

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

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

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Par

ZAOUI DHIAEDDINE

MORSLY amine

Intitulé

**Étude et conception des antennes reconfigurables en
diagramme de rayonnement pour les communications de 5G**

Évalué le :

Par la commission d'évaluation composée de :*

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. MESSAOUDENE Idris</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BELAZZOUG Massinissa</i>	<i>MAB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>MM. LEKHLLEF Nora</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BRAHAM CHAUCHE Youcef</i>	<i>Docteur</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>UQAT-CANADA</i>

REMERCIEMENTS

Nous saisissons cette occasion pour remercier : Tout d'abord, Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné du courage et de la volonté

Accomplir ce travail.

Un remerciement et une reconnaissance particulière à nos encadreurs Dr. Belazzoug Massinissa Dr. Youcef Braham Chaouche pour Leurs conseils Avérés, Leurs efforts et Leurs écoutes particulières Tous ceux qui de près ou de loin ont participés à

Notre Éducation.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation Sincères remerciements à tous les professeurs et administrateurs du département d'électronique.

Nos pères, frères et sœurs pour leur soutien indéfectible.

Nous N'oublions pas de remercier : Dr Bouaza Abdel Maoula

Dr Hammache Boualem et Dr. Messaoudene Idris, pour leur aide, nous vous sommes reconnaissants

Merci à tous

DEDICACES

C'est avec grand plaisir que je lui dédie ce travail

Ceux qui étaient

Inspiration et conception.

Pour ma mère, mon père et ma grand-mère.

Je le dédie à mon frère et à la femme de mon frère

Un cadeau spécial pour : Islam, Sabrina,

Imad, Imad, abd el kader , zaki

Et Yakoub

Pour tous les membres de la famille Zaoui et Ayadi

En fin de compte, je l'ai dédié chaleureusement

Surtout pour ma chère maman et papa

DHIAEDDINE. ZAOUI

DEDICACES

C'est avec une joie que je dédie ce travail à

Ceux qui m'ont

Été une source d'inspiration et de volonté.

A ma mère et mon père et à mes grands-parents.

Je le dédie à mes très chères sœurs et mon frère

Une dédicace spéciale à : Salim, Souhaib,

À toute la Famille MORSLY et AISSI

A la fin je dédie très chaleureusement ce

Mémoire

À mon binôme DHIAEDDINE

MORSLY AMINE

Table des matières

Table des matières..... I
Liste des Figures III
Liste Des Tableaux..... VI
Liste des Abréviations..... VII
Résumé..... VIII
Abstract..... VIII
ملخص..... VIII
Introduction générale I

Chapitre 1 : NOTIONS SUR LES SYSTÈMES RECONFIGURABLE 5G

1.1. Introduction..... 4
1.1.Communications à onde millimétrique et les domaines d'application de la 5G
..... 4
1.2.1. Nécessité de la 5G..... 5
1.2.2. Futures de systèmes de communications 5G..... 6
1.3. Antennes reconfigurables 8
1.3.1. Définition..... 8
1.3.2. Avantages et inconvénient des antennes reconfigurables 8
1.3.3. Techniques de reconfigurabilité..... 9
1.4. Antennes reconfigurables en fréquence..... 11
1.4.1. Commutation de fréquences par diodes pin..... 11
1.4.2. Accord en fréquence à l'aide de varactors 12
1.4.3. Accord en fréquence à l'aide de matériaux agiles 13
1.5. Antenne reconfigurable en polarisation..... 13
1.5.1. Utilisation de diodes pin 13
1.5.2. Utilisation d'éléments parasites..... 14

Table des matières

1.6. Antennes reconfigurable en diagramme de rayonnement.....	15
1.6.1. Utilisation diode pin.....	15
1.6.2. Utilisation de MEMS.....	16
1.6.3. Utilisation de photoconducteurs	17
1.7. Conclusion.....	17
Chapitre 2 : VALIDATION D'UNE ANTENNE RECONFIGURABLE POUR LES APPLICATIONS 5G	
2.1. Introduction.....	20
2.2. Présentation du logiciel CST	20
2.3. Description d'antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement.....	20
2.3.1. Géométrie de l'antenne proposée.....	21
2.3.2. Etude de l'influence de différents paramètres.....	23
2.3.3. Implémentation avec des switches réels.....	25
2.3.4. Réalisation du prototype et résultats expérimentaux	27
2.3.4.1 Distribution des courants surfaciques.....	28
2.3.5. Validation de la structure par CST et comparaison des résultats	29
2.3.5.1. Coefficients de réflexion et Diagrammes de rayonnement.....	29
2.6. Conclusion.....	31
CHAPITRE 3 : CONCEPTION D'UNE ANTENNE RECONFIGURABLE EN DIAGRAMME POUR LES APPLICATIONS 5G	
3.1. Introduction.....	34
3.2. Structure de l'antenne.....	34
3.3. Implémentation avec des switches réels	36
3.4. Résultats de simulation	37
3.4.1. Coefficient de réflexion	37
3.4.1.1. Cas idéal.....	38
3.4.1.2. Cas des diodes réel (PIN MA4AGFCP910).....	38
3.4.1.3. Interprétation.....	39
3.4.2. Distribution de courant.....	39
3.4.3. Diagramme de rayonnement.....	40

Table des matières

<i>3.4.4. Gain</i>	<i>42</i>
<i>4. Conclusion</i>	<i>43</i>
<i>Conclusion générale</i>	<i>45</i>
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	<i>47</i>

Liste des figures

Liste des Figures

CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES SYSTÈMES RECONFIGURABLE 5G

Figure .1 . 1.Évolution des applications de la 5G	5
Figure .1 . 2.Les niveaux de performance estimés de la 5G.....	5
Figure .1 . 3.Évolution de la 5G.....	8
Figure .1 . 4.Les différentes techniques de reconfigurabilité	10
Figure .1 . 5.Arbre de catégorisation par fonctionnalité.	10
Figure .1 . 6.Antenne reconfigurable en fréquence. (a) Vue de dessus. (b) Structure en 3D.....	11
Figure .1 . 7.Géométrie de l'antenne à fentes reconfigurable en fréquence.	12
Figure .1 . 8.Antenne patch reconfigurable en fréquence sur substrat EBG.	13
Figure .1 . 9.Antenne reconfigurable en polarisation (a) Photographie du prototype (b) Géométrie de l'antenne.	14
Figure .1 . 10.Antenne patch carré à polarisation circulaire reconfigurable.....	14
Figure .1 . 11.(a)Antenne reconfigurable en diagramme pour les applications 5G (b) S11 de l'antenne reconfigurable (état 1 : les deux diodes sont éteintes ; état 2 : les deux diodes sont allumées). (c) Diagramme d'antenne à 28 GHz avec deux diodes PIN dans deux états.	16
Figure .1 . 12.Antenne reconfigurable en diagramme]......	16
Figure .1 . 13.Antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement.....	17

Chapitre 2 : VALIDATION D'UNE ANTENNE RECONFIGURABLE POUR LES APPLICATIONS 5G

Figure. 2. 1.Interface graphique de CST.....	20
Figure. 2 . 2.Conception de l'antenne proposée. La métallisation de la couche supérieure est en noir et gris foncé, tandis que le plan de masse est en gris clair	21
Figure. 2 . 3.Validation de l'antenne proposée (a) couche supérieure (b) couche inférieure.	21
Figure. 2 . 4.Schéma de l'antenne simulé. (a) Vue en 3D. (b) Vue des couches supérieure et supérieure, latérale et inférieure. La métallisation est en noir, le diélectrique est en gris, et les trous d'interconnexion sont en bleu.....	22
Figure. 2. 5.Position des diodes PIN sous CST.....	23
Figure. 2. 6.Coefficient de réflexion simulé de l'antenne en fonction de la longueur L1. P = 1.2 mm.....	24
Figure. 2 . 7.Coefficient de réflexion simulé de l'antenne en fonction de la position de la diode P.	24
Figure. 2 . 8.Diagrammes de rayonnement simulés dans le plan horizontal ($\theta = 90^\circ$).	25

Liste des figures

Figure. 2. 9.Circuits RLC équivalents de la diode p-i-n MA4AGFCP910 en tant que modèle à un port. (a) Modèle de diode à polarisation directe (10 mA). (b) Modèle de polarisation inverse.	26
Figure. 2 . 10.Impédances mesurées et modélisées de diode PIN MA4AGFCP910 dans les états de polarisation directe et inverse (plage de fréquences 2-70 GHz).	26
Figure. 2 . 11.Photographie de l'antenne fabriquée.	27
Figure. 2 . 12.Dispositif de mesure dans une chambre anéchoïque à ondes millimétriques	28
Figure. 2 . 13.Transition entre le micro-ruban et la ligne à double fentes. (a) Conception de la transition. (b) Distribution du courant de surface dans la configuration R - la diode R est polarisée dans le sens direct	28
Figure. 2. 14.Résultats du coefficient de réflexion validé par CST ; (b) Comparaison des caractéristiques du coefficient de réflexion simulées et mesurées de l'antenne proposée	30
Figure. 2. 15.Diagramme rayonnement validé ;(b) Comparaison des diagrammes de rayonnement normalisés simulés et mesurés dans le plan horizontal ($\theta = 90^\circ$) à 60 GHz.	30

CHAPITRE 3 : CONCEPTION D'UNE ANTENNE RECONFIGURABLE EN DIAGRAMME POUR LES APPLICATIONS 5G

Figure. 3. 1.Géométrie de l'antenne proposée (a) vue en 3D (b) vue en dessus (c) vue en dessous.	35
Figure. 3. 2.Circuits RLC équivalents de la diode p-i-n MA4AGFCP910. (a) polarisation directe. (b) polarisation inverse.	36
Figure. 3. 3.Emplacement des diodes.	36
Figure. 3. 4.Simulation avec Schématique de CST (2 diodes PIN). (a) état On-Off. (b) état On-On.	37
Figure. 3 . 5.Validation de l'antenne proposée. (a) cas idéale. (b) utilisation des diodes réels. ...	37
Figure. 3. 6.Coefficient de réflexion dans le cas idéale.	38
Figure. 3. 7.Coefficient de réflexion dans le cas réel.	39
Figure. 3. 8.Répartition du courant à 31.5 GHz (a) D1 : ON-D2 : ON (b) D1 : ON-D2 : ON. ...	39
Figure. 3. 9.Répartition du courant à 32.5 GHz (a) D1 : ON-D2 : ON (b) D1 : ON-D2 : ON. ...	40
Figure. 3. 10.Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée (a) avec des diodes(b) avec idéales ($\phi=0^\circ$ à 31.5 GHz).	41
Figure. 3. 11.Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée (a) avec des diodes réelles(b) avec idéale ($\phi=0^\circ$ à 32.5 GHz).	41
Figure. 3. 12.Représentation du gain en fonction de la fréquence pour les quatre cas.	42

Liste Des Tableaux

Liste Des Tableaux

CHAPITRE 1 : NOTIONS SUR LES SYSTÈMES RECONFIGURABLE 5G

Tableau. 1. 1. Avantages et inconvénients d'onde millimétrique.....	4
Tableau. 1. 2. Historique des générations de communication.....	7
Tableau. 1. 3. Avantages et inconvénients des antennes reconfigurables.....	9

Chapitre 2 : VALIDATION D'UNE ANTENNE RECONFIGURABLE POUR LES APPLICATIONS 5G

Tableau. 2. 1. Dimension d'antenne proposée.	22
Tableau. 2. 2. Principes de fonctionnement de l'antenne.....	29
Tableau. 2. 3. Résultat comparatif de simulation d'un réseau d'antenne.....	31

CHAPITRE 3 : CONCEPTION D'UNE ANTENNE RECONFIGURABLE EN DIAGRAMME POUR LES APPLICATIONS 5G

Tableau. 3. 1. Dimensions de l'antenne.....	35
Tableau. 3. 2. Comparaison entre les différentes cas de reconfigurabilité pour 31.5 GHz et 32.5 GHz.....	42

Liste des Abréviations

2G	Deuxième Génération.
3G	Troisième Génération.
4G	Quatrième Génération.
5G	Cinquième Génération.
CDMA	Code-Division Multiple Access
CST	Computer Simulation Technologie
EBG	Electromagnetic Band-Gap
ECC	Le Coefficient De Corrélation D'enveloppe
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GSM	Global System For Mobile
GTI	Globale Td-Lte Initiative
IMT	International Mobile Telecommunications
LAN	Local Area Network
Latence	Le Délai De Transmission
LTE	Long-Term Evolution.
LTSA	Linear Tapered Slot Antennas
M2M	Machine-To-Machine
MEMS	Micro-Electromechanical System
MEMS-RF	Radio-Frequency Micro Electromechanical System
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
PAN	Personal Area Network
PCB	Printed Circuit Board
Port-RF	Radio Frequency Connector
PSTN	Public Switched Telephone Network
Signal RF	Radio Frequency Signal
SPDT	Single Pole Double Throw
TD-LTE	Time Division LTE
TDMA	Time Division Multiple Access
WAN	Wide Area Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

Résumé

L'objectif principal de ce travail est d'étudier et de développer des conceptions d'antenne reconfigurable en diagramme avec un seul port pour les communications 5G. Pour ce faire, la mise en œuvre pratique s'est concentrée sur la validation d'une antenne à commutation de faisceau à entré unique dans la bande 60 GHz pour les applications de réseau à ondes millimétriques basées sur diode PIN disponibles dans le commerce. Dans la deuxième partie de ce mémoire, une antenne reconfigurable à base d'un diode PIN fonctionnant sur la bande entre 2-50 GHz a été simulée et validée pour les applications a ondes millimétriques ; avec une bande passante entre 30.5-35 GHz. Cette antenne offre de meilleures performances en termes de commutation de fiscaux avec des diagrammes de pointe dirigés vers $\pm 24^\circ$ et 0° , ainsi que un pic de gain atteint 6 dBi. Néanmoins la commutation des diodes la bande passante est maintenue. Finalement, l'antenne proposée est un bon candidat pour les systèmes à commutation de faisceaux dans les communications 5G.

Mots clés (*) : Antenne à ondes millimétriques (mmWave), antenne reconfigurable, Diode PIN, les systèmes RF.

Abstract

The main objective of this work is to investigate and develop a reconfigurable pattern antenna with a single port for 5G communications. To achieve this, the practical implementation focused on validating a single-input beam-switched antenna in the 60 GHz band for commercially available PIN diode-based millimeter wave array applications. In the second part of this thesis, a reconfigurable antenna based on a PIN diode operating on the band between 2-50 GHz has been simulated and validated for millimeter wave applications; with a bandwidth of 30.5 to 35 GHz. This antenna offers better performance in terms of switching rates with peak patterns directed towards $\pm 24^\circ$ and 0° , as well as a gain peak reaching 6 dBi. The bandwidth is maintained nevertheless the switching of the diodes. Finally, the proposed antenna is a good candidate for beam-switched systems in 5G communications.

Keywords (*) : Millimeter wave antenna (mmWave), reconfigurable antenna, PIN diode, RF systems.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو التحقيق في تصميمات الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل داخل النمط وتطويرها باستخدام منفذ واحد للاتصالات 5G. ولتحقيق ذلك، ركز التنفيذ العملي على التحقق من صحة هوائي بتبديل الحزمة أحادي الإدخال في النطاق 60 جيجاهرتز لتطبيقات مصفوفة الموجات المليمترية القائمة على الصمام الثنائي PIN المتاحة تجارياً. في الجزء الثاني من هذه الأطروحة، تمت محاكاة هوائي قابل لإعادة التشكيل يعتمد على صمام ثنائي PIN يعمل على النطاق بين 2-50 جيجاهرتز والتحقق من صحته لتطبيقات الموجات المليمترية؛ بعرض نطاق يتراوح بين 30.5 و35 جيجا هرتز. يوفر هذا الهوائي أداءً أفضل من حيث التبديل الضريبي مع مخططات ذروة موجية نحو ± 24 درجة و0 درجة، فضلاً عن ذروة كسب تصل إلى 6 ديسيبل. ومع ذلك، فإن تبديل الثنائيات يتم الحفاظ على عرض النطاق الترددي. أخيراً، يعد الهوائي المقترح مرشحاً جيداً لأنظمة تبديل الحزمة في اتصالات الجيل الخامس.

الكلمات المفتاحية (*) : هوائي موجة المليمتر (mmWave)، هوائي قابل لإعادة التشكيل، صمام ثنائي PIN، أنظمة RF

Introduction Générale

Introduction générale

La nouvelle génération de communications mobiles connue sous le nom de cinquième génération (5G) est une technologie de pointe qui prend en charge de nouvelles fonctions et répond aux besoins et aux défis du futur Liés à la bande passante ou au débit, mais pour une très faible latence, afin de réduire la consommation d'énergie avec un service de haute qualité

Pour répondre aux besoins actuels dans le domaine des télécommunications, les concepteurs en micro-ondes sont amenés à développer des dispositifs à base d'antennes qui doivent pouvoir se reconfigurer en fonction de leur environnement et contexte d'utilisation afin d'améliorer leurs performances [1]. Ces antennes vont assurer le fonctionnement de l'émission ou de la réception des ondes électromagnétiques et ont des propriétés très utiles, notamment dans le cas où elles doivent fonctionner à des fréquences élevées et ainsi l'antenne peut s'adapter aux conditions changeantes en fréquence, la polarisation ou le diagramme de rayonnement.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier et de développer des nouvelles conceptions d'antennes reconfigurables en diagramme basées sur des diodes PIN pour les communications 5G.

Le présent mémoire est divisé en trois principaux chapitres et une conclusion générale. Il est présenté comme suit :

Dans le premier chapitre, on va présenter une notion sur les systèmes reconfigurables 5G, donner le concept des systèmes reconfigurables 5G. Puis, nous allons introduit brièvement les domaines d'application de la communication à ondes millimétriques et de la 5G, la nécessité de cette technologie l'avenir du système de communication 5G. Ensuite, un état de l'art sur les antennes reconfigurables et les approches utilisées dans la littérature pour réaliser la reconfiguration seront présentés. De plus, on va aussi aborder la classification des antennes reconfigurables en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation. Finalement, les technique les plus courantes pour chaque groupe ont été présentées et discutées.

Le deuxième chapitre sera consacré à la conception d'antenne commutée de base à 60 GHz qui peut être fabriquée sur un substrat conventionnel à faible coût. Dans la première partie de ce chapitre, on va discuter le logiciel de simulation CST Microwave. Ensuite, nous décrivons l'antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement. Puis, les résultats de simulations sont

Introduction générale

illustrés avec des interprétations. Enfin, une validation et une comparaison des résultats seront établies.

Dans le troisième chapitre, on va concevoir une antenne reconfigurable basée sur des diodes PIN pour achever la reconfigurabilité en diagrammes pour les applications 5G. La simulation sera effectuée à l'aide de logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave. Dans la première partie de ce chapitre, on va présenter la structure de l'antenne proposée avec une explication des éléments de reconfiguration. Finalement, des discussions sur les résultats de simulation dans toutes les cas possibles de reconfigurabilité (diode - métal) seront abordées, pour montrer les avantages et les performances de notre antenne proposée.

CHAPITRE I

NOTIONS SUR LES SYSTÈMES RECONFIGURABLE 5G

1.1. Introduction

Une antenne est un dispositif qui transmet ou reçoit des ondes radio dans l'espace. Les antennes 5G dirigent le signal dans une direction spécifique au lieu de toutes les directions, ce qui constitue une bonne performance par rapport aux générations précédentes [2].

Ce chapitre est consacré au concept des systèmes reconfigurables 5G. Tout d'abord, nous présenterons brièvement les domaines d'application de la communication à ondes millimétriques et de la 5G, la nécessité de cette technologie et l'avenir du système de communication 5G.

Ensuite, on va présenter un état de l'art sur les antennes reconfigurables et les approches utilisées dans la littérature pour réaliser la reconfiguration. On va aussi aborder la classification des antennes reconfigurables de fréquence, de diagramme de rayonnement et de polarisation. De plus, les méthodes les plus courantes pour chaque groupe ont été présentées et discutées.

1.1. Communications à onde millimétrique et les domaines d'application de la 5G

L'onde millimétrique (mmWave), est une nouvelle gamme de fréquences pour la 5G, située dans le spectre entre 24 GHz et 30 GHz et entre 30-300 GHz [3]. Les avantages et inconvénients présentés par les ondes millimétriques sont résumés dans le tableau 1.1 :

Tableau. 1. 1.avantages et inconvénients d'onde millimétrique.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Larges bandes disponibles ; petites antennes.• Gain et efficacité élevés, ce qui permet de minimiser les risques d'atténuations.• Réduire la latence entre les appareils.• La compacité des équipements.• Hauts Débits de données.	<ul style="list-style-type: none">• Le prix élevé des équipements en hyperfréquence.• Les ondes millimétriques sont facilement absorbées par les obstacles, ce qui réduit l'énergie.• Une courte portée.

Avec l'arrivée de la 5G, chaque type de communication sera considérablement impacté. Parmi les raisons de s'intéresser au nouveau réseau du 5G, plusieurs facteurs ont été pris en charge notamment : le besoin croissant de connexions à haut débit, la nécessité d'augmenter le volume de données sur les réseaux sans fil, la demande de qualité supérieure de service et un cout plus bas. Les réseaux 5G joueront un rôle primordial dans notre vie et offrent de nombreuses solutions dans

différents domaines tel que la santé, la distribution vidéo et audio sur Internet, les jeux, la surveillance et sécurité, les entreprises, l'industrie, les écoles et les collèges, des pilotes et des policiers (voir la Fig. 1.1) [4].

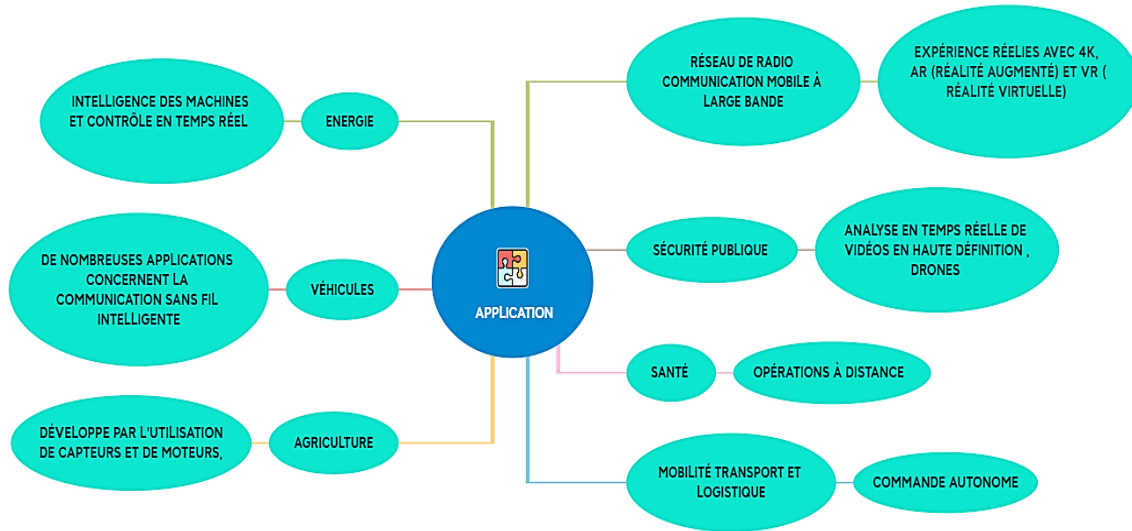


Figure .1 . 1.Évolution des applications de la 5G [4] [5].

1.2.1. Nécessité de la 5G

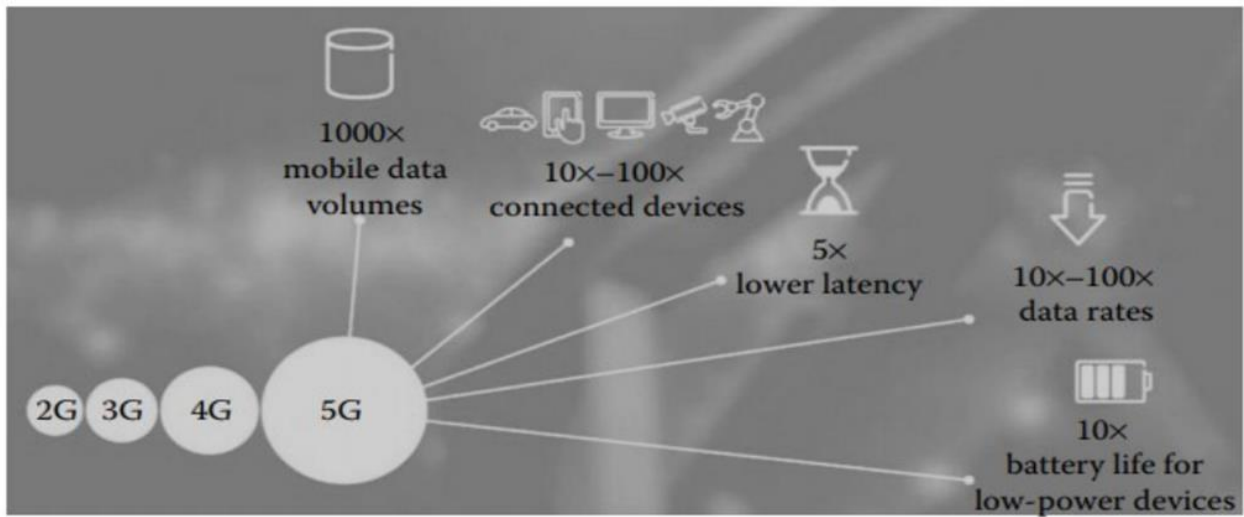


Figure .1 . 2.Les niveaux de performance estimés de la 5G

Comme le montre la Fig.1.2, les niveaux de performance requis de la technologie 5G sont :

- Données avec grands volumes : la taille des données doit être 1 000 fois plus grande ;

- Une latence plus courte donne l'apparence d'un réseau plus réactif ;
- Moins d'antennes : Le nombre de stations pouvant être connectées via une antenne doit être réduit ;
- L'augmentation du nombre d'antennes est 100 fois plus élevée, laissant la fréquence utilisée déterminer le nombre d'antennes ;
- Augmentation de débit à 1 Go ;
- L'augmentation du nombre de batteries nous permet de réduire la consommation d'énergie [6].

1.2.2. Futures de systèmes de communications 5G

L'évolution du système mobile se divise principalement en cinq générations comme le montre le tableau 1.2 :

Dans les années 1980, la première génération de systèmes de communication mobile basés sur des signaux analogiques voit le jour, permettant de s'affranchir des contraintes de la ligne téléphonique. Dans les années 1990, les systèmes de communication mobile de deuxième génération (2G) basés sur les communications numériques étaient disponibles, ce qui a entraîné une expansion mondiale rapide des communications mobiles personnelles.

Après l'an 2000, avec le déploiement des systèmes 3G, les gens peuvent profiter d'une expérience mobile Internet plus rapide, y compris les appels vidéo.

En 2010, le déploiement commercial d'un réseau 4G basé sur l'évolution à long terme (LTE) a amélioré la capacité du système et l'expérience utilisateur. Selon la Global TD-LTE Initiative (GTI), 364 réseaux commerciaux LTE ont été lancés au troisième trimestre 2015.

Avec le déploiement généralisé des systèmes IMT-Advanced (IMT-A), les technologies de communication mobile de cinquième génération (5G) gagnent du terrain dans les domaines de la recherche [3] [4]. La Fig.1.3 décrit l'évolution des générations de réseaux mobiles [7].

Tableau. 1. 2. Historique des générations de communication [8] [4].

Réseau	1G	2G/2.5G	3G	4G	5G
Déploiement	1970/1984	1980/1990	1990/2002	2000/2010	2014/2015
Bande passante	2 Kbps	4-64Kbs	12 Mbps	200 Mbps	1 Gbps
Description fonctionnelle générale	Cellulaire analogique	Cellulaire numérique (GSM/CDMA)	Première bande passante mobile utilisant des protocoles IP (WCDMA ,2000)	Le haut débit mobile sur un standard unifié (LTE)	Internet tactile amélioré le réseau de communication M2M
Fréquence	900 MHz	900 MHz et 1.8 GHz	800/900 MHz 1.7 à 1.9 GHz 2100 MHz	800 MHz 900 MHz 1800 MHz 2100 MHz 2600 MHz	28 GHz 37 GHz 39 GHz 61-74 GHz
Service	Téléphonie mobile	Voix numérique Messagerie court	Audio-vidéo et donnée intégrés de haute qualité	Accès dynamique à l'information dispositif variable	Accès dynamique à l'information appareil variable avec capacité d'IA
MULTIPLIXAGE	FDM A	TDMA /CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Commutation	Circuit	Circuit/circuit pour le réseau d'accès et l'interface hertzienne	Paquet sauf pour l'interface hertzienne	Tout paquet	Tout paquet
Réseau central	PSTN	PSTN	Réseau de paquet	L'internet	L'internet
Remise		Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal

Remarque: FDMA, frequency-division multiple access; LAN, local area network; PAN, personal area network; PSTN, public switched telephone network; TDMA, time-division multiple access; WAN, wide area network; WLAN, wireless local area network.

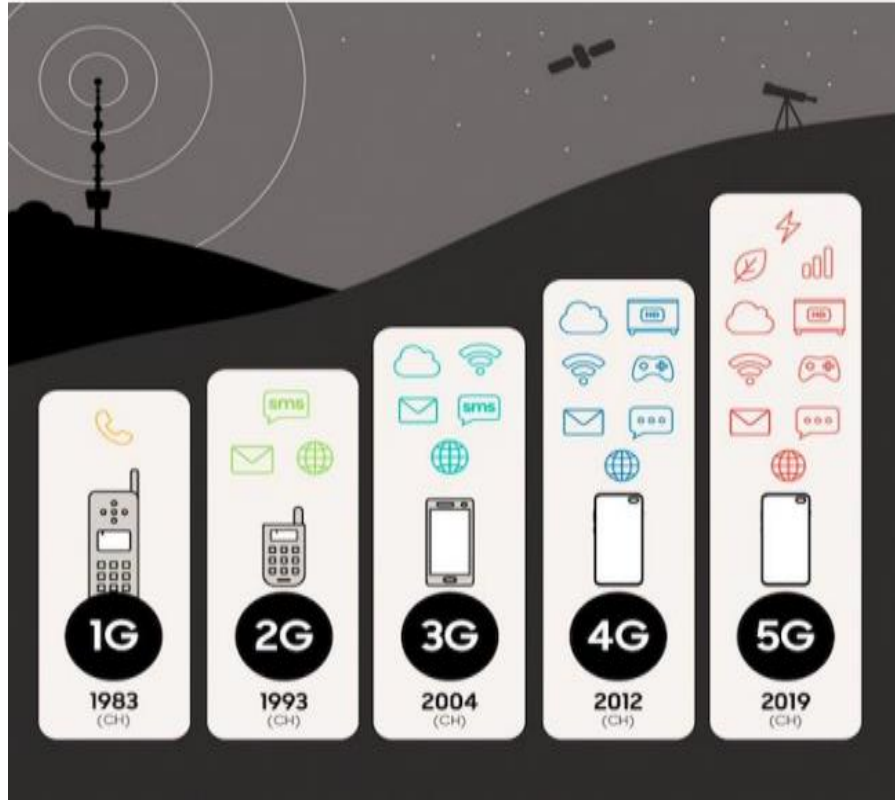


Figure .1 . 3.Évolution de la 5G [9].

1.3. Antennes reconfigurables

1.3.1. Définition

Une antenne reconfigurable est définie comme un dispositif capable de modifier ses caractéristiques de fonctionnement (fréquence opérationnelle, bande passante, polarisation, diagramme de rayonnement) d'une manière dynamique après sa fabrication. Le changement dans l'un de ses paramètres électriques, optiques, physiques (modification mécanique) ou l'intégration de matériaux commandables (ferrites, cristaux liquides) permet de modifier les caractéristiques de l'antenne, même durant le fonctionnement de l'antenne en temps réel. Ces changements permettent à l'antenne de s'adapter au changement de l'environnement et aux contraintes liées aux systèmes de communications [10].

1.3.2. Avantages et inconvénient des antennes reconfigurables

Le tableau 1.3 ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des antennes reconfigurables [11] :

Tableau. 1. 3. Avantages et inconvénients des antennes reconfigurables [11].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • La réallocation et la gestion dynamique du spectre • Offre la flexibilité et réponds aux exigences de plate-forme radio sans fil (des services multiples dans un seul appareil). • Réduction du nombre d’antennes dans le système ce qui réduit la taille et le coût de l’appareil. • Une bonne isolation entre les différentes normes sans fil et les bandes. • La reconfigurabilité de rayonnement permet d’avoir une diversité spatiale. • Reconfigurabilité en fréquence est utile à l’appui de nombreuses applications sans fil. • Reconfigurabilité en polarisation permet de réduire divers problèmes tel que l'affaiblissement du signal dû à la propagation par trajets multiples, la sensibilité de l'émetteur-récepteur de signaux à l'orientation de l'antenne et la sécurité, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus chers que les antennes classiques (introduire des composants actifs) • Consommation énergétique élevée (composants actifs à polariser en continu) • Difficultés de conception et de simulation à cause de l’intégration des composants actifs dans l’antenne (le besoin d’utiliser des packages, circuit de polarisation) • Une efficacité réduite.

1.3.3. Techniques de reconfigurabilité

Les progrès de la microélectronique ont fourni de nouvelles voies pour obtenir des antennes reconfigurables grâce à des méthodes plus efficaces et plus rentables. Certaines techniques se sont appuyées sur des composants locaux actifs tels que des diodes PIN, des diodes varicaps, des MEMS, et des commutateurs optiques, qui sont intégrés dans la structure de l’antenne et lui permettent de modifier sa longueur électrique effective, de créer des court-circuits ou des fentes commutables, et activer ou désactiver les éléments parasites.

D’autres approches basées sur la résilience des substrats sont également mises en œuvre. En effet, il s’est avéré assez utile d’utiliser des matériaux "intelligents", c’est-à-dire des matériaux aux propriétés observables, comme les substrats ferroélectriques et ferromagnétiques, ainsi que des cristaux liquides [12].

Différentes techniques de reconfiguration peuvent être mises en œuvre pour déjouer les contraintes imposées et remplir pleinement la fonction d'antenne. La plupart de ces techniques peuvent être classées comme dans la Fig. 1.4.

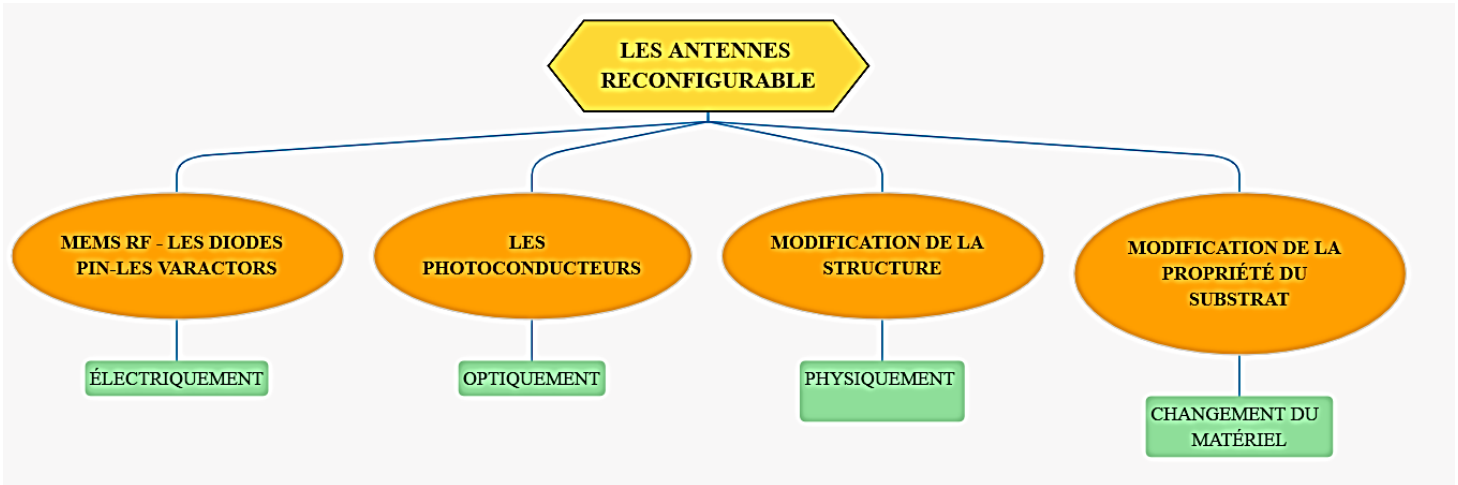


Figure .1 . 4. Les différentes techniques de reconfigurabilité [13].

Quelle que soit la technique de reconfigurabilité utilisée, on peut les classer suivant leur fonctionnalité sur les caractéristiques de l'antenne comme nous le montrons dans la Fig. 1.5.

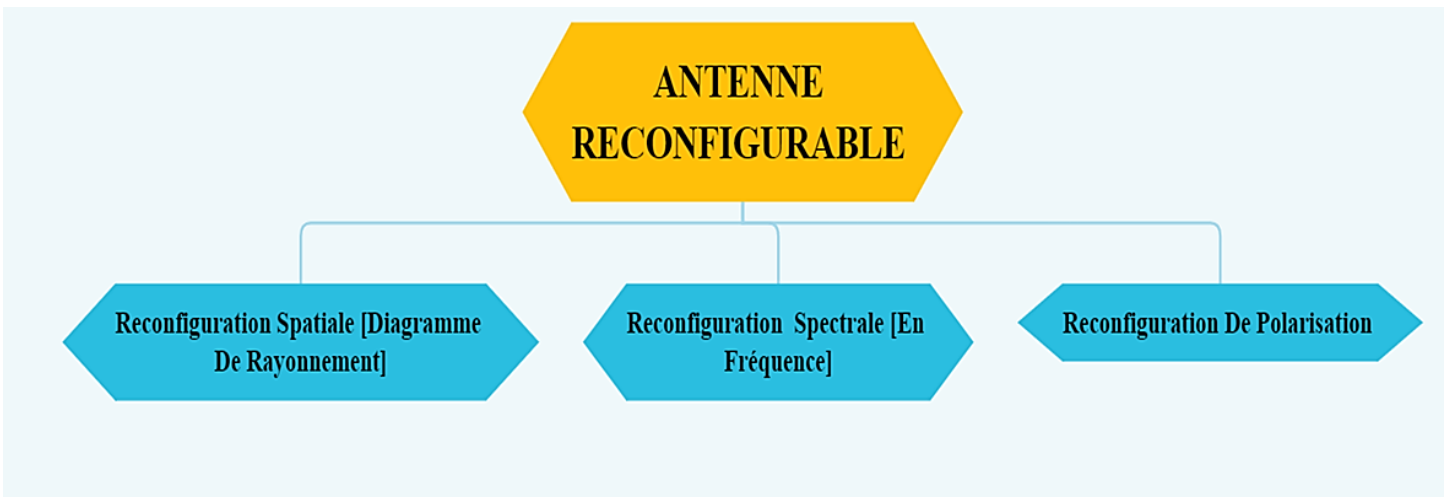


Figure .1 . 5. Arbre de catégorisation par fonctionnalité [14].

1.4. Antennes reconfigurables en fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence sont également appelées antennes accordables. Elles sont classées en antennes reconfigurables en fréquence continue et en antennes reconfigurables en fréquence commutée. Malgré le fait que le principe de fonctionnement est le même, les antennes reconfigurables en termes de changements de longueur de courant, permettant un fonctionnement de bande différent [15].

Dans cette partie, nous présentons trois techniques pour réaliser une reconfiguration en fréquence qui sont : commutation de fréquences par diodes PIN, accord en fréquence à l'aide de varactors, et accord en fréquence à l'aide de matériaux agiles.

1.4.1. Commutation de fréquences par diodes pin

Un exemple est donné dans [16], en utilisant des diodes PIN. L'antenne proposée est une nouvelle structure différentielle reconfigurable basée sur des dipôles. La structure de base de l'antenne proposée consiste en deux paires de bras verticaux formant les dipôles, la structure d'alimentation, la structure de commutation de mode et les diodes PIN. En commutant les diodes PIN sur "ON" et "OFF", l'antenne peut résonner dans deux états, et donc le travail est concentré à 3.5 et 5.5 GHz, respectivement. Bien que les deux états correspondent à des modes de résonance différents, les portions de rayonnement effectif sont les mêmes et la structure de commutation de mode en champ lointain des deux états n'y contribue pas. Il en résulte des diagrammes de rayonnement similaires pour les deux états. En outre, l'antenne proposée a une structure simple et une portée étendue. La largeur de bande d'impédances mesurées à -10 dB est de 2.89-4.07 GHz (33%) et de 5.1-6.19 GHz (19.8%) pour les deux conditions.

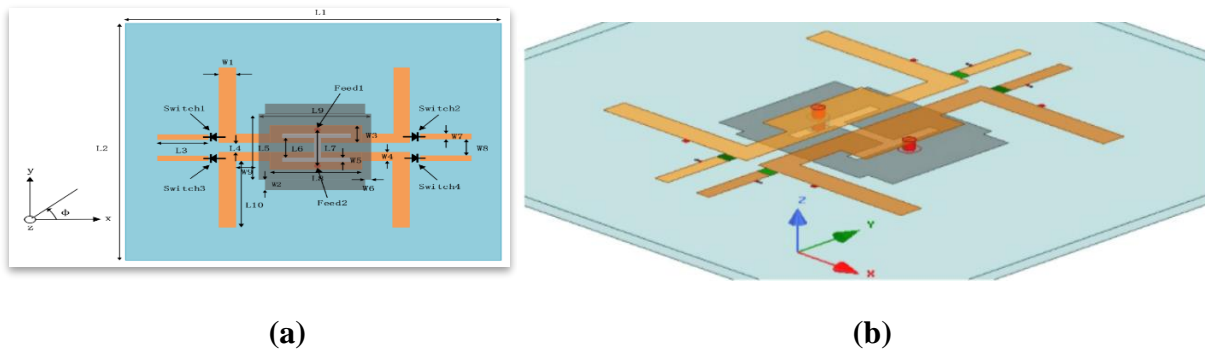


Figure 1.6. Antenne reconfigurable en fréquence. (a) Vue de dessus. (b) Structure en 3D [16].

1.4.2. Accord en fréquence à l'aide de varactors

Dans [17], une antenne à double fonction micro-ondes et ondes millimétriques a été présentée. La conception consiste en un trou imprimé sur le bord au niveau du plan de masse (Figure 1.7). La diode varactor est utilisée pour obtenir un réglage de fréquence de 2.05 à 2.7 GHz (4G, WLAN) avec un gain maximal atteint 4.5 dB avec une efficacité mesurée de 45 % à 70 % dans une plage de basses fréquences reconfigurable.

Pour la longueur d'onde millimétrique, l'ouverture agit comme un réseau d'ouvertures connectées (CSAA) utilisant huit flux périodiques avec une large bande passante de 23-29 GHz (5 GHz) et un gain réalisé maximum de 12.5 dB avec une efficacité mesurée de 80% à 90 % dans la gamme des hautes fréquences. Pour améliorer la fonctionnalité, deux emplacements sont disposés orthogonalement pour implémenter le MIMO (Multiple Input, Multiple Output). La structure entière a été mise en œuvre à l'aide d'un substrat Rogers 5880 avec une taille de plaque de $70 \times 60 \times 0.381 \text{ mm}^3$. Le coefficient de corrélation d'enveloppe (ECC) et l'isolation ont été calculés, montrant des propriétés MIMO satisfaisantes. La valeur ECC minimale est de 0.01, tandis que l'isolement est supérieur à 20 dB entre différentes prises de courant. En raison de l'intégration des opérations 4G et 5G dans une fente étroite, le système d'antenne proposé est de structure compacte, simple et plat, donc attrayant pour les futurs appareils mobiles portables.

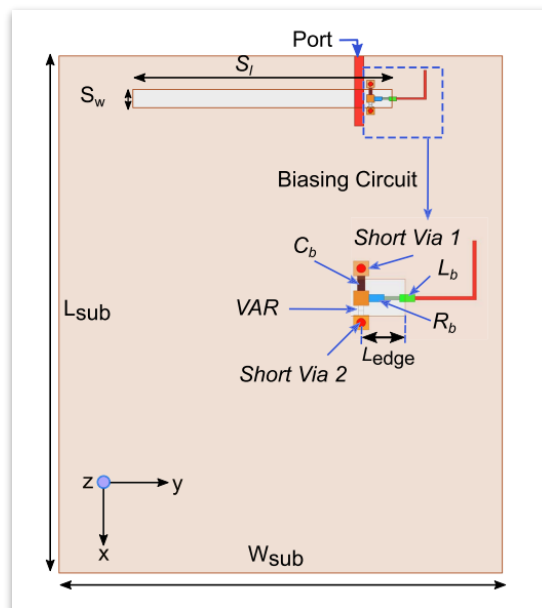


Figure .1 . 7.Géométrie de l'antenne à fentes reconfigurable en fréquence[17].

1.4.3. Accord en fréquence à l'aide de matériaux agiles

Un accord de fréquence peut également être obtenu en utilisant des substrats dont les caractéristiques diélectriques ou diamagnétiques sont compatibles. Ce substrat pourrait également être du type bande interdite électromagnétique (EBG, Electromagnetic Band-Gap), comme on le voit dans [18]. L'antenne proposée est un patch micro-ruban composé d'un substrat à structure périodique avec un composant programmable pour chaque cellule comme le montre la Fig. 1.8. La surface EBG peut être connectée ou non au plan de masse de l'antenne. Deux fréquences de résonance de 1.96 GHz et 2.45 GHz peuvent être obtenues en utilisant ces deux combinaisons.

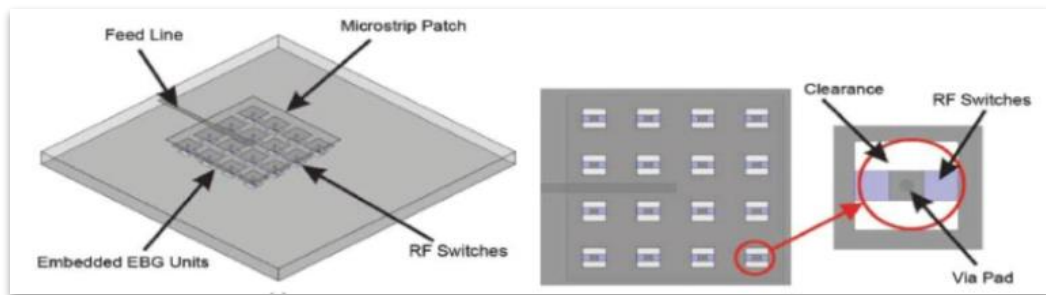


Figure .1 . 8. Antenne patch reconfigurable en fréquence sur substrat EBG [18].

1.5. Antenne reconfigurable en polarisation

Le réglage de la polarisation de l'antenne, qu'elle soit linéaire ou circulaire, correspond à sa reconfiguration de polarisation. Le but de ces antennes est de changer la direction vectorielle du champ émis sans changer les fréquences de résonance ni la forme du diagramme de rayonnement. En général, il est nécessaire de pouvoir changer le sens et/ou la phase de circulation des courants sur un élément rayonnant sans affecter l'allure ou le trajet des courants [19].

1.5.1. Utilisation de diodes pin

Dans [20], une antenne patch alimentée par microruban reconfigurable avec agilité de polarisation dans l'une ou l'autre des deux bandes est proposée. La reconfigurabilité de fréquence est obtenue en connectant un petit patch supplémentaire au patch principal via une diode PIN. Chaque coin est coupé du patch principal par une coupe étroite en forme de L pour obtenir la polarisation reconfigurable. De plus, les largeurs de bande d'impédance et de rapport axial sont améliorées en utilisant l'alimentation à couplage de proximité. L'antenne proposée est capable de

fonctionner dans trois états de polarisation, c'est-à-dire une polarisation circulaire gauche, une polarisation linéaire et une polarisation circulaire droite dans deux bandes de fréquences.

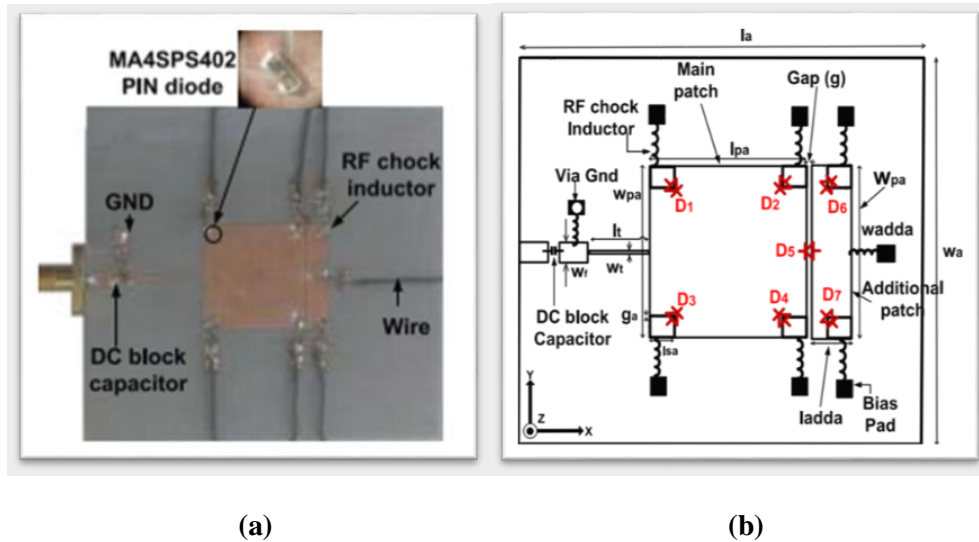


Figure .1 . 9. Antenne reconfigurable en polarisation (a) Photographie du prototype (b) Géométrie de l'antenne [20].

1.5.2. Utilisation d'éléments parasites

La référence [21], montre un exemple d'antenne reconfigurable avec des éléments parasites. L'idée est de placer des éléments d'antenne parasites à proximité de l'élément rayonnant principal, avec des effets modifiables via un composant reprogrammable. L'antenne est constituée d'un patch carré avec des transducteurs piézoélectriques commutables qui peuvent affecter les coins supérieurs. Elle fonctionne à une fréquence de 5.8 GHz et a des performances comparables pour les deux polarisations circulaires commutables, droites et gauches.

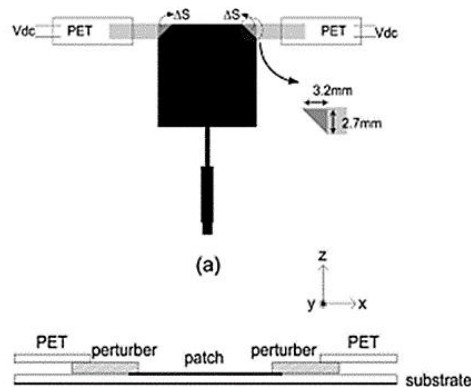


Figure .1 . 10. Antenne patch carré à polarisation circulaire reconfigurable [21].

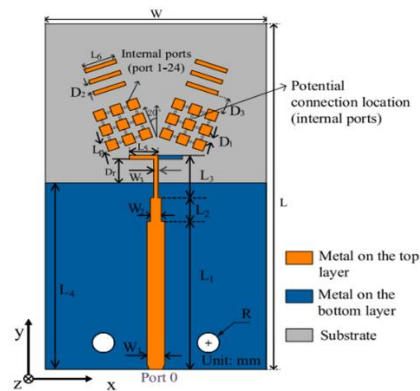
1.6. Antennes reconfigurable en diagramme de rayonnement

Par définition, les antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement modifient la forme, la direction et le gain des diagrammes de rayonnement afin de privilégier ou non certaines directions. Les réseaux d'antennes sont généralement utilisés pour obtenir cette fonctionnalité.

Ce type de reconfiguration peut être utilisé pour éviter les sources de bruit ou les interférences électroniques, améliorer la sécurité et économiser l'énergie en changeant de direction pour les utilisateurs cibles. Par conséquent, ce type de reconfiguration est un candidat prometteur pour améliorer le signal dans la direction souhaitée ou éviter les signaux provenant de directions indésirables. Il existe plusieurs concepts de reconfiguration de diagramme, parmi ces techniques, on trouve l'utilisation de diode PIN, de MEMS et des photoconducteurs [22].

1.6.1. Utilisation diode pin

Une antenne reconfigurable de surface parasite fonctionnant dans la gamme de fréquence millimétrique est présentée dans [23]. En insérant une surface de pixel parasite devant une antenne rayonnante, l'antenne peut obtenir différents diagrammes de rayonnement, y compris le routage du faisceau sans utiliser de déphaseurs. Dans cette conception, deux diodes PIN qui agissent ensemble comme un état de commutation sont placées dans la surface parasite, comme illustré à la Fig. 1. 11. (a). Deux tracés de rayonnement indiquant 75° et 110° ont été obtenus pour illustrer le concept et ouvrir la voie à des extensions avec plus de faisceaux comme le montre la Fig. 1. 11. (c). Le coefficient de réflexion a également été obtenu à 28 GHz avec une adaptation - 30 dB Comme illustré à la Figure. 1. 11. (b)



(a)

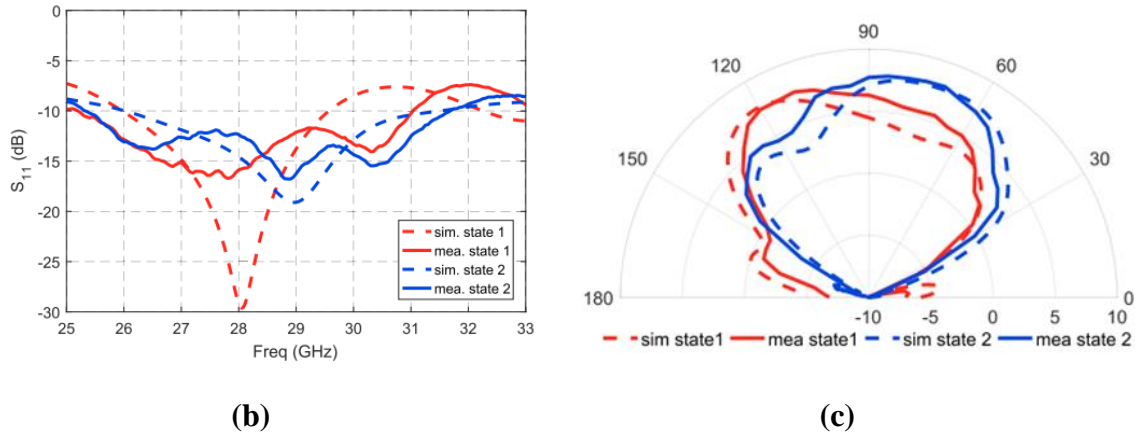


Figure .1 . 11. (a) Antenne reconfigurable en diagramme pour les applications 5G (b) S_{11} de l'antenne reconfigurable (état 1 : les deux diodes sont éteintes ; état 2 : les deux diodes sont allumées). (c) Diagramme d'antenne à 28 GHz avec deux diodes PIN dans deux états[23].

1.6.2. Utilisation de MEMS

Dans [24], une nouvelle antenne quasi-Yagi reconfigurable en diagramme pour les ondes millimétriques est présentée. L'antenne quasi-Yagi est imprimée sur un substrat de quartz intégré avec des commutateurs MEMS RF. Elle se compose d'un dipôle commandé, de deux directeurs de dipôle et d'un plan de masse tronqué comme réflecteur. En contrôlant l'actionnement des MEMS RF chargés sur les éléments dipôles commandés et directeurs Comme illustré à la Figure. 1. 12 , la fréquence de fonctionnement de l'antenne est commutable dans la bande des réseaux personnels sans fil à ondes millimétriques (WPAN) (57-66 GHz) et la bande E (71-86 GHz).

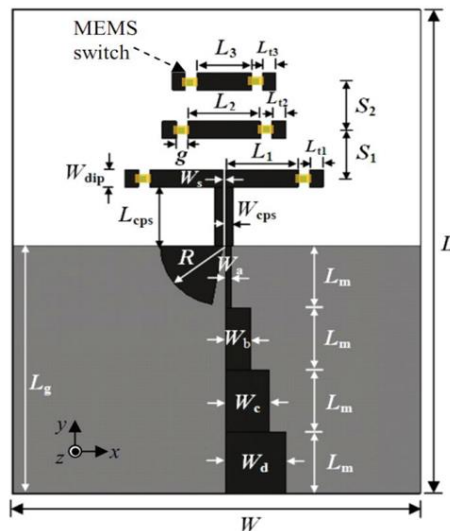


Figure .1 . 12. Antenne reconfigurable en diagramme [24].

1.6.3. Utilisation de photoconducteurs

Un nouveau concept d'une antenne reconfigurable à commande optique (OCRAA), fonctionnant dans les bandes de fréquences de 28 et 38 GHz pour les applications en ondes millimétriques (mm) est proposée dans [25]. L'utilisation de commutateurs photoconducteurs permet de contrôler optiquement ses bandes passantes opérationnelles et son diagramme de rayonnement. L'antenne présente une largeur de faisceau à mi-puissance de 90° dans le plan azimutal, dans le but de permettre la couverture dans un environnement intérieur (Figure 1.13).

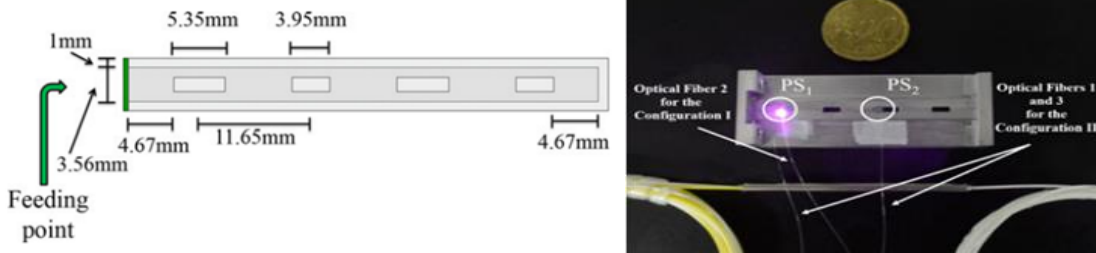


Figure .1 . 13. Antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement [25]

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a commencé par une description de la technologie de la 5G dans les bandes millimétriques, leurs domaines d'application et leurs nécessités. Puis, nous avons présenté les applications et les exigences d'antennes reconfigurables. Les composants employés pour la reconfiguration restent limités en nombre et comptent essentiellement parmi des diodes (PIN ou varicaps), des varactors et des MEMS. Ensuite, on a présenté un état de l'art sur les antennes reconfigurables et les approches utilisées dans la littérature pour réaliser la reconfiguration. Dans le chapitre suivant, nous avons vu la conception et la simulation d'une antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement en utilisant la diode PIN. Cette antenne peut fonctionner facilement à plusieurs bandes de fréquences suivant l'état des diodes PIN (ON, OFF).

CHAPITRE 2 : Validation d'une antenne reconfigurable pour les applications 5G

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous discutons une conception d'antenne commutée de base à 60 GHz qui peut être fabriquée avec un PCB conventionnel à faible coût. Elle est destinée aux futurs dispositifs industriels de réglage fin qui fonctionneront dans des environnements de propagation difficiles. En utilisant des diodes PIN, l'antenne proposée peut déplacer l'orientation de son lobe principal entre deux angles différents [26].

La simulation précise des antennes avant leur réalisation est une étape très importante. CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passive en 3 dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales [27]. Il permet de calculer les paramètres S_{ij} , le diagramme de rayonnement, le champ électromagnétique, la distribution de courant, et d'autres paramètres. Et comme notre travail de simulation sera réalisé à l'aide de ce logiciel, il est indispensable de le présenter.

2.2. Présentation du logiciel CST

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structures passives en 3 Dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, Finite Intégration Technic) [28]. Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet de s'appliquer à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux micro-ondes en analyse temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrète la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles, et c'est l'une des principales caractéristiques de ce simulateur (Figure 2.1).

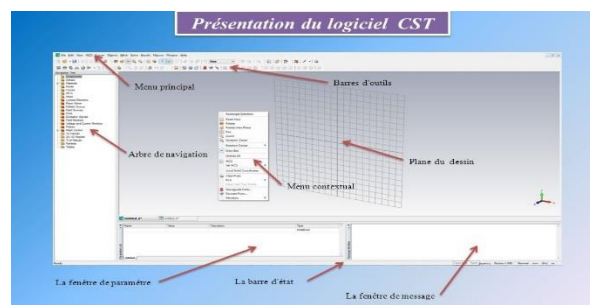


Figure. 2. 1.Interface graphique de CST

2.3. Description d'antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement

2.3.1. Géométrie de l'antenne proposée

La figure 2.2 montre l'antenne proposée. Elle se compose de deux radiateurs pointant dans des directions différentes. Ces derniers sont alimentés par un seul port RF via un commutateur SPDT (Single Pole Double Throw). Le diagramme de rayonnement peut être reconfiguré en changeant l'état du commutateur. Les LTSA (linear tapered slot antennas) sont utilisés comme éléments rayonnants en raison de leur diagramme de rayonnement et de leur facilité d'intégration avec le commutateur SPDT distribué à base de diodes PIN [29].

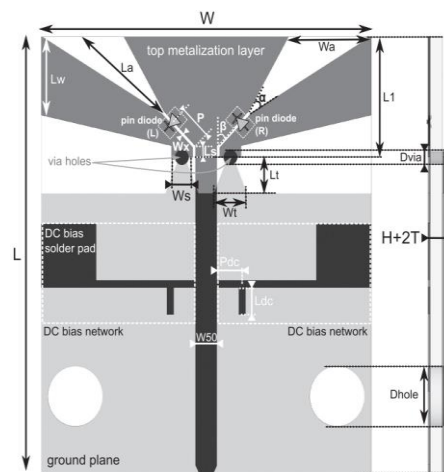


Figure. 2. 2. Conception de l'antenne proposée. La métallisation de la couche supérieure est en noir et gris foncé, tandis que le plan de masse est en gris clair [29].

La figure 2.3 montre la validation de l'antenne proposée afin que la fig. 2.3. (a) illustre la couche supérieure et la fig.2.3. (b) la couche inférieure.

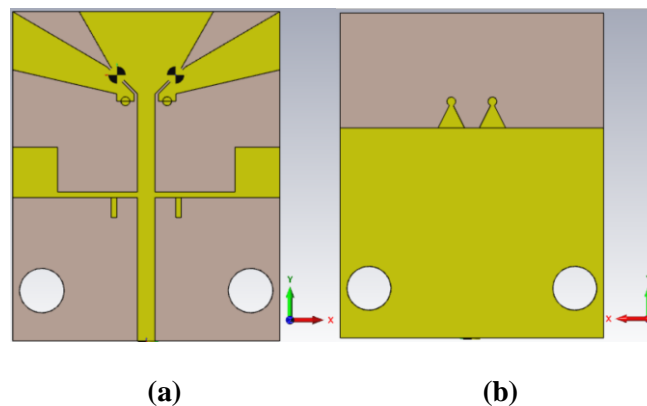


Figure. 2. 3. Validation de l'antenne proposée (a) couche supérieure (b) couche inférieure.

Les paramètres de l'antenne sont regroupés dans le tableau 2.1 :

Tableau. 2. 1.Dimension d'antenne proposée[29].

L	W	L _a	W _a	W _s	W _x	W ₅₀	W _t	L _t
14.7	11.9	3.83	2.96	0.78	0.15	0.78	1.2	1.2
P	L ₁	L _w	L _s	L _{dc}	P _{dc}	D _{via}	α	β
1.2	4.0	2.6	0.33	0.89	0.92	0.4	30	45

La configuration finale de l'antenne proposée est représentée à la figure 2.2 et les paramètres géométriques optimisés sont résumés dans le tableau 2.1. Cette antenne est conçue sur un substrat ROGERS CuClad 217 avec un constant diélectrique de 2.20, une hauteur H de 0.254 mm, une épaisseur de couche de métallisation T de 35 μm, et une perte tangente de 0.001 [29].

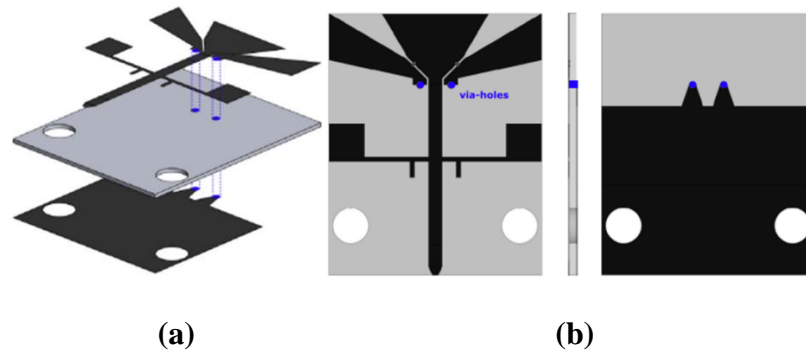


Figure. 2. 4.Schéma de l'antenne simulé. (a) Vue en 3D. (b) Vue des couches supérieure et supérieure, latérale et inférieure. La métallisation est en noir, le diélectrique est en gris, et les trous d'interconnexion sont en bleu

Le schéma détaillé des couches d'antenne est illustré à la Figure 2.4. La structure conçue est composée de deux LTSA avec l'angle d'ouverture α , la longueur et la largeur de l'extrémité W_a qui sont placés symétriquement l'un par rapport à l'autre et pointant les directions $\pm\beta$ par rapport au plan de symétrie de la structure. L'antenne est alimentée par les lignes à fentes d'une largeur W_x qui se connecte à la ligne micro-ruban d'entrée [29].

Nous avons mis deux diodes à faisceau commuté (modulations L et R) identiques, mais opposées l'une à l'autre afin de les pointer dans des directions différentes comme le montre la figure 2.5.

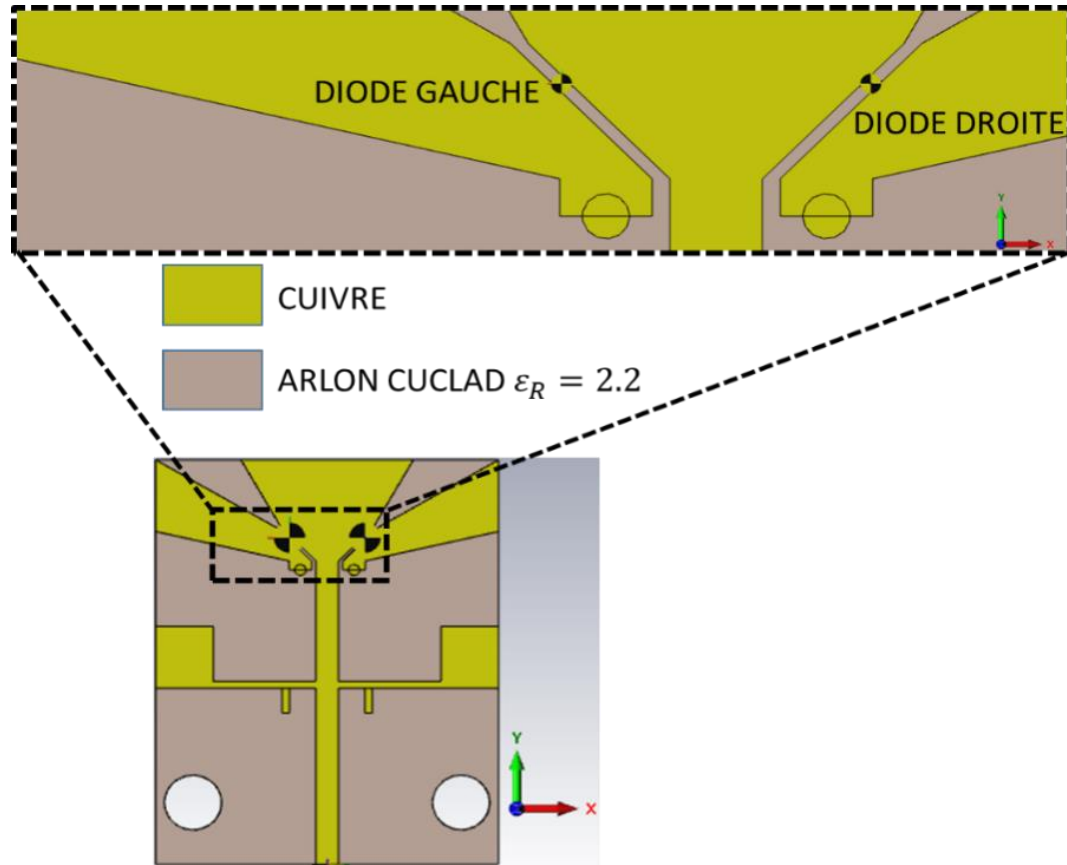


Figure. 2. 5. Position des diodes PIN sous CST.

2.3.2. Etude de l'influence de différents paramètres

Dans cette section, une analyse des performances est effectuée en ce qui concerne l'effet des patches coniques horizontaux sur l'antenne pour obtenir de bons résultats au niveau du coefficient de réflexion dans la gamme de fréquences souhaitée. Les figures 2.6 et 2.7 présentent les effets de la longueur de patches coniques horizontaux (paramètre « L_1 ») en termes de paramètre S, et effet de position de diode p). On peut conclure que ces deux paramètres " L_1 " et "p" affectent largement le paramètre S de l'antenne. Afin d'obtenir la bande passante de 56 à 61 GHz ou au-dessus de 60 GHz, la position L_1 doit être optimisée avec la position améliorée de la diode "p".

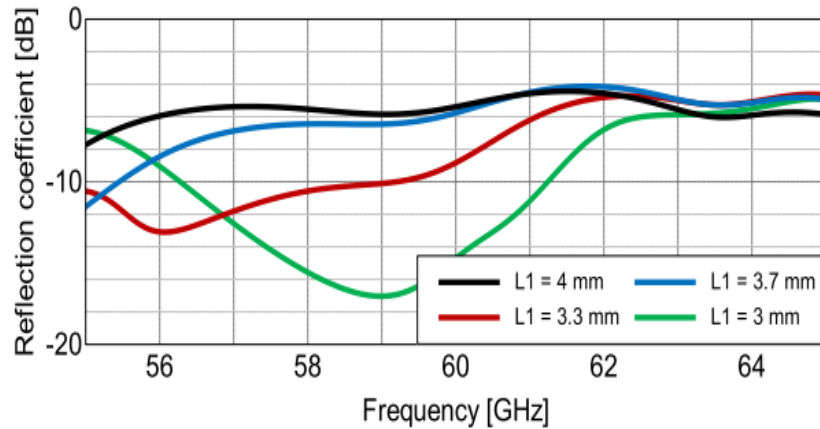


Figure. 2. 6. Coefficient de réflexion simulé de l'antenne en fonction de la longueur $L1$. $P = 1.2$ mm [29].

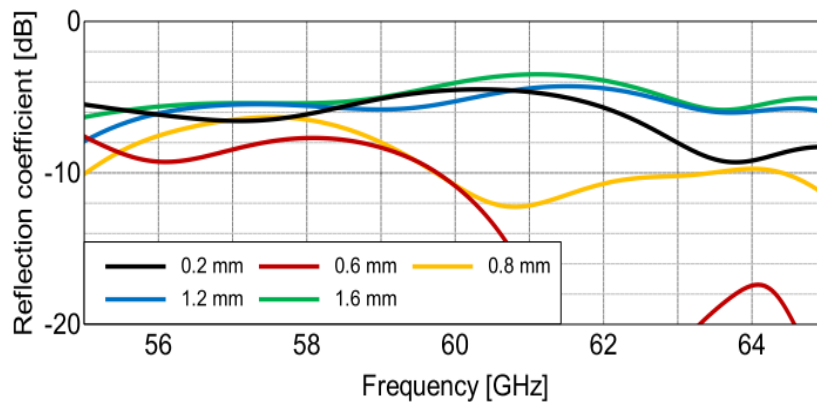


Figure. 2. 7. Coefficient de réflexion simulé de l'antenne en fonction de la position de la diode P . $L1 = 4$ mm [29].

Pour analyser l'effet de l'approche proposée sur les propriétés de rayonnement, on a calculé les diagrammes de rayonnement de l'antenne pour différents paramètres dans le plan Thêta (xz). Les résultats se trouvent à la figure 2.8. On remarque que les formes sont identiques, mais opposées l'une par rapport à l'autre et pointent donc dans deux directions différentes. L'efficacité de la simulation est d'environ 80% et le niveau de polarisation croisée dans la direction du lobe principal est inférieur à -10 dB.

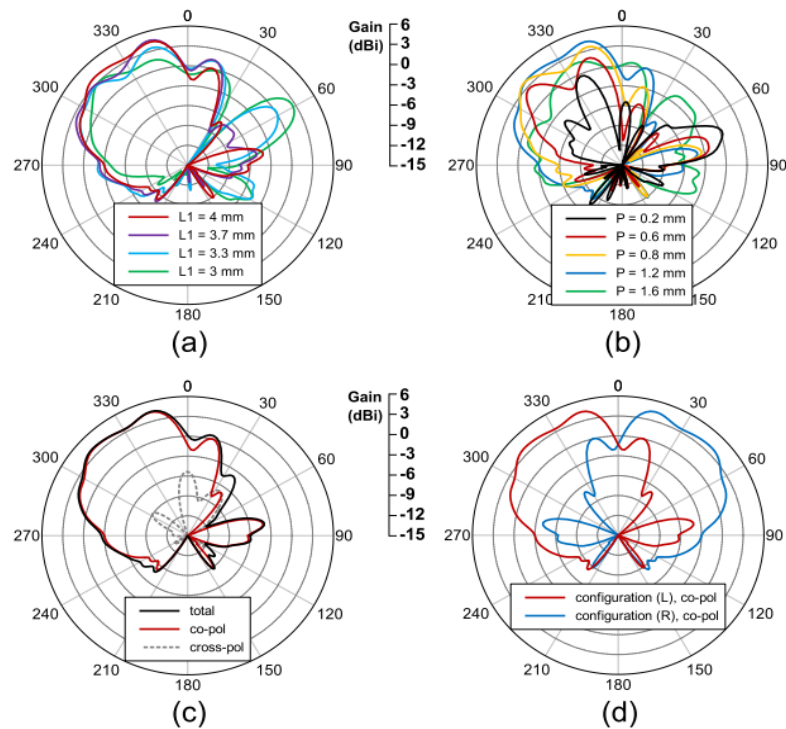


Figure. 2 . 8. Diagrammes de rayonnement simulés dans le plan horizontal ($\theta = 90^\circ$) [29].

Selon la valeur de L_1 ou P , avec une largeur de faisceau d'environ la moitié de la puissance 80. Le niveau des lobes latéraux diminue avec l'augmentation de la longueur L_1 , mais au détriment du décalage de la bande passante correspondante vers des fréquences plus basses. Un effet similaire se produit avec le changement de la distance P . On voit qu'il est difficile d'assurer à la fois une bonne adaptation à 60 GHz et des lobes latéraux bas. Pour avoir un bon compromis entre ces deux caractéristiques, on a choisi $L_1 = 4$ mm et $P = 1.2$ mm.

2.3.3. Implémentation avec des switches réels

Le fabricant fournit des caractéristiques RF mesurées à deux ports des diodes jusqu'à la fréquence de 50 GHz. Pour la simulation, un modèle à un port est nécessaire, de sorte que les données de mesure disponibles ont été converties sous la forme requise en mettant au plan de masse un port de la diode. De plus, les paramètres de la diode ont dû être extrapolés jusqu'à 70 GHz pour simuler correctement les performances de l'antenne conçue. Finalement, des circuits équivalents RLC ont été provenus pour les états de polarisation directe et inverse de la diode. Les

paramètres de chaque modèle ont été obtenus en réglant les composants de manière à ce qu'ils s'adaptent à la fréquence de l'antenne.

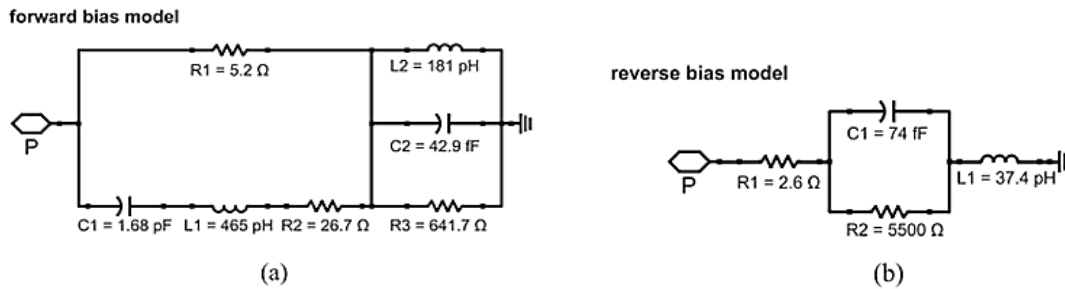


Figure. 2. 9.Circuits RLC équivalents de la diode p-i-n MA4AGFCP910 en tant que modèle à un port. (a) Modèle de diode à polarisation directe (10 mA). (b) Modèle de polarisation inverse [29].

Les switches utilisés dans ce travail sont des diodes PIN de type MA4AGFCP910 du constructeur Infineon. Les modèles de circuits équivalents utilisés dans le logiciel de simulation CST sont illustrés à la figure 2.9, une inductance (L) de 465 pH est utilisée pour l'état ON. Trois résistances (R_f) de 5.2 Ω , 26.7 Ω , et 641.7 Ω à l'état de polarisation en sens direct et deux condensateurs (CT) dans le circuit parallèle est de 1.68 Pf, et 42.9 Ff pour l'état de polarisation en sens inverse. Deux résistances (R_P) est de 2.6 Ω , et 5500 Ω , une inductance (L) de 37.5 Ph et un condensateur de 74 Ff.

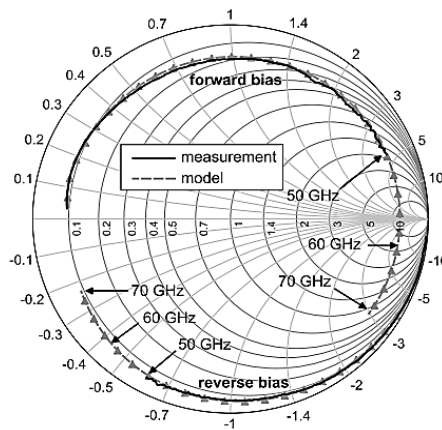


Figure. 2. 10.Impédances mesurées et modélisées de diode PIN MA4AGFCP910 dans les états de polarisation directe et inverse (plage de fréquences 2-70 GHz)[29].

Les paramètres S mesurés et approximés de la diode sont comparés dans la Fig. 2.10 et ils montrent un très bon accord dans toute la gamme d'ajustement. Les caractéristiques extrapolées de la diode montrent que dans la gamme des ondes millimétriques, elle se comporte de manière tout

à fait opposée au comportement attendu des diodes PIN. Dans l'état direct, la diode a une phase du coefficient de réflexion proche de 0° à 60 GHz ce qui signifie qu'elle se comporte comme un circuit ouvert, alors que dans l'état inverse elle a une phase de réflexion d'environ -130° ce qui est proche d'un court-circuit.

En raison des propriétés des diodes PIN présentés ci-dessus à 60 GHz, l'antenne rayonne dans la direction de la ligne de fente chargée avec la diode à l'état direct, tandis que le rayonnement est supprimé dans la direction de la ligne de fente avec la diode à polarisation inverse.

2. 3.4. Réalisation du prototype et résultats expérimentaux [29]

Pour valider expérimentalement l'approche proposée, un prototype d'antenne avec un switch réel a été fabriqué et ses différentes performances sont mesurées. La figure 2.11 montre une photographie de l'antenne fabriquée avec des fils de polarisation soudés pour contrôler l'état de commutation de l'antenne. Le tampon de soudure inutilisé est laissé pour maintenir la symétrie de la structure.

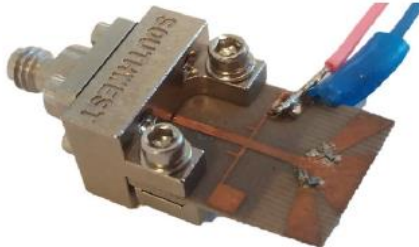


Figure. 2. 11. Photographie de l'antenne fabriquée [29].

Deux fils ont été soudés pour contrôler la configuration de commutation de l'antenne. Une chambre anéchoïque à ondes millimétriques a été utilisée pour effectuer des mesures des caractéristiques de rayonnement.

La configuration de mesure est illustrée à la Fig.2.12 et se compose d'une chambre anéchoïque et d'un système émetteur-récepteur utilisant l'analyseur de réseau vectoriel Rohde et Schwarz ZVA50 et l'extension de plage de fréquences d'ondes millimétriques VDI WR15 [29]. L'antenne testée est mesurée en mode réception et est montée sur un support en mousse Rohacell (de permittivité relative proche de 1) qui est placé sur un plateau tournant. Ce montage permet de

mesurer les diagrammes de rayonnement dans un plan horizontal ($\theta = 90^\circ$) dans une gamme ϕ comprise entre -120° et $+120^\circ$.

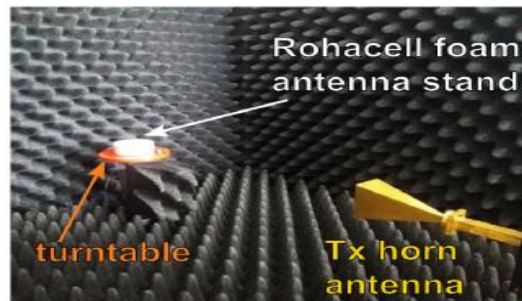


Figure. 2. 12. Dispositif de mesure dans une chambre anéchoïque à ondes millimétriques [29].

2.3.4.1 Distribution des courants surfaciques

L'antenne est alimentée par les lignes à fentes de la largeur W_x qui se connectent à la ligne microstrip d'entrée par une transition. Cette transition est illustrée à la Figure 2.13. Elle se compose de trois bandes sur la couche supérieure, de deux cônes sur la couche inférieure et de deux trous de passage de diamètre D_{via} . Les cônes relient le plan de masse de la ligne micro ruban aux bandes extérieures des lignes à fentes par l'intermédiaire des trous de passage, tandis que la bande centrale se dilate pour former le conducteur commun des deux lignes à fentes. Toute la structure de l'antenne est excitée à partir d'un connecteur d'extrémité de 1,0 mm monté à l'aide de trous de diamètre $D_{hole} = 2$ mm.

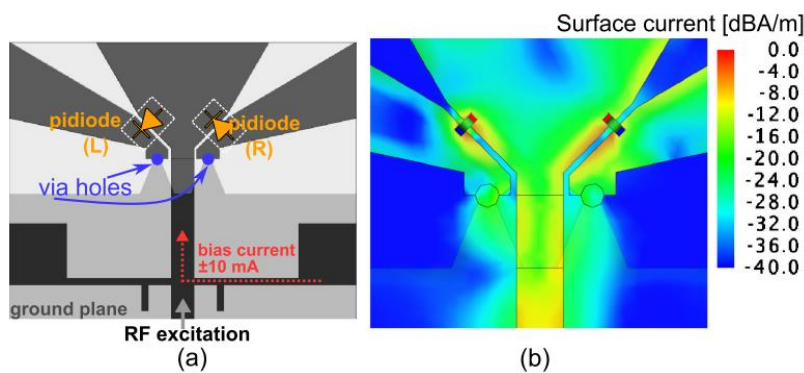


Figure. 2. 13. Transition entre le micro-ruban et la ligne à double fentes. (a) Conception de la transition. (b) Distribution du courant de surface dans la configuration R - la diode R est polarisée dans le sens direct [29].

Lorsqu'une diode est polarisée en direct (généralement par un courant de 10 mA circulant dans le circuit d'antenne), la seconde est polarisée en inverse avec une tension négative égale à la

tension directe de la première diode (type 1,37 V) et un très petit courant de fuite inverse (généralement 10 μ A). Cette commutation de faisceau est visible sur la figure 2.13(b), où la distribution du courant de surface dans la configuration R est représentée.

L'état de l'antenne est commuté en changeant la polarisation du courant continu circulant dans le réseau qui change les impédances des diodes, comme résumé dans le tableau 2.2. Le réseau de polarisation en courant continu des diodes est découplé du signal RF par un tronçon parallèle de longueur L_{dc} placé P_{dc} à l'écart de la ligne d'alimentation RF est réfléchi par rapport à la ligne micro-ruban centrale afin de conserver la symétrie de l'antenne [29].

Tableau. 2. 2.Principes de fonctionnement de l'antenne [29].

Paramètres	Valeur	
Courant d'entrée de polarisation	+10 mA	-10 mA
Polarisation de la diode L	Direct	Sens inverse
Impédance de diode L à 60 GHz	Circuit ouvert	Court-circuit
Polarisation de la diode R	Sens inverse	Direct
Impédance de la diode R à 60 GHz	Court-circuit	Circuit ouvert
configuration de l'antenne	L	R
direction du lobe principal	$-\beta$	$+\beta$

2.3.5. Validation de la structure par CST et comparaison des résultats

2.3.5.1. Coefficients de réflexion et Diagrammes de rayonnement

- Coefficients de réflexion

Les valeurs simulé du coefficient de réflexion sont présentées à la Fig.2.14(a) et comparées aux résultats de l'article Fig.2.14(b). Le coefficient de réflexion simulé par [29] atteint un niveau satisfaisant du coefficient de réflexion, qui est inférieur -5 dB (Fig.2.14(b) en noir) dans toute la bande considérée de 55–65 GHz. Le résultat de validation de l'antenne présente un niveau satisfaisant du coefficient de réflexion, qui est inférieur à -4 dB dans toute la bande considérée de 55 à 65 GHz (Fig.2.14(a) en rouge). Cependant, Il y a quelques différences qui sont causées par

des incertitudes de simulation, la différence de logiciel de simulation (l'article est simulé avec **FEKO** et nous avons validé par **CST**), et le fait que les impédances des diodes ont été extrapolées.

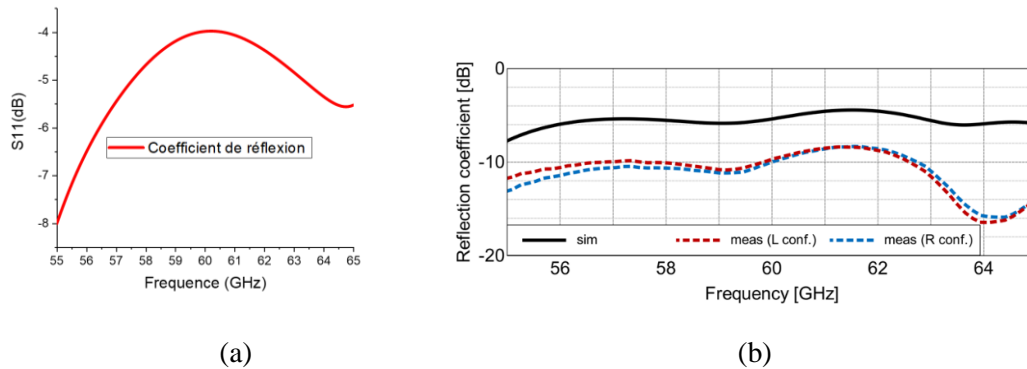


Figure. 2. 14. Résultats du coefficient de réflexion validé par CST ; (b) Comparaison des caractéristiques du coefficient de réflexion simulées et mesurées de l'antenne proposée

• **Diagrammes de rayonnement**

Le diagramme de rayonnement en gain permet d'observer dans quelle direction la densité de flux de puissance se concentre. La figure 2.15 présente le diagramme en gain, la valeur maximale du gain pour la fréquence 60 GHz est égale à 4.28 dB. Les diagrammes de rayonnement simulés dans [29] au plan horizontal (voir Fig.2.15(a)) sont en bon accord avec notre validation. L'antenne rayonne dans la direction de la diode polarisée dans le sens direct. Une ouverture angulaire d'environ 80° et des lobes secondaires à $\phi = \pm 45^\circ$.

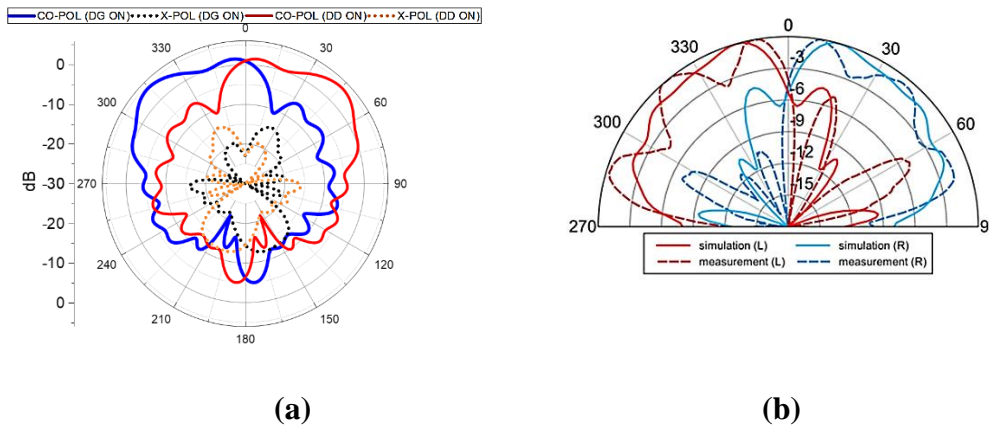


Figure. 2. 15. Diagramme rayonnement validé ;(b) Comparaison des diagrammes de rayonnement normalisés simulés et mesurés dans le plan horizontal ($\theta = 90^\circ$) à 60 GHz.

Tableau. 2. 3. Résultat comparatif de simulation d'un réseau d'antenne.

Paramètre d'antenne	Nos résultats	Résultats d'article
S11 à 60 GHz (dB)	-4	-5
Direction du rayonnement à 60 GHz (degrés)	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$
Bande passante (GHz)	[55–65]	[55–65]

Selon le tableau 2.3, nous remarquons un petit écart entre nos résultats et ceux de l'article [29] et parfois nos résultats sont médiocres par rapport à ceux de l'article. Cela peut être dû au fait que certains paramètres sont manquants, à savoir la position de l'alimentation et le diamètre externe du câble d'alimentation coaxial.

2.6. Conclusion

Ce chapitre présente la conception et la vérification expérimentale associée d'une nouvelle antenne à faisceau commuté simple basée sur un commutateur SPDT distribué utilisant une transition microbande-ligne à fentes et des diodes PIN, qui a été intégrées à des radiateurs à fentes coniques linéaires. Le faisceau principal de l'antenne peut être commuté entre deux directions différentes. L'antenne est peu coûteuse à fabriquer et de petite taille, elle peut donc être utilisée dans des nœuds de réseau 5G simples, notamment ceux qui fonctionneront dans les systèmes de l'Internet des objets. Au cours du processus de conception, nous avons démontré comment les diodes PIN disponible dans le commerce et caractérisées jusqu'à 50 GHz seulement peuvent être utilisées avec succès dans une antenne à faisceau commuté fonctionnant dans la gamme de fréquences 55-65 GHz.

Ensuite, nous avons réussi à valider cette antenne reconfigurable avec une alimentation coplanaire, par l'utilisation du logiciel de simulation CST ; en modifiant les modes de fonctionnement de la diode PIN. L'antenne fonctionne sur les bandes millimétriques. Les résultats obtenus sont proches de celui de l'article.

*CHAPITRE 3 : conception d'une antenne reconfigurable
en diagramme pour les applications 5G*

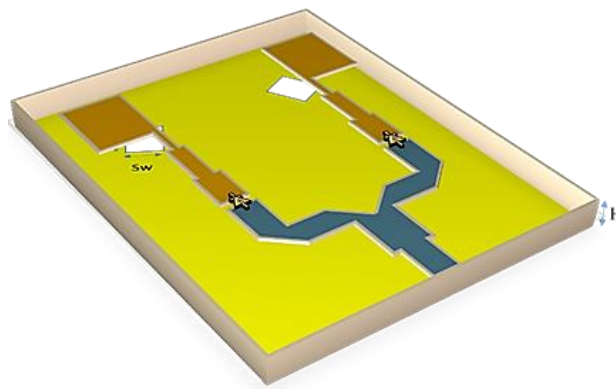
3.1. Introduction

La réduction d'énergie et l'augmentation de la couverture sont prioritaires dans les applications 5G. Pour conception, les antennes directionnelles doivent être intelligentes lors de la réception et l'émission. La reconfiguration du diagramme de rayonnement fait référence à ce filtrage spatial.

Le but de ce chapitre est de concevoir une antenne reconfigurable en diagramme à deux éléments rayonnant en utilisant des diodes PIN. Un réseau d'antenne patch carrée alimenté à base d'un diviseur de puissance sera abordé. L'antenne source rayonnante est une antenne qui rayonne de manière omnidirectionnelle autour du plan d'élévation. Deux diodes PIN commutables pourraient être intégrés dans un diviseur de puissance pour bloquer le rayonnement de l'antenne d'un côté et lui permettre de rayonner dans la direction souhaitée. L'antenne proposée sera validée avec le simulateur électromagnétique CST.

3.2. Structure de l'antenne

La configuration de l'antenne reconfigurable proposée est illustrée à la Fig. 3.1. Ses paramètres dimensionnels sont indiqués dans le tableau 3.1. La face supérieure de cette antenne illustre un réseau de deux antennes basées sur un patch conventionnel, excitées par un réseau d'alimentation ; la face inférieure présente un plan de masse à deux fentes gravées imprimées sur un substrat diélectrique de type Rogers RT 5880, avec une permittivité relative $\epsilon_r = 2,2$ et une perte tangente diélectrique $\tan \delta = 0,0009$ avec une épaisseur de H égale à 0,508 mm.



(a)

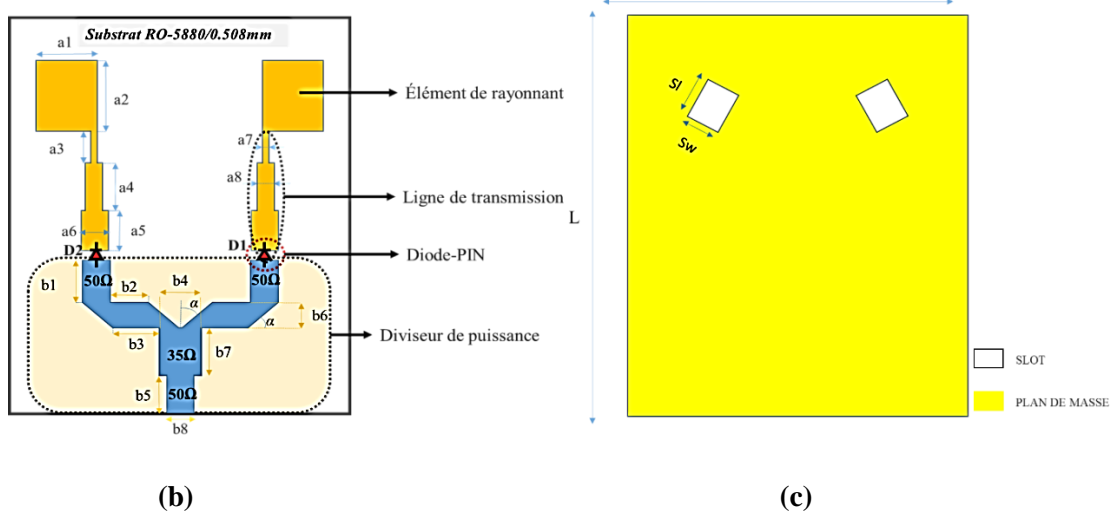


Figure. 3. 1.Géométrie de l'antenne proposée (a) vue en 3D (b) vue en dessus (c) vue en dessous.

Deux diodes PIN de type MA4AGFCP910 ont été intégrées dans le réseau d'alimentations pour assurer le contrôle de la distribution du courant surfacique sur l'antenne, afin de changer la direction du faisceau de l'antenne. Le diagramme de rayonnement peut être reconfiguré en changeant l'état de diode (ON : passante et OFF : bloquée).

Tableau. 3. 1.Dimensions de l'antenne.

Paramètres	Valeurs (mm)	Paramètres	Valeurs (mm)
a1	3.65	b1	2.60
a2	4.30	b2	2.24
a3	2.00	b3	2.59
a4	3.00	b4	2.50
a5	2.40	b5	2.50
a6	1.60	b6	1.60
a7	0.40	b7	2.92
a8	1.00	b8	1.60
W	20.00	L	24.62
S1	2.47	Sw	2.02
α	45°	H	0.508

3.3. Implémentation avec des switches réels

Les diodes PIN MA4AGFCP910 sont intégrées avec l'antenne proposée pour assurées la reconfigurabilité. La figure 3.2 montre les circuits équivalents de diode dans les états marche/arrêt [30] (ON : figure 3.2(a) ; OFF : figure 3.2(a)).

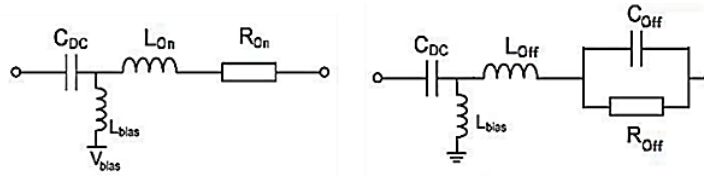


Figure. 3. 2.Circuits RLC équivalents de la diode p-i-n MA4AGFCP910. (a) polarisation directe. (b) polarisation inverse.

Sur la base de circuits équivalents pour l'état ON (cas de polarisation directe), une inductance $L_{On} = 0,01 \text{ nH}$, résistance $R_{On} = 5,2 \Omega$, condensateur DC $C_{DC} = 2 \text{ pF}$ Sont utilisés. Dans le cas de polarisation inverse une résistance de $R_{Off} = 5,2 \Omega$ en parallèle avec un condensateur de $C_{Off} = 0,02 \text{ pF}$, une inductance de $L_{Off} = 0,01 \text{ nH}$, et un condensateur DC de $C_{DC} = 2 \text{ pF}$ sont utilisés.

Dans la partie de simulation électromagnétique en utilisant la modélisation du paramètre S, par l'insertion de deux ports distincts à l'emplacement de chaque diode comme le montre la figure 3.3, plus un port d'excitation de l'antenne. Une fois cette étape terminée, il faut se rendre dans la partie schématique du CST pour mettre un circuit correspondant à l'état souhaité des diodes (ON ou OFF).

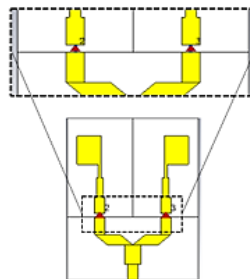


Figure. 3. 3.Emplacement des diodes.

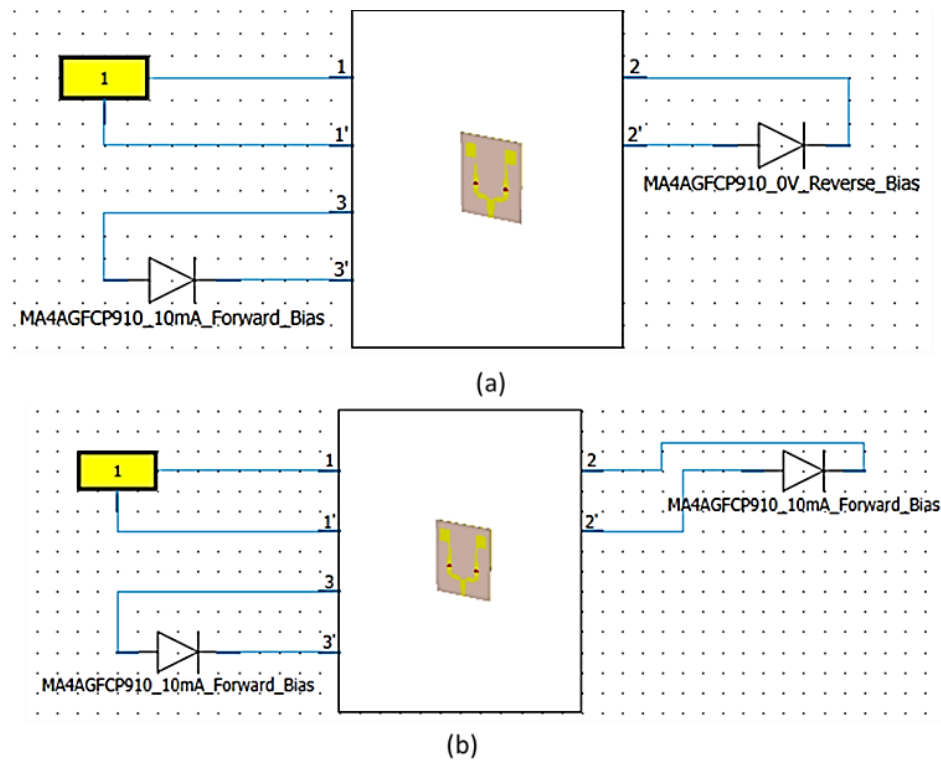


Figure. 3. 4.Simulation avec Schématique de CST (2 diodes PIN). (a) état On-Off. (b) état On-On.

3.4. Résultats de simulation

3.4.1. Coefficient de réflexion

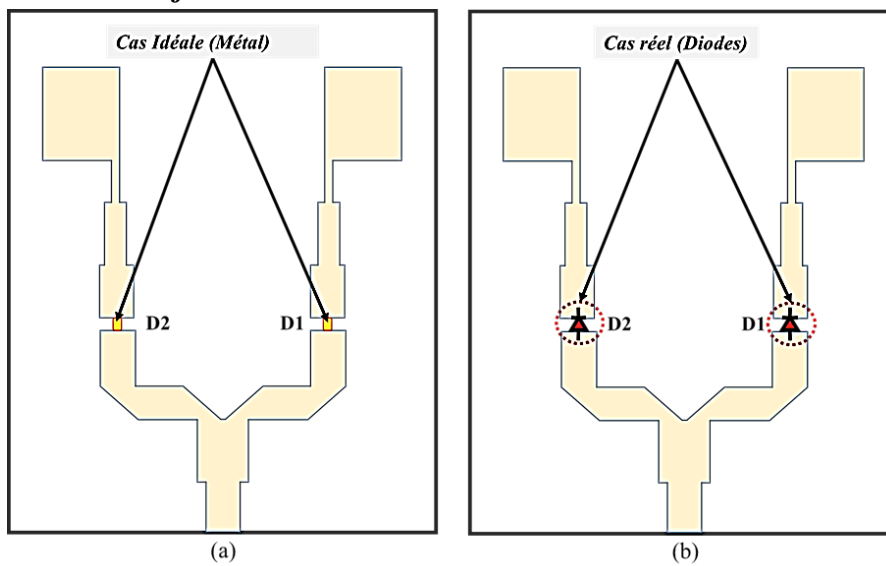


Figure. 3 . 5.Validation de l'antenne proposée. (a) cas idéale. (b) utilisation des diodes réels.

3.4.1.1. Cas idéal

La figure 3.6 montre le coefficient de réflexion de l'antenne proposée dans le cas idéal, pour l'utilisation des segments de cuivre. D'après cette figure dans le Cas N° 1, on remarque que l'antenne conçue résonne sur la bande passante à (-10dB) de 30.6–34 GHz, lorsque le métal N°1 (D1) et le métal N° 2 (D2) sont court-circuités (D1→ON, D2→ON). Pour le cas N° 2 lorsque le métal N°1 (D1) est court-circuité, et le métal N° 2 (D2) est supprimé (D1→ON, D2→OFF) la bande passante est entre 30–34.25 GHz.

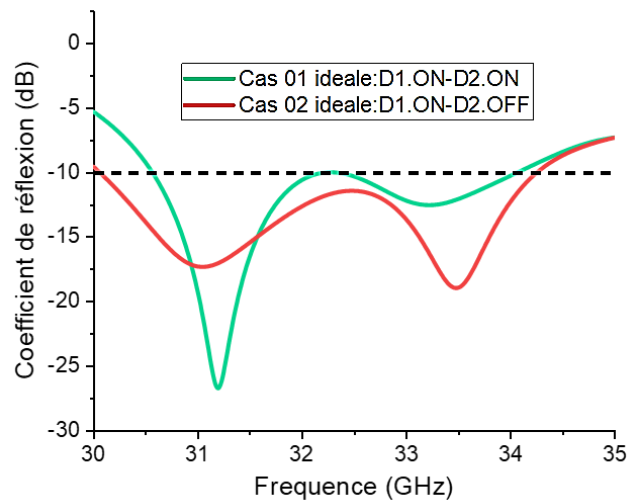


Figure. 3. 6.Coefficient de réflexion dans le cas idéale.

3.4.1.2. Cas des diodes réel (PIN MA4AGFCP910)

Le coefficient de réflexion de l'antenne proposée dans le cas réel est illustré dans la figure 3.7. D'après le graphe du Cas N° 1, on distingue que l'antenne fournit une bande passante entre 30.5–33.2 GHz, quand la diode N°1 (D1) et la diode N° 2 (D2) sont passantes (D1→ON, D2→ON). Pour le cas N° 2 lorsque la diode N°1 (D1) est passante, et la diode N° 2 (D2) est bloquée (D1→ON, D2→OFF) la bande passante est entre 30.5–34.6 GHz.

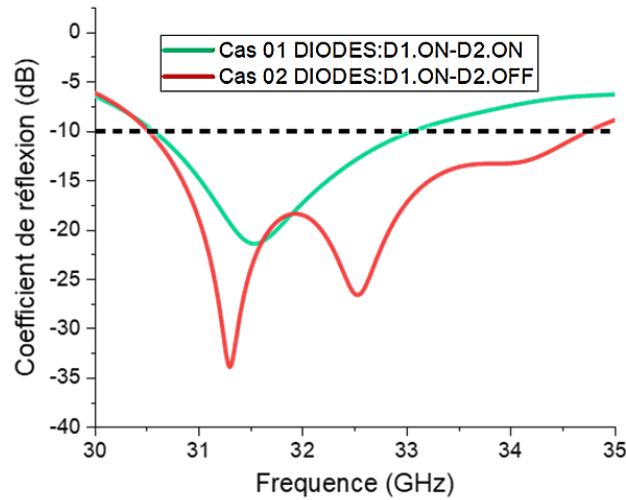


Figure. 3. 7.Coefficient de réflexion dans le cas réel.

3.4.1.3. Interprétation

Après les simulations effectuées, nous avons remarqué que la bande passante est conservée malgré le fait que nous ayons changé le type de reconfiguration (diode ou métal). Ce fait nous a amenés à réaliser la commutation de faisceau avec une bande de fréquence pratiquement constante.

3.4.2. Distribution de courant

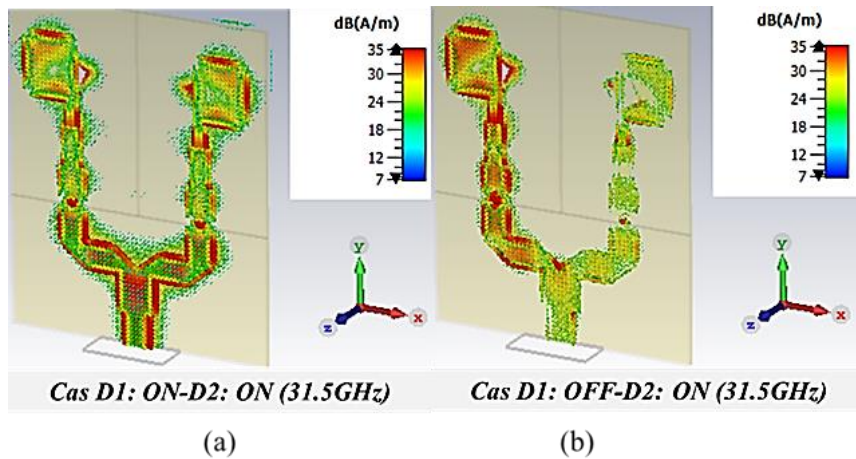


Figure. 3. 8.Répartition du courant à 31.5 GHz (a) D1 : ON-D2 : ON (b) D1 : ON-D2 : ON.

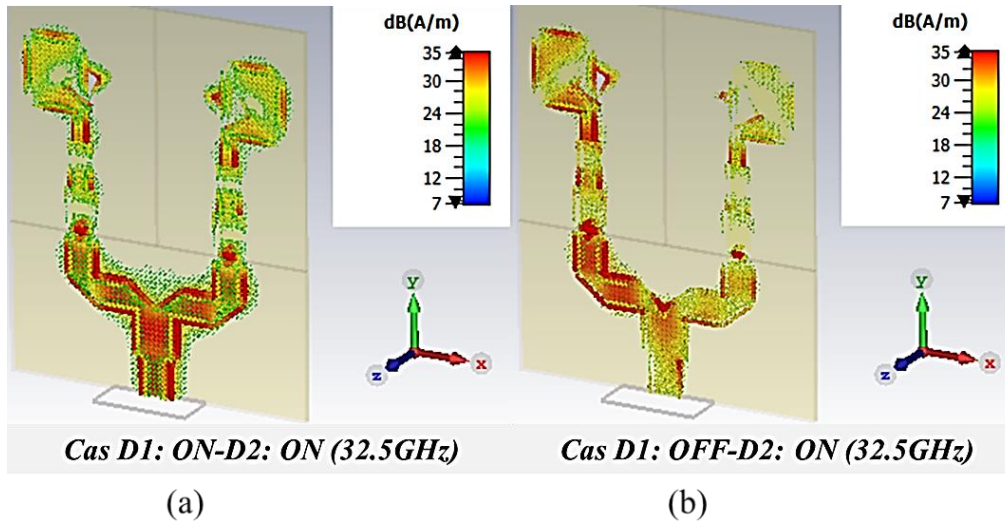


Figure. 3. 9. Répartition du courant à 32.5 GHz (a) D1 : ON-D2 : ON (b) D1 : ON-D2 : ON.

Afin de mieux comprendre l'effet des diodes, nous avons présenté la distribution du courant surfacique (Les figures 3.8 et 3.9) sur la structure de l'antenne pour deux fréquences 31.5 GHz et 32.5 GHz. Lorsque les diodes PIN sont à l'état ON, la distribution de courant se repartit d'une façon équivalente sur les frontières des patches pour les deux fréquences ; tel qu'illustré sur les figures 3.8(a) et 3.9(a). Cependant, les courants surfaciques sont concentrés dans la zone où l'un des diodes est mise à l'état ON et l'autre OFF afin de bloquer les ondes électromagnétiques.

3.4.3. Diagramme de rayonnement

Les Figures 3.9 et 3.10 illustrent le diagramme rayonnement dans le plan $\varphi = 0^\circ$ à la fréquence centrale 31.5 GHz et 32.5 GHz. Nous remarquons dans le cas de la fréquence 31.5 GHz que le diagramme rayonnement de l'antenne proposée, dans le cas de métal l'antenne rayonne vers 0° donc le diagramme de rayonnement n'est pas incliné vers la direction désiré, mais pour les diodes réels dans les fréquences 31.5 GHz l'antenne rayonne vers trois direction différent $\theta = \pm 22^\circ$ pour les cas de diode ON/OFF, et $\theta = 0^\circ$ pour les cas de diode ON/OFF avec des valeurs de gain 4 dBi, et 6 dBi. Pour la fréquence 32.5 GHz lorsque de utilise les diodes et pour les différents cas le niveau du gain est de 6 dBi avec une couverture a $\theta = \pm 24^\circ$ et $\theta = 0^\circ$ dans le plan $\varphi = 0^\circ$. Dans le cas de la métallisation à la fréquence 32.5 GHz, l'antenne rayonne vers trois direction différent $\theta = \pm 20^\circ$ et $\theta = 0^\circ$. Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme

appropriée, comme la montre les figures 3.10 et 3.11 puisque le rayonnement est concentré dans le plan supérieur de l'antenne. On remarque que le diagramme de rayonnement de l'antenne avec des diodes réelles est plus directif que l'antenne avec des métallisations.

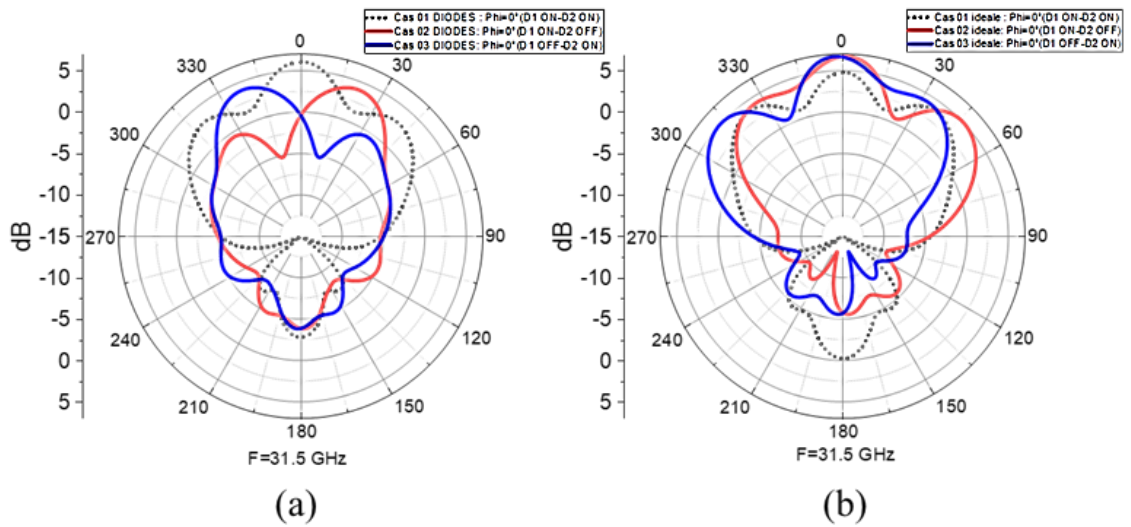


Figure. 3. 10. Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée (a) avec des diodes (b) avec idéales ($\phi=0^\circ$ à 31.5 GHz).

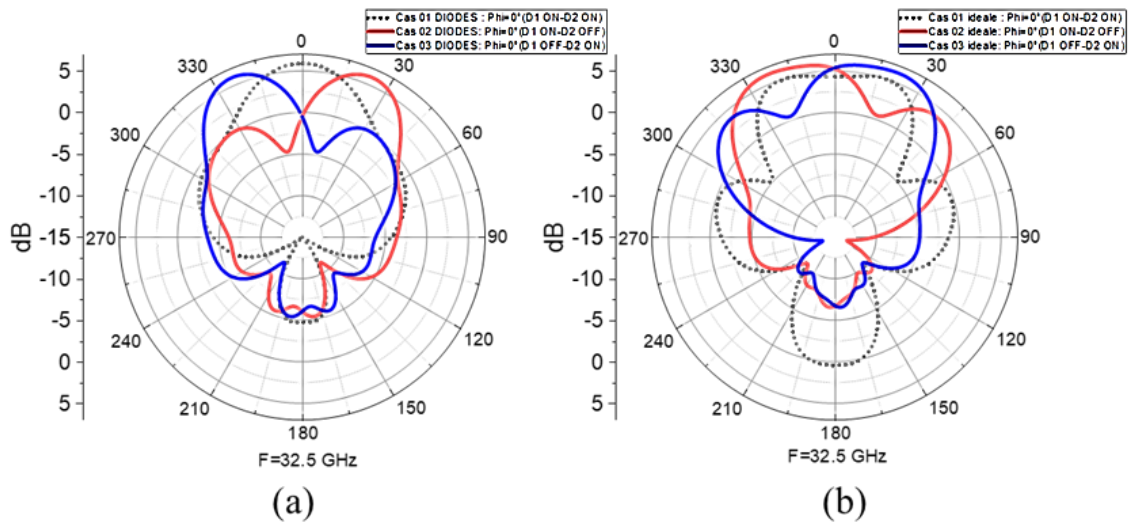


Figure. 3. 11. Diagramme de rayonnement de l'antenne proposée (a) avec des diodes réelles (b) avec idéale ($\phi=0^\circ$ à 32.5 GHz).

3.4.4. Gain

Les gains d'antenne simulés dans différents états à l'aide de diodes PIN et le métal sont présentés sur la figure 3.12. Les valeurs de gain simulé ont été prélevées à des bandes de fréquences de résonance de chaque mode. On peut observer que les réponses de gain changent avec la reconfigurabilité et elles présentent des valeurs différentes pour chaque mode. À partir de ces résultats, avec un maximum de 7.38 dBi au cas 1(idéal ON-ON), 8.12 dBi au cas 2(diode ON-ON), 7.78 dBi dans le cas 3 (idéal ON-OFF), et 5.58 dBi pour le dernier cas (diode ON-OFF). On peut remarquer que l'antenne proposée fournit des gains acceptables dans toute la bande d'exploitation

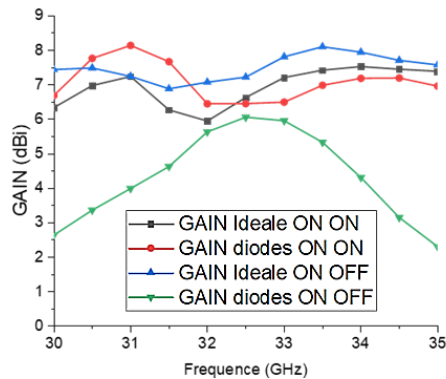


Figure. 3. 12.Représentation du gain en fonction de la fréquence pour les quatre cas.

Tableau. 3. 2.Comparaison entre les différentes cas de reconfigurabilité pour 31.5 GHz et 32.5 GHz.

Etats	31.5 GHz		32.5 GHz	
	Gain	Direction de rayonnement	Gain	Direction de rayonnement
ON-ON (diode)	6 dBi	0°	6 dBi	0°
ON-ON (idéal)	5 dBi	0°	5.01 dBi	0°
ON-OFF (diode)	4 dBi	±22°	6 dBi	±24°
ON-OFF (idéal)	6.7 dBi	0°	6.15 dBi	±22°

4. Conclusion

Dans ce chapitre, et pour les applications 5G nous avons présenté un réseau d'antenne reconfigurable en diagramme pour les ondes millimétriques basé sur les diodes PIN pour basculer entre différents modes de fonctionnement. Le rayonnement de l'antenne peuvent être contrôlés en changeant l'état des diodes PIN, ON ou OFF, qui est déployé dans cette antenne. La conception de cette antenne a été validée en utilisant le logiciel CST studio. La bande passante de cette antenne est de 30,5 à 35 GHz. Cette antenne offre de meilleures performances en termes de taux de commutation avec des faisceaux orientés vers $\pm 24^\circ$ et 0° , ainsi qu'un pic de gain atteignant 6 dBi. Enfin, l'antenne proposée est un bon candidat pour les systèmes à commutation de faisceaux dans les communications 5G.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette mémoire a présenté le travail réalisé sur les antennes reconfigurables en diagramme rayonnement. Le but était de concevoir et de réaliser des antennes reconfigurables à base des diodes PIN pour des applications 5G.

Dans le premier chapitre, nous avons décrit la technologie 5G dans des plages millimétriques, ses domaines d'application et ses besoins. Dans le même contexte, nous avons fourni une définition complète des antennes reconfigurables, en mentionnant les avantages et les inconvénients, en plus des types de reconfiguration, et nous avons également classé ces antennes.

Dans le deuxième chapitre, on a étudié et validé une antenne à commutation de faisceau simple basée sur les diodes PIN, qui sont combinées avec des radiateurs à fentes coniques. Le faisceau principal de l'antenne peut être commuté entre deux directions différentes. L'antenne est peu coûteuse à fabriquer et de petite taille, elle peut donc être utilisée dans de simples nœuds de réseau 5G, y compris ceux qui fonctionneront dans les systèmes IoT. Au cours du processus de validation, nous avons démontré comment intégrer les diodes PIN à l'aide du CST. Finalement, un bon accord entre les résultats de simulation de cet article et notre validation a été obtenues.

Enfin, dans chapitre III, nous avons conçu et simulé une nouvelle structure qui consiste d'un réseau d'antennes reconfigurable excitées à travers un réseau d'alimentation, en utilisant un diviseur de puissance à diodes PIN. Les résultats montrent que l'antenne reconfigurable proposée peut fonctionner dans les bandes d'ondes millimétriques Ka entre 30.5 et 35 GHz avec des diagrammes orientées vers $\pm 24^\circ$ et 0° pour les différents états de diode, ainsi qu'un pic de gain atteignant 6 dBi.

Des études futures peuvent être menées dans les domaines suivants. En raison des avantages de l'utilisation d'une antenne à faisceau reconfigurable dans le système de communication 5G, il est essentiel d'étudier différentes techniques d'orientation de faisceau et de les compléter par des études analytiques comprenant des simulations pour bien comprendre les pertes/gains attendus.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] NGOM, Assane. Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou " Small Cells" pour le standard 5G. 2019. PhD Thesis. Université Côte d'Azur (ComUE).

[2] CHORFI, Hamid. Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique. Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue (Canada), 2012.
[3].https://www.frandroid.com/telecom/488716_reseau-5g-tout-ce-qui-va-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante

[4]HU, Fei (ed.). Opportunities in 5G networks: A research and development perspective. CRC press, 2016.

[5] OSSEIRAN, Afif; MONSERRAT, Jose F.; MARSCH, Patrick (ed.). 5G mobile and wireless communications technology. Cambridge University Press, 2016.

[6] AGIWAL, Mamta; ROY, Abhishek; SAXENA, Navrati. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18.3: 1617-1655.

[7]LIU, Guangyi; JIANG, Dajie. 5G: Vision and requirements for mobile communication system towards year 2020. Chinese Journal of Engineering, 2016, 2016.2016: 8.

[8] ABU SAADA, Mohammed H. Design of Efficient Millimeter Wave Planar Antennas for 5G Communication Systems. 2017.

[9] Samsung within Innovation 5G, 2019

[10] CHRISTODOULOU, Christos G., et al. Reconfigurable antennas for wireless and space applications. Proceedings of the IEEE, 2012, 100.7: 2250-2261.

[11]. POZAR, David M. Microstrip antenna aperture-coupled to a microstripline. Electronics letters, 1985, 21: 49.

[12] <https://www.rapport-gratuit.com/etude-et-conception-des-antennes-reconfigurables/>

[13] CHRISTODOULOU, Christos G., et al. Reconfigurable antennas for wireless and space applications. Proceedings of the IEEE, 2012, 100.7: 2250-2261.

[14]<https://123dok.net/article/antennes-reconfigurables-en-diagramme-de-Rayonnement.qv1922vd>.

BIBLIOGRAPHIE

[15] ALI, Tanweer; PATHAN, Sameena; BIRADAR, Rajashekhar C. Multiband, frequency reconfigurable, and metamaterial antennas design techniques: Present and future research directions. *Internet Technology Letters*, 2018, 1.6: e19.

[16] JIN, Guiping, et al. Differential frequency-reconfigurable antenna based on dipoles for sub-6 GHz 5G and WLAN applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19.3: 472-476.

[17] IKRAM, Muhammad, et al. Integrated frequency-reconfigurable slot antenna and connected slot antenna array for 4G and 5G mobile handsets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67.12: 7225-7233.

[18] LIANG, Jing; YANG, HY David. Microstrip patch antennas on tunable electromagnetic band-gap substrates. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2009, 57.6: 1612-1617.

[19].<https://docplayer.fr/62832535-Conception-d-antenne-intelligente-reconfigurable-pour-la-radio-cognitive.html>

[20] SINGH, Rajesh Kumar; BASU, Ananjan; KOUL, Shibhan Kishen. A novel reconfigurable microstrip patch antenna with polarization agility in two switchable frequency bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66.10: 5608-5613.

[21]HSU, Shih-Hsun; CHANG, Kai. A novel reconfigurable microstrip antenna with switchable circular polarization. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2007, 6: 160-162.

[22] NACHOUANE, Hamza. Contribution à la conception et à la réalisation d'antennes reconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitive de la quatrième génération. 2017. PhD Thesis. Institut National des Postes et Télécommunications.

[23] TANG, Shiwen, et al. A Pattern-Reconfigurable Antenna for Single-RF 5G Millimeter-Wave Communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20.12: 2344-2348.

[24] YANG, Yi, et al. MEMS-loaded millimeter wave frequency reconfigurable quasi-Yagi dipole antenna. In: *Asia-Pacific Microwave Conference 2011*. IEEE, 2011. p. 1318-1321.

[25] DA COSTA, I. F., et al. Optically controlled reconfigurable antenna array for mm-wave applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2142-2145.

[26] PANAGAMUWA, Chinthana J.; CHAURAYA, Alford; VARDAXOGLU, J. C. Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54.2: 449-454.

BIBLIOGRAPHIE

[26] ROH, Wonil, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results. *IEEE communications magazine*, 2014, 52.2: 106-113.

[27] Zemam .Youssef, Foukia. Aimad Eddine, << Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs>>, Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid-telemcen ,2017

[28] EL BABA, Ibrahim. Contributions numériques en compatibilité électromagnétique impulsionnelle. Paradigme pour la caractérisation temporelle d'équipements. 2012. PhD Thesis. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.

[29]TRZEBIATOWSKI, Kamil, et al. Simple 60 GHz switched beam antenna for 5G millimeter-wave applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 20.1: 38-42.

[30] MALLAT, Nazih K., et al. A dual circularly reconfigurable polarization patch antenna for fifth generation mobile communication systems. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2020, 105: 73-84.