



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université de Mostaganem Abdelhamid Ibn Badis (UMAB)

كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie



N°d'ordre : M...../GE/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

FILIERE : TELECOMMUNICATIONS

Spécialité : Système des Télécommunication

Thème

**ANTENNES IMPRIMEES A POLARISATION CIRCULAIRE ALIMENTEES PAR
COUPLAGE PAR FENTE POUR DES APPLICATIONS 5G**

Présenté par :

YOUSOUFI MOSSI HAMZA

NDLOVU GIFT

Soutenu le 04 /07/ 2022 devant le jury composé de :

Président :	M. Said MESKINE	Professeur	UMAB
Examineur :	M. ABED Mansour	MCA	UMAB
Rapporteur :	Ahmed AHMADOUCHE	MCA	UMAB

Année Universitaire : 2021/ 2022

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier « **DIEU** » le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience pour terminer ce modeste travail.

Nous remercions, ensuite, M. AHMADOUCHE Ahmed, notre encadrant qui a dirigé ce travail et qui a cru en nous dès le départ pour la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nos remerciements vont également à tous les membres de nos familles respectives qui n'ont cessé de nous aider et de nous encourager. Nous tenons à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

A la mémoire de mon très cher père **Youssoufi Mossi**.

A ma mère, pour tous ces sacrifices, son amour, sa tendresse, son soutien et ces prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs (Slamatou, Aïchatou, Halimatou, mariama, hadjara, amina et feu ramatoulaye dit bouli), pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères (Boubacar, djafar, Nouhou, Abdoulaye), pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mes ami(e)s (Gift, Fabrice, Mohamed, aboubacar, Zaoui, Kader,)

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Youssoufi Mossi Hamza

Dédicace

C'est avec une sincère gratitude et une chaleureuse considération que je dédie ce travail :

A mes parents qui m'ont élevé et n'ont jamais cessé de me soutenir.

A Richard et Shirley qui m'ont montré la valeur du travail acharné.

A mon frère et mes sœurs qui sont très spéciaux.

A mon associé Hamza avec qui nous avons travaillé sans relâche pour faire de ce mémoire une réalité.

A mes amis Leon, Hamza, Takudzwa, Kelvin, Ezekiel, Jubilee, Blessing, Tanaka, Nicholus et la famille Mostaganem

A ma chère amie Naima Boukhiar qui a toujours cru en moi depuis le jour où je l'ai rencontrée

Je vous remercie tous de faire partie de ma vie. QUE DIEU VOUS BÉNISSE TOUS .

GIFT NDLOVU

Résumé

L'objectif de ce mémoire est l'étude et la conception d'une antenne patch à double polarisation circulaire alimentée par couplage par fente en croix, offrant une large bande passante pour des applications 5G.

La caractérisation des antennes imprimées étudiées à travers la détermination de leurs paramètres hyperfréquences (fréquence de résonance, bande passante, diagramme de rayonnement, gain, rapport axial etc..) est réalisée à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique CST. Une comparaison est d'abord faite entre une antenne alimentée de façon classique par une ligne micro-ruban et une antenne patch alimentée par couplage par fente. Une bande passante plus large est observée dans le cas de couplage par fente. Ensuite une antenne à double polarisation circulaire, alimentée par fente, fonctionnant à 3,5 GHz est étudiée. Les résultats de simulation numérique obtenus, concernant le coefficient de réflexion et le coefficient d'isolation, confirment les prévisions de l'analyse théorique préliminaire faite. Une réalisation pratique d'une antenne à double polarisation circulaire alimentée par fente, fonctionnant à 2,1 GHz, est présentée. Les résultats de test obtenus sont en bon accord avec ceux de la simulation.

Mots clés : 5G, MIMO Massif, Antennes imprimées, Polarisation circulaire, CST

Abstract

The objective of this thesis is the study and design of a dual circular polarization patch antenna fed by cross-slot coupling, offering a large bandwidth for 5G applications.

The characterization of the printed antennas studied through the determination of their microwave parameters (resonant frequency, bandwidth, radiation pattern, gain, axial ratio, etc.) is carried out using the electromagnetic simulation software CST. A comparison is first made between an antenna fed in the conventional way by a micro-strip line and a patch antenna fed by slot coupling. A wider bandwidth is observed in the case of slot coupling. Next, a slot-fed dual circular polarization antenna operating at 3.5 GHz is studied. The numerical simulation results obtained, concerning the reflection coefficient and the insulation coefficient, confirm the predictions of the preliminary theoretical analysis made. A practical realization of a slot-fed dual circular polarization antenna, operating at 2.1 GHz, is presented. The test results obtained are in good agreement with those of the simulation.

Keywords : 5G, Massive MIMO, Printed Antennas, Circular Polarization, CST.

Table des Matières

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Dédicace.....	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Table des Matières	vi
Liste des figures.....	viii
Liste des abréviations	ix
Introduction Générale.....	1
Chapitre I Aperçu général sur la 5G	4
I.1 Architecture du réseau 5G [2].....	5
I.1.1 Le projet de partenariat de 3e génération(3GPP)	6
I.1.2 Spectre et fréquences 5G.....	6
I.1.3 Multi-Access Edge Computing	7
I.1.4 virtualisation des fonctions réseau et 5G	7
I.1.5 Architecture 5G RAN	8
I.1.6 Enhanced Common Public Radio Interference	8
I.1.7 Tranchage du réseau.....	9
I.1.8 Mimo massif.....	9
I.1.9 Formation de faisceaux.....	10
I.1.10 Cœur de la 5G.....	11
I.1.11 Options d'architecture 5G	11
I.2 Principe de fonctionnement de la 5G	12
I.2.1 Communications ultra-fiables à faible latence (URLLC).....	13
I.2.2 Communications massives de type machine (mMTC)	14
I.2.3 Vitesse et latence	14
I.2.4 5G et intelligence artificielle [4]	15
I.2.5 Les avantages de la 5G[5]	16
I.2.6 Les inconvénients de la 5G[5]	17
I.3 Conclusion.....	18
Chapitre II Antennes imprimées	19
II.1 L'antenne patch micro-ruban	20
II.2 Mécanisme de rayonnement	21
II.2.1 Modèle de la cavité.....	21
II.2.2 Rayonnement à grande distance	22
II.2.3 Modèle de la ligne de transmission.....	24
II.2.4 Impédance d'entrée	25
II.2.5 Adaptation d'impédance	26
II.3 Techniques d'excitation d'une antenne patch micro-ruban	26
II.3.1 Alimentation par câble coaxiale	26
II.3.2 Alimentation par ligne micro-ruban.....	27
II.3.3 Alimentation par couplage par fente	28
II.4 Polarisation d'une antenne.....	30
II.5 Dimensionnement et résultat de simulation d'une antenne patch à 3.5GHz	31
II.5.1 Alimentation par ligne micro-ruban.....	31
II.5.1.1 Calcul de la largeur W et de la longueur L du patch.....	31
II.5.1.2 La position x du point d'excitation du patch pour avoir l'adaptation à 50Ω	32
II.5.1.3 Calcul de la largeur Wl de la ligne micro-ruban 50 Ω.....	32
II.5.2 Alimentation par couplage par fente	32
II.5.3 Comparaison des résultats	33

II.6	Conclusion	33
<i>Chapitre III Conception et simulation d'une antenne à double polarisation circulaire pour des applications</i>		
5G	34
III.1	Conception d'une antenne à double polarisation circulaire fonctionnant à 3,5 GHz	35
III.2	Calcul des dimensions de l'antenne patch	35
III.2.1	Ligne d'alimentation 50 ohm.....	35
III.2.2	Patch.....	36
III.2.2.1	Sa largeur W.....	36
III.2.2.2	Sa longueur L.....	36
III.2.3	Fente.....	37
III.3	Résultats et discussions.....	37
III.3.1	Etude paramétrique de l'antenne	37
III.3.2	Influence de L sur le fonctionnement de l'antenne	37
III.3.3	Influence de L_F sur le fonctionnement de l'antenne	38
III.3.4	Caractéristique de l'antenne étudiée	39
III.3.4.1	Coefficients de réflexion et d'isolation	39
III.3.4.2	Etudes des courants du surface	40
III.3.5	Caractéristiques de la polarisation circulaires	41
III.3.5.1	Diagramme de rayonnement.....	42
III.4	Conception d'une antenne fonctionnant à 2.1GHz	43
III.5	Réalisation pratique.....	45
III.6	Conclusion	47
Conclusion Générale		48
Bibliographie.....		49

Liste des figures

Figure I-1 : schéma de l'architecture du réseau 5G	6
Figure I-2 : Fonctionnement de la technologie MIMO	10
Figure I-3 :Formation de faisceaux.....	10
Figure I-4 : option d'architecture	12
Figure I-5 : vitesse et latence	14
Figure II-1 : Configuration d'une antenne miro-ruban.....	21
Figure II-2 : Modèle de la cavité.....	21
Figure II-3 : Représentation du champ E en mode dominant TM ₁₀₀	22
Figure II-4 : rayonnement d'une antenne patch.....	23
Figure II-5 Représentation des ouvertures dans le repère cartésien.....	24
Figure II-6 : Schéma électrique du patch	25
Figure II-7 : Excitation du patch	26
Figure II-8 : Alimentation par câble coaxiale d'une antenne patch.....	27
Figure II-9 : Alimentation par ligne micro-ruban d'une antenne patch	27
Figure II-10 : schéma d'une antenne patch à couplage par fente	28
Figure II-11 : ellipse de polarisation	30
Figure II-12 : Alimentation par ligne micro-ruban.....	32
Figure II-13 : Alimentation par couplage par fente	33
Figure III-1 :Configuration d'une Antenne à double polarisation circulaire alimentée par couplage par fente en croix	37
Figure III-2 :influences de L sur le fonctionnement de l'antenne.....	38
Figure III-3 :influence de LF sur le fonctionnement de l'antenne.....	39
Figure III-4 :coefficients de réflexion(a), coefficient d'isolation entre deux ports(b)	40
Figure III-5 : Etude du courant de surface.....	41
Figure III-6 : Rapport axial et gain en fonction de la fréquence	41
Figure III-7 : Diagramme de rayonnement.....	42
Figure III-8 : Diagramme de rayonnement en 3D.....	42
Figure III-9 :-coefficient de réflexion(a),-coefficient d'isolation(b) , -Diagramme de rayonnement (c) , -rapport axial(d).....	44
Figure III-10 :(a) ligne d'alimentation, (b)patch, (c)fente en croix, (d)banc de mesure.	45
Figure III-11 : coefficient de réflexion mesuré.....	46
Figure III-12 :coefficient d'isolation mesuré.....	46

Liste des abréviations

3GPP	Le projet de partenariat de 3eme génération
4G	4eme Génération de Téléphonie Mobile
5G	5eme génération de Téléphonie Mobile
5GC	5eme génération core
AF	Application Function
AMF	Access and Mobility management
BS	staion de base
DN	Data Network
ECPRi	L'interface radio publique commune évoluée
EPC	Evolved Packet Core
IA	Intelligence Artificielle
IBM	International busness machine
IOT	Internet Of Things
LTE	Long Term Evolution
MEC	Multiple-Access Edge computing
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	massive Machine Type Communication
NFV	Virtualisation des fonctions réseau
NR	New Radio
NSSF	Network slice section function
OFDM	Orthogonal frequency division Multiplex
O-RAN	Open Radio Acces Network
RAN	Radio Acces Network
RF	Radio fréquence
SBA	Service-Based Architecture
TM	Transverse Electromagnetique
UE	User Equipment
UHF	Ultra Haute Fréquence
UIT	Union international des télécommunications
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
Arcep	Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse
Anse	Agence nationale de securité Sanitaire de l'alimentation

Introduction Générale

La nouvelle génération de télécommunication mobile connue sous l'acronyme de cinquième génération (5G) est une technologie évolutive qui prend en charge de nouvelles fonctionnalités et vise à augmenter la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Face à ces objectifs, la cinquième génération devra combiner plusieurs technologies afin d'avoir un réseau mobile qui pourra satisfaire les différentes exigences. Ce domaine a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les préoccupations de ce domaine, on trouve les antennes. Ce sont des éléments obligatoires pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. Elles sont présentes dans tous les systèmes de communication sans fil. Pour répondre aux besoins actuels du domaine des télécommunications, les concepteurs en hyperfréquences sont amenés à élaborer des dispositifs à base des antennes planaires. Ces antennes présentent des caractéristiques très avantageuses, surtout dans le cas où elles doivent opérer dans des fréquences élevées.

La transmission des données à haut débit, liée à la demande toujours croissante des dispositifs mobiles, a généré un grand intérêt pour les antennes microbandes et qui sont probablement les antennes les plus utilisées dans les conceptions commerciales compactes. Les principaux avantages de ces antennes sont : - faibles poids, volume, épaisseur et coût, - simplicité de fabrication, - possibilité de mise en réseau, - intégration d'éléments discrets et conformabilité facilitant l'implantation sur tout type de support.

Dans le cadre de ce travail de mémoire, nous proposons de concevoir une antenne à double polarisation circulaire dédiée aux applications de cinquième génération à la fréquence de 3.5GHz et 2.1GHz pour la réalisation pratique par manque de matériels. Nous nous sommes limités à ces fréquences car plus la fréquence de résonance est grande plus les dimensions de l'antenne sont petites ce qui nous complique la réalisation.

Pour la bande de fréquences des 3,5 GHz (3 - 4 GHz) est celle qui sera utilisée en priorité pour le réseau mobile 5G. C'est la bande cœur de la 5G. Sur les 1GHz de largeur de spectre, 910 MHz étaient disponibles pour la 5G et ils ont été attribués en exclusivité à la 5G. Cela devrait malgré tout suffire aux opérateurs pour proposer à leurs abonnés une bonne qualité de services en 5G.

De toutes les fréquences qui seront utilisées par la 5G, la bande des 3,5 GHz est celle qui offre le meilleur compromis. Tout d'abord, elle offre une largeur de bande suffisante. C'est pourquoi la 5G, dans un premier temps, va apporter de l'oxygène au réseau et empêcher les effets de saturation. En outre, cette bande de fréquences permet d'avoir les meilleurs débits en 5G tout en ayant une bonne longueur d'ondes, ce qui permet aussi à la 5G de répondre aux enjeux de couverture mobile. Les fréquences 3,5 GHz ont une portée moyenne de 400 mètres en zone urbaine et 1,2 km en zone rurale.

La bande de fréquences des 2,1 GHz est aussi une vieille connaissance. Elle a en effet été attribuée pour la première fois en 2001 afin que les opérateurs puissent déployer la 3G. En 2017, l'Arcep a ensuite modifié les autorisations d'utilisation de ces fréquences afin que les opérateurs puissent y déployer la 4G. Si les opérateurs ont encore du spectre disponible dans cette bande de fréquences, ou qu'ils en libèrent, ils pourront également faire de la 5G dans la bande des 2,1 GHz.

Comme la bande des 3,5 GHz, la bande des 2,1 GHz représente un très bon compromis entre vitesse, couverture et pénétration à l'intérieur des bâtiments. Bref, elle présente beaucoup d'avantages, avec malgré tous des débits moindres.

On utilisera une antenne à double polarisation circulaire gauche et droite et comportera deux accès distincts selon le type de polarisation choisie. Elle sera constituée de trois niveaux de métallisation et de deux substrats. L'élément rayonnant et la ligne d'alimentation seront séparés par un plan de masse où une fente de couplage électromagnétique sera gravée de façon à assurer l'alimentation de l'antenne.

Ce mémoire comporte trois chapitres. Dans le premier chapitre nous ferons un aperçu sur la 5G et son architecture. Ensuite nous présenterons le principe de fonctionnement ainsi que les avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons les antennes imprimées, leurs mécanismes de rayonnement, ainsi que les différentes techniques d'excitation les plus utilisées et enfin un dimensionnement suivi d'une comparaison entre l'alimentation par ligne micro-ruban et par couplage par fente.

Nous présenterons dans le troisième chapitre la conception et les résultats d'une antenne à double polarisation circulaire alimentée par couplage par fente en croix fonctionnant dans la bande de 3.5Ghz suivi d'une étude paramétrique et une caractérisation de la polarisation circulaire. Puis nous allons faire une simulation suivie d'une réalisation

pratique à 2.1 GHz et d'une comparaison entre les caractéristiques de l'antenne simulée et réalisée.

Chapitre I
Aperçu général sur la 5G

I Introduction

La technologie 5G a vu le jour en 2019 quand les entreprises de téléphonie mobile ont commencé à la déployer. Elle succède à la quatrième génération, appelée 4G, en proposant des débits plus importants et une latence fortement réduite, tout en évitant le risque de saturation des réseaux lié à l'augmentation des usages numériques (smartphones, tablettes, objets connectés). Son déploiement fait l'objet de contestations concernant en particulier l'effet sanitaire des ondes électromagnétiques et l'impact environnemental de cette technologie. Les réseaux 5G devraient compter plus de 1,7 milliard d'abonnés dans le monde d'ici 2025.[1]

I.1 Architecture du réseau 5G [2]

Le réseau cellulaire fournit une connectivité sans fil aux appareils en déplacement. Ces appareils, appelés User Equipment (UE), correspondaient traditionnellement aux smartphones et aux tablettes, mais comprendront de plus en plus les voitures, les drones, les machines industrielles et agricoles, les robots, les appareils électroménagers, les dispositifs médicaux, etc.

La 5G utilise une architecture plus intelligente, les réseaux d'accès radio (RAN) n'étant plus limités par la proximité des stations de base ou une infrastructure complexe. La 5G ouvre la voie vers un RAN désagrégé, flexible et virtuel avec de nouvelles interfaces créant des points d'accès aux données supplémentaires.

Les multiples options de connectivité dans l'architecture 3GPP pour la 5G ont créé diverses alternatives de déploiement pour un opérateur. Par exemple, un équipement utilisateur (UE) peut se connecter au réseau à l'aide de l'accès LTE et/ou de l'accès 5G New Radio (NR) qui se connecte au noyau de paquets évolué (EPC) ou au réseau 5G Core (5GC). La terminologie de l'option provient de la phase d'étude 5G de la version 3GPP 15, bien qu'elle ne soit pas explicitement utilisée dans les spécifications 3GPP.

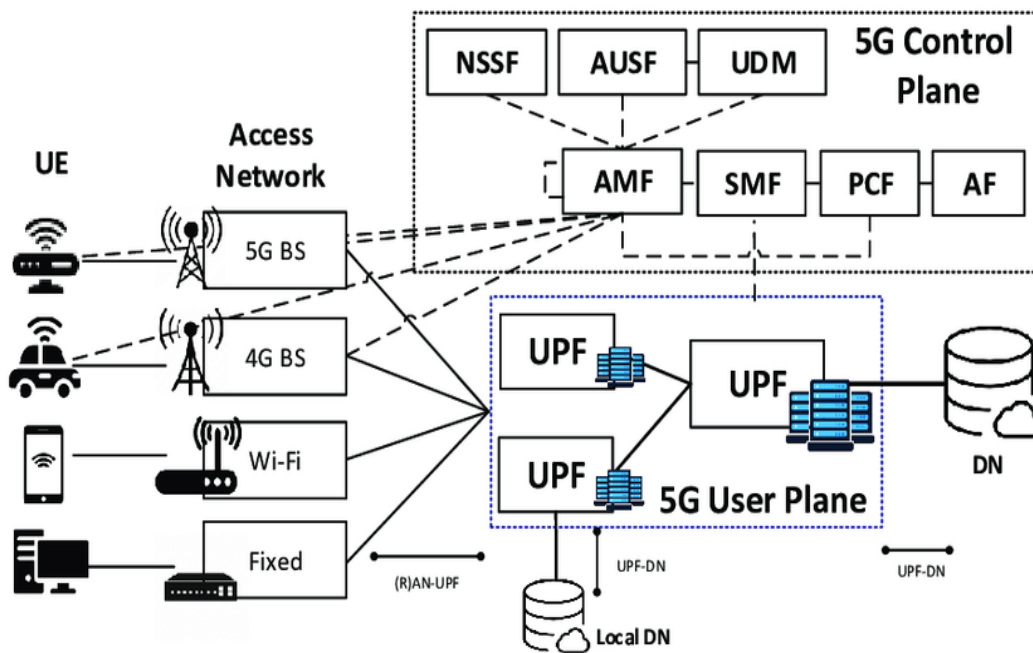


Figure I-1 : schéma de l'architecture du réseau 5G

I.1.1 Le projet de partenariat de 3e génération(3GPP)

Le projet de partenariat de 3e génération (3GPP) porte sur les technologies de télécommunications telles que les réseaux d'accès radio (RAN), les réseaux de transport centraux et les capacités de service. Le 3GPP a publié des spécifications système complètes pour l'architecture de réseau 5G, qui est nettement plus axée sur les services que les générations précédentes. Les services 3GPP sont mis à la disposition des fonctions réseau qui sont autorisées à les utiliser via une architecture standard. Les autres préoccupations de conception pour une architecture de réseau 5G décrites par les spécifications 3GPP incluent la modularité, la réutilisabilité et l'autonomie des services réseau.

I.1.2 Spectre et fréquences 5G

Plusieurs gammes de fréquences sont désormais dédiées à la nouvelle radio 5G (NR). La partie du spectre radio avec des fréquences comprises entre 30 GHz et 300 GHz est connue sous le nom d'onde millimétrique, car les longueurs d'onde vont de 1 à 10 mm. Des fréquences comprises entre 24 GHz et 100 GHz sont désormais attribuées à la 5G dans plusieurs régions du monde.

En plus de l'onde millimétrique, les fréquences UHF sous-utilisées entre 300 MHz et 3 GHz sont également réaffectées à la 5G. La diversité des fréquences employées peut être adaptée aux applications uniques étant donné que les fréquences plus élevées sont caractérisées par une bande passante plus élevée, bien qu'une portée plus courte. Les fréquences des ondes millimétriques sont idéales pour les zones densément peuplées, mais inefficaces pour les communications longue distance. Au sein de ces bandes de fréquences hautes et basses dédiées à la 5G, chaque opérateur a commencé à se tailler ses propres portions individuelles discrètes du spectre 5G.

I.1.3 Multi-Access Edge Computing

Le Multi-Access Edge Computing (MEC) est un élément important de l'architecture 5G. MEC est une évolution du cloud computing qui amène les applications des centres de données centralisés à la périphérie du réseau, et donc plus proches des utilisateurs finaux et de leurs appareils. Cela crée essentiellement un raccourci dans la livraison de contenu entre l'utilisateur et l'hôte, et le long chemin réseau qui les séparait autrefois.

Cette technologie n'est pas exclusive à la 5G mais fait certainement partie intégrante de son efficacité. Les caractéristiques du MEC incluent la faible latence, la bande passante élevée et l'accès en temps réel aux informations RAN qui distinguent l'architecture 5G de ses prédécesseurs. Cette convergence du RAN et des réseaux centraux obligera les opérateurs à tirer parti de nouvelles approches de test et de validation du réseau.

Les réseaux 5G basés sur les spécifications 3GPP 5G constituent un environnement idéal pour le déploiement MEC. Les spécifications 5G définissent les catalyseurs de l'informatique de pointe, permettant à MEC et à la 5G d'acheminer le trafic en collaboration. Outre les avantages de la latence et de la bande passante de l'architecture MEC, la répartition de la puissance de calcul permettra de mieux gérer le volume élevé d'appareils connectés inhérent au déploiement de la 5G et à l'essor de l'Internet des objets (IoT).

I.1.4 Virtualisation des fonctions réseau et 5G

La virtualisation des fonctions réseau (NFV) dissocie le logiciel du matériel en remplaçant diverses fonctions réseau telles que le pare-feu, les équilibreurs de charge et les routeurs par des instances virtualisées fonctionnant en tant que logiciel. Cela élimine le besoin d'investir dans de nombreux éléments matériels coûteux et peut également accélérer

les temps d'installation, fournissant ainsi des services générateurs de revenus au client plus rapidement.

NFV active l'infrastructure 5G en virtualisant les Appliance au sein du réseau 5G. Cela inclut la technologie de découpage du réseau qui permet à plusieurs réseaux virtuels de fonctionner simultanément. La NFV peut relever d'autres défis liés à la 5G grâce à des ressources informatiques, de stockage et de réseau virtualisées personnalisées en fonction des applications et des segments de clientèle.

I.1.5 Architecture 5G RAN

Le concept de NFV s'étend au RAN à travers, par exemple, la désagrégation du réseau promue par des alliances telles que O-RAN. Cela permet de la flexibilité et crée de nouvelles opportunités de concurrence, fournit des interfaces ouvertes et un développement open source, pour finalement faciliter le déploiement de nouvelles fonctionnalités et technologies à grande échelle. L'objectif d'O-RAN ALLIANCE est de permettre un déploiement multifournisseur avec du matériel standard dans le but d'une interopérabilité plus facile et plus rapide. La désagrégation du réseau permet également aux composants du réseau d'être virtualisés, offrant un moyen d'évoluer et d'améliorer l'expérience utilisateur à mesure que la capacité augmente. Les avantages de la virtualisation des composants du RAN offrent un moyen d'être plus rentable d'un point de vue matériel et logiciel, en particulier pour les applications IoT où le nombre d'appareils se compte en millions.

I.1.6 Enhanced Common Public Radio Interference

La désagrégation du réseau avec la séparation fonctionnelle apporte également d'autres avantages en termes de coûts, en particulier avec l'introduction de nouvelles interfaces telles qu'eCPRI. Les interfaces RF ne sont pas louables lors du test d'un grand nombre de porteuses 5G, car les coûts RF augmentent rapidement. L'introduction des interfaces eCPRI présente une solution plus louable car moins d'interfaces peuvent être utilisées pour tester plusieurs opérateurs 5G. eCPRI vise à être une interface normalisée pour la 5G utilisée par exemple dans l'interface de transport frontale O-RAN telle que le DU. CPRI, contrairement à eCPRI, a été développé pour la 4G, mais dans de nombreux cas, il était spécifique au fournisseur, ce qui le rendait problématique pour les opérateurs.

I.1.7 Tranchage du réseau

Cette technologie ajoute une dimension supplémentaire au domaine NFV en permettant à plusieurs réseaux logiques de s'exécuter simultanément sur une infrastructure de réseau physique partagée. Cela devient partie intégrante de l'architecture 5G en créant des réseaux virtuels de bout en bout qui incluent à la fois des fonctions de mise en réseau et de stockage.

Les opérateurs peuvent gérer efficacement divers cas d'utilisation de la 5G avec des exigences de débit, de latence et de disponibilité différentes en partitionnant les ressources réseau entre plusieurs utilisateurs ou « locataires ».

Le découpage du réseau devient extrêmement utile pour des applications telles que l'IoT où le nombre d'utilisateurs peut être extrêmement élevé, mais la demande globale de bande passante est faible. Chaque vertical 5G aura ses propres exigences, de sorte que le découpage du réseau devient une considération de conception importante pour l'architecture du réseau 5G. Les coûts, la gestion des ressources et la flexibilité des configurations réseau peuvent tous être optimisés avec ce niveau de personnalisation désormais possible. De plus, le découpage du réseau permet des essais accélérés pour de nouveaux services 5G potentiels et une mise sur le marché plus rapide.[2]

I.1.8 MIMO massif

C'est une technologie émergente pour les nouveaux systèmes de communication et de l'internet des objets, basée sur l'usage de centaines d'antennes interférant entre elles. C'est une des techniques candidates pour la 5G et pour succéder à la 4G LTE. Parmi les évolutions, on peut citer une connectivité élevée et des équipements à faible coût pour s'adapter à la croissance du nombre de périphériques, une meilleure fiabilité des communications, une latence réduite, des débits plus élevés.[3]

Avec cette technologie chaque antenne est une antenne intelligente (réseau d'antenne) dont le balayage est contrôlé numériquement.

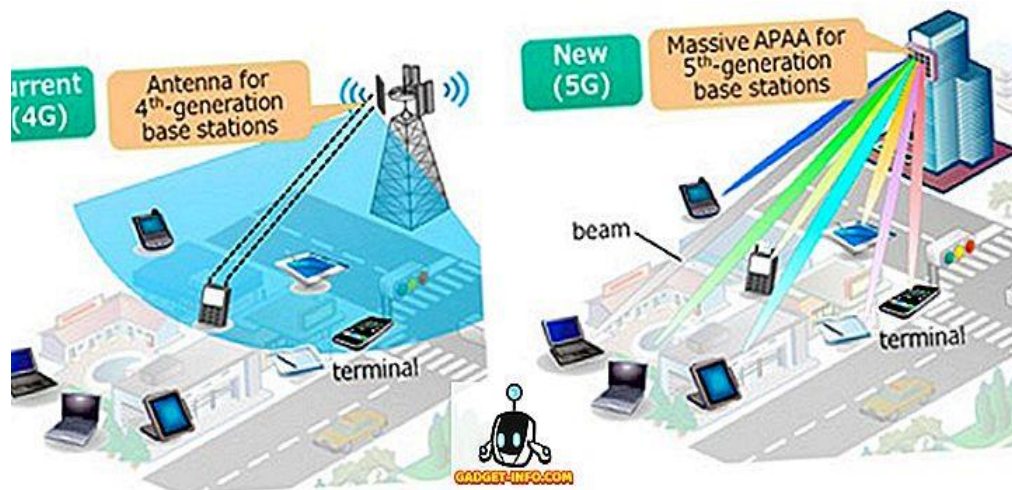


Figure I-2 : Fonctionnement de la technologie MIMO

I.1.9 Formation de faisceaux

Une autre technologie révolutionnaire qui fait partie intégrante du succès de la 5G est la formation de faisceaux. Les stations de base conventionnelles ont transmis des signaux dans plusieurs directions sans tenir compte de la position des utilisateurs ou des appareils ciblés. Grâce à l'utilisation de réseaux à entrées multiples et à sorties multiples (MIMO) comprenant des dizaines de petites antennes combinées en une seule formation, des algorithmes de traitement du signal peuvent être utilisés pour déterminer le chemin de transmission le plus efficace vers chaque utilisateur tandis que des paquets individuels peuvent être envoyés en plusieurs directions ensuite chorégraphiés pour atteindre l'utilisateur final dans une séquence prédéterminée.



Figure I-3: Formation de faisceaux

Avec la transmission de données 5G occupant l'onde millimétrique, la perte de propagation en espace libre, proportionnelle à la taille réduite de l'antenne, et la perte de diffraction, inhérente aux fréquences plus élevées et au manque de pénétration dans les murs, sont nettement plus importantes. D'autre part, la plus petite taille d'antenne permet également à des réseaux beaucoup plus grands d'occuper le même espace physique. Avec chacune de ces antennes plus petites réattribuant potentiellement la direction du faisceau plusieurs fois par milliseconde, la formation massive de faisceaux pour prendre en charge les défis de la bande passante 5G devient plus faisable. Avec une plus grande densité d'antennes dans le même espace physique, des faisceaux plus étroits peuvent être obtenus avec un MIMO massif, offrant ainsi un moyen d'atteindre un débit élevé avec un suivi plus efficace de l'utilisateur.

I.1.10 Cœur de la 5G

L'architecture du réseau central 5G est au cœur de la nouvelle spécification 5G et permet la demande de débit accrue que la 5G doit prendre en charge. Le nouveau noyau 5G, tel que défini par le 3GPP, utilise une architecture basée sur les services (SBA) alignée sur le cloud qui couvre toutes les fonctions et interactions 5G, y compris l'authentification, la sécurité, la gestion des sessions et l'agrégation du trafic des terminaux. Le noyau 5G met davantage l'accent sur la NFV en tant que concept de conception intégrale avec des fonctions logicielles virtualisées pouvant être déployées à l'aide de l'infrastructure MEC qui est au cœur des principes architecturaux de la 5G.

I.1.11 Options d'architecture 5G

Comblent le fossé entre la 4G et la 5G nécessitera des étapes progressives et un plan de match bien orchestré. Emblématique de ce changement sera la transition progressive du mode non autonome aux options d'architecture 5G en mode autonome. La norme 5G non autonome a été finalisée fin 2017 et utilise le RAN LTE et les réseaux centraux existants comme point d'ancrage, avec l'ajout d'un opérateur de composants 5G. Malgré la dépendance à l'architecture existante, le mode non autonome augmentera la bande passante en exploitant les fréquences d'ondes millimétriques.

Le mode autonome 5G est essentiellement un déploiement 5G à partir de zéro avec la nouvelle architecture de base et le déploiement complet de tout le matériel, des caractéristiques et des fonctionnalités 5G. Alors que le mode non autonome cède progressivement la place à de nouveaux déploiements d'architecture de réseau mobile 5G,

une planification et une mise en œuvre minutieuses rendront cette transition transparente pour la base d'utilisateurs.

5G NR DEPLOYMENT ARCHITECTURE OPTIONS

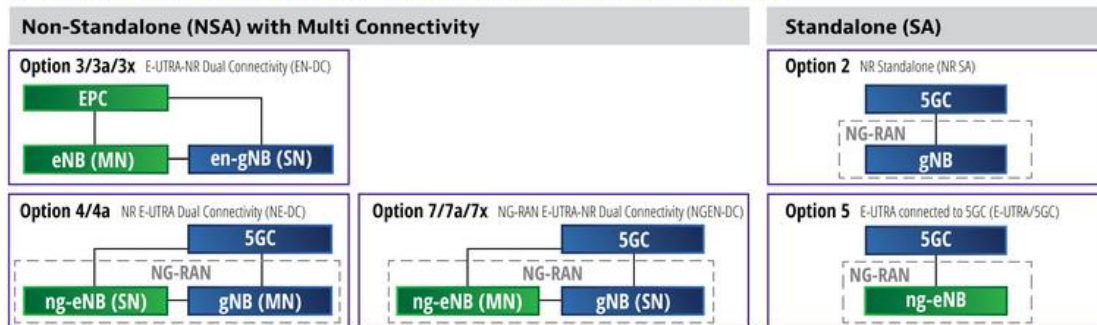


Figure I-4: option d'architecture

I.2 Principe de fonctionnement de la 5G

La 5G fonctionne sur des nouvelles fréquences radio pour la transmission des signaux. Elle exploite un spectre de fréquences radio et la technologie de câbles de fibre optique, pour le traitement de plus large volume de donnée en moins de temps.

Ces données sont encodées grâce à la technologie OFDM, puis envoyées par le biais d'ondes radio entre les antennes cellulaires connectées au même réseau au sein d'un territoire. L'une des différences entre la 5G et les précédentes générations est que les fréquences radio sont ciblées.

Ceci signifie que la 5G est uniquement disponible dans certaines zones, généralement dans les villes les plus denses. Grâce aux fréquences radio plus élevées que la 4G et à l'usage d'une technologie plus récente, la 5G peut atteindre les niveaux souterrains et traverser les murs épais.

La technologie et l'équipement sur lesquels repose la 5G sont très différents, donc il est nécessaire de mettre à jour les équipements des antennes de communication, et notamment les radios.

Contrairement aux générations précédentes, la 5G peut être tout pour toutes les applications. Il peut offrir des vitesses élevées, une faible latence, des densités d'appareils élevées, une connectivité longue distance et une grande fiabilité, selon les exigences de

l'application. En fait, les capacités du réseau 5G peuvent être personnalisées en fonction des besoins particuliers de l'application.

Cette personnalisation est connue sous le nom de découpage du réseau, où les réseaux 5G peuvent être découpés en segments de réseau virtuels, chacun pouvant être configuré pour se conformer aux besoins de l'application particulière. Ceci est réalisé en utilisant la virtualisation des fonctions réseau (NFV) et la mise en réseau définie par logiciel (SDN). Ensemble, ces concepts peuvent être considérés comme la virtualisation des réseaux, de la même manière que la virtualisation des systèmes (la création de machines virtuelles dans le cloud) est appliquée aux serveurs.

L'UIT-R a défini trois principaux domaines d'application pour les capacités améliorées de la 5G, à savoir le haut débit mobile amélioré (eMBB), les communications ultra fiables à faible latence (URLLC) et les communications massives de type machine (mMTC). Seul eMBB est utilisé, déployé en 2020. URLLC et mMTC sont à plusieurs années dans la plupart des endroits. Ces trois domaines d'application particuliers sont les seuils définis qui doivent être atteints pour que le réseau soit appelé 5G.

Ce domaine d'application se concentre principalement sur la fourniture de vitesses élevées aux appareils mobiles. eMBB aura des connexions plus rapides, un débit plus élevé et une capacité d'appareils connectés plus élevée. Les applications relevant de la catégorie eMBB comprennent la connectivité Internet traditionnelle aux smartphones, tablettes, ordinateurs portables et PC, la connectivité sans fil fixe et des applications plus innovantes, telles que la télé-présence, la télémédecine, la réalité virtuelle et augmentée et les applications de divertissement.

I.2.1 Communications ultra-fiables à faible latence (URLLC)

Ce domaine d'application utilise le réseau 5G pour les applications critiques nécessitant une grande fiabilité, un échange de données robuste et une faible latence. Les applications dans ce domaine incluent l'autonomie des véhicules, couvrant à la fois le trafic routier et le trafic de drones, certains types d'automatisation de la fabrication et de l'industrie, l'automatisation des entrepôts et des ports, les applications militaires et le soutien des services d'urgence.

I.2.2 Communications massives de type machine (mMTC)

mMTC tire parti des immenses capacités des appareils connectés de la 5G, qui atteignent 2,5 millions d'appareils connectés par mile carré. Les applications mMTC n'ont pas besoin des débits binaires élevés, de la haute fiabilité et des faibles latences fournies par eMBB et URLLC, mais elles ont besoin de la haute densité d'appareils et de la longue distance entre l'appareil connecté et la station de base. Les applications typiques de mMTC incluent l'Internet des objets, les villes intelligentes, les bâtiments intelligents, l'agriculture intelligente, les réseaux intelligents et la surveillance industrielle.

I.2.3 Vitesse et latence

En théorie, la 5G offre une vitesse moyenne de 10 Gbps, soit plus de 100 fois plus rapide que la technologie 4G actuelle. Les vitesses de téléchargement moyennes réelles de la 5G sont actuellement mesurées entre 1,4 et 14 fois plus rapides que la 4G.

Les vitesses 5G les plus rapides seraient dans les bandes mmWave et peuvent atteindre 4 Gbit/s avec agrégation de porteuses et MIMO. La 5G à mi-bande fournira généralement entre 100 et 4 400 Mbit/s, mais aura une portée beaucoup plus large que mmWave. Le spectre bande basse offre la plus grande portée, donc une plus grande zone de couverture pour un site donné, mais ses débits sont inférieurs aux bandes moyenne et haute. Les travaux sur la technologie 5.5G devraient offrir des débits de 20 Gbit/s en aval et de 10 Gbit/s en amont, éventuellement entre 2025 et 2030.

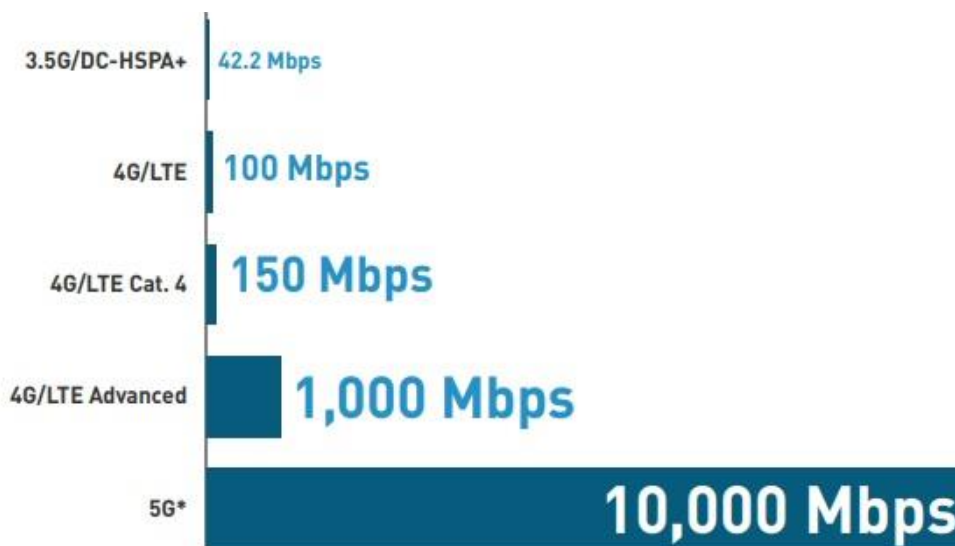


Figure I-5: vitesse et latence

La latence mesure le temps nécessaire à votre téléphone pour envoyer un message et obtenir une réponse. En 5G, la "latence d'air" est de l'ordre de 8 à 12 millisecondes. La latence au serveur doit être ajoutée à la "latence d'air" pour la plupart des comparaisons. Verizon a signalé que la latence de son déploiement précoce 5G est de 30 ms : les serveurs Edge proches des tours peuvent réduire la latence à 10-20 ms ; 1 à 4 ms seront extrêmement rares pendant des années en dehors du laboratoire. La latence est beaucoup plus élevée lors des transferts ; allant de 50 à 500 millisecondes selon le type de transfert. La réduction de la latence de transfert est un domaine de recherche et de développement en cours.

I.2.4 5G et intelligence artificielle [4]

La 5G va propulser l'intelligence artificielle. Là encore, l'IA ne sera plus centralisée sur le Cloud, mais distribuée en périphérie du réseau ou directement sur les appareils connectés.

De nombreuses applications excitantes se profilent grâce à la combinaison entre ces deux technologies. L'IA et la 5G pourraient par exemple permettre l'essor des « humains virtuels » capables d'interagir avec l'utilisateur en temps réel pour lui fournir des conseils ou lui apporter un peu de compagnie. Verizon travaille déjà sur cette technologie « d'humains numériques » dans ses laboratoires 5G.

IBM (international business machine) a noué un partenariat avec Samsung pour développer des appareils mobiles capables de générer des alertes pour les pompiers ou la police en détectant instantanément des situations à risque.

Les appareils IA et 5G incorporés à des bâtiments, des villes ou des véhicules pourraient prendre des décisions complexes à partir des données. Une caméra intelligente pourrait par exemple ordonner des actions à partir des images qu'elle filme. Par exemple, un capteur d'image intégré à un véhicule pourrait utiliser l'IA pour détecter un obstacle sur la route et partager ces données avec les autres voitures via la 5G. L'entreprise Cognizant travaille sur de telles innovations.

Un autre cas d'usage est celui de « **l'Intelligence artificielle des objets** » ou **AIoT**. Dans le domaine de la surveillance domestique, par exemple, les caméras connectées

pourront transférer très rapidement de multiples flux vidéo vers le Cloud via la 5G indépendamment de l'accès à l'internet fixe.

Ce nouveau réseau mobile va aussi permettre l'accélération des chatbots et des assistants vocaux. Il facilitera aussi la collecte massive de données, qui pourra être exploitée pour entraîner plus efficacement les modèles de Machine Learning.

1.2.5 Les avantages de la 5G[5]

◆ L'intérêt de la 5G pour l'entreprise

La technologie 5G permet une forte réduction de la consommation d'énergie, augmentation des débits, amélioration des connectivités, optimisation du travail à distance, prolongement de la durée de vie des appareils. Bref, un énorme gain de productivité pour l'entreprise...

Les débits en 5G sont 10 fois plus élevé que ceux de la 4G. La vitesse moyenne de téléchargement est multipliée par 7. Cette vitesse permet donc de télécharger des fichiers volumineux, les éditer de manière collaborative et les partager à partir d'un appareil mobile.

◆ Une vitesse incomparable et une connectivité massive

Les bénéfices de la 5G sont vastes pour les sociétés comme pour les consommateurs. La vitesse est le plus grand atout de la 5G. A titre d'exemple, un utilisateur de la 5G peut télécharger un film sur son appareil mobile en moins d'une seconde.

La 5G permet aussi d'améliorer la capacité de connectivité. Cela veut dire que plusieurs utilisateurs de la 5G peuvent être connectés en même temps sans que cela impacte la vitesse de connexion, réduction des temps d'attente et favorise la qualité et la rapidité des échanges pour donner une expérience utilisateur optimale.

◆ Très haut débit pour les objets connectés et l'industrie

Des voitures autonomes, vidéos téléchargées en quelques secondes et jeux vidéo comme si on y était, cela fait vraiment rêver. Le petit décalage de 0,27 secondes qu'on connaît aujourd'hui avec la 4G, passera à 0,01 seconde, ce qui

permettrait de réaliser aussi des prouesses en télémédecine, en particulier pour la chirurgie à distance.

Cet univers à ultra haut débit s'appelle « l'internet des objets connectés ». La 5G ajoutera l'interopérabilité des objets connectés.

Dans un futur pas si lointain, tout notre environnement sera connecté et interconnecté grâce à l'internet des objets. A titre d'exemple votre maison va se préchauffer en détectant votre arrivée, votre montre vous montrera ce qui reste dans votre frigo et votre lave-vaisselle va vous envoyer une notification pour signaler une panne. Le rôle de la 5G est de rendre donc ses échanges de données très fluides.

Même pour l'industrie, La 5G permettra d'automatiser et d'améliorer l'interconnexion entre les machines et les systèmes, ainsi que d'optimiser le téléchargement des informations en temps réel.

1.2.6 Les inconvénients de la 5G[5]

◆ Les dangers de la 5G sur notre santé

Avec le déploiement de la 5G, de nouvelles bandes de fréquence sont (bande 3,5 GHz) ou seront prochainement exploitées (bande 26 GHz). Dans la continuité de ses travaux d'expertise sur radiofréquences et santé, et sur la base des données scientifiques disponibles à ce jour, l'Anses estime peu probable que le déploiement de la 5G dans la bande de fréquences 3,5 GHz présente de nouveaux risques pour la santé. Pour la bande de fréquences 26 GHz, les données ne sont, à l'heure actuelle, pas suffisantes pour conclure à l'existence ou non d'effets sanitaires. Les connaissances sur les liens entre expositions et effets sanitaires devant être renforcées, l'Anses souligne la nécessité de poursuivre les recherches et de suivre en particulier l'évolution de l'exposition des populations à mesure de l'évolution du parc d'antennes et de l'augmentation de l'utilisation des réseaux.

◆ Disposer d'un téléphone compatible au réseau 5G

Les smartphones devront être compatibles à la 5G, comme cela s'est passé pour la 4G après son lancement, il va falloir acheter un nouveau téléphone compatible à la 5G afin de bénéficier des avantages.

I.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évoqué la 5G ainsi que son architecture et son principe de fonctionnement. Et dans le chapitre suivant, nous allons présenter les antennes imprimées et leurs caractéristiques

Chapitre II
Antennes imprimées

II Introduction

Les antennes imprimées ou micro-ruban, ou patch en anglais, sont des éléments rayonnant d'un circuit imprimé ; c'est le type d'antenne utilisée dans de nombreuses applications en hyperfréquences ($f > 1\text{GHz}$).

L'antenne est constituée d'une plaque de métal sur un substrat diélectrique. Les formes les plus utilisées sont rectangulaire et circulaire

II.1 L'antenne patch micro-ruban

L'antenne patch micro-ruban se compose d'un patch constitué d'une couche métallique très mince (généralement en cuivre) d'une fraction de longueur d'onde, placée au-dessous d'un plan de masse séparé par un substrat diélectrique. Les antennes patches micro-rubans présentent de nombreux avantages, elles sont légères, sont faciles à alimenter et peuvent, en plus, être conçues pour fonctionner sur une large gamme de fréquences (1–40 GHz). Elles peuvent également être combinées pour former des réseaux linéaires ou planaires pouvant ainsi générer des polarisations linéaires, double et circulaire. Ces antennes sont peu coûteuses, elles sont fabriquées par de simples gravures, ce qui les rend très utiles en tant qu'antennes actives intégrées offrant ainsi l'opportunité de fabriquer des antennes micro-rubans émetteur et récepteur compactes selon différentes formes et configurations. Mais elles ont un rendement faible, limité par les pertes conducteur et diélectrique et les ondes de surface. Cependant, seules des antennes micro-rubans de forme rectangulaire seront considérées dans notre travail. [6]

L'élément de base de l'antenne est un conducteur mince de dimension $L \times W$ situé sur un substrat diélectrique soutenu par un plan de masse conducteur [6].

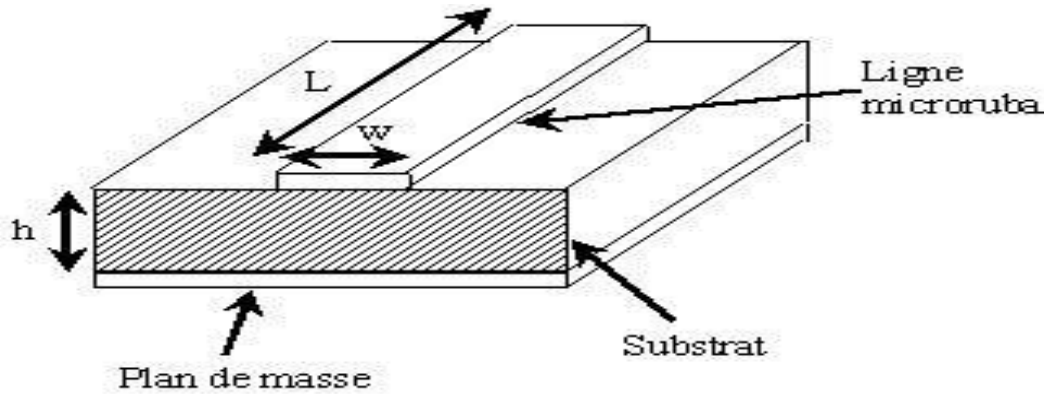


Figure II-1 : Configuration d'une antenne micro-ruban

II.2 Mécanisme de rayonnement

Il existe deux façons de voir le rayonnement d'une antenne micro-ruban. Pour cette analyse, on se limite aux plaques rectangulaires.

- Le modèle par cavité résonnante
- Le modèle par ligne de transmission

II.2.1 Modèle de la cavité

Au départ, on assure que le champ dans le diélectrique est limité par l'espace entre la plaque et le plan de masse. On traite alors cette espace comme une cavité rectangulaire remplie d'un diélectrique de permittivité ϵ_{eff} dont les six parois sont :

- Deux parois métalliques horizontales (Parfaits Conducteurs Electriques)
- Quatre murs magnétiques (P C M) qui simulent le circuit(parois)à la périphérie de la plaque



Figure II-2: Modèle de la cavité

En fait les champs ne sont pas tout à fait circonscrits à l'intérieur de la cavité. Une faible quantité de la puissance incidente est rayonnée à travers les ouvertures latérales que sont les murs magnétiques. La solution du champ peut être obtenue directement à partir des solutions trouvées pour un guide rectangulaire de cotes L et W et dont les parois latérales sont des murs magnétiques (composante tangentielle de $H=0$).

Habituellement, on opère l'antenne micro-ruban à la fréquence la plus basse de résonance (mode fondamental). Le mode dominant est celui correspondant à la plus grande dimension, habituellement L (mode TM₁₀₀)

$$E_z = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{L}x\right) \quad (II.1)$$

$$f_{100} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (II.2)$$

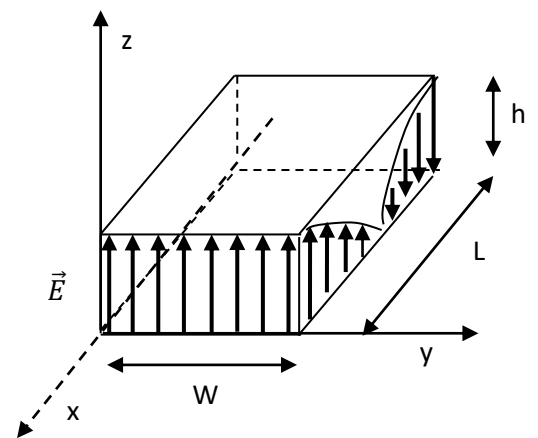


Figure II-3: Représentation du champ E en mode dominant TM₁₀₀

II.2.2 Rayonnement à grande distance

Le champ entre les bords du patch et le plan de masse va déborder et contribuer à générer le champ électromagnétique rayonné. Ceux générés par les bords séparés par L étant maximum et en opposition de phase vont avoir tendance à s'additionner de manière constructive et optimale. Ces bords sont appelés bords rayonnants. Ceux générés par les bords séparés par W présentent un zéro ne vont pas contribuer au rayonnement.

Ainsi le rayonnement d'une antenne patch rectangulaire se trouve équivalent au rayonnement de deux ouvertures rectangulaires de dimension $W * h$

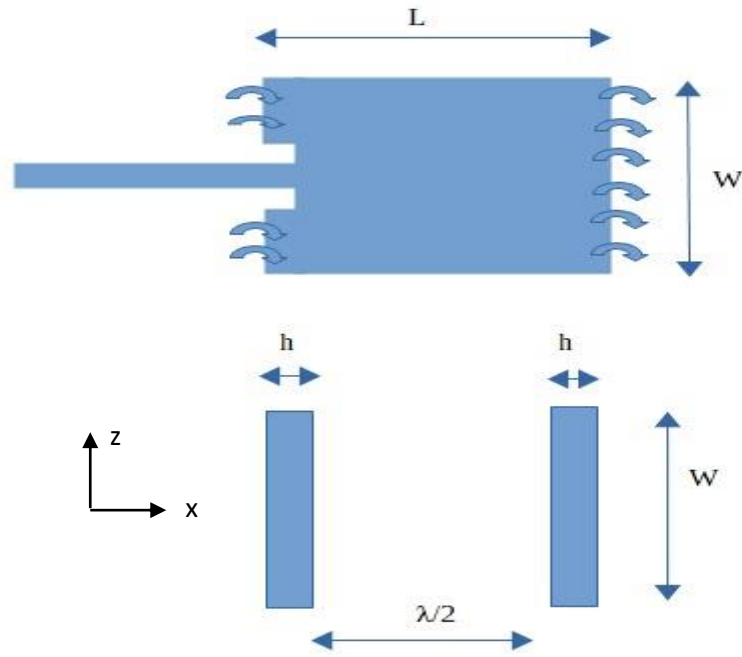


Figure II-4 : rayonnement d'une antenne patch

En se référant à la figure II.4, le champ électrique créé par une ouverture est donné par :

$$\vec{E}_1 \approx -j \frac{k}{4\pi} \frac{e^{-jk}}{r} 2E_0 h W \cdot \frac{\sin\left(\frac{kW}{2r}z\right)}{\frac{kWz}{2r}} \frac{\sin\left(\frac{kh}{2r}x\right)}{\frac{khx}{2r}} \sin(\theta) \vec{u}_\phi \quad (\text{II.3})$$

$$z = r \cos\theta \text{ et } x = r \sin\theta \cos\phi \quad (\text{II.4})$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$: Nombre d'onde

En prenant en compte que l'épaisseur h est très faible $k \cdot h \ll 1$ et $V_0 = E_0 \cdot h$, la tension aux bornes de l'antenne, on trouve :

$$\vec{E}_1 = -j \frac{V_0}{\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \sin\left(\pi \frac{w}{\lambda_0} \cos\theta\right) \sin\theta \vec{u}_\phi \quad (\text{II.5})$$

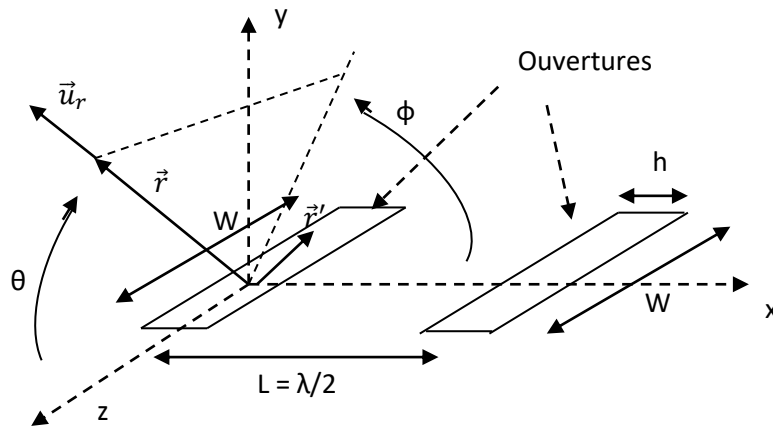


Figure II-5 Représentation des ouvertures dans le repère cartésien

Pour le diagramme de rayonnement de l'antenne, on doit multiplier le champ d'une ouverture par le facteur de réseau $F(\theta, \phi)$ à 2 éléments distants de $d = L = \frac{\lambda}{2}$

$$E_t = E_1 * F(\theta, \phi) \quad (\text{II.6})$$

$$F(\theta, \phi) = 2 \cos \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_0} \cos \theta \sin \phi \right) \quad (\text{II.7})$$

$$\text{D'où } \vec{E}_t = -j \frac{V_0}{\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{\sin \left(\frac{\pi w}{\lambda_0} \cos \theta \right)}{\cos \theta} \sin \theta \cdot 2 \cos \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_0} \cos \theta \sin \phi \right) \vec{u}_\phi \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Pour } \theta = \frac{\pi}{2}, \vec{E}_t = -2 \frac{V_0 w}{\lambda_0 r} \cos \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_0} \cos \phi \right) \vec{u}_\phi \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Pour } \phi = \frac{\pi}{2}, E_t = E_{tmax} = 2 \frac{V_0 w}{\lambda_0 r} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Pour } \phi = 0, E_t = E_{max} \cos \frac{\pi \lambda}{2 \lambda_0} \quad (\text{II.11})$$

II.2.3 Modèle de la ligne de transmission

La plaque peut être vue comme le prolongement d'une ligne de transmission avec une impédances caractéristique différente mais avec pertes puisqu'une partie de la puissance incidente est rayonnée et une autre est perdue dans le diélectrique.

Comme on cherche à produire du rayonnement, une partie du flux électrique se retourne dans le substrat de la plaque et une autre partie dans l'air. Il faut considérer la permittivité effective du substrat.

Chapitre II Antennes imprimées

A cause des effets de bord importants, la plaque donne l'impression d'être plus grande électriquement. On rajoute donc une longueur ΔL de chaque coté à la longueur physique L

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{II.12})$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{w}\right)^{-0.555} \quad (\text{II.13})$$

$$L = L_{eff} - 2 \Delta L \quad (\text{II.14})$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{II.15})$$

II.2.4 Impédance d'entrée

Seules les ouvertures avant et arrière contribuent au rayonnement dans les champs lointains.

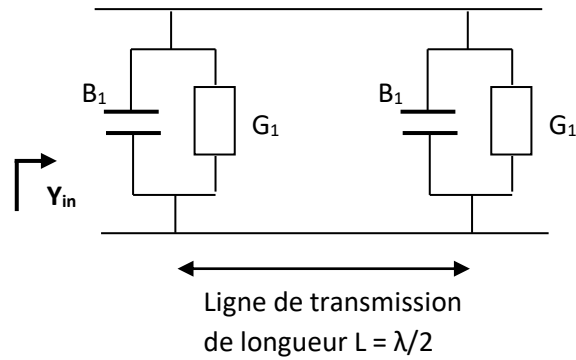


Figure II-6 : Schéma électrique du patch

$$Y_{in} = G_1 + jB_1 + Y_c \frac{G_1 + j(B_1 + Y_c \tan \beta l)}{Y_c - B_1 \tan \beta l + jG_1 \tan \beta l} \quad (\text{II.16})$$

$$Y_{in} = 2(G_1 + jB_1) \quad (\text{II.17})$$

$$\text{Avec } G_1 = \frac{\pi w}{z_0 \lambda_0} \left[1 - \frac{(Bh)^2}{24}\right] : \text{conductance de rayonnement d'une fente} \quad (\text{II.18})$$

$$B_1 = 0.01668 \frac{\Delta L}{h} \frac{w}{\lambda_0} \epsilon_{eff} \text{ Qui est la partie imaginaire} \quad (\text{II.19})$$

La résistance d'entrée varie selon la position de x

$$x = \frac{L}{\pi} \arccos \sqrt{2G_1 R_{in}} \quad (\text{II.20})$$

$$R_{in} = \frac{1}{2G_1} \cos^2 \frac{\pi x}{L} \quad (\text{II.21})$$

En général on cherche à obtenir une résistance d'entrée $R_{in} = 50\Omega$ pour assurer l'adaptation.

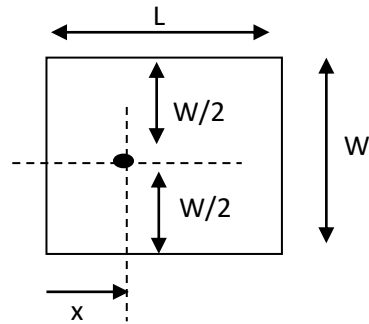


Figure II-7 : Excitation du patch

II.2.5 Adaptation d'impédance

L'adaptation d'impédance est une opération très importante dans l'alimentation d'une antenne quel que soit la technique utilisée, car c'est elle qui garantit que la plupart de la puissance est transférée de l'alimentation vers l'élément rayonnant, c'est-à-dire le patch.[5]

II.3 Techniques d'excitation d'une antenne patch micro-ruban

L'antenne patch micro-ruban peut être alimentée par plusieurs techniques qui peuvent être classées en deux catégories : avec contact et sans contact. Dans la première technique, la puissance RF est fournie directement au patch rayonnant par l'intermédiaire d'un élément de liaison : une ligne micro-ruban ou un câble coaxial. Dans la deuxième technique, un couplage de champ électromagnétique est réalisé pour assurer le transfert de puissance entre une ligne micro-ruban et le patch rayonnant.[5]

II.3.1 Alimentation par câble coaxiale

L'alimentation par câble coaxiale est une technique très couramment utilisée pour l'alimentation des antennes patchs micro-rubans. Comme le montre la figure II.8, le conducteur interne du connecteur coaxial s'étend à travers le diélectrique pour être soudé au patch, tandis que le conducteur extérieur est relié au plan de masse. Le principal

avantage de ce type d'alimentation est la possibilité de placer la sonde coaxiale à n'importe quel endroit à l'intérieur du patch afin de rechercher l'adaptation. Cette méthode d'alimentation est simple à concevoir.[5]

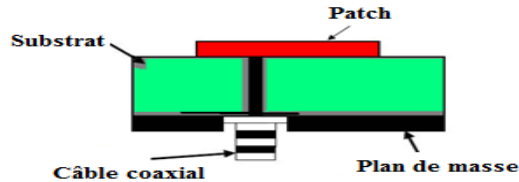


Figure II-8 : Alimentation par câble coaxiale d'une antenne patch

II.3.2 Alimentation par ligne micro-ruban

Dans ce type de technique d'alimentation, une ligne micro-ruban est reliée directement au bord du pavé micro-ruban. La largeur de la ligne ajustera l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation. En effet, cette technique d'alimentation présente un avantage puisque l'antenne et le circuit d'alimentation sont gravés sur le même substrat. Le but de l'encoche gravée sur le patch est de faire correspondre l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation à l'impédance d'entrée du patch sans avoir besoin d'éléments supplémentaires. Ceci est réalisé en contrôlant la bonne profondeur de l'encoche.[6]

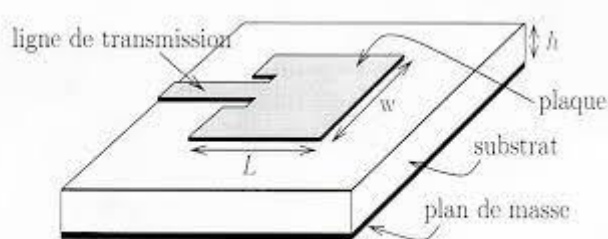


Figure II-9 : Alimentation par ligne micro-ruban d'une antenne patch

II.3.3 Alimentation par couplage par fente

Dans ce type de technique d'alimentation, le plan de masse sépare le patch rayonnant et la ligne d'alimentation. Le couplage entre les deux éléments est obtenu grâce à une fente ou une ouverture dans le plan de masse. La fente de couplage est généralement centrée sous le patch entraînant ainsi une baisse de polarisation croisée à cause de la symétrie de la configuration. Le couplage entre la ligne d'alimentation et le patch est déterminé par la forme, la taille et l'emplacement de l'ouverture ou de la fente. Dans cette technique d'alimentation, le rayonnement parasite est réduit au minimum. En règle générale, afin d'optimiser le rayonnement du patch, une constante diélectrique élevée est utilisée pour le substrat inférieur, tandis qu'une épaisseur plus grande et une constante diélectrique faible sont utilisées pour le substrat supérieur. L'inconvénient majeur de cette configuration réside dans la difficulté de fabrication due à la présence de plusieurs couches, ce qui a pour effet d'augmenter l'encombrement de l'antenne et le coût. [7]

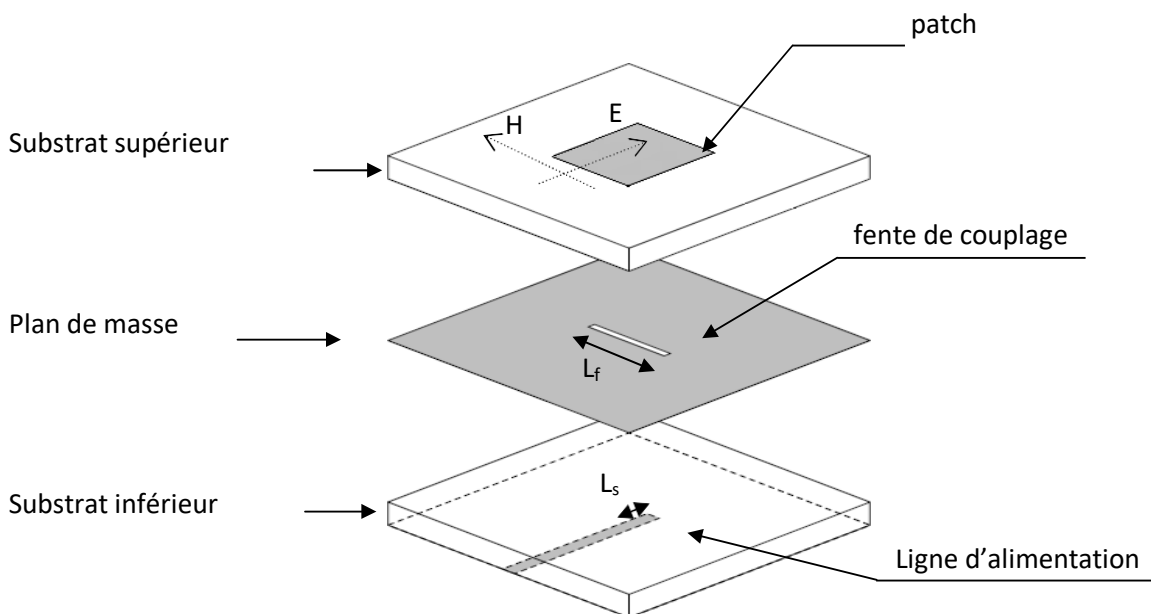


Figure II-10 : schéma d'une antenne patch à couplage par fente

Chapitre II Antennes imprimées

Afin de comprendre le fonctionnement de l'antenne, une étude paramétrique a été faite sur :

La constante diélectrique du substrat de l'antenne : elle affecte principalement la bande passante et l'efficacité du rayonnement de l'antenne. Pour une faible valeur de permittivité, on peut avoir une bande passante plus large avec une réduction d'ondes de surface. [8]

L'épaisseur du substrat de l'antenne : elle affecte la bande passante et le niveau de couplage. Il en résulte qu'un substrat plus épais donne naissance à une bande passante plus large, mais avec moins de couplage pour une fente donnée.[8]

La longueur du patch : elle fixe la fréquence de résonance de l'antenne.

La largeur du patch : elle fixe la résistance de résonance de l'antenne. Plus le patch est grand, plus cette résistance est faible.

La constante diélectrique du substrat de la ligne d'excitation : elle est liée à la qualité de circuit micro-ruban, sa valeur varie typiquement entre 2 à 10.

La largeur de la fente : La largeur de la fente affecte également le niveau de couplage, mais pas comme sa longueur. Le rapport de la longueur et de la largeur de cette fente est généralement de 1/10.

La position de la ligne d'excitation par rapport à la fente : Pour un maximum de couplage, la ligne d'excitation doit être positionnée perpendiculaire à l'axe de la fente. L'inclinaison de la ligne d'excitation par rapport à la fente provoque une réduction du couplage, de même pour le positionnement de la ligne d'excitation au bord de la fente.

La position du patch par rapport à la fente : Pour un couplage maximum, le patch doit être centré sur la fente. Le déplacement du patch par rapport à la fente dans la direction du plan H a peu d'effet. Par contre, en le déplaçant par rapport à la fente dans la direction du plan E (résonance), il diminue le niveau de couplage.

La longueur de la fente (Lf) : Le niveau de couplage est principalement déterminé par la longueur de la fente, ainsi que le niveau de rayonnement arrière.[8]

La forme de la fente : La forme de la fente de couplage a un impact significatif sur le couplage entre la ligne d'excitation et le patch. Dans la majorité d'antennes micro-rubans couplées par fente, une fente de couplage rectangulaire est utilisée donnant ainsi un meilleur couplage qu'avec les fentes rondes. Des fentes avec des extrémités élargies telles

que os de chien[9], nœud papillon[9] ou en forme de H [10] peuvent en outre améliorer le couplage.

II.4 Polarisation d'une antenne

Une antenne rayonne une onde qui, en champ lointain, présente localement les propriétés d'une onde plane. La polarisation de cette onde est par définition caractérisée par la projection, dans le plan orthogonal à la direction de propagation, de la courbe décrite dans le temps par l'extrémité du vecteur champ électrique de l'onde rayonnée en zone lointaine. Le champ électrique lointain peut s'écrire, en un point fixé, comme suit

$$\frac{E_{\theta}^2(t)}{E_{\theta m}^2} + \frac{E_{\phi}^2(t)}{E_{\phi m}^2} - 2\cos\alpha \cdot \frac{E_{\theta}(t) \cdot E_{\phi}(t)}{E_{\theta m} \cdot E_{\phi m}} \cdot \sin^2\alpha = 0 \quad (\text{II.22})$$

Cette équation définit l'ellipse de polarisation du champ rayonné

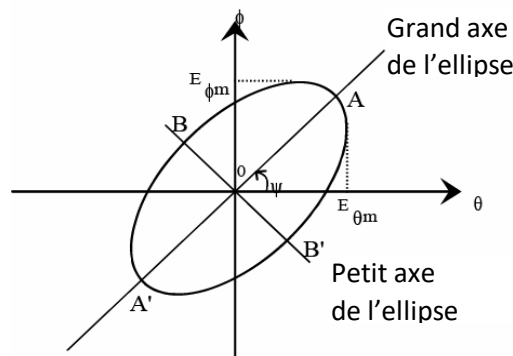


Figure II-11 : ellipse de polarisation

Pour caractériser une polarisation, le taux d'ellipticité ou rapport axial est pris en compte. Il est défini par :

$$T = \frac{\text{Grand diamètre de l'ellipse}}{\text{petit diamètre de l'ellipse}} = \frac{a}{b}$$

Qui est un paramètre généralement exprimé en dB par la relation :

$$T(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{a}{b} \right) \quad (\text{II.23})$$

Grâce à ce critère, il est possible de déterminer la nature de la polarisation.

- La polarisation rectiligne ou linéaire ($T \rightarrow \infty$ ou $T = 0$) est obtenue quand le champ reste parallèle à une direction au cours du temps : l'ellipse devient un segment de droite.
- La polarisation circulaire ($T = 1$) droite ou gauche est obtenue lorsque les deux champs sont de même amplitude ($E_{\theta m} = E_{\phi m}$) et en quadrature de phase : l'ellipse devient alors un cercle.

Dans notre cas, seule la polarisation circulaire nous intéresse. Dans la plupart des cas, il est très difficile d'obtenir une polarisation circulaire parfaite, le terme de polarisation elliptique est alors employé.

Comme pour la polarisation circulaire, la polarisation elliptique correspond à la somme des deux ondes planes dont les champs électriques ne sont pas de même amplitude mais perpendiculaires et déphasés de $\pm \frac{\pi}{2}$ ou dont les champs sont de même amplitude mais de déphasage différent de $\pm \frac{\pi}{2}$.

II.5 Dimensionnement et résultat de simulation d'une antenne patch à 3.5GHz

La simulation électromagnétique des antennes est réalisée à l'aide du logiciel CST.

II.5.1 Alimentation par ligne micro-ruban

Comme substrat nous avons choisi du RT/DUROID 5880 de permittivité relative $\epsilon_r = 2.2$ et d'épaisseur $h = 3.175\text{mm}$.

II.5.1.1 Calcul de la largeur W et de la longueur L du patch

La valeur de cette largeur est calculée par $W = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{II.24})$

Avec $c = 3 \cdot 10^8$ m/s : vitesse de la lumière dans le vide

$f_r = 3,5$ GHz fréquence de résonance de l'antenne patch

ϵ_{eff} Dépend de W : $\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{W}\right)^{-0,555} \quad (\text{II.25})$

La valeur de départ de W est calculée par $W = \frac{c}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$.

On trouve $W_0 = 33.88\text{mm}$.

En calculant successivement ϵ_{eff} puis W à l'aide des formules (II.24) et (II.25) on trouve $\epsilon_{eff} = 2,0$ et $W = 30,30$ mm.

Le calcul de la longueur L du patch est fait avec les formules (II.14) et (II.15) ; On trouve $\Delta L = 1,638$ mm et $L = 27,02$ mm.

L'optimisation avec le logiciel CST pour un patch carré donne : $W = L = 26,8$ mm

II.5.1.2 La position x du point d'excitation du patch pour avoir l'adaptation à 50Ω

Cette position est $x = 8,8$ mm d'après l'équation (II.18) et (II.20) et (II.21)

$Z_0 = 120 \pi$ Ohm : impédance du vide

$\lambda_0 = \frac{c}{f_r}$: longueur d'onde dans le vide

II.5.1.3 Calcul de la largeur W_l de la ligne micro-ruban 50Ω

$$\frac{W_l}{h} = \left(\frac{e^H}{8} - \frac{1}{4 e^H} \right)^{-1} \quad (\text{II.26})$$

$$H = \frac{Z_C \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119,9} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \quad (\text{II.27})$$

$h = 3,175$ mm et $Z_C = 50 \Omega$

On trouve : $W_l = 2,63$ mm

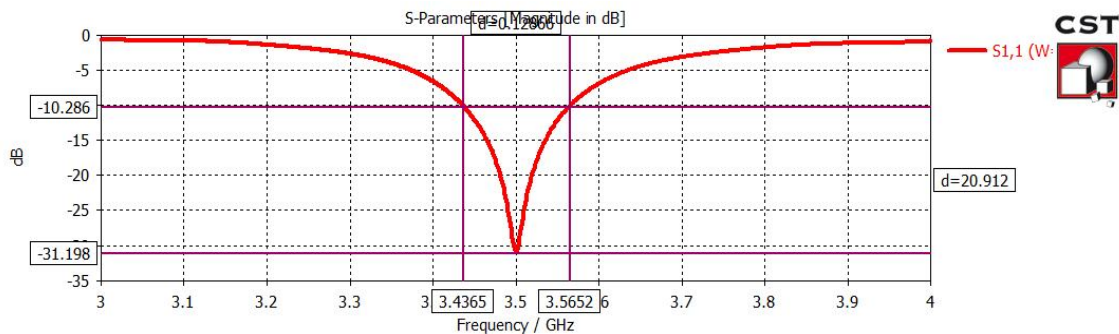


Figure II-12 : Alimentation par ligne micro-ruban

II.5.2 Alimentation par couplage par fente

Nous avons choisi, comme substrat inférieur de la ligne, du FR-4 de permittivité relative $\epsilon_r1 = 4,3$ et d'épaisseur $h1 = 1,524$ mm, et pour le substrat supérieur du patch du RT/DUROID 5880 de permittivité relative $\epsilon_r2 = 2,2$ et d'épaisseur $h2 = 3,175$ mm.

- La largeur de la ligne d'alimentation est $W_l = 3,5$ mm (II.26)
- Sa longueur vaut $L = 50$ mm,

➤ La longueur de la fente est $L_f \approx \frac{L_{eff \text{ du patch}}}{2}$ (II.28)

Donc $L_f=17\text{mm}$

➤ Sa largeur vaut $W_f=0.625\text{mm}$

::

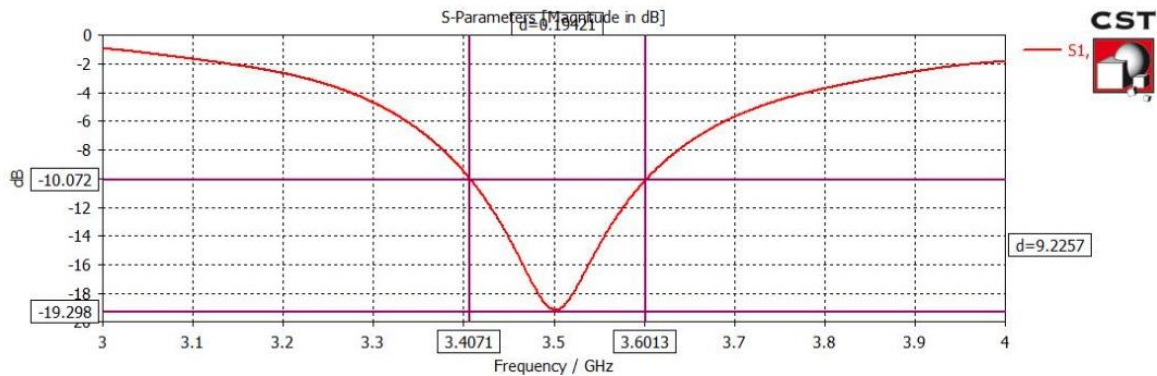


Figure II-13 : Alimentation par couplage par fente

II.5.3 Comparaison des résultats

D'après les figures II-12 et II-1 on constate que la bande passante pour le patch alimenté par couplage par fente est plus large que celle du patch alimenté par ligne micro-ruban ; 194.26MHz contre 126.66MHz. Dans le chapitre suivant nous allons utiliser l'alimentation du patch par couplage par fente car elle nous offre une large bande passante laquelle est nécessaire pour des applications 5G.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les antennes imprimées ou plus précisément les antennes patches. Nous avons décrit leur mécanisme de rayonnement et calculé leurs dimensions pour une fréquence d'utilisation donnée. Nous avons montré l'importance de la position du point d'application de l'excitation pour avoir l'adaptation d'impédance. Deux types d'alimentation par ligne micro-ruban et par couplage par fente sont traités. Le logiciel CST a été utilisé pour optimiser les dimensions calculées par des formules empiriques et de simuler le comportement électromagnétique de ces deux configurations. Le couplage par fente offre une meilleure bande passante. C'est ce type d'alimentation qui va être utilisé dans le chapitre suivant pour concevoir une antenne à double polarisation circulaire fonctionnant à 3.5GHz pour des applications 5G.

Chapitre III
**Conception et simulation d'une antenne à double
polarisation circulaire pour des applications 5G.**

III Introduction

La polarisation circulaire à partir d'une antenne patch carrée est obtenue en utilisant deux alimentations qui génèrent deux modes polarisés rectilignes, orthogonaux entre eux et en quadrature de phase. On peut générer une polarisation gauche ou droite selon la phase appliquée à chacune des excitations ports. Dans ce mémoire nous étudierons une structure d'antenne utilisant une ligne à double port couplée par une fente en croix.

III.1 Conception d'une antenne à double polarisation circulaire fonctionnant à 3,5 GHz

Avant la conception de l'antenne, une étude détaillée de la conception sera donnée dans ce paragraphe. Une antenne à fente présente un avantage en termes de pureté de polarisation du fait de la séparation du plan de masse de l'élément rayonnant et de la ligne électrique, limitant ainsi l'interférence des rayonnements parasites sur le diagramme rayonnant. Cela augmente les performances de l'antenne, en particulier le Gain. La structure de l'antenne est illustrée dans la figure III.1.

L'antenne à double polarisation couplée à une fente comprend une fente en forme de croix. Les quatre points de couplage sont déphasés d'une distance de $\lambda_g/4$ ainsi que d'un déphasage de 90° le long de la ligne d'alimentation. Cette structure présente un avantage de simplicité en générant une polarisation circulaire dans les deux sens, gauche et droite, avec une sélection de l'un des ports pour l'alimentation et l'autre pour une charge de 50 ohms.

En choisissant, comme substrat inférieur de la ligne, du FR-4 de permittivité relative $\epsilon_{r1} = 4.3$ et d'épaisseur $h_1 = 1.524$ mm, et pour le substrat supérieur du patch du RT/DUROID 5880 de permittivité relative $\epsilon_{r2} = 2.2$ et d'épaisseur $h_2 = 3.175$ mm, il est possible de déterminer les dimensions approximatives de l'antenne pour la faire résonner à 3.5 GHz.

III.2 Calcul des dimensions de l'antenne patch

III.2.1 Ligne d'alimentation 50 ohm

$$H = \frac{50 \sqrt{2(4.3+1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.3-1}{4.3+1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.3} \ln \frac{4}{\pi} \right) = 1.51 \text{ d'après l'équation (II.27)}$$

$$\frac{Wl}{h} = \left(\frac{e^{1.51}}{8} - \frac{1}{4e^{1.51}} \right)^{-1} = 1.95 \text{ d'après l'équation (II.26)}$$

$$Wl = 1.95 * 1.6 = 3.12 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_{r1}+1}{2} + \frac{\varepsilon_{r1}-1}{2} \left(1 + \frac{10h}{W}\right)^{-0.555} \quad (\text{III.1})$$

$$\varepsilon_{eff\text{tigne}} = \frac{4.3+1}{2} + \frac{4.3-1}{2} \left(1 + \frac{10 * 1.524}{3,12}\right)^{-0.555} = 3.25$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff\text{tigne}}}} = \frac{c}{f_r \sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (\text{III.2})$$

$$\lambda = \frac{3 * 10^8}{3.510^9 \sqrt{3.25}} = 47.54 \text{ mm}$$

$$\frac{\lambda}{4} = 11.88 \text{ mm}$$

III.2.2 Patch

III.2.2.1 Sa largeur W

$$W_0 = \frac{3 * 10^8}{2 * 3.510^9} \sqrt{\frac{2}{2.2+1}} = 33.88 \text{ mm d'après l'équation (II.24)}$$

$$\varepsilon_{eff1} = \frac{2.2+1}{2} + \frac{2.2-1}{2} \left(1 + \frac{10 * 3.175}{33.88}\right)^{-0.555} = 2.01$$

$$W_1 = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\varepsilon_{eff1}}} \quad (\text{III.3})$$

$$W_1 = \frac{3 * 10^8}{2 * 3.510^9 \sqrt{2.01}} = 30.23 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{eff2} = \frac{2.2+1}{2} + \frac{2.2-1}{2} \left(1 + \frac{10 * 3.175}{30.23}\right)^{-0.555} = 2,0$$

$$W_2 = \frac{3 * 10^8}{2 * 3.510^9 \sqrt{2,0}} = 30.30 \text{ mm}$$

III.2.2.2 Sa longueur L

$$L_{eff} = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\varepsilon_{eff}}} = \frac{3 * 10^8}{2 * 3.510^9 \sqrt{2}} = 30.30 \text{ mm d'après l'équation (II.15)}$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(1.77+0,3) \left(\frac{33.88}{3.175} + 0,264\right)}{(1.77-0,258) \left(\frac{33.88}{3.175} + 0,8\right)} = 0.516 \text{ d'après l'équation (II.12)}$$

$$\Delta L = 1.638 \text{ mm}$$

$$L = 30.30 - 2 * 1.638 = 27,02 \text{ mm}$$

III.2.3 Fente

Fente placée au centre du plan de masse de la ligne d'alimentation :

Longueur de la fente est $L_f = \frac{32.21}{2} = 16.1mm$ d'après l'équation (II.28)

Après optimisation avec CST qui est un logiciel commercial utilisant la méthode des éléments finis, les dimensions optimisées de l'antenne sont les suivantes ; elles sont exprimées en millimètres :

$W=23.3, L=23.3, W_L=3, L_S=80, W_S=80, h_1=1.524, h_2=3.175, L_F=16.2, W_F=0.625$

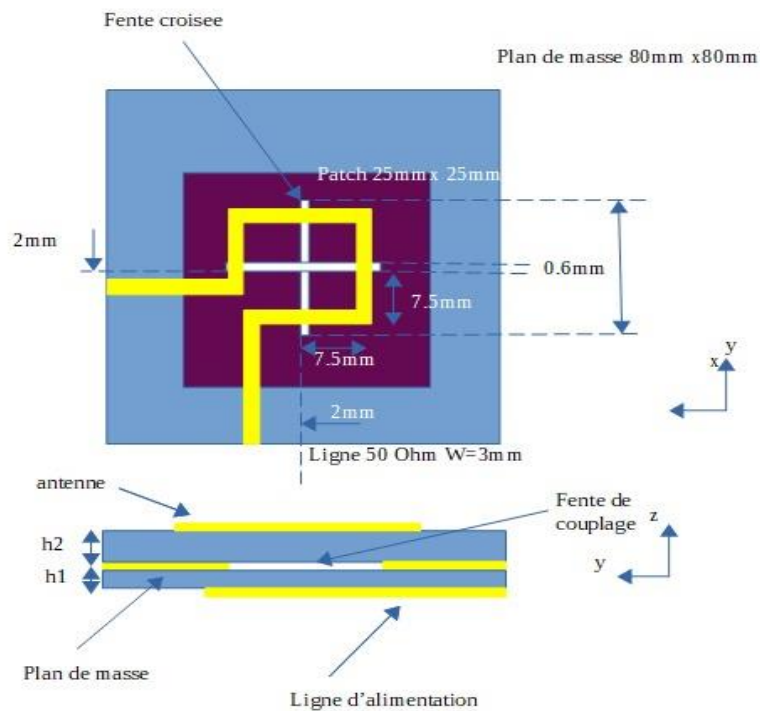


Figure III-1: Configuration d'une Antenne à double polarisation circulaire alimentée par couplage par fente en croix

III.3 Résultats et discussions

III.3.1 Etude paramétrique de l'antenne

III.3.2 Influence de L sur le fonctionnement de l'antenne

La taille du patch est le paramètre le plus important en ce qui concerne la fréquence de résonance. Le changement de la longueur du patch permet une modification de la

Chapitre III conception et simulation

fréquence de l'antenne figure III.2. On remarque que quand cette longueur augmente il y'a un décalage à gauche vers les basses fréquences des courbes représentant les coefficients de réflexion et de transmission.

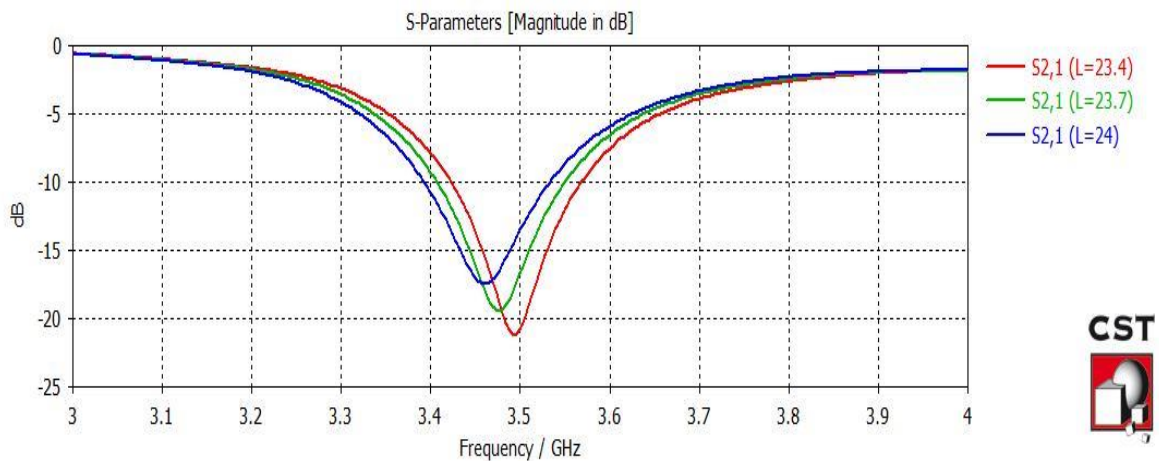
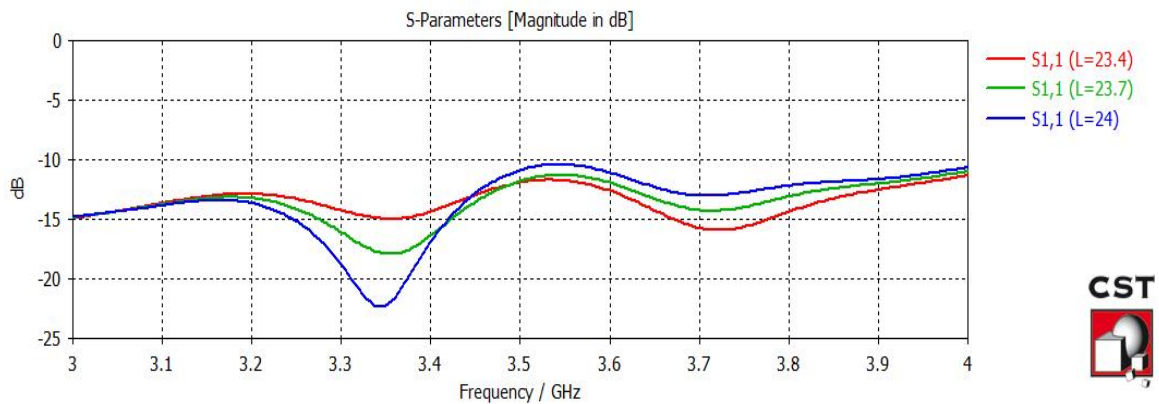


Figure III-2: influences de L sur le fonctionnement de l'antenne

III.3.3 Influence de L_F sur le fonctionnement de l'antenne

Le comportement de la longueur de la fente de couplage est présenté à la figure suivante. On remarque que sur toute la bande de 3 à 4 GHz, l'antenne reste adaptée (S_{11} inférieur à -10dB). L'augmentation de L_f se traduit par une augmentation du couplage. Cependant on observe un décalage de la résonance du coefficient de transmission vers les basses fréquences.

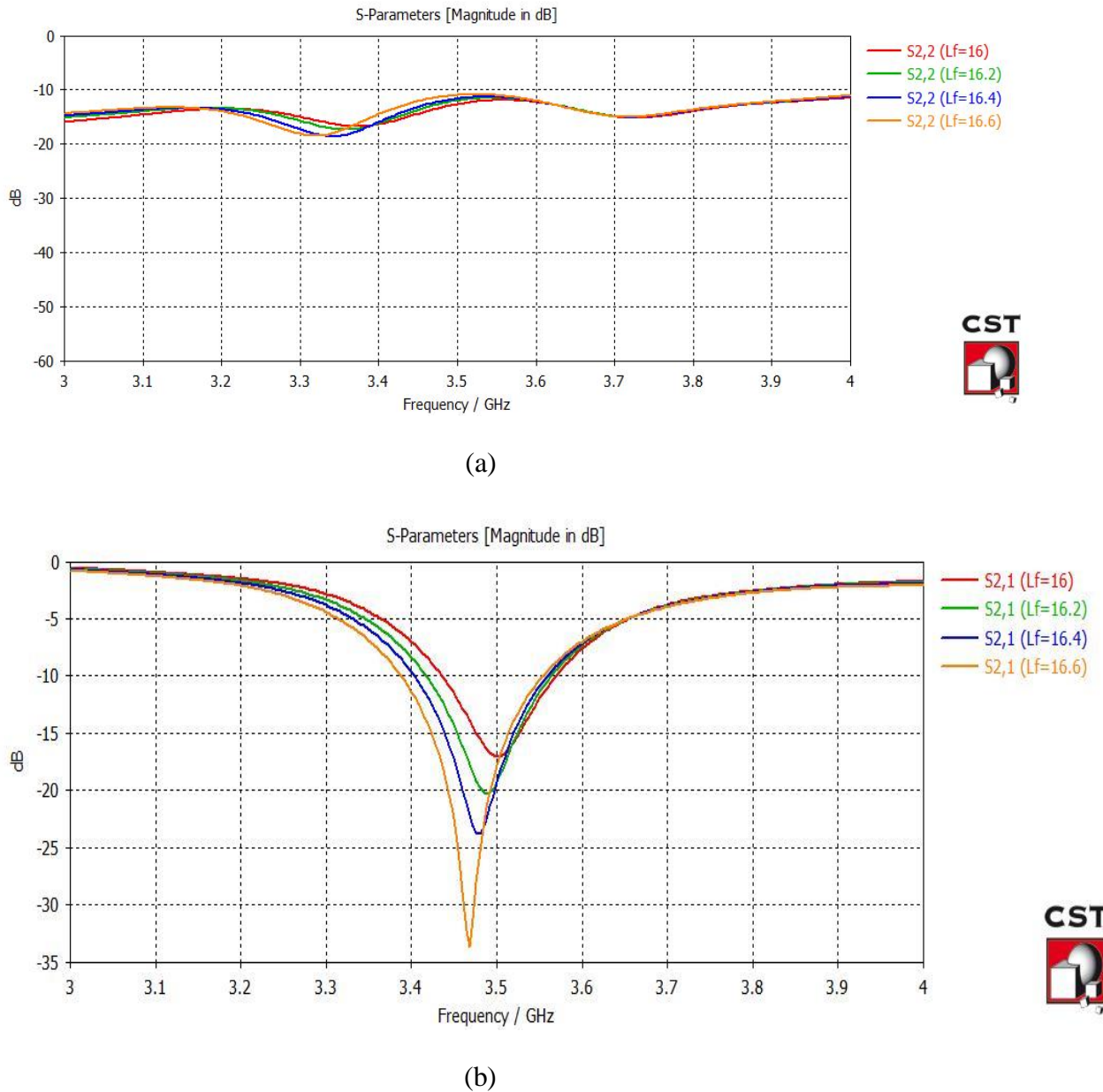
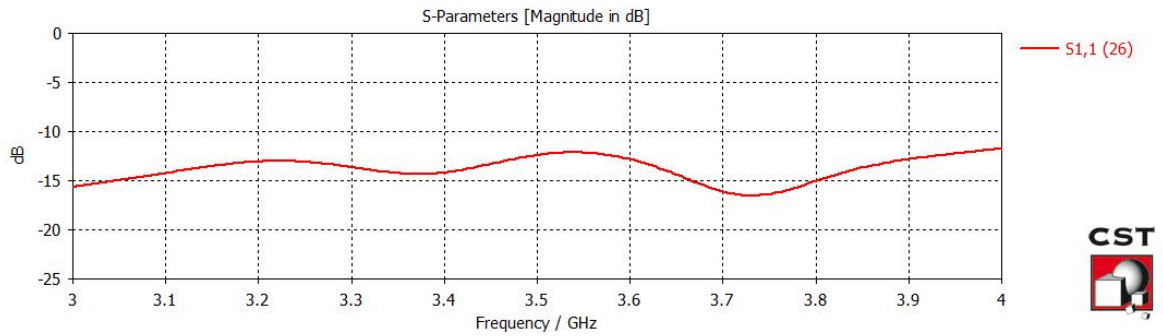


Figure III-3: influence de LF sur le fonctionnement de l'antenne.

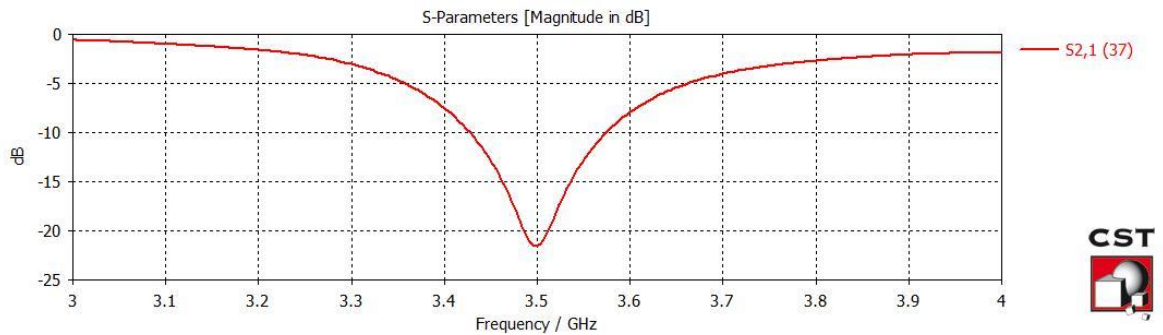
III.3.4 Caractéristique de l'antenne étudiée

III.3.4.1 Coefficients de réflexion et d'isolation

La figure suivante nous montre les résultats de simulation du coefficient de réflexion et d'isolation de notre antenne (les dimensions de l'antenne sont données par la figure III.1). On remarque qu'il y a une bonne isolation entre les deux ports d'alimentation à la fréquence de résonance 3.5GHz avec une valeur environ de -22db. L'antenne reste adaptée entre 3 et 4GHz avec une très large bande passante.



(a)



(b)

Figure III-4: coefficients de réflexion(a), coefficient d'isolation entre deux ports(b)

III.3.4.2 Etudes des courants du surface

La répartition du champ électrique sur le patch est un autre moyen de valider son fonctionnement pour la polarisation circulaire

A la fréquence de résonance (3.5GHz), on peut observer cette polarisation circulaire. Une représentation du courant électrique à la surface du patch en fonction du temps figure 3.16, permet d'observer le phénomène de rotation du champ. Cette rotation est dans le sens des aiguilles d'une montre, ce qui correspond bien à une polarisation circulaire droite.

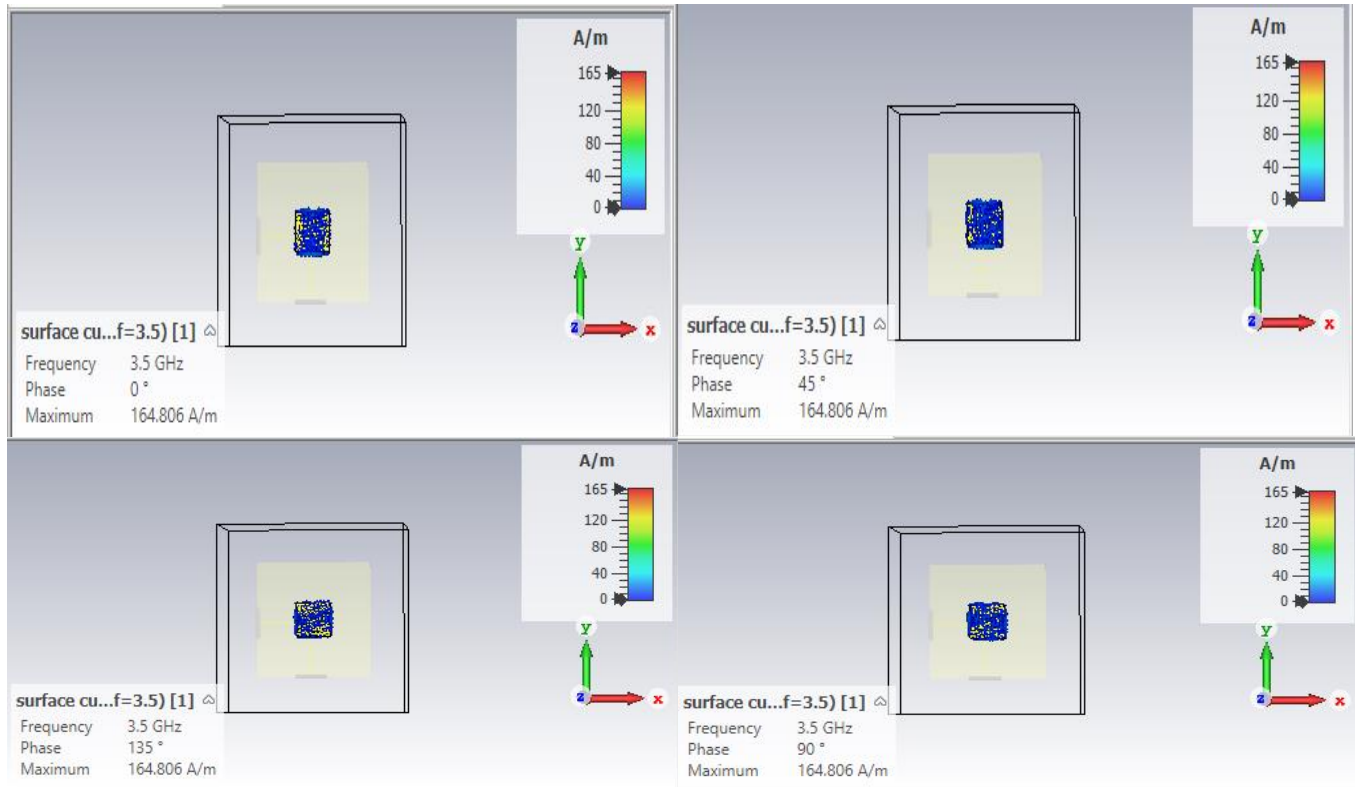


Figure III-5 : Etude du courant de surface

III.3.5 Caractéristiques de la polarisation circulaires

Les résultats de simulation de l'antenne, en termes de rapport axial et gain, sont présentés sur la figure suivante. La figure montre que le rapport axial n'excède pas 3 dB sur toute la bande passante de l'antenne [3 – 4 GHz]. Le gain de l'antenne est aussi indiqué ; Il atteint 7.18 dBi à sa valeur maximale pour $f=3.5$ GHz.

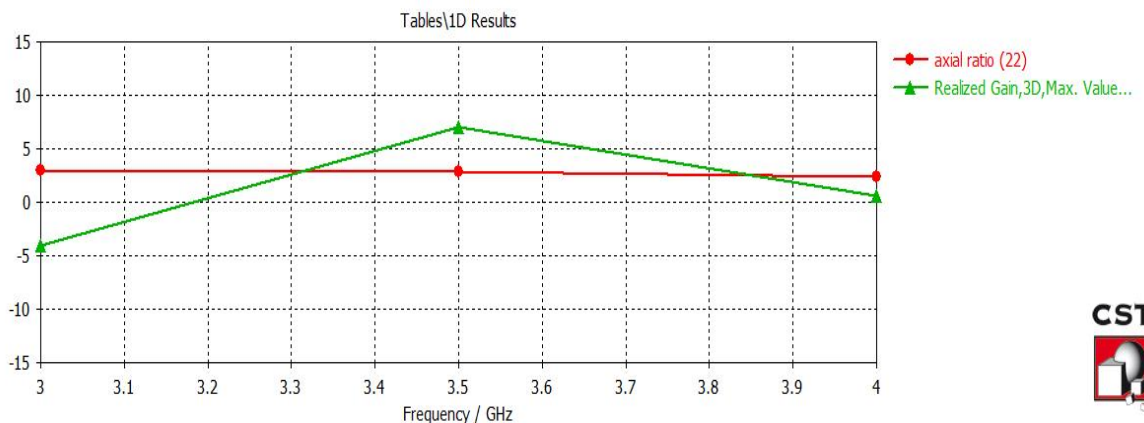


Figure III-6 : Rapport axial et gain en fonction de la fréquence

III.3.5.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Les diagrammes de

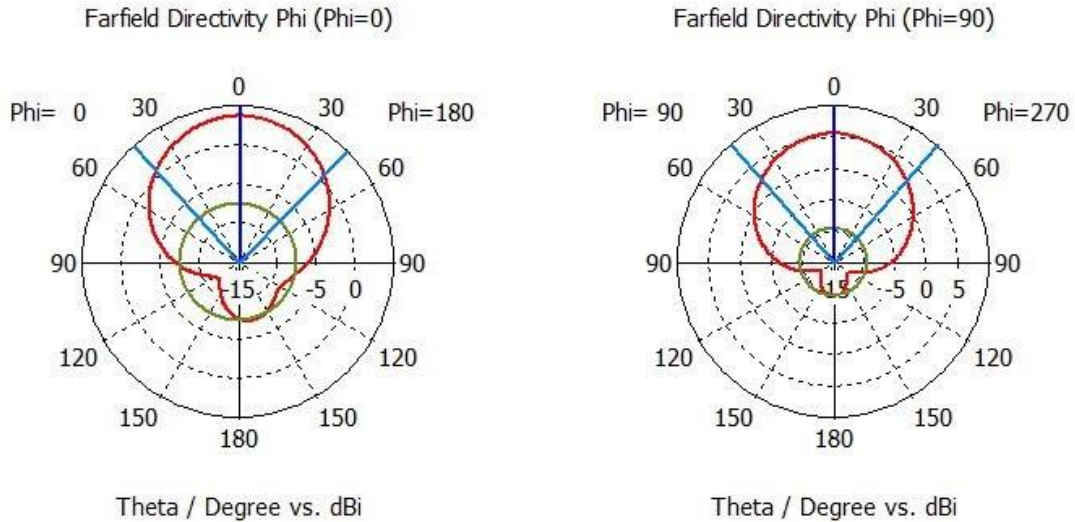


Figure III-7 : Diagramme de rayonnement

rayonnement en champ lointain de la structure finale dans les plans $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 90^\circ$ ont été calculés à la fréquence $f = 3.5 \text{ GHz}$. Cependant un rayonnement arrière existe. Il est dû à la ligne d'alimentation et la fente de couplage.

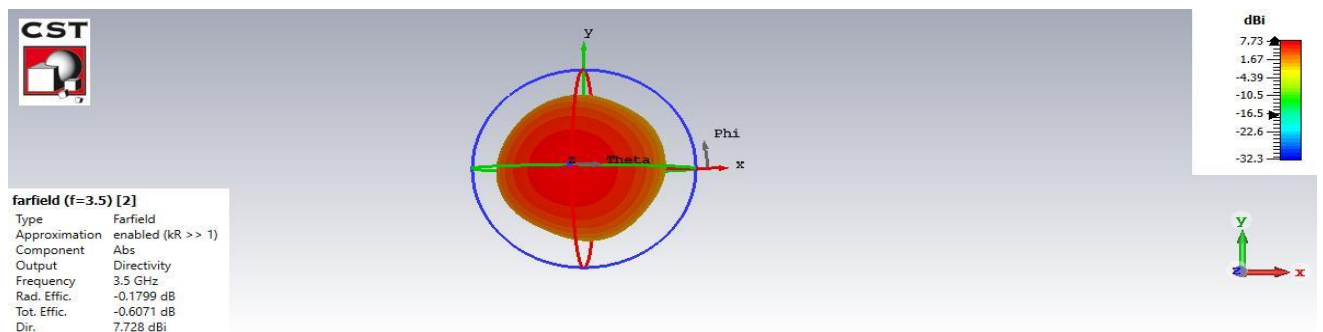


Figure III-8 : Diagramme de rayonnement en 3D

On constate que le rayonnement de notre antenne est omnidirectionnel ; C'est ce est recherché.

III.4 Conception d'une antenne fonctionnant à 2.1GHz

Pour des problèmes de disponibilité de matériels, une réalisation d'une antenne à double polarisation circulaire ne sera faite que pour un fonctionnant à 2,1 GHz qui est l'une des bandes de fréquences 5G utilisées en Allemagne. Ces fréquences à ondes longues de 2,1 GHz sont bien adaptées pour couvrir de vastes zones.[6]

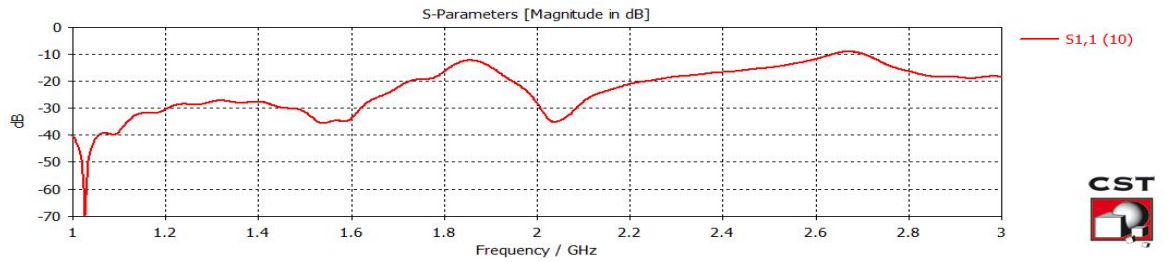
L'analyseur de réseau vectoriel que nous avons à notre disposition est Protek A333. Sa bande de fréquence est comprise entre 300 kHz et 3,2 GHz.

Nous avons choisi, comme substrat inférieur et supérieur du FR4 qui est le seul à notre disposition et qui à une permittivité relative $\epsilon_r=4.3$ et d'épaisseur $h=1.6$ mm. Voici les résultats de calcul des dimensions approximatives de l'antenne pour la faire résonner à 2.1GHz.

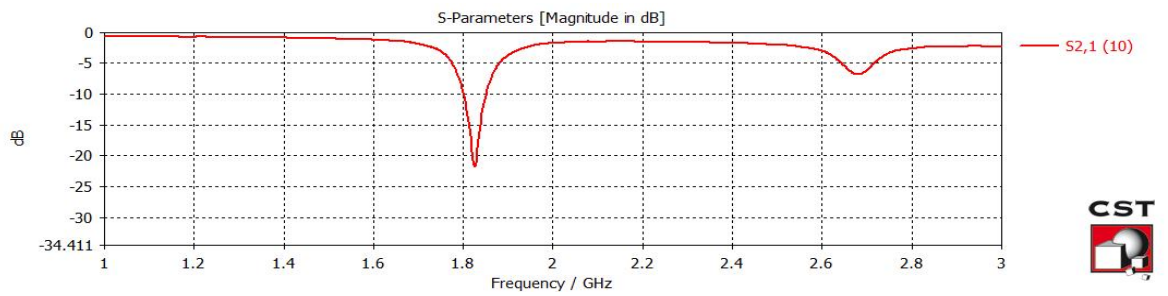
$W=L=34.4$ mm ; $L_f=24$ mm ; $L_s=100$ mm ; $W_s=100$ mm.

Après optimisation avec CST les valeurs sont :

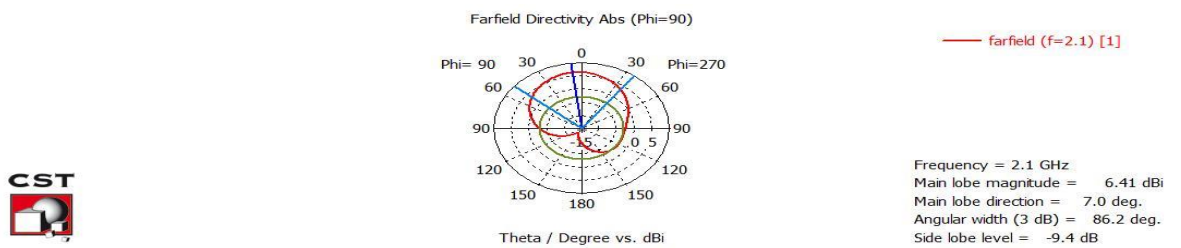
$W= L=31$ mm , $L_f=23$ mm ; $L_s=100$ mm ; $W_s=100$ mm.



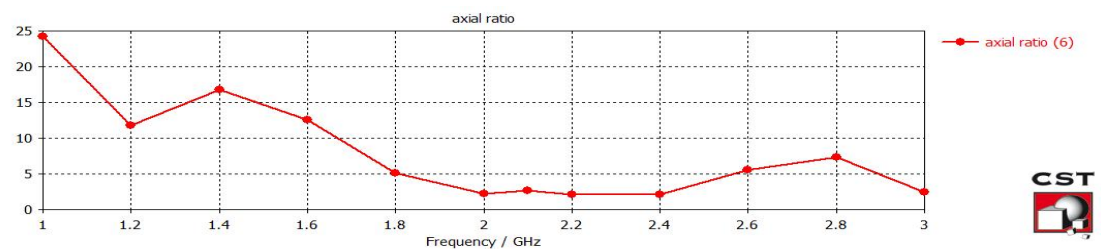
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III-9:-coefficient de réflexion(a),-coefficient d'isolation(b) , -Diagramme de rayonnement (c) , -rapport axial(d).

D'après la figure III-9(a) on remarque que l'antenne reste adaptée entre 1 et 3 GHz avec un gain de 6.41dbi.

Chapitre III conception et simulation

Le rapport axial reste au-dessous de 3 dB entre 2 et 2.4 GHz. La bande passante étroite du rapport axial est due au choix du substrat qui a une constante diélectrique plus élevée et une hauteur mince, un substrat plus épais est préféré car il a une proportionnalité directe avec la bande passante alors que la constante diélectrique est inversement proportionnelle à la bande passante comme plus la permittivité relative est faible, plus la bande passante est obtenue.

III.5 Réalisation pratique

Les résultats de la simulation de l'antenne qui a été dimensionnée pour fonctionner à 2.1GHz sont comparés à ceux issus de la réalisation pratique dans le laboratoire de l'université de Mostaganem. L'antenne réalisée est présentée dans la figure suivante

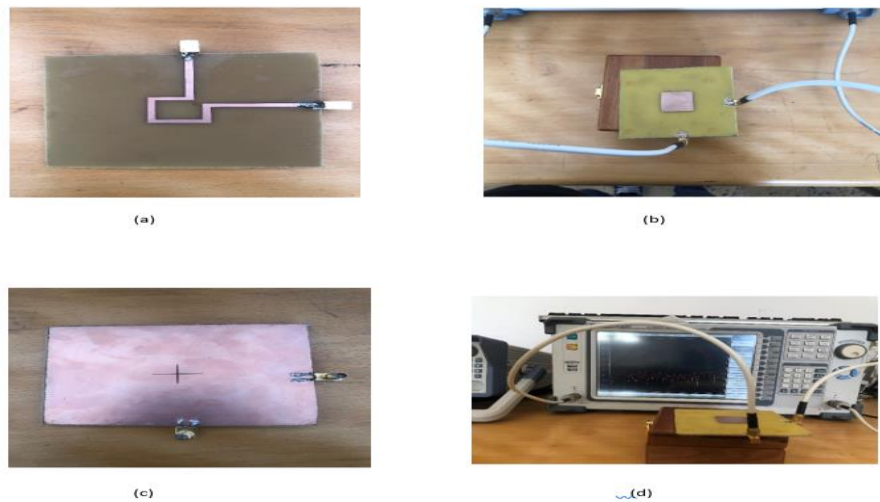


Figure III-10 : (a) ligne d'alimentation, (b) patch, (c) fente en croix, (d) banc de mesure.

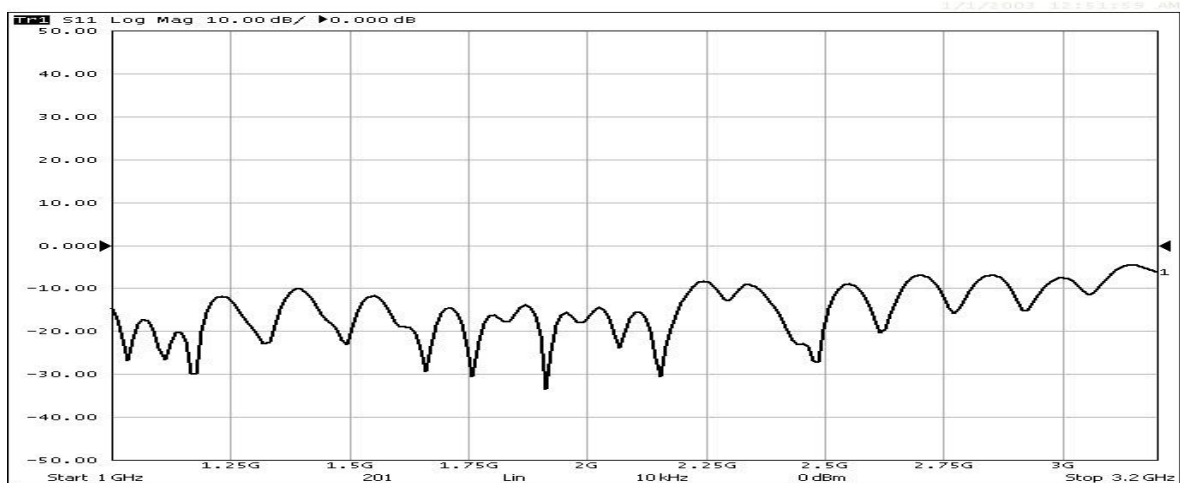


Figure III-11: coefficient de réflexion mesuré

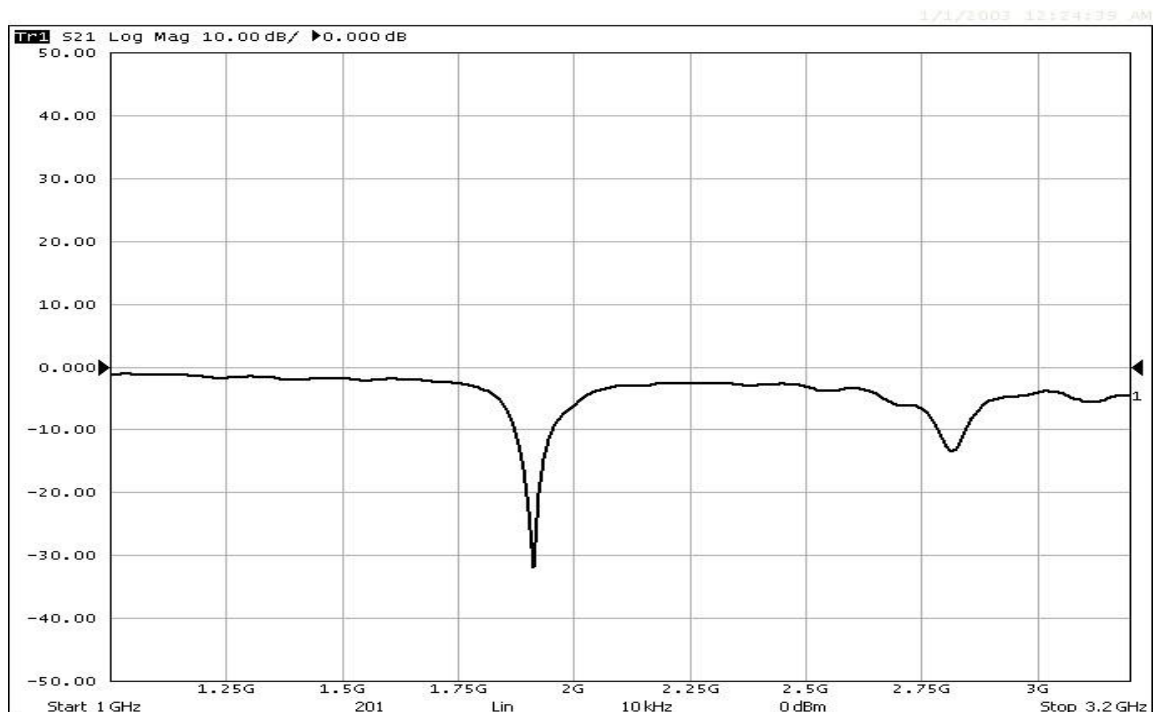


Figure III-12: coefficient d'isolation mesuré

On remarque que les valeurs du coefficient de réflexion simulé et mesuré à la fréquence 2.1GHz sont toutes à -30dB. Le coefficient de réflexion reste adapté entre 1 et 2.5GHz, ce qui nous offre une très large bande passante.

L'isolation S_{12} mesurée entre les deux ports d'alimentation 1 et 2 est de -30dB, figure III.12. Compte-tenu de cette valeur, on constate que les deux ports ne sont pas très correctement isolés à la fréquence 2.1 GHz. Le décalage entre les résultats de simulation et de mesure est principalement dû au gap d'air présent entre les différentes couches des substrats de l'antenne, à l'imperfection du processus de fabrication.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit, dimensionné et simulé une antenne à double polarisation circulaire alimenté par couplage par fente en croix pour un fonctionnement à 3.5GHz. Les calculs préliminaires pour le dimensionnement sont en accord avec l'optimisation donnée avec le logiciel CST. Une large bande passante a été observée. Pour des problèmes de disponibilité de matériels, une réalisation d'une antenne à double polarisation circulaire n'a été faite que pour un fonctionnement à 2,1 GHz qui est l'une des bandes de fréquences 5G utilisées en Allemagne.

Conclusion Générale

La conception et caractérisation expérimentale d'une antenne à double polarisation circulaire pour les applications 5G a fait l'objet des travaux présentés dans ce mémoire.

Le logiciel CST nous a permis de simuler une antenne à double polarisation circulaire fonctionnant à 3.5GHz. Avant cette simulation nous avons passer par des calculs analytique afin d'avoir des valeurs approximatives, puis la conception et l'optimisation avec le logiciel CST a permis de le faire résonner à la fréquence de 3.5Ghz.

Pour la réalisation pratique nous avons réalisé une étude afin d'expliquer le fonctionnement de l'antenne, c'est une étude paramétrique détaillée des éléments qui composent l'antenne (ligne micro-ruban, fente de couplage et patches) . Cette étude a permis la réalisation pratique de l'antenne sur laquelle nous avons su quels paramètres modifier pour obtenir une fréquence de travail optimale. En raison du manque de matériaux, nous avons conçu notre antenne à 2,1 GHz en utilisant 2 substrats similaires, ce qui a réduit la précision des résultats car différents substrats pour le patch et la ligne de transmission sont préférés. (RT Duroid de permittivité $\epsilon_r = 2.2$ et d'épaisseur $h=3.175$ pour le patch et du FR-4 de permittivité $\epsilon_r= 4.4$ et d'épaisseur $h=1.6$ pour la ligne de transmission).

En fait pour la ligne d'alimentation il est préférable d'avoir un diélectrique grand d'épaisseur faible pour garder le champ à l'intérieur du substât pour le faire guider dans la ligne d'alimentation.

Et pour le patch c'est tout à fait le contraire c'est-à-dire un diélectrique faible d'épaisseur grande pour faire rayonner tout le champ à travers le patch.

Bibliographie

- [1]wikipedia. (2022, Février 2). Récupéré sur wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>
- [2]Solution, v. (2022, Février 4). Récupéré sur Solution, viavi: <https://www.viavisolutions.com/fr-fr/architecture-5g>
- [3]https://fr.wikipedia.org/wiki/MIMO_massif. (2022, FEVRIER 3). Récupéré sur https://fr.wikipedia.org/wiki/MIMO_massif.
- [4]Le guide, u. (2022, FEVRIER 4). Récupéré sur Le guide, ultime: <https://www.lebigdata.fr/5g-tout-savoir#:~:text=La%205G%20fut%20l'un,4%20%C3%A0%203%2C8%20GHz>.
- [5]5G, A. c. (2022, FEVRIER 8). Récupéré sur 5G, Abimes concept les avantages et inconvennien de la 5G: <https://www.abime-concept.com/blog/2020/09/29/les-avantages-et-inconvenients-de-la-5g/#:~:text=%E2%80%93L'int%C3%A9r%C3%AAt%20de%20la%205G,de%20productivite%C3%A9%20pour%20l'entreprise%E2%80%A6>
- [6]HAROUNI, Z. (2022, MARS 13). *Conception et caractérisation d'une Rectenna à double*. Récupéré sur HAROUNI, Zied.
- [7]AG, D. T. (2022, AVRIL 2). Récupéré sur AG, Deutsche Telekom: <https://www.telekom.com/en/company/details/5g-frequencies-everything-you-need-to-know-622934>
- [8]Peter L. Sullivan, a. D. (2022, AVRIL 7). Récupéré sur Peter L. Sullivan.
- [9]Vivek Rathi, G. K. (2022, AVRIL 10). Récupéré sur Vivek Rath.
- [10]Wu Bi-yan, “. C. (2022, AVRIL 15). Récupéré sur Wu Bi-yan, “Aperture Coupled H Shape Miniature Patch Antenna”, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*, Vol. 48, No.7, pp 5816 – 5818, 2007.