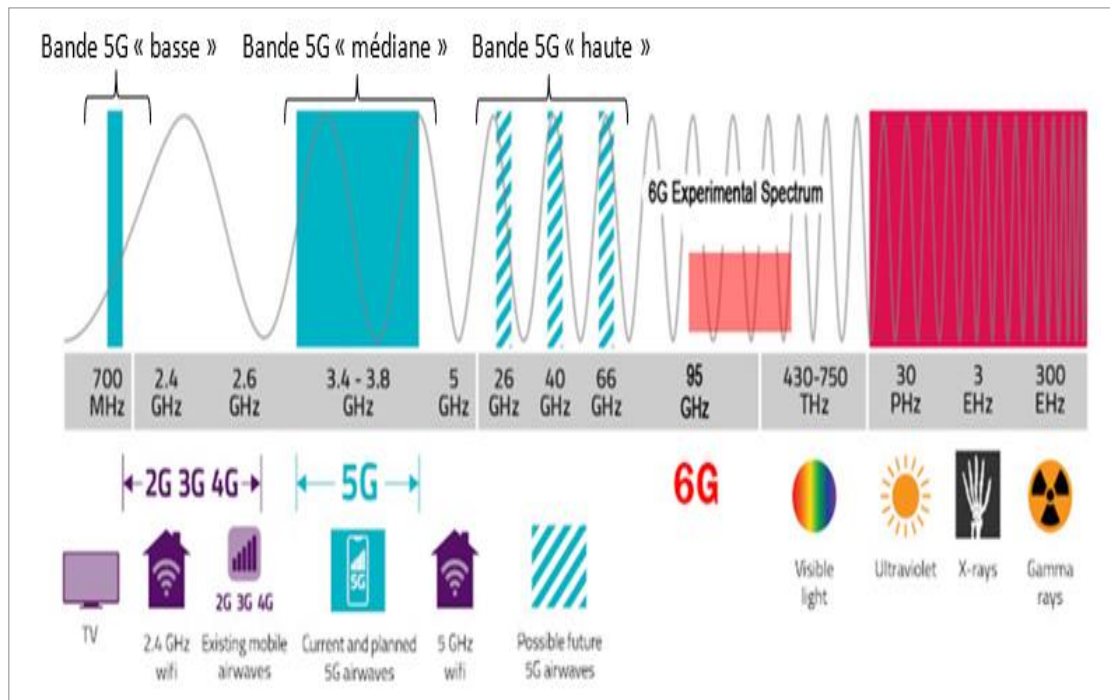


Figure II. 2- Classement des spectres électromagnétique[23].

II.2.3 Les phénomènes physiques de la propagation radioélectrique

Les principaux phénomènes physiques régissant l'interaction de l'onde avec l'environnement sont la réflexion, la transmission, la diffraction et la diffusion.

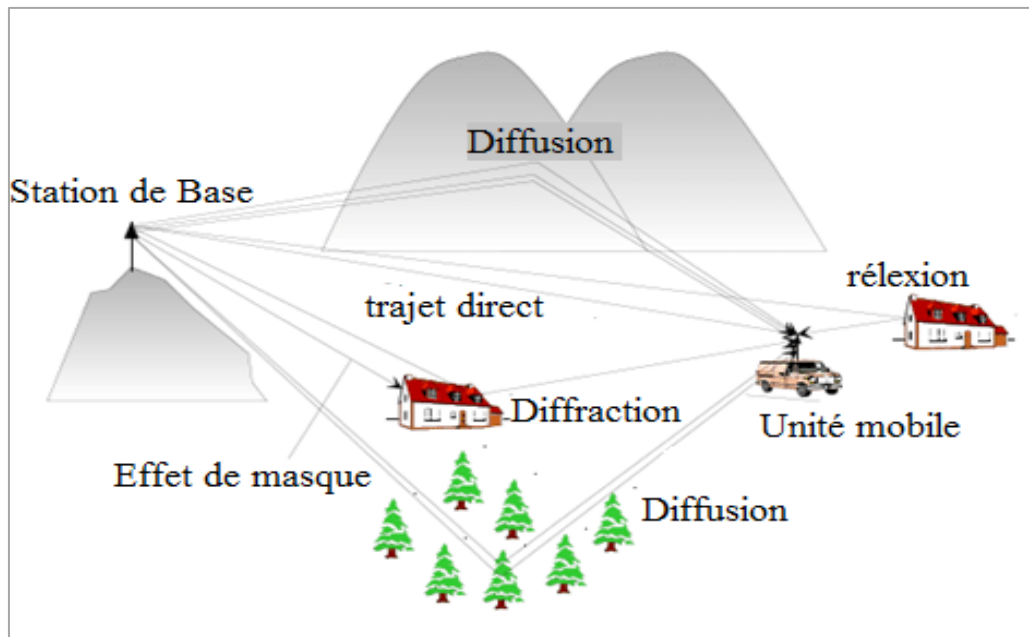


Figure II. 3- Les mécanismes de propagations[24].

II.2.3.1 La réflexion et la transmission

- La réflexion est le phénomène par lequel les vibrations ou les ondes électromagnétique sont réfléchies à un Ce phénomène se produit lorsqu'un La propagation de l'onde affecte une surface de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde [24].
- Le phénomène de transmission est le processus par lequel les vibrations ou les ondes se propager à travers un milieu, par exemple le vide, l'air ou un obstacle, sans un changement de fréquence selon la loi Snell-Descartes.
- Le coefficient de transmission est défini comme le rapport entre le flux d'énergie transmis et le flux d'énergie incident.
- Différents types de La transmission est généralement distinguée en transmission régulière, la vague se propage à travers un objet sans diffusion. En transmission diffuse Le phénomène de diffusion se produit à une échelle macroscopique indépendamment du Lois de réfraction : l'onde incidente, tout en étant transmise, est dispersée sur Enfin, la transmission mixte est en partie régulière et en partie transmission diffuse.

II.2.3.2 La diffraction

Le phénomène de la diffraction se produit lorsque l'onde électromagnétique transmise rencontre un obstacle ayant des dimensions de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde et des formes irrégulières (arêtes, pointes, cônes, ...etc.) Chaque point de l'arête, par exemple, se comporte comme une source secondaire qui rayonne à nouveau l'onde dans plusieurs directions.

Ce phénomène est l'un des facteurs les plus importants dans la propagation de la radio et entraîne des perturbations affectant la propagation de ces ondes [25].

II.2.3.3 La diffusion

Est le phénomène par lequel l'énergie d'une onde électromagnétique est distribuée dans un milieu de propagation dans plusieurs directions après avoir rencontré une surface rugueuse ou hétérogénéités de petites dimensions par rapport à la longueur d'onde. L'énergie émise peut être canalisée le long d'une direction donnée en utilisant un La propagation est réalisée dans ce cas par des réflexions successives des ondes provenant des surfaces du guide d'ondes. Certains environnements, par exemple : les rues, les couloirs ou les tunnels des canyons se comportent comme des guides d'ondes propagation des ondes radio [25].

II.3 Les ondes millimétriques

Les systèmes de communication sans fil, comme les communications mobiles, ont évolué de façon spectaculaire depuis leurs humbles débuts.

L'antenne est l'élément clé de la technologie sans fil qui a été utilisée pour différentes applications permettant la transmission de données à haut débit, les communications point à point et les communications cellulaires mobiles.

Pour augmenter les débits de données et la capacité disponible dans le domaine spectral, on observe une tendance croissante vers des fréquences millimétriques de 30 GHz à 300 GHz avec des longueurs d'onde comprises entre 10 mm et 1 mm, appelées ondes millimétriques. À ces fréquences, le signal de propagation souffre d'une atténuation due à l'absorption atmosphérique et ne peut pas être utilisé pour les communications à longue distance, mais il est très intéressant pour les applications à grande vitesse et à courte distance [26][27].

Les fréquences des ondes millimétriques présentent des avantages et des généreuses largeurs de bande, comme l'utilisation de composants RF beaucoup plus petits, y compris les antennes, par rapport aux fréquences plus basses. La petite taille de ces antennes permet d'en regrouper un grand nombre dans de petits espaces, où les composants actifs et passifs et les antennes sont intégrés dans un même ensemble [28].

II.3.1 Le spectre des ondes millimétriques

Les ondes millimétriques se trouvent sur la tranche des plus hautes fréquences des ondes radioélectriques avec une longueur d'onde s'étalant de 1 à 10 mm, et une fréquence allant de 24 à 300 GHz.

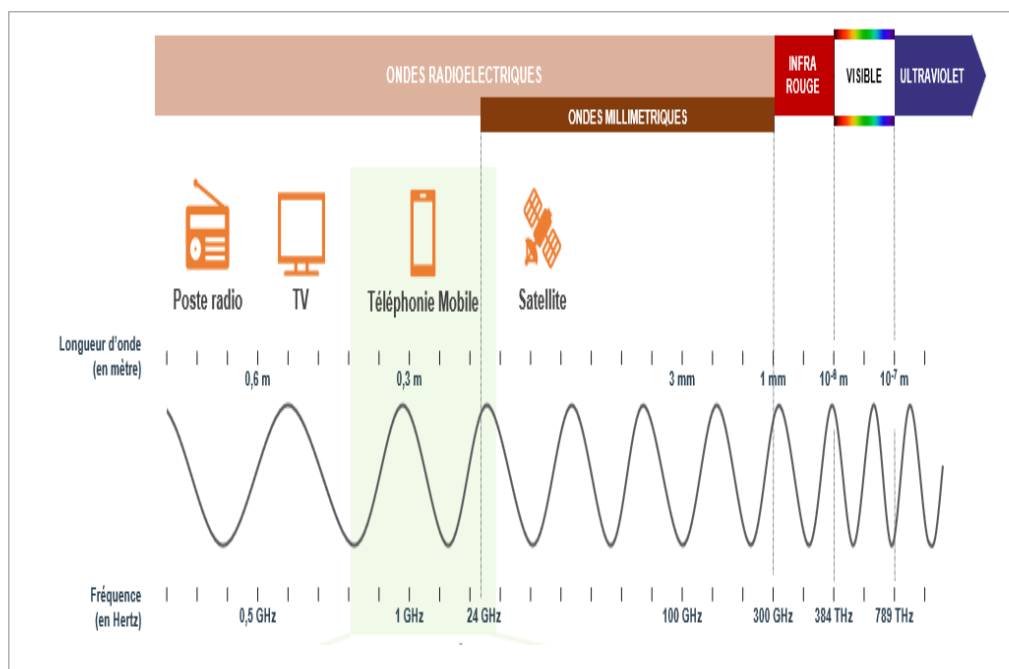


Figure II. 4- Le spectre des ondes millimétriques[28].

II.3.2 Les avantages et les inconvénients des ondes millimétriques

a. Les avantages d'une utilisation de ces bandes millimétriques :

- En raison de l'augmentation du nombre d'appareils connectés aux réseaux sans fil, la rareté des ressources spectrales est devenue un problème de plus en plus important. Pour le moment, nous ne pouvons toujours partager qu'une quantité limitée de bande passante sur un spectre extrêmement étroit, ce qui affecte considérablement l'expérience utilisateur. La technologie des ondes millimétriques est la clé pour résoudre ce problème.
 - L'utilisation d'une large bande passante de (30 GHz-300 GHz) par rapport aux autres ondes radio des réseaux sans fil.
 - Selon les principes de la communication, la bande passante maximale du signal pour la communication sans fil est d'environ 5% de la fréquence porteuse. Ainsi, plus la fréquence porteuse est élevée, plus la bande passante de signal réalisable est grande.
 - Parmi les bandes d'ondes millimétriques, la bande 28 GHz et la bande 60 GHz sont les deux plages les plus prometteuses pour une utilisation en 5G et 6G.
 - Faisceaux étroits : avec la même taille d'antenne, il est possible d'emballer plus d'éléments d'antenne aux fréquences d'ondes millimétriques.
 - Elle offre au moins une bande passante continue de 5 GHz au monde dans le cas de certaines bandes, comme la bande autour de 60 GHz.
 - Millimétriques sont complexes et permet une transmission à haute sécurité [28].
 - Un autre avantage majeur de la technologie des ondes millimétriques est sa petite taille de composant. Les appareils intelligents et les téléphones mobiles modernes doivent être efficace et de petite taille. Les ondes millimétriques sont complexes et permet une transmission à haute sécurité [28].
- b.** Malgré ces avantages, la bande millimétrique fait face à certains inconvénients comme :
- Une courte portée.
 - Une grande atténuation.
 - Les ondes millimétriques sont absorbées facilement par le feuillage et les bâtiments, les pertes de puissances sont provoquées par les matériaux comme la brique, les vitres teintées, les murs intérieurs et les cabines.

II.3.3 Limitation des ondes millimétriques

Les principales limites des ondes millimétriques sont : la portée limitée et la ligne de visée (LOS) [28].

- **Portée limitée** : Les facteurs suivants affectent la portée de transmission des ondes millimétriques des longueurs d'onde plus courtes allant de 1 à 10 mm, une forte atténuation atmosphérique due au brouillard, à la pluie et à l'humidité. La portée de transmission peut être augmentée en utilisant un réseau d'antennes à haut gain qui augmente la puissance effective rayonnée.
- **Ligne de visée (LOS)** : La communication par ondes millimétriques nécessite une ligne de visée (LOS) et les obstacles physiques dans les applications pratiques affaiblissent les signaux, réduisant ainsi la portée de transmission.

II.3.4 Les applications des ondes millimétriques

II.3.4.1 La conception des petites cellules avec la 5G

La 5G et le concept des petites cellules sont parmi les technologies les plus discutées ces derniers temps. En raison de sa nécessité de prendre en charge un débit de données plus élevé, la 5G et la 6G utilisera des ondes millimétriques (entre 24 GHz et 86 GHz). Les entreprises des futures générations la technologiques testent avec le support des ondes millimétriques. Le concept des petites cellules pourrait intégrer les ondes millimétriques dans sa mise en œuvre future [28].

II.3.4.2 La bande V

La bande V, également appelée "bande en V", est une désignation standard de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) pour une plage de fréquences située dans la partie micro-ondes du spectre électromagnétique, s'étendant de 40 à 75 gigahertz (GHz) [28].

Cette bande est peu utilisée, sauf dans le cadre de la recherche en radar à ondes millimétriques et d'autres types de recherche scientifique. Il ne faut pas la confondre

avec la bande V (bande cinq) de la gamme de fréquences UHF, qui va de 600 à 1000 MHz [28].

La bande V est également utilisée pour les systèmes de communication terrestre à ondes millimétriques de grande capacité. Aux États-Unis, la Fédéral Communications Commission a attribué la bande de fréquences de 57 à 71 GHz aux systèmes sans fil sans licence.

Ces systèmes sont principalement utilisés pour les communications à grande capacité et à courte distance (moins de 1 mile). En outre, les fréquences à 70, 80 et 90 GHz ont été attribuées comme bandes "légèrement autorisées" pour les communications sans fil gigabit à bandes multifréquences. Toutes les liaisons de communication dans la bande V nécessitent une ligne de visée dégagée entre le point émetteur et le point récepteur, et l'évanouissement dû à la pluie doit être pris en compte lors de l'analyse du budget de liaison.

II.3.4.3 WiGig

WiGig, également connu sous le nom de 802.11ad ou Wireless AD (ou Wi-Fi 60 GHz), offre des vitesses Wi-Fi environ sept à huit fois plus rapides que celles de 802.11ac, avec des vitesses de téléchargement pouvant atteindre 10 Gbps. Avec cette capacité, WiGig peut télécharger un film HD en quelques secondes. Il se distingue par une faible latence et une réactivité presque équivalente à celle d'une connexion filaire.

Contrairement au Wi-Fi standard qui utilise généralement les bandes de fréquences 2,4 GHz ou 5 GHz, par contre la WiGig utilise le spectre 60 GHz. Les canaux plus larges de ce spectre permettent de transporter davantage de données dans le signal. de plus, la technologie de formation de faisceau est utilisée pour établir un signal direct entre les appareils, éliminant ainsi les interférences [28].

Le nom WiGig provient de l'Alliance sans fil Gigabit, une association formée à l'origine pour promouvoir l'adaptation de la norme IEEE 802.11ad. Cependant, c'est maintenant certifié par WiFi Alliance [27].

II.3.4.4 Communication par Satellite

Les ondes millimétriques sont des candidats parfaits pour la communication par satellite. À des altitudes plus élevées d'orbites, il fonctionne parfaitement avec un débit massif et une faible latence [29].

II.3.5 Potentiel des ondes millimétrique

La pénurie de spectres millimétriques a suscité des études et des efforts industriels visant à exploiter de larges bandes de fréquences à des longueurs d'ondes très petites qui n'avaient pas été exploitées auparavant. Associées à la technologie CMOS RF à faible puissance, ces bandes de fréquences permettent le déploiement d'un grand nombre d'antennes miniaturisées dans des espaces restreints. La communication sans fil utilisant des ondes millimétriques est confrontée à des défis de propagation, tels que les pertes de trajet, l'effet d'ombrage, ainsi que diverses atténuations significatives dues à des obstructions. Pour ce faire, les techniques liées à l'augmentation des fréquences permettent de réduire l'impact de ces pertes, telles que les antennes directionnelles à gain élevé (formation de faisceaux) et les systèmes d'entrées multiples sorties multiples (MIMO). Ces techniques doivent être modélisées pour assurer une transmission fiable [29].

II.4 Le rôle des ondes millimétriques dans les technologies 5G, 6G

La technologie de communication sans fil a évolué à un rythme extrêmement rapide au cours des quatre dernières décennies. La cinquième génération à venir (5G) est très prometteuse pour fournir un débit de données ultra-rapide, une très faible latence et une efficacité spectrale considérablement améliorée en exploitant le spectre d'ondes millimétriques pour la première fois dans les infrastructures de communication mobile.

Les nouvelles applications avides de données et le réseau sans fil grandement élargi nécessiteront la communication de sixième génération (6G) qui représente une mise à niveau significative du réseau 5G couvrant presque toute la surface de la terre et l'espace proche. Dans les réseaux 5G et les futurs réseaux 6G, les technologies à ondes millimétriques joueront un rôle important dans l'accomplissement des tâches de performance et de communication du réseau envisagées.

II.4.1 Les antennes mmWave pour communications 5G/6G

Les antennes sont des composants passifs frontaux critiques responsables de l'émission et de la réception d'ondes électromagnétiques dans les systèmes de communication sans fil [30]. Leurs propriétés électriques, y compris l'impédance d'entrée, le modèle de rayonnement, le gain, la polarisation, et l'intermodulation passive, affecteront la couverture de signal, l'efficacité, le chiffre de bruit, et la linéarité du système. Pour les communications 5G, les exigences du système exigent de nouvelles antennes à large bande/multibande et mmWave entièrement intégrées avec double polarisation et couverture de faisceau large [31], [32]. Par conséquent, des efforts considérables ont été faits sur les antennes mmWave pour les stations de base BS et les utilisateurs terminaux UT 5G dans le milieu universitaire et l'industrie.

II.4.2 MmWave Antennes pour 5G BS

Pour la 5G BS, des grands réseaux d'antennes avec un grand nombre d'éléments sont nécessaires. Il peut fournir un haut degré de liberté pour réaliser le beamforming flexible [33]. Dans la gamme de fréquences inférieure à 6 GHz, des antennes dipolaires de 45° avec des circuits montés verticalement sont couramment utilisées comme éléments radiants à double polarisation pour les SR [34]. de manière conventionnelle, une antenne est généralement conçue et fabriquée, puis connectée aux modules frontaux RF à l'aide de câbles. Cependant, un tel processus ne convient plus aux réseaux MIMO massifs à des fréquences mmWave, car les variations de phase et d'amplitude causées par les câbles et les connecteurs entre un grand nombre de canaux pourraient être importantes. Pour les BS 5G, le réseau d'antennes et les circuits frontaux RF doivent être entièrement intégrés et conçus conjointement [35].

En outre, une largeur de faisceau large et stable qui peut être prise en charge dans une ou plusieurs bandes de fréquences 5G mmWave émises est très souhaitable. Jusqu'à présent, plusieurs types d'antennes mmWave pour les applications BS ont été proposés, y compris les antennes à fente conique alimentées par des guides d'ondes intégrés au substrat (SIM) [36], des dipôles magnéto-électriques [37], des patches pliés verticalement [38], des radiateurs à méta-surface [39], des radiateurs à ouverture [40], et ainsi de suite. Cependant, ils n'ont pas de double polarisation, ce qui limite leurs applications dans les BS 5G.

II.4.3 MmWave Antennes pour 5G UT

Contrairement aux antennes pour les SR, bien que la formation de faisceaux soit toujours nécessaire aux UT, le nombre d'éléments est inférieur en raison de l'espace limité. Les antennes fonctionnant dans le régime de fréquence inférieur à 6 GHz sont étudiées depuis plus de 20 ans [41], mais l'intégration d'antennes et de réseaux mmWave dans les UT est un domaine de développement, la plate-forme UT nécessite des considérations de conception spéciales comme suit [42].

Tout d'abord, il est préférable que les antennes mmWave soient entièrement intégrées dans un UT. en détail, les structures d'antenne ne doivent pas dépasser de la périphérie d'un téléphone portable pour obtenir une meilleure protection mécanique des antennes et avoir un extérieur convivial pour les utilisateurs.

Deuxièmement, les réseaux d'antennes mmWave devraient couvrir autant que possible la sphère entière avec une pire supérieure à un certain seuil puisque l'orientation des téléphones mobiles change constamment dans des scénarios réalistes. Une telle couverture de signal est caractérisée par l'efficacité de couverture, qui décrit la couverture spatiale d'un réseau d'antennes avec des faisceaux balayés [43]. En raison de la couverture de direction de faisceau sous-hémisphérique des réseaux phasés planaires, afin d'obtenir une couverture élevée, plusieurs ensembles de réseaux doivent être utilisés sur un UT et leurs emplacements doivent être optimisés.

Troisièmement, l'influence de l'utilisateur doit être prise en considération [44]. En raison du faible facteur de forme des antennes mmWave, le corps humain, comme les mains à proximité des antennes mmWave, modifierait considérablement les propriétés électriques des antennes. Il peut provoquer une mauvaise correspondance de l'impédance, une distorsion du motif et une dégradation de l'efficacité du rayonnement.

Enfin, l'intégration des antennes et des CRFI est une autre question cruciale [45]. Pour un UT tel qu'un téléphone intelligent, il est très probable qu'il transportera de plus en plus de capteurs qui nécessitent de l'espace pour installer.

II.4.4 MmWave Antennas for 6G Communications

Pour les communications 6G, les conceptions d'antennes sont confrontées à davantage de défis dans les aspects suivants.

Tout d'abord, le fonctionnement multi-bande est nécessaire afin que, dans la même ouverture, plusieurs services dans différentes bandes mmWave ainsi que les bandes inférieures à 6 GHz puissent être pris en charge. Cela nécessite des conceptions structurelles tridimensionnelles innovantes et des méthodes avancées de partage d'ouverture.

Deuxièmement, les antennes mmWave reconfigurables sont hautement souhaitables, pour basculer entre différentes bandes opérationnelles ou modes de modèle pour des applications polyvalentes. Troisièmement, l'intégration à grande échelle et transparente des puces mmWave fonctionnant à différentes bandes avec les antennes du même module est nécessaire. Cela implique des conceptions d'emballage, un processus de fabrication et une considération de dissipation de chaleur. [46]

II.5 Conclusion

En conclusion, dans ce chapitre nous avons vu la propagation en espace libre et les ondes électromagnétiques spécifiquement les ondes millimétriques avec leurs applications et ces avantages qui révèlent la complexité et l'ingéniosité des systèmes de communication sans fil, et leurs inconvénients qui sont basés sur les phénomènes physiques, alors la solution de ces problèmes c'est le RIS quand va le découvrir dans le troisième chapitre, qui est un moyen révolutionnaire pour contrer les limites de propagation des ondes millimétriques.

Elle offre une amélioration significative de la couverture et de la qualité des signaux dans les environnements urbains denses et à l'intérieur des bâtiments, où les signaux sont autrement sujets à des pertes importantes. Les RIS ouvrent, grâce à leur capacité à façonner et à diriger les ondes électromagnétiques, la voie à une nouvelle génération de réseaux sans fil intelligents, où l'environnement lui-même devient modulable et reconfigurable.

CHAPITRE III

RECONFIGURABLES SURFACES INTELLIGENTES

III.1 Introduction

La communication assistée par surface intelligente reconfigurable (RIS) est considérée comme un sujet de recherche passionnant dans les communautés universitaires et industrielles car elle fournit une solution abordable émergente pour obtenir des systèmes sans fil de nouvelle génération de haute qualité et sécurisés.

En particulier, le déploiement de RIS dans les réseaux sans fil 5G, 6G promet de réduire les coûts matériels du système, la complexité du traitement du signal, ainsi que la consommation d'énergie due à la petite taille, à la légèreté et à la capacité de façonner activement l'environnement de propagation sans fil.

Les objectifs exigeants pour les futures générations (5G), (6G) ont stimulé les récents efforts de recherche sur les nouveaux matériaux et les architectures frontales de radiofréquences pour le sans-fil connectivité, ainsi que des paradigmes informatiques et de communication révolutionnaire. Parmi les candidats pionniers ces technologies qui appartiennent aux surfaces intelligentes reconfigurables (RIS), qui sont des structures planes artificielles avec des circuits électroniques intégrés qui peuvent être programmés pour manipuler le champ électromagnétique entrant dans un large intégration des RIS dans les réseaux sans fil a été récemment préconisée comme une de transformer tout environnement de propagation de signal sans fil en un environnement programmable dynamiquement, ces dispositifs de RIS sont capables de reconfigurer l'environnement de propagation sans fil en réglant soigneusement les changements de phase d'un grand nombre d'éléments réfléchissants passifs à faible coût.

Dans ce chapitre, nous visons à répondre aux questions suivantes : pourquoi on a besoin d'un RIS ? quelle est l'architecture du RIS? Et Quelles sont les applications de RIS ?

III.2 Le RIS

Les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) ont été envisagées comme une technologie clé permettant de contourner tous les problèmes. Les RIS peuvent être installés sur de grandes surfaces planes (par exemple, les murs ou plafonds à l'intérieur, bâtiments ou signalisation extérieure) afin de refléter la fréquence radio (RF) l'énergie autour des obstacles et création d'une ligne de visée virtuelle (LoS) chemin de propagation entre une source mmWave et la destination [47].

Un RIS est une surface plane constituée d'un tableau de passifs éléments réfléchissants, dont chacun peut imposer indépendamment le décalage de phase requis sur le signal entrant [47], basé sur les matériaux spécifiques des éléments réfléchissants, le RIS peut être classés en structures à base de réseau d'antennes [48] et de méta-surface.

En ajustant soigneusement les changements de phase de tous les éléments réfléchissants, les signaux réfléchis peuvent être reconfigurés pour se propager vers les directions souhaitées. En raison des développements rapides dans les métamatériaux, la réflexion Le coefficient de chaque élément peut être reconfiguré en temps réel s'adapter à la propagation sans fil dynamique fluctuante environnement.

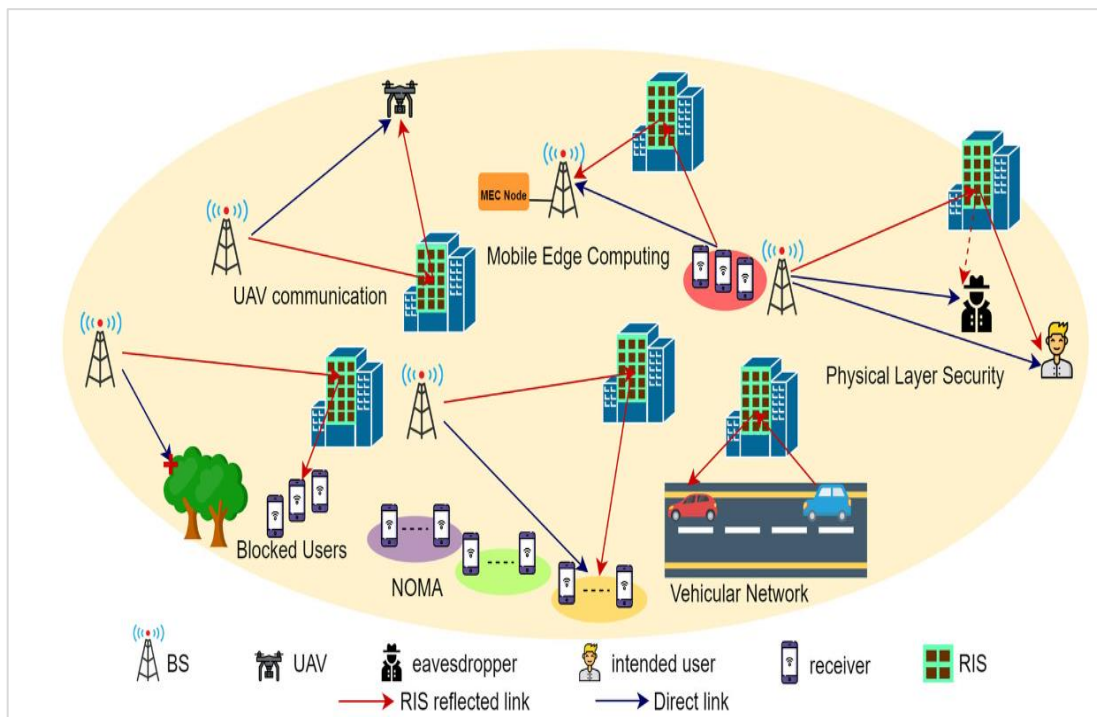


Figure III. 1- Les applications émergentes du RIS pour les réseaux sans fil 5G,6G[47].

III.3 Architecture de RIS (Reconfigurables intelligentes surfaces)

L'architecture de RIS comprend deux parties : le multi-surface de planification de couche et un contrôleur intelligent [50]. Dans une architecture en couches, comme le montre la **figure III.2**, la couche externe comprend d'un grand nombre d'éléments imprimés sur un substrat diélectrique pour interagissent directement avec les signaux d'incident.

La couche intermédiaire est panneau, qui évite toute fuite de signal. La couche intérieure est un contrôle circuit imprimé, responsable de l'ajustement des amplitudes de réflexion et les changements de phase de chaque élément RIS. La reconfiguration de Les éléments RIS sont gérés par le contrôleur intelligent, comme un réseau de porte programmable sur le terrain (FPGA), qui sert également de passerelle pour communiquer avec la station de base (BS) et un autre réseau composant.

La structure d'un élément individuel, intégré avec un La diode intrinsèque négative (PIN) est également montrée dans la **figure III.2** en contrôlant la tension via la ligne de polarisation, la diode PIN peut être commutée entre les états d'activation et de

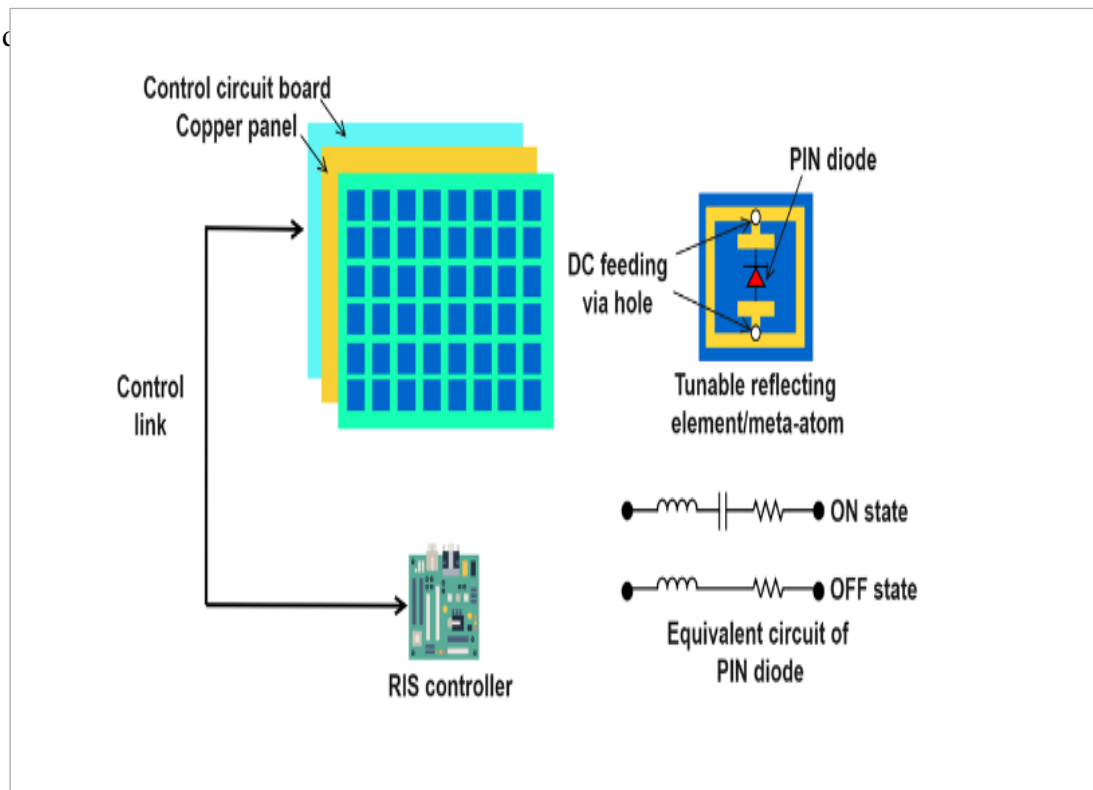


Figure III. 2- L'architecture de RIS. [49].

III.4 Principe Fondamental Du RIS

La mise en œuvre du RIS est basée sur le concept de synthétiquement forme bidimensionnelle produite des métamatériaux électromagnétiques, La méta-surface, qui est composée d'un nombre massif de des éléments réfléchissants, appelés méta-atomes [64]. Le comportement de la méta-surface est contrôlé par les propriétés géométriques, c'est-à-dire la taille, l'orientation, l'arrangement, etc., des méta-atomes. Cependant, en raison de la nature stochastique des canaux de propagation, les applications de communication sans fil exigent une réponse en temps réel des méta-atomes, ce qui peut être réalisé par des dispositifs électroniques, des matériaux fonctionnels ou un actionnement mécanique.

III.5 Le RIS dans l'environnement

Cette **figure III.3** c'est un exemple de RIS dans l'environnement, chaque RIS compose de plusieurs diodes passives intégrées qui sont reconfigurables c'est-à-dire chaque fois l'utilisateur change sa place le RIS doit automatiquement change leur destination.

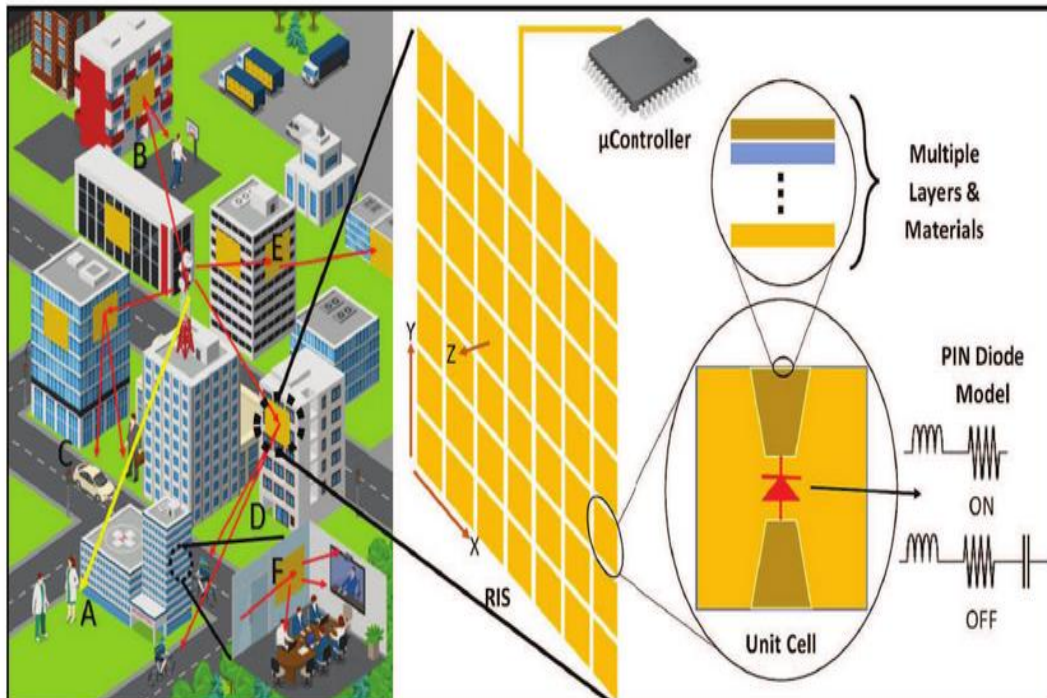


Figure III. 3- Exemple d'environnement assiste par RIS[50].

III.6 Les applications du RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces)

Les RIS offrent des degrés supplémentaires de liberté pour améliorer les avantages de la performance du système. Nous énumérons ci-dessous quelques applications RIS dans divers systèmes émergents.

III.6.1 L'association des ondes millimétriques dans le RIS

Les techniques MmWave ont le potentiel de supporter des débits de données élevés étant donné leur bande passante élevée. Cependant, la communication à la fréquence mmWave présente également certains inconvénients, tels que sa perte de chemin sévère. Heureusement, cela peut être atténué par son énorme gain de réseau fourni par un grand réseau d'antennes dans un espace compact, compte tenu de sa courte longueur d'onde. Un autre l'obstacle est qu'il est vulnérable aux blocages par les voitures, les piétons et les arbres. La perte de pénétration est également élevée, ce qui ne peut pas être facilement résolu en utilisant un grand réseau d'antennes. Au lieu de cela, les RIS peuvent être déployés pour construire une liaison de transmission auxiliaire même lorsque la liaison directe est bloquée [51].

III.6.2 Réseaux multicellulaires assistés par RIS

Pour maximiser l'efficacité du spectre (SE), plusieurs BS dans différentes cellules réutilisent les mêmes ressources de fréquence rares, ce qui entraîne des interférences inter-cellules, en particulier pour les utilisateurs de bord de cellule.

Plus précisément, la puissance de signal souhaitée reçue par l'utilisateur de bord de cellule de sa BS de service est comparable à l'interférence reçue de ses cellules voisines. Par conséquent, les utilisateurs de bord de cellule souffrent d'un signal-à-interférence-plus-faible rapport de bruit (SINR).

Pour résoudre ce problème, les auteurs de [51] ont proposé de déployer un RIS à la limite de la cellule, comme la montre la **figure III.4**. Dans un tel contexte, le RIS est capable d'améliorer simultanément le signal obtenu à partir de la BS de service et d'atténuer l'interférence de l'autre.

III.6.3 Informations et alimentation sans fil simultanées assistées par RIS Réseaux de transfert (SWIPT)

Réseaux SWIPT est une technique prometteuse de fournir l'énergie économique à l'Internet des objets (IoT), où est une BS avec l'alimentation électrique constante diffuse simultanément un signal sans fil aux récepteurs d'information (IR) et aux récepteurs d'énergie (ER). Le principal défi dans les systèmes SWIPT est que les ER et les IR fonctionnent sous différentes exigences d'alimentation électrique. Les ER nécessitent une puissance reçue sur l'ordre beaucoup plus élevée que les IR. Par conséquent, les SU devraient être déployées plus près du BS que les DI à récolter puissance suffisante, puisque l'atténuation du signal limite les ER pour résoudre ce problème, les auteurs de [52] ont proposé de déployer un RIS à proximité (**Figure III.4**).

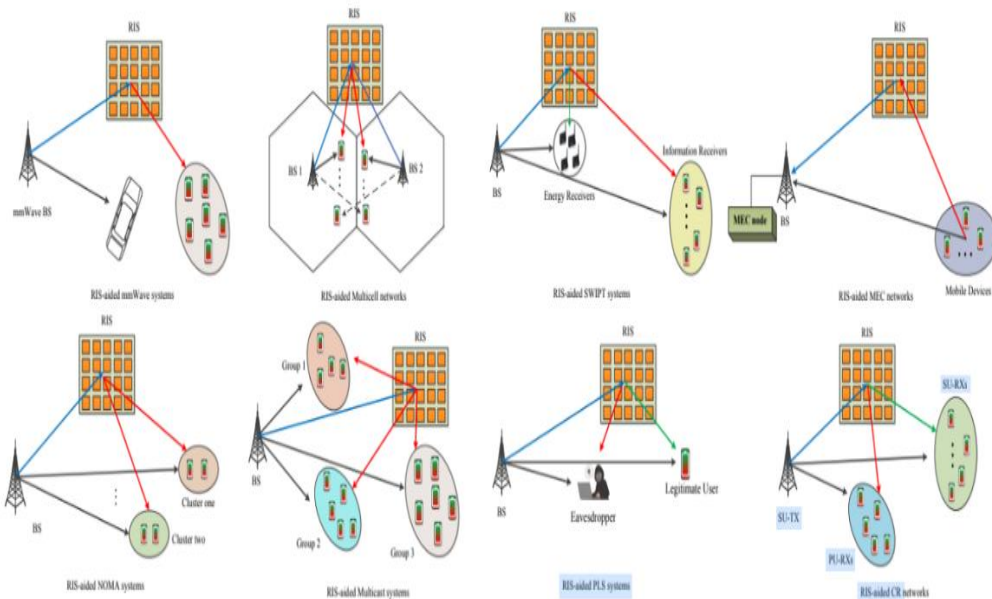


Figure III. 4- Les applications du RIS dans divers systèmes émergents de sous-6 GHz[52].

III.6.4 Réseaux MEC (Mobile Edge Computing) assistés par RIS

Dans les nouvelles applications de futures générations telles que la réalité virtuelle (RV), les tâches de traitement d'images et de vidéos à forte intensité de calcul doivent être exécutées en temps réel. Cependant, en raison des capacités limitées d'alimentation et de matériel des périphériques VR, ces tâches ne peuvent pas être accomplies

localement. Pour résoudre ce problème, ces tâches informatiques intensives peuvent être déchargées sur des nœuds informatiques puissants qui sont habituellement déployés à la périphérie du réseau. Cependant, dans certains cas particuliers où ces appareils sont loin du nœud MEC, ils peuvent souffrir d'un faible taux de déchargement des données en raison de la perte de chemin sévère, ce qui entraîne des retards de déchargement excessifs. Pour surmonter cet obstacle, un nouveau cadre MEC assisté par RIS a été proposé en [53], comme le montre la **figure III.3**.

III.6.5 Réseaux de sécurité de la couche physique (PLS) assistés par RIS

En raison de la nature de diffusion de la transmission sans fil, les liaisons sans fil sont sujettes à des menaces de sécurité telles que des attaques de brouillage ou des fuites d'informations sécurisées. Récemment, les techniques PLS ont fait l'objet de recherches approfondies, car elles peuvent éviter les protocoles d'échange de clés complexes et conviennent aux applications sensibles à la latence. Afin de maximiser le taux d'une liaison de communication sécurisée, le bruit artificiel et les antennes multiples ont été proposés.

Cependant, lorsque les utilisateurs légitimes et les espions ont des canaux corrélés ou lorsque les espions sont plus proches de la BS que les utilisateurs légitimes, le taux de sécurité réalisable reste limité. Pour résoudre ce problème, en [54], un RIS a été déployé dans un réseau fonctionnant en présence d'une machine d'écoute, comme le montre la **figure III.3**, afin d'atténuer la fuite d'informations vers les machines d'écoute, tout en augmentant simultanément la puissance du signal reçu chez les utilisateurs légitimes.

III.7 Les techniques d'estimation des canaux pour les communications RIS

De nombreuses technologies ont été considérées, par les chercheurs et les industries, comme des outils potentiels pour atteindre les exigences 6G en termes d'augmentation du taux de données, de densification du réseau, d'amélioration de l'efficacité énergétique. Parmi ces technologies, on peut citer l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique [55], les communications millimétriques et sub-Tera Hertz et l'utilisation de surfaces intelligentes reconfigurables (RIS).

Avec un faible coût matériel et la consommation d'énergie, l'utilisation de RIS peut améliorer la couverture et la capacité dans les futures communications 6G. RIS est une

structure plane qui contrôle l'environnement de communication sans fil en réglant les coefficients des éléments RIS [56].

Il existe de nombreux défis liés au RIS, allant des aspects technologiques pour la conception de cellules d'unité dédiées, la gestion du faisceau, la direction du faisceau et l'estimation des paramètres du canal depuis et vers le RIS. L'estimation du canal se réfère à l'estimation des paramètres du canal à partir des signaux reçus, lorsque des symboles pilotes connus sont utilisés pour estimer les paramètres souhaités. Les techniques d'estimation des canaux dépendent du modèle de canal, du nombre d'utilisateurs, ...etc. Plusieurs techniques ont été présentées en [57] et [58], où les auteurs ont catégorisé l'estimation des canaux techniques basées sur le modèle de canal en deux classes à savoir le modèle de canal structuré et non structuré.

III.7.1 Modèle de canal structuré pour RIS

Le modèle de canal structuré peut être caractérisé par un modèle de canal géométrique ou de canal Saleh-Valenzuela (SV) (en bandes de fréquence mm-Wave et THz), où le nombre de paramètres de canal est faible et la diffusion est clairsemée. À titre d'illustration, considérons le système MIMO à des ondes millimétriques assisté par RIS en liaison descendante présenté à la **figure III.5**, qui comprend un BS multi-antennes, un MS multi-antennes unique et un RIS ayant une matrice de contrôle de phase Ω . $H_{B,R}$ représente le canal entre le BS et le RIS, $H_{R,M}$ représente le canal entre le RIS et le MS, $A_o D_{BS}$ représente l'angle de départ du BS vers le RIS, $A_o A_{RIS}$ et $A_o D_{RIS}$ représentent l'angle d'arrivée et l'angle de départ au RIS respectivement, et $A_o A_{MS}$ représente l'angle d'arrivée à la station mobile. $H_{B,R}$ est défini comme suit :

$$H_{B,R} = A_R(A_o A_{RIS})\rho_{B,R} A_B^H(A_o D_{BS}) \quad (\text{III, 1})$$

Où $\rho_{B,R}$ est une matrice diagonale ayant les gains de chemin pour le canal entre le BS et le RIS. A_R Et A_B sont les matrices de réponse du tableau pour le RIS et le BS respectivement. $H_{R,M}$ Est défini de manière similaire :

$$H_{R,M} = A_M(A_o A_{MS})\rho_{R,M} A_R^H(A_o D_{RIS}) \quad (\text{III,2})$$

Le canal composite est exprimé comme suit :

$$H = H_{R,M} \Omega H_{B,R} = A_M (A_0 A_{MS}) \rho_{R,M} A_R^H (A_0 D_{RIS}) \Omega A_R (A_0 A_{RIS}) \rho_{B,R} A_B^H (A_0 D_{BS}) \quad (\text{III},3)$$

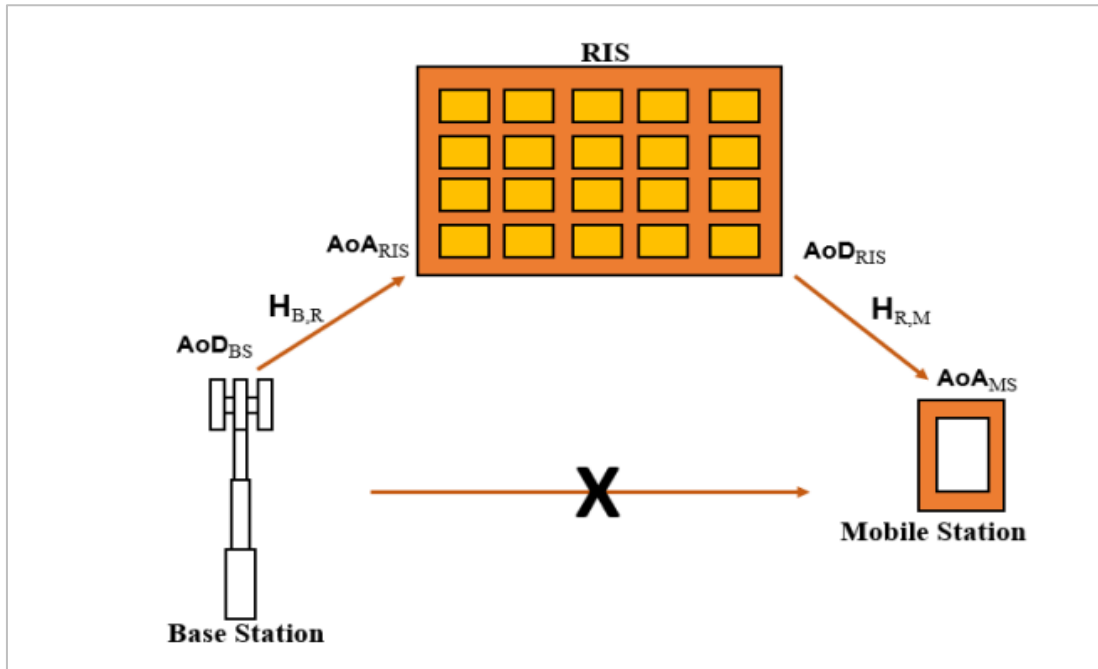


Figure III. 5- Modèle de canal d'une liaison descendante [58].

III.8 Gestion des faisceaux pour les systèmes assistés par RIS

Pour obtenir des performances optimales, les systèmes de communication sans fil dépendent de l'utilisation de plusieurs antennes et du traitement avancé du signal. Avec l'essor des réseaux 5G et 6G, la formation de faisceaux et la gestion des faisceaux se compliquent en raison de facteurs tels que la mobilité des utilisateurs, le nombre accru d'antennes et l'utilisation de fréquences plus élevées. La réalisation du beamforming directionnel est un défi majeur dans les réseaux d'antennes MIMO.

L'une des caractéristiques fondamentales pour relever ce défi est le processus de gestion des faisceaux.

La gestion des faisceaux est un aspect essentiel des systèmes de communication sans fil modernes, en particulier dans le contexte des communications mmWave en raison des caractéristiques d'atténuation et de direction élevées des signaux mmWave

[59][60]. La formation de faisceaux à ces fréquences permet des liaisons de grande capacité en 5G et au-delà.

Les techniques de gestion du faisceau sont utilisées pour optimiser l'utilisation des faisceaux radio directionnels à diverses fins, y compris la formation de faisceaux, la direction du faisceau et le suivi du faisceau.

III.8.1 Architecture MIMO massive

Le beamforming est une composante essentielle des systèmes MIMO massifs, où des centaines d'antennes sont probablement utilisées à la station de base. Les techniques de formation de faisceaux aident à concentrer les signaux dans la direction de l'utilisateur prévu, améliorant l'efficacité spectrale et réduisant les interférences on considère différentes architectures qui peuvent être divisées en trois catégories différentes [61] :

- a. Formation de faisceaux numériques :** La formation de faisceaux numériques conçoit différents signaux dans le domaine numérique où chaque signal est dédié à une antenne. Cette architecture permet la plus grande flexibilité puisque l'on peut assigner différentes puissances et phases à différentes antennes.
- b. Formation de faisceaux analogiques :** La formation de faisceaux analogiques utilise une chaîne RF unique et des déphaseurs. Le même signal est transmis à chaque antenne du réseau d'antennes, mais avec des phases différentes.
- c. Formation de faisceaux hybride :** La formation de faisceaux hybride combine la formation de faisceaux numériques et analogiques pour trouver un équilibre entre complexité et performance. C'est particulièrement important pour les systèmes mmWave, où les approches entièrement numériques sont gourmandes en énergie et coûteuses.

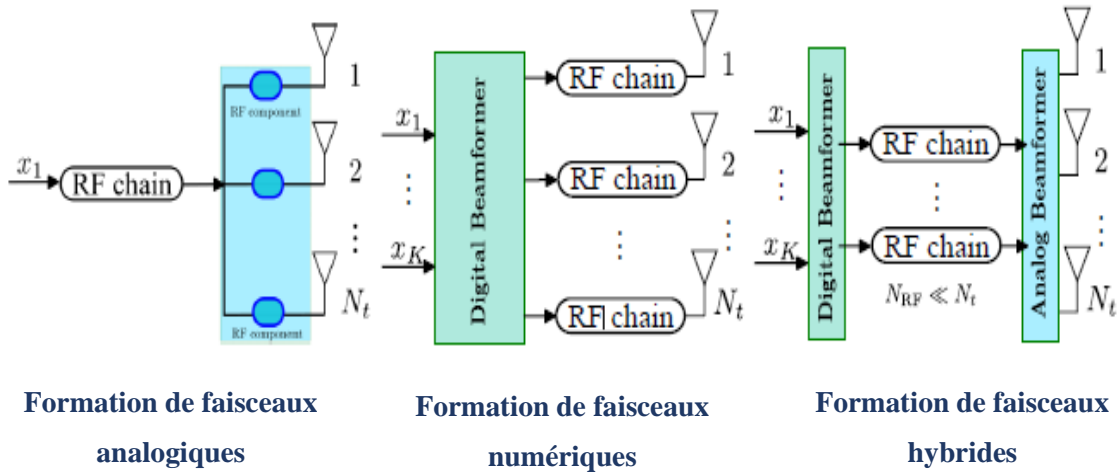


Figure III. 6- Architecture de faisceaux analogiques, numériques et hybrides. [61]

III.9 Modèle et spécifications du système

Dans cette partie, nous décrivons le modèle de système commun pour les configurations de réseau d'émission (TA) et de réseau réfléchi (RA). En considérant les canaux déterministes entre RIS-Tx et RIS-Rx, nous développerons les expressions analytiques pour calculer le champ lointain rayonné dans un direction, ou plus la puissance reçue à n'importe quelle position de récepteur dans l'espace 3D.

III.9.1 Scénarios et paramètres

On a deux scénarios sont envisagés pour les systèmes de communication assistés par RIS, à savoir : le réseau réfléchi (reflect-array RA) et le réseau transmise (transmit-array TA). Comme le montre la **figure III.7**, la principale différence entre les deux scénarios est que dans le réseau réfléchissant, les ondes électromagnétiques sont réfléchies par la surface au lieu de la traverser dans le cas du réseau d'émission. Alors, nous définirons les paramètres des scénarios TA et RA qui seront utilisés.

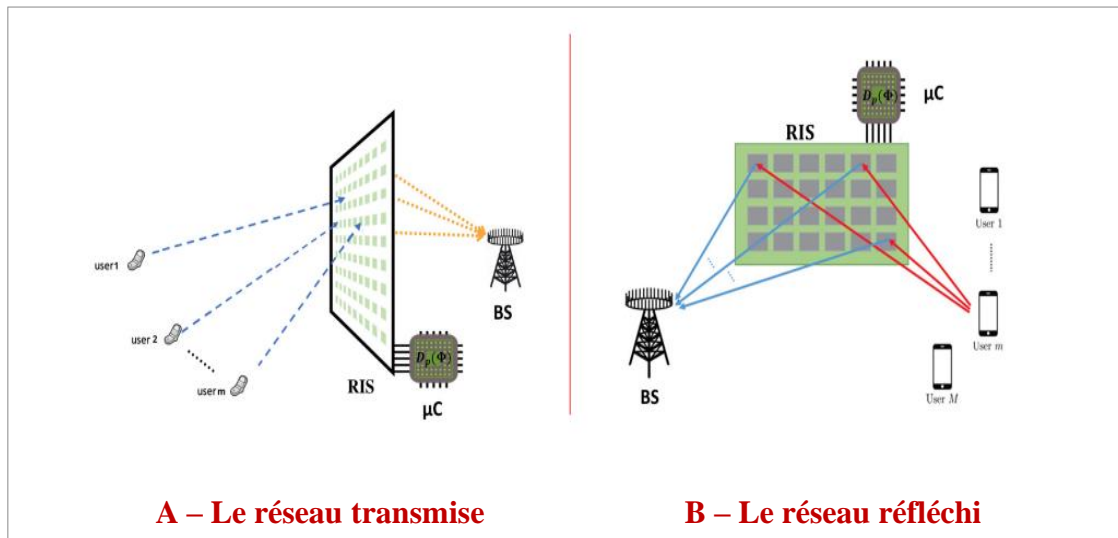


Figure III.7- *Système de communication assisté par RIS [62].*

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons répondu sur les questions critiques associé aux RIS, nous avons étudié de manière exhaustive et systématique l'état de l'art des RIS, qui sont reconnus comme efficaces solution pour réseaux sans fil 5G, 6G. Nous avons d'abord décrit les principaux fondamentaux du RIS, en mettant l'accent sur leur mise en œuvre, l'architecture matérielle, le mécanisme de contrôle et les stratégies de déploiement motivés par la compatibilité du RIS avec d'autres technologies de communication, nous avons discuté des applications émergentes du RIS dans les communications mm Waves et THz.

IV.1 Introduction

La surface intelligente reconfigurable (RIS), est une structure programmable qui peut être utilisée pour contrôler la propagation électromagnétique (EM) les ondes en modifiant les propriétés et les paramètres électriques, magnétiques de la surface. En plus du contrôle des ondes EM, les RIS peuvent être utilisés pour détecter l'environnement radio en intégrant des capacités de détection. Par placer des surfaces intelligentes dans l'environnement où les systèmes sans fil fonctionnent, les propriétés des canaux radio peuvent être contrôlées au moins partiellement.

Le contrôle des canaux radio modifie le paradigme de conception du système sans fil conventionnel, dans lequel le canal radio est considéré comme une entité incontrôlable qui déforme les signaux transmis. L'émetteur (TX) et le récepteur (RX) sont conçus pour égaliser l'impact du canal. Les scénarios envisagés varient du cas où un seul RIS est placé sur un mur pour diriger les signaux provenant d'une direction prédéterminée, par exemple, la station de base, vers l'environnement où presque toutes les surfaces (murs, meubles, vêtements, ...etc.) sont recouvertes d'un RIS à base de méta surface. L'introduction de surfaces intelligentes peut améliorer la fiabilité et l'efficacité énergétique des systèmes sans fil.

Alors, dans ce dernier chapitre nous allons faire une simulation sur les RIS, pour définir le principes d'envoyer et recevoir des signaux pour constater les différentes résultats obtenu a partir des changements dans les paramètres .

IV.2 L'Analyse de simulation d'un RIS

Dans cette partie nous allons décrivant les paramètres de l'émetteur (TX) et le récepteur (RX) On prend une matrice $[M*N]$ d'un RIS, en envoie un signal émet qui est à propos d'un faisceau guidée les ondes millimétriques vers la destination, le but de notre étude c'est d'envoyer un message par le RIS avec une augmentation du débit, un faible temps d'envoi et moins de perte.

IV.3 Le réseau transmise (TA)

La **figure IV.1** présente un système de communication sans fil à sortie unique à entrée unique (SISO) assisté par RIS en mode TA. Dans cette figure, une méta-surface avec $N \times M$ Unit-Cell (UC) est positionnée dans le plan $[O, y, z]$. Ces U_{SC} sont espacées d'une distance d_y , le long de l'axe $[O, y)$ et d_z , le long de l'axe $[O, z)$.

Nous notons $D = \max(M \times d_y, N \times d_z)$. Le scénario TA sera considéré dans la bande de fréquences de 26 GHz. Dans la **figure IV.1**, nous pouvons distinguer les définitions des différents angles pour les antennes émettrices/réceptrices et aussi pour les cellules unitaires du SIR : Dans cette figure, $\theta_{m,n}^{tx}$ et $\theta_{n,m}^{rx}$ représentent l'angle d'élévation de la cellule unitaire (m, n) à l'antenne d'émission et de réception, respectivement.

Nous pouvons voir sur la **figure IV.1** que l'antenne émettrice est placée derrière le RIS, ce qui correspond à un scénario TA.

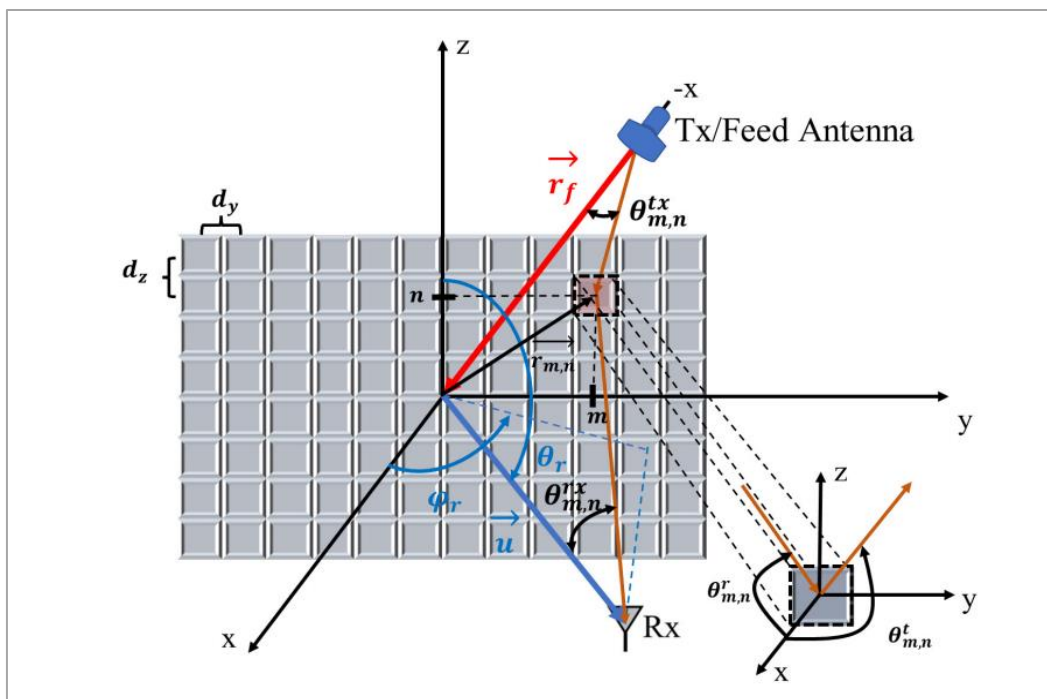


Figure IV. 1-Modèle de système TA [62].

IV.3.1 La Géométrie et le diagramme de rayonnement

- a. **Pour l'espacement inter-UC**, nous considérons, par défaut, $dy = dz = \lambda/2$. Il n'est pas exclu de considérer d'autres valeurs d'espacement pour les études futures.
- b. **La taille de RIS**, Nous utiliserons un RIS carré avec la taille $M = N = 20$. Il n'est pas exclu, à des fins de simulation, de prendre 40×40 RIS ou des tailles plus grandes ou d'autres formes (circulaires ou rectangulaires).
- c. **Le positionnement et nombre d'antennes Tx**, Nous utiliserons : 1, 2 ou 4 antennes de pavillon pour la transmission. Ces antennes sont placées à une distance focale F derrière le SIR (positionnées symétriquement par rapport à l'axe $[O, x]$). Pour une configuration donnée (nombre et position des antennes de klaxon lors de la transmission), la distance focale optimale F est fonction de $D = \max(M \times dy, N \times dz)$ ainsi que des schémas de rayonnement des antennes de klaxon utilisées [63].

Sur la base des études CEA-Leti [63] et pour un RIS éclairé par une antenne klaxon, la valeur optimale de F/D est égale à 0,47 pour une matrice carrée de 20×20 UC. Cette distance relative diminue à 0,43 pour un réseau circulaire d'un diamètre de 20 UC. Pour 2 antennes de klaxon en transmission, la distance relative optimale est égale à 0,34. Cette distance n'est pas très affectée par la géométrie du RIS (carré ou circulaire). Si nous notons la distance entre les deux antennes de klaxon, elles doivent être espacées d'une distance relative optimale $d/D = 0,42$. Avec 4 antennes de klaxon, les distances passent à $F/D = 0,25$ et à $d/D = 0,52$, correspondant dans ce cas à la distance entre les sources les plus éloignées.

IV.3.2 Profile de rayonnement

- **Pour les Tx et Rx** : Pour Tx et Rx, nous examinerons les schémas de rayonnement dans $\cos^4(\varnothing)$. Cette valeur est valide dans toutes les configurations Tx considérées : mono-alimentation et multi-alimentation. Nous soulignons que \varnothing est l'angle de rayonnement par rapport à la normale à la surface rayonnante. Dans la **figure IV.1** l'angle \varnothing est égal respectivement à $\theta_{m,n}^{tx}$ et $\theta_{m,n}^{rx}$ pour l'antenne Tx éclairant l'UC (m, n) ou pour le faisceau d'antenne Rx formé par la même UC.

- **Pour UC :** la cellule unitaire, d'index (m, n) , est constituée d'une section de déphasage connectée à des éléments rayonnants Rx et Tx. Chaque élément est modélisé comme une ouverture uniforme dont la directivité, en transmission ou en réception, est donné par :

$$F^x(\theta_{m,n}^x) = \frac{4\pi A_{phy}}{\lambda^2} \cos(\theta_{m,n}^x) \quad (IV, 1)$$

Avec $x \in \{t, r\}$ pour la transmission/réception et où A_{phy} est la zone physique de la cellule unitaire, λ est la longueur d'onde et $\theta_{m,n}^{t/r}$ est l'angle entre la normale à l'UC et le Tx ou le Rx. Il convient de mentionner qu'en raison de leur réciprocité, les modèles de rayonnement des UC sont symétriques en transmission et en réception. Dans le cas spécifique où les antennes Tx et Rx sont situées à la même position, nous avons $F^t(\theta_{m,n}^t) = F^r(\theta_{m,n}^r)$.

IV.3.2.1 États de phase des UC

Nous considérons un RIS avec 2 (1 bit) ou 4 (2 bits) états de phase. Pour les études analytiques, nous pouvons utiliser des états de phase d'ordre supérieur ainsi que des états de phase continus. Ce document servira de référence pour l'analyse comparative.

IV.3.2.2 Les Paramètres généraux de l'TA

La **tableau IV.1** résume les paramètres généraux à utiliser dans le scénario d'assistance technique.

Tableau IV. 1- Paramètres du scénario TA.

Fréquence	$f_{TA} = 26 \text{ GHz}$
Longueur d'onde	$\lambda = c/f_{TA}$
Nombre d'UC	$M \times N = 20 \times 20$
Espacement UC	$d_y = d_z = \lambda/2$
Rapport F/D optimal (une alimentation)	0.47
Diagramme de rayonnement Tx/Rx	$F^{tx}(\theta_{m,n}^{tx}) = 2(4 + 1)\cos^4(\theta_{m,n}^{tx}), F^{rx}(\theta_{n,m}^{rx}) = 2(4 + 1)\cos^4(\theta_{m,n}^{rx})$
Diagramme de rayonnement UC	$F^x(\theta_{m,n}^x) = \frac{4\pi A_{phy}}{\lambda^2} \cos(\theta_{m,n}^x)$ avec $x \in \{t, r\}$ Pour transmission/réception

IV.3.3 Le réseau réfléchi RA

Dans la **figure IV.2**, nous définissons les paramètres du scénario Reflect-array (RA) qui seront utilisés par les partenaires du projet qui travailleront sur cette configuration du RIS. La **figure IV.2** présente le scénario RA. Pour ce scénario, nous considérons la bande de fréquences de 60 GHz. Comme le montre la **figure IV.2**, nous pouvons voir que contrairement au scénario TA, dans le scénario RA, l'émetteur et les utilisateurs

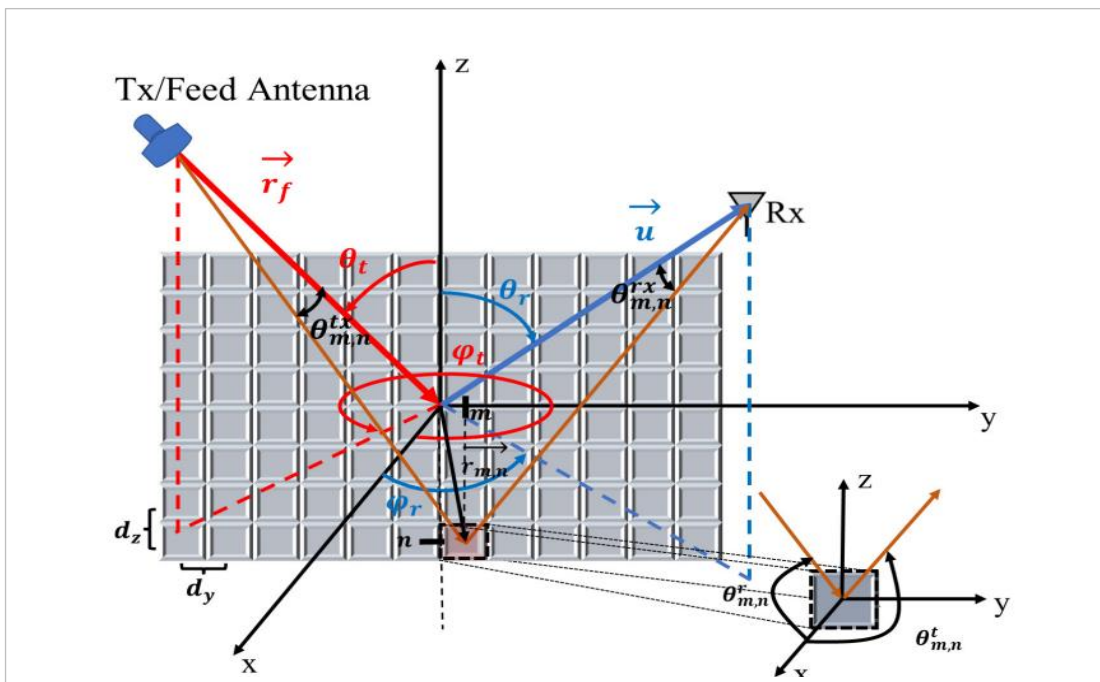


Figure IV. 2- Modelé de système RA [62].

IV.3.3.1 Géométrie et profil de rayonnement

- **Espacement inter UC :** Pour l'espace entre les UC_s , nous pouvons garder celui utilisé dans le TA scénario : $dy = dz = \lambda/2$. Toutefois, compte tenu des contraintes technologiques liées à la conception de Dans ces bandes de fréquences, il n'est pas exclu de considérer d'autres valeurs d'espace [62].
- **Taille du RIS :** Nous utiliserons également des RIS carrés en $M \times N = 20 \times 20 UC_s$ ou $M \times N = 40 \times 40 UC_s$, (au moins initialement pour les RA non configurables). Pour les RA reconfigurables, la taille minimale qui $M \times N = 20 \times 20$.
- **Positionnement Tx et nombre d'antennes Tx :** Pour le positionnement du Tx, nous n'avons pas assez de perspective sur son positionnement par rapport au RIS : distance, angles... Pour le RA dans la bande 60 GHz, seul le cas mono-alimentation sera considéré. Pour les simulations, il serait possible de définir ultérieurement la distance F/D optimale ainsi que l'angle entre le klaxon et le RA (différence par rapport à la normale) en fonction des caractéristiques des antennes du klaxon. L'impact du décalage de la source par rapport à la normale doit être limité s'il est $< 30^\circ$.

IV.3.3.2 Diagramme de rayonnement

- **Pour Tx et Rx :** si nous utilisons des antennes d'alimentation en corne du côté Tx, comme nous l'avons fait dans le scénario TA, les schémas de rayonnement sont en $COS^4(\emptyset)$. Nous rappelons \emptyset qu'est l'angle de rayonnement par rapport à la normale à la surface rayonnante. Comme le montre la **figure IV.2**, cet angle est respectivement égal à $\theta_{m,n}^{tx}$ et $\theta_{m,n}^{rx}$ pour l'antenne Feed Tx éclairant l'UC (m, n) ou pour le faisceau d'antenne Rx formé par la même UC [62].
- **Pour UC :** nous considérerons la même expression pour les profils de rayonnement que dans le scénario TA.
- **États de phase des UC :** Nous considérons les AR avec 2 ou 4 états de phase. À des fins de simulation, nous pouvons également considérer le cas de la phase continue et le cas de 8 états de phase pour l'analyse comparative.

IV.3.3.3 Paramètres généraux de l'RA

Le **tableau IV.2** résume les paramètres généraux à utiliser dans le scénario RA.

Tableau IV. 2- Paramètres du scénario RA.

Fréquence	$f_{RA} = 60 \text{ GHz}$
Longueur d'onde	$\lambda = c/f_{RA}$
Nombre d'UC	$M \times N = 20 \times 20$
Espacement UC	$d_y = d_x = \lambda/2$
Diagramme de rayonnement Tx/Rx	$F^{tx}(\theta_{m,n}^{tx}) = 2(4 + 1)\text{COS}^4(\theta_{n,m}^{tx}), F^{tx}(\theta_{m,n}^{tx}) = 2(4 + 1)\text{COS}^4(\theta_{m,n}^{tx})$
Diagramme de rayonnement UC	$F_{m,n}^{tx}(\theta_{m,n}^x) = \frac{4\pi A_{phy}}{\lambda^2} \text{COS}_{m,n}^x$ avec $x \in \{t, r\}$ Pour transmission / réception

IV.4 La Conception Des Faisceaux Analytiques

La méthode des phases optimales qui sera utilisée pour trouver la grille optimale selon la théorie du réseau d'antennes [65], un faisceau focalisé dans la direction souhaitée sera obtenu une fois qu'un front d'onde de phase égale est formé. Concernant le réflecteur antenne et la phase de réflexion de chaque cellule de l'unité doit compenser le retard de phase spatiale de la source ponctuelle à la direction du faisceau souhaité. Si la cellule unitaire n'a qu'une phase de codage binaire, la phase de compensation continue est ensuite discrétisée en deux valeurs quantifiées. Dans ce qui suit, nous présentons la quantification en une, deux ou trois bits. Pour le codage 1 bit, nous utilisons la règle suivante :

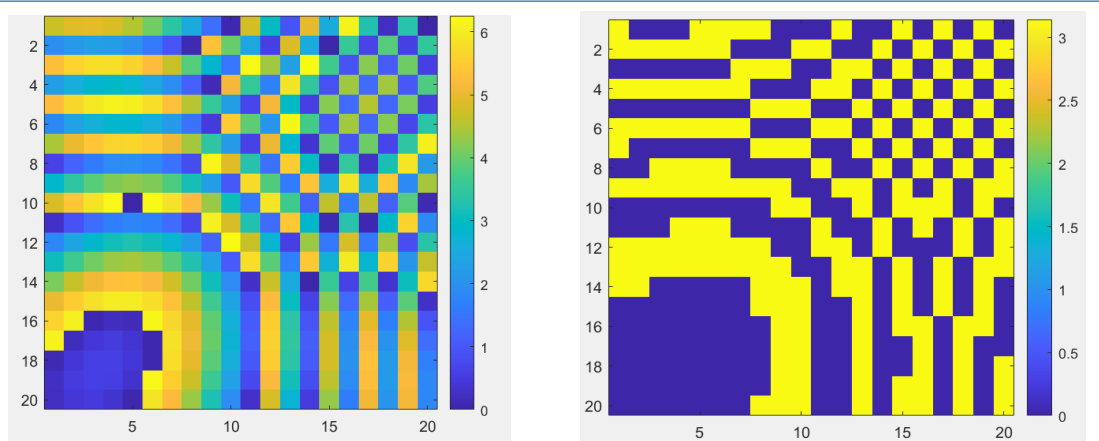
$$\phi_{m,n}^{Q1} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sin(\phi_{m,n}^{cont}) \leq 0 \\ \pi & \text{if } \sin(\phi_{m,n}^{cont}) > 0 \end{cases} \quad (\text{IV, 2})$$

Pour le codage 2 bits, nous utilisons la règle suivante :

$$\phi_{n,m}^{Q2} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sin(\phi_{n,m}^{cont}) < 0 \text{ et } \cos(\phi_{n,m}^{cont}) \geq 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{if } \sin(\phi_{n,m}^{cont}) \geq 0 \text{ et } \cos(\phi_{n,m}^{cont}) > 0 \\ \pi & \text{if } \sin(\phi_{n,m}^{cont}) > 0 \text{ et } \cos(\phi_{n,m}^{cont}) \leq 0 \\ 3 * \frac{\pi}{2} & \text{if } \sin(\phi_{n,m}^{cont}) \leq 0 \text{ et } \cos(\phi_{n,m}^{cont}) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV, 3})$$

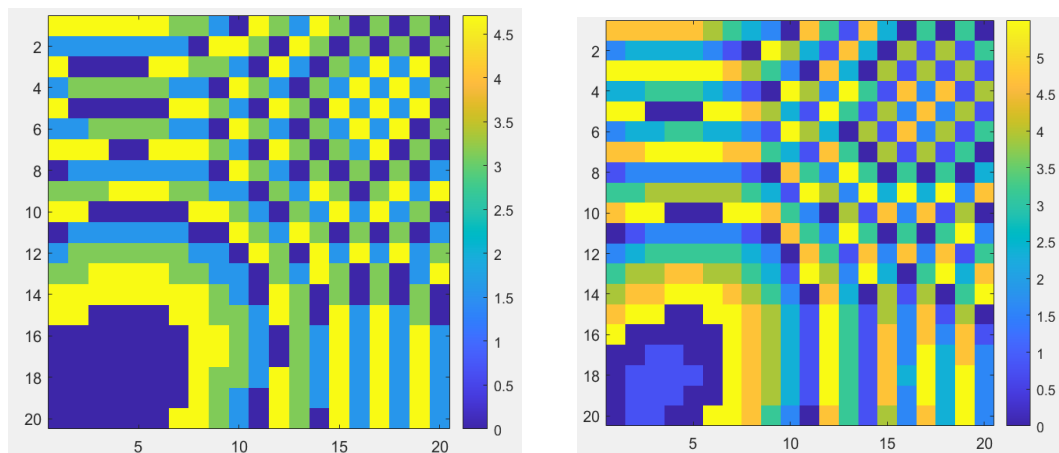
Le RIS est utilisé pour la formation de faisceaux, puis la puissance reçue est maximisée pour un utilisateur ou plus. Le scénario dans lequel le SRR est utilisé pour

la radiodiffusion est discuté dans cette sous-section. Lorsque l'émetteur est dans le champ proche du RIS, cela signifie que l'émetteur est relativement proche du RIS, de sorte que l'onde électromagnétique transmise au RIS peut être considérée comme une onde sphérique [66].



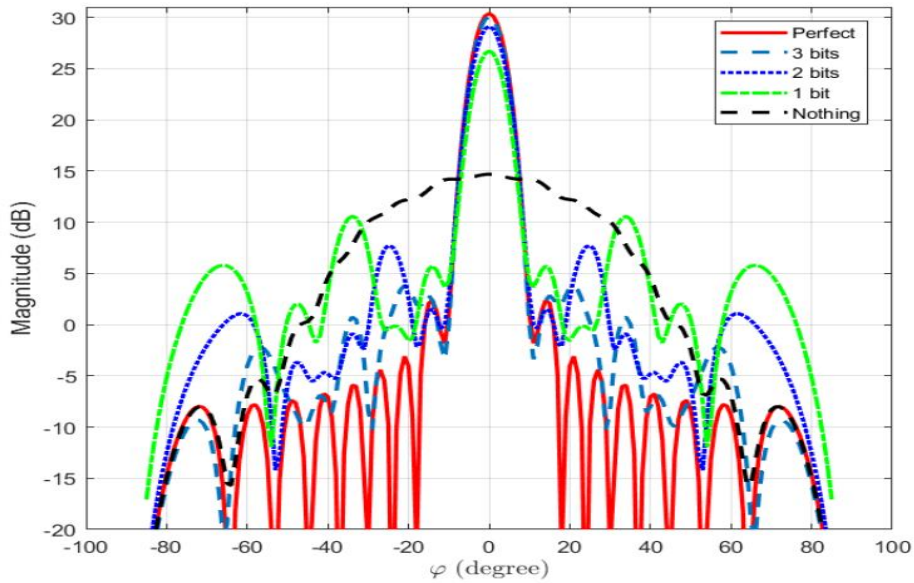
(a) Pour $N= n\text{bit}$.

(b) Pour $N= 1\text{ bit}$.



(d) Pour $N= 2\text{ bit}$.

(c) Pour $N= 3\text{ bit}$.



(e) La compensation de phase sur les schémas de rayonnement.

Figure IV. 3- Distribution de phase sur le réseau émetteur dans le cas (a) de phases continues, (b) de compensation de phase 1 bit, (c) de compensation de phase 2 bits, (d) et de compensation de phase 3 bits. (e) la compensation de phase sur les schémas de rayonnement.

IV.4.1 Analyse

La **figure IV.3** montre la distribution des phases sur le réseau émetteur et les schémas de rayonnement dans le cas de : pas de compensation de phase, ce qui signifie que toutes les phases de la grille sont égales à la quantification n , 1 bit, 2 bits et 3 bits. Nous pouvons voir que plus la résolution de quantification est élevée, plus le profil de rayonnement est proche de celui de la compensation de phases continues.

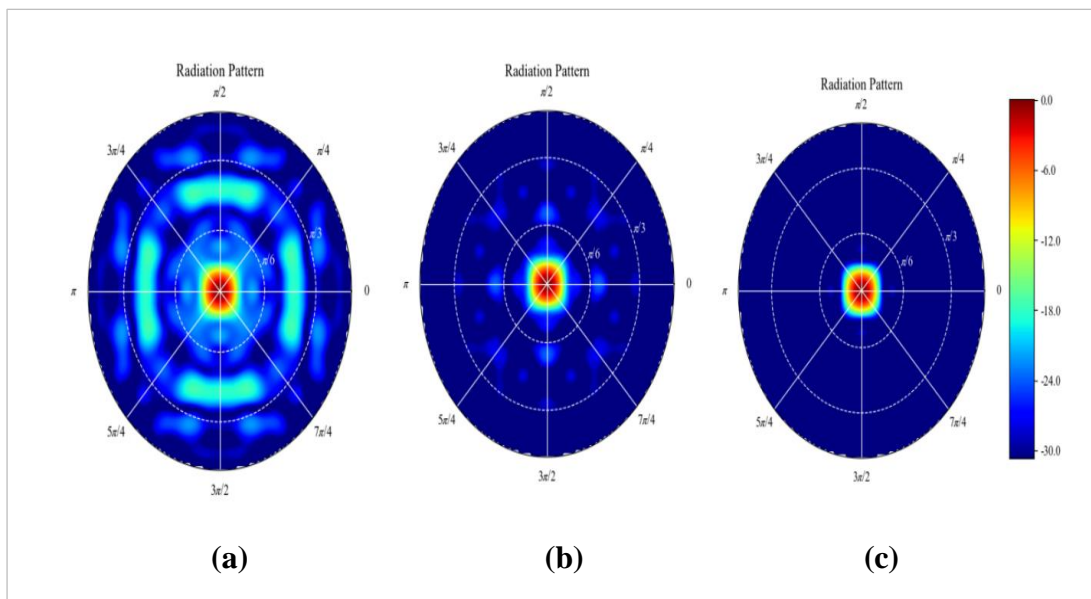


Figure IV. 4- Diagramme de rayonnement en direction large dans le plan (u, v) pour (a)1 bit, (b) 2 bits et (c) configurations de phase continue.

La **figure IV.4** représente un diagramme de rayonnement en direction large dans le plan (u, v) utilisé pour représenter la directivité du faisceau radio dans l'espace en fonction des configurations de phase des RIS pour différentes tailles de données, comme 1 bit et 2 bits, ainsi que pour les configurations de phase continue.

Le **tableau IV.2** donne les valeurs de directivité, SLL et HPBW pour différentes résolutions de quantification. Par rapport à la compensation de phase parfaite, la perte en termes de SLL, pour la quantification 1 bit, 2 bits et 3 bits, est respectivement égale à 13.1 dB, 3.6 dB et 3 dB. La résolution de quantification impacte également le HPBW, mais avec une proportion plus faible.

Tableau IV. 1- La Directivité, le gain, SLL et HPBW pour différents modes de quantification.

La compensation	Parfaite	3bits	2bits	1bit
La directivité(dB)	28.6	28.6	28.2	26.1
SLL (dB)	28.2	27.9	23.3	16.9
HPBW(deg)	7.0	7.0	6.9	7.1

IV.5 Faisceau dans différentes directions

Les diagrammes de rayonnement pour les angles d'azimut ϕ allant de -60° à 60° , avec des phases continues et quantifiées en mode 1 bit sont présentés dans la **figure IV.3** (a), (b) respectivement.

Nous pouvons voir que pour les deux modes, lorsque $[\theta, \phi] = [0^\circ, 0^\circ]$ le SLL est maximisé, alors que le HPBW est réduite au minimum. En changeant la direction de l'azimut, la valeur de la SLL diminue, tandis que la HPBW augmente.

Le **tableau IV.2** illustre la directivité, HPBW et SLL pour les faisceaux dans différentes directions dans le cas des modes de quantification continu et 1 bit.

IV.6 Optimisation du faisceau avec des algorithmes génétiques

L’algorithme GA :

Les algorithmes génétiques appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur but est d’obtenir une solution approchée à un problème d’optimisation.

IV.6.1 Première approche d’optimisation

Dans cette partie, nous présentons les résultats de l’optimisation de la matrice de phase du RIS par GA. Nous présentons d’abord les résultats sans contrainte sur les caractéristiques du faisceau. Ensuite, les phases UCs sera optimisé en contraignant le faisceau SLL et/ou HPBW.

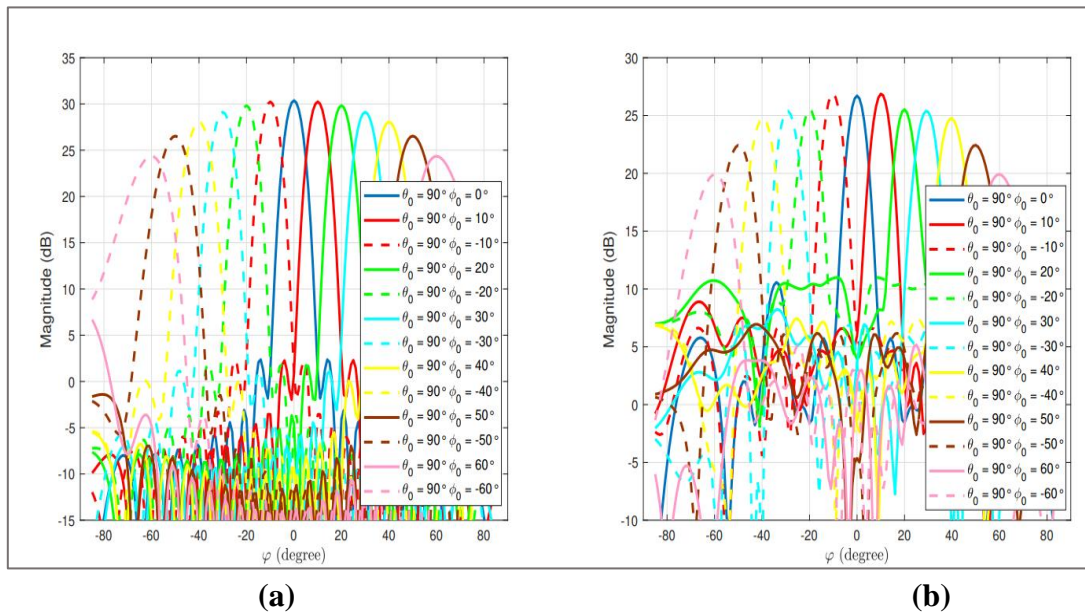


Figure IV. 5- Faisceaux dans différentes directions dans le cas de (a) phases continues, (b) phase 1 bit compensation.

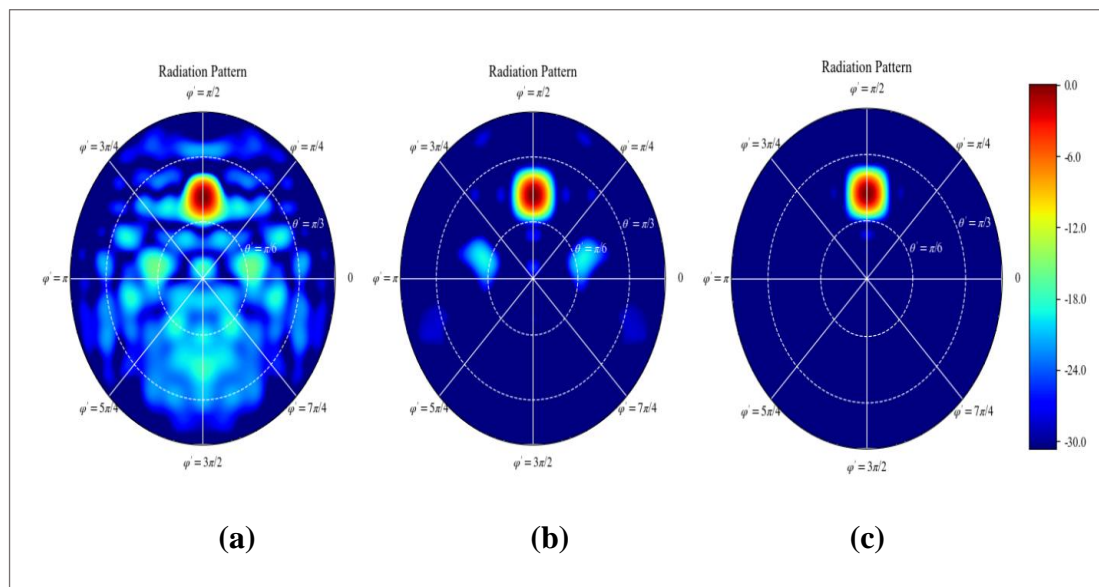


Figure IV. 6- Diagramme de rayonnement dans la direction $(\theta, \varphi) = (30^\circ, 90^\circ)$ pour (a) les configurations à 1 bit, (b) à 2 bits et (c) à phase continue.

IV.6.2 Le GA avec contrainte

Nous utilisons GA pour optimiser la grille de phase afin d'obtenir un diagramme de rayonnement avec une contrainte spécifique sur le SLL et le HPBW. La fonction utilisée écrite comme une somme de deux sous-fonctions F1 et F2.

La première sous-fonction F1 vise à maximiser le champ dans les directions de formation de faisceau, tandis que F2 contrôle la SLL. La fonction globale est donnée par :

$$F_{obj} = F1 + F2 \quad (IV, 4)$$

$$F1 = \sum_{(\theta_i, \varphi_j) \in S_p} (E(\theta_i, \varphi_j) - V)^2 \quad (IV, 5)$$

$$F2 = \max_{(\theta_n, \varphi_m) \in S_c} \left\{ (E(\theta_n, \varphi_m) - (V - \beta))^2 \right\} \quad (IV, 6)$$

Où les S_p S_c contiennent la coordonnée des directions de pointage et les directions que nous voulons contrôler leur SLL, respectivement. V est le champ maximal obtenu après compensation de phase (quantifié sur 1 bit) et β est la valeur de diagramme de rayonnement cible à l'extérieur du faisceau principal. La figure 4-6 illustre les différents paramètres utilisés dans la fonction qui est définie dans les équations (IV, 4), (IV, 5) et (IV, 6).

Il est important de souligner que les équations (IV, 4), (IV, 5) et (IV, 6) peuvent être utilisées pour optimiser la puissance transmise (en champ proche ou en champ lointain) à un ou plusieurs utilisateurs.

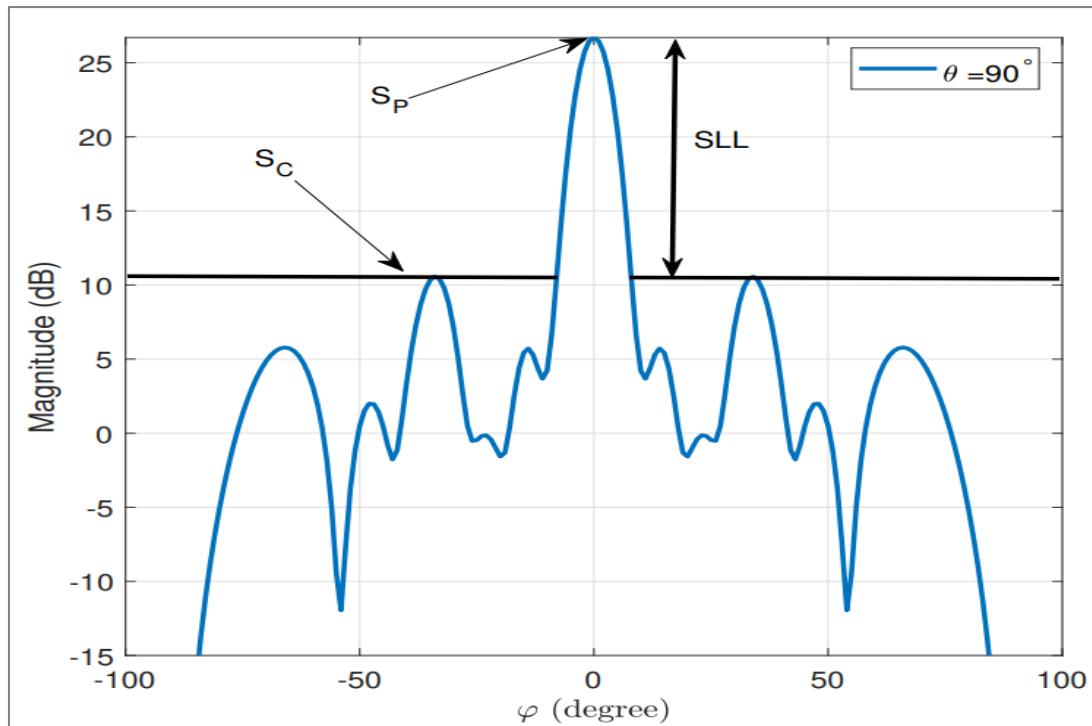


Figure IV. 7- Les paramètres utilisés dans la fonction F_{obj} .

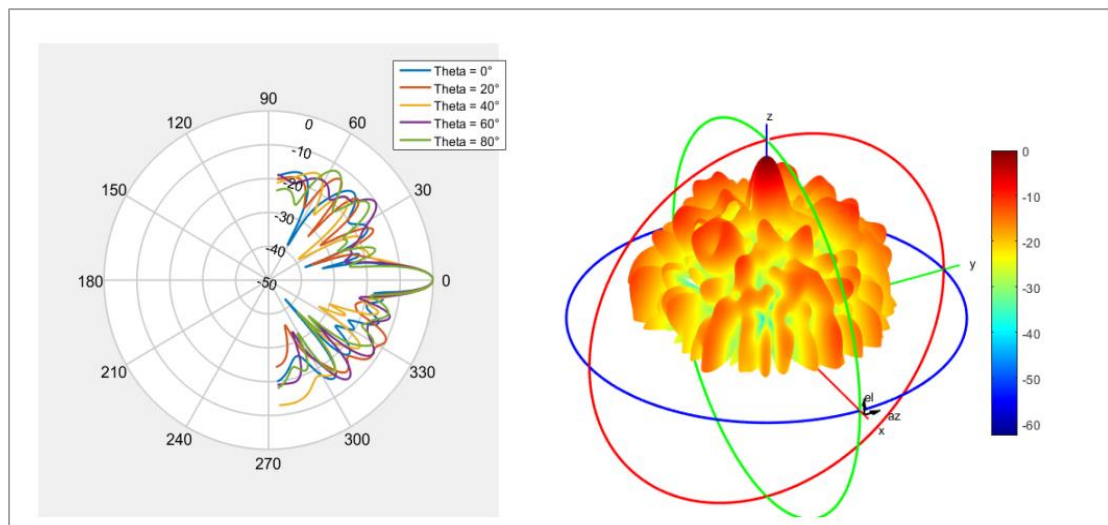


Figure IV.8 - Un faisceau avec 3D 10dB SLL.

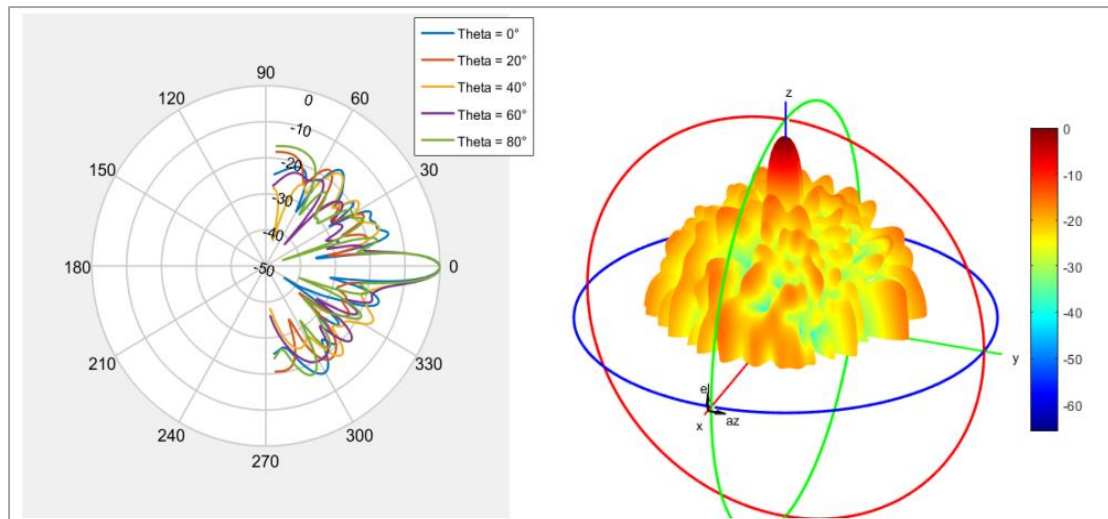


Figure IV.9 - Un faisceau avec 3D 13dB SLL.

Les **figures IV.8** et **IV.9** montrent les résultats obtenus avec un masque SLL 3D de 10dB et 13dB respectivement. Nous pouvons voir que dans les deux cas, l'GA atteint les SLL cibles.

L'un des défis des techniques d'optimisation de faisceau est la conception de grands faisceaux. Ce type de faisceau pourrait être intéressant lors d'une approche progressive pour identifier ou détecter les utilisateurs.

Pour atteindre cet objectif, nous pouvons utiliser la fonction de coût de l'**équation (IV, 4)** pour générer des faisceaux avec un grand HPBW.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une technique de génération de codebook basée sur l'optimisation GA, qui permet de générer des faisceaux simples ou multiples avec des formes et des directions spécifiques en utilisant des masques circulaires pour définir la fonction de perte. L'optimisation a été utilisée pour assurer une valeur minimale de SLL.

Lors de l'augmentation de la largeur de faisceau du diagramme de rayonnement, on a vu plusieurs cas (pas de compensation de phase, 1 bit, 2bit ,3bit).

CONCLUSION GÉNÉRALE

En conclusion, les applications des surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) dans le domaine des ondes millimétriques offrent des perspectives prometteuses pour les futures générations de réseaux de communication, notamment la 5G et la 6G. Ces surfaces représentent une innovation significative qui peut répondre à plusieurs défis clés rencontrés dans les réseaux de communication sans fil.

Tout d'abord, les RIS offrent la possibilité de contrôler et de manipuler de manière dynamique les ondes électromagnétiques, ce qui permet une amélioration notable de la couverture, de la capacité et de la fiabilité des réseaux. Cette capacité de manipulation active des ondes millimétriques peut être particulièrement bénéfique dans les environnements urbains denses, où les obstacles physiques et les interférences peuvent poser des défis importants.

De plus, les RIS offrent une flexibilité architecturale remarquable, ce qui permet aux opérateurs de réseau de déployer des solutions sur mesure pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs et des applications. Cette adaptabilité est essentielle pour prendre en charge une large gamme de services et de cas d'utilisation, allant de la connectivité à large bande aux applications à faible latence et ultra-fiables.

En outre, les RIS peuvent contribuer à améliorer l'efficacité énergétique des réseaux de communication en optimisant l'utilisation des ressources spectrales et en réduisant les pertes de propagation. Cela peut être crucial pour relever le défi croissant de la consommation énergétique des infrastructures de communication, tout en permettant le déploiement de réseaux plus durables et respectueux de l'environnement.

En résumé, les applications des surfaces intelligentes reconfigurables dans le domaine des ondes millimétriques ouvrent de nouvelles perspectives pour les réseaux de communication sans fil de prochaine génération. Leur intégration pourrait conduire à des réseaux plus performants, plus flexibles et plus efficaces, capables de répondre aux exigences toujours croissantes de connectivité et de qualité de service pour les applications 5G, 6G et au-delà.

RÉFÉRENCES

- [1] K. David and H. Berndt, « 6G vision and requirements: Is there any need for beyond 5G? », IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 13, no. 3, pp. 72-80, Sep. 2018.
- [2] En 2011 Vlad Trifa développe le concept de « Web des Objets » (WdO) dans sa thèse, c'est l'intégration des objets connectés dans le réseau Internet ainsi que dans le Web.
- [3] Wang N. *et al.* Physical-layer security of 5G wireless networks for IoT: Challenges and opportunities IEEE Internet Things J.(2019)
- [4] S. J. Nawaz, S. K. Sharma, S. Wyne, M. N. Patwary, and M. Asaduzzaman, “Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future,” IEEE Access, vol. 7, pp. 46317–46350, 2019.
- [5] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G networks: Use cases and technologies,” IEEE Commun. Mag., vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020
- [6] A. N'gom, A. Diallo, A.C. Beye, J.M. Ribero, “Sous-réseau d'antennes adaptatif destiné aux réseaux 'small cells' pour la 5G” Assemblée générale GDR ONDES “Interférences d'Ondes” Sophia Antipolis 23-25 Octobre 2017
- [7] Abdoulaye Chaibo, A. Ngom, Mahamoud Youssouf Khayal, Kharouna Talla, Aboubaker Chedikh Beye “A Novel Bow-Tie Antenna with Triple BandNotched Characteristics for UWB Applications” Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2016, 8, 271-282
- [8] T. Wen and Z. Peiyong, “6G The Next Generation: From Connected People and Things to Connected Intelligence,” 2020. (Cited on pages xv, xvi, 4, 5, 6 and 106.)
- [9] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, and G. C. Trichopoulos, “Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond,” IEEE Access, vol. 7, pp. 78 729–78 757, 2019. (Cited on page 4.)
- [10] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems,” IEEE communications magazine, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, 2014.

- [11] J. Nam, J.-Y. Ahn, A. Adhikary, and G. Caire, "Joint spatial division and multiplexing: Realizing massive MIMO gains with limited channel state information," in 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [12] ITU-R, "IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.", in Recommendation ITU-R M.2083-0, 2015. (Cited on page 4.)
- [13] [memoire PFE OS.pdf](#)
- [14] (article belongs to the Special Issue [5G and beyond Cellular Networks for Intelligent Sensing Systems](#)) Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction Published: 12 May 2020.
- [15] Etemad, K. (2008) Overview of Mobile WiMAX Technology and Evolution. IEEE Communications Magazine, 46, 31-40. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4644117> And <https://www.connectdata.fr/solution/iot-et-m2m/>
- [16] Holma, H. and Antti, T. (2009) LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio. Wiley Publisher, Hoboken, NJ. <https://doi.org/10.1002/9780470745489>
- [17] A.Omri, and R.Bouallegue. "New transmission scheme for MIMO-OFDM", International Journal of Next Generation Network, (2011), 3(1), pp. 11-19.
- [18] S.Merchan, A.G. Armada, and J.L.Garcia. "OFDM performance in amplifier nonlinearity", IEEE Transactions on Broadcasting, (1998), 44(1), pp.106-114
- [19] A.Omri, and R.Bouallegue. "New transmission scheme for MIMO-OFDM", International Journal of Next Generation Network, (2011), 3(1), pp. 11-19
- [20] M. A. Habibi, M. Nasimi, B. Han, and H. D. Schotten, "A comprehensive survey of RAN architectures toward 5G mobile communication system," IEEE Access, vol. 7, pp. 70371–70421, 2019.
- [21] E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO is a reality—What is next?: Five promising research directions for antenna arrays," Digit. Signal Process., vol. 94, pp. 3–20, Nov. 2019
- [22] T. Strohmer and S. Beaver, "Optimal OFDM design for time-frequency dispersive channels," IEEE Transactions on communications, vol. 51, no. 7, pp. 1111–1122, 2003.
- [23] J. Walfisch, H. L. Bertoni, «A theoretical model of uhf propagation in urban environments», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 36, no. 12, pp. 1788–1796, Dec 1998.

- [24] Y. Yu, G. Q. Luo, A. [1] A. Omar, X. Liu, W. Yu, Z. C. Hao and Z. Shen, "3D absorptive frequency-selective reflection and transmission structures with dual absorption bands," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 72880–72888, 2018.
- [25] hervé sizun. BOOK Introduction to the Propagation of Radio Waves. 2006
- [26] M. Borhani Kakhki, M. Mantash, A. Kesavan, M. M. Tahseen, & T. A. Denidni (2018) Millimeter wave beam-tilting Vivaldi antenna with gain enhancement using multi-layer FSS. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17 (12): 2279-2283.
- [27] Pucci (2013). Gap waveguide technology for millimeter wave applications and integration with antennas, Ph.D. Dissertation, Antenna Group Department of Signals and Systems Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- [28] Rajiv, Applications of Millimetre Waves and Future, July 23, 2017.
- [29] H. Huang, Y. Song, J. Yang, G. Gui, and F. Adachi, "Deep-learning- based millimeter wave massive MIMO for hybrid precoding," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 3, pp. 3027–3032, Mar. 2019.
- [30] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Hoboken, NY, USA:Wiley, 2016.
- [31] W. Hong et al., "Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6231-6249, Dec. 2017.
- [32] W. Hong, K.-H. Baek and S. Ko, "Millimeter-wave 5G antennas for smartphones: Overview and experimental demonstration", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6250-6261, Dec. 2017.
- [33] T. E. Bogale and L. B. Le, "Massive MIMO and MMWave for 5G wireless hetnet: Potential benefits and challenges", *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 11, no. 1, pp. 64-75, Mar. 2016.
- [34] Z. N. Chen and K.-M. Luk, *Antenna For Base Stations in Wireless Communications*, New York, NY, USA:McGraw-Hill, 2009.
- [35] G. M. Rebeiz, "Millimeter-wave and terahertz integrated circuit antennas", *Proc. IEEE*, vol. 80, no. 11, pp. 1748-1770, Nov. 1992.
- [36] K.-M. Mak, K. K. So, H.-W. Lai and K.-M. Luk, "A magnetoelectric dipole leaky-wave antenna for millimeter-wave application", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6395-6402, Dec. 2017.

- [37] Y. Zhu, R. Lu, C. Yu and W. Hong, "Design and implementation of a wideband antenna subarray for phased array applications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 8, pp. 6059-6068, Dec. 2020
- [38] B. Yang, Z. Yu, Y. Dong, J. Zhou and W. Hong, "Compact tapered slot antenna array for 5G millimeter-wave massive MIMO systems", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6721-6727, Dec. 2017.
- [39] D. J. Bisharat, S. Liao and Q. Xue, "High gain and low cost differentially fed circularly polarized planar aperture antenna for broadband millimeter-wave applications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 1, pp. 33-42, Jan. 2016.
- [40] T. Li and Z. N. Chen, "Wideband sidelobe-level reduced Ka-band metasurface antenna array fed by substrate-integrated gap waveguide using characteristic mode analysis", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1356-1365, Mar. 2020.
- [41] Z. Ying, "Antennas in cellular phones for mobile communications", *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2286-2296, Jul. 2012.
- [42] W. Hong, "Solving the 5G mobile antenna puzzle: Assessing future directions for the 5G mobile antenna paradigm shift", *IEEE Microw. Mag.*, vol. 18, no. 7, pp. 86-102, Dec. 2017.
- [43] J. Helander, K. Zhao, Z. Ying and D. Sjöberg, "Performance analysis of millimeter-wave phased array antennas in cellular handsets", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 504-507, 2016.
- [44] R. Khan, A. A. Al-Hadi, P. J. Soh, M. R. Kamarudin, M. T. Ali and Owais, "User influence on mobile terminal antennas: A review of challenges and potential solution for 5G antennas", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77695-77715, Nov. 2018.
- [45] S. Shinjo, K. Nakatani, K. Tsutsumi and H. Nakamizo, "Integrating the front end: A highly integrated RF front end for high-SHF wide-band massive MIMO in 5G", *IEEE Microw. Mag.*, vol. 18, no. 5, pp. 31-40, Aug. 2017.
- [46] W. Saad, M. Bennis and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications trends technologies and open research problems", *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, May 2020.
- [47] F. Tariq, M. R. A. Khandaker, K. Wong, M. A. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, "A speculative study on 6G," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 4, pp. 118-125, 2020
- [48] F. Tariq, M. R. A. Khandaker, K. Wong, M. A. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, "A speculative study on 6G," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 4, pp. 118-125, 2020.

- [49] article Umair Sajid Hashmi, School of Electrical Engineering and Computer Science, National University of Sciences and Technology, Pakistan published in 10 February 2022
- [50] Q. Wu et al., “Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 106–112, 2020.
- [51] C. Pan, H. Ren, K. Wang, W. Xu, M. ElKashlan, A. Nallanathan, and L. Hanzo, “Multicell MIMO communications relying on intelligent reflecting surfaces,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 8, pp. 5218–5233, 2020.
- [52] C. Pan, H. Ren, K. Wang, M. ElKashlan, A. Nallanathan, J. Wang, and L. Hanzo, “Intelligent reflecting surface aided MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 8, pp. 1719–1734, 2020.
- [53] T. Bai, C. Pan, Y. Deng, M. ElKashlan, A. Nallanathan, and L. Hanzo, “Latency minimization for intelligent reflecting surface aided mobile edge computing,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 11, pp. 2666–2682, 2020.
- [54] M. Cui, G. Zhang, and R. Zhang, “Secure wireless communication via intelligent reflecting surface,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 1410–1414, 2019
- [55] J. Du, C. Jiang, J. Wang, Y. Ren, and M. Debbah, “Machine learning for 6g wireless networks: Carrying forward enhanced bandwidth, massive access, and ultrareliable/lowlatency service,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 122–134, 2020
- [56] Y. Liu, X. Liu, X. Mu, et al., “Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities,” *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577, 2021
- [57] C. Pan, G. Zhou, K. Zhi, et al., “An overview of signal processing techniques for RIS-aided wireless systems,” *arXiv preprint arXiv: 2112.05989*, 2021
- [58] A. L. Swindlehurst, G. Zhou, R. Liu, C. Pan, and M. Li, “Channel estimation with reconfigurable intelligent surfaces—a general framework,” *Proceedings of the IEEE*, 2022
- [59] M. Xiao, S. Mumtaz, Y. Huang, et al., “Millimeter wave communications for future mobile networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 9, pp. 1909–1935, 2017.
- [60] R. W. Heath, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. M. Sayeed, “An overview of signal processing techniques for millimeter wave mimo systems,” *IEEE journal of selected topics in signal processing*, vol. 10, no. 3, pp. 436–453, 2016.

-
- [61] J. Beiranvand, "Formation de faisceaux hybride par lâutilisation massive dâantennes pour les réseaux de capteurs fixes," Ph.D. dissertation, Limoges, 2023.
- [62] Khaled TAHKOUBIT, Mahmoud NAAMANI, Didier LE RUYET, Hmaied SHAIK, Maarouf AL HAJJ, Valery GUILLET, Mbissane DIENG, Ghais EL-ZEIN ANR-20-CE25-0016-01, MESANGES CNAM 31/01/2023
- [63] W. Fan, C. Zhang, and Y. Huang, "Flat Beam Design for Massive MIMO Systems via Riemannian Optimization," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 301–304, Feb. 2019, issn: 2162-2345. doi: 10.1109/LWC.2018.2871260
- [64] Q. Wu et al., "Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 106–112, 2020.
- [65] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2015.
- [66] W. Tang, M. Z. Chen, X. Chen, et al., "Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 1, pp. 421–439, 2020.