

Conception et réalisation d'antennes en technologie LTCC

par

Chahrazad BENSID

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE  
LA DIPLÔME MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE  
M. Sc. A

MONTRÉAL, LE 07 OCTOBRE 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Chahrazad bensid, 2025



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ammar Kouki, directeur de mémoire  
Département du génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. René Jr.Landry, président du jury  
Département du génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Dominic Deslandes, membre du jury  
Département du génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 09 SEPTEMBRE 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, le Professeur Ammar B. Kouki, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité, ses conseils éclairés et la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce projet de mémoire. Son expertise et son soutien constant ont été déterminants pour l'aboutissement de ce travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à Monsieur René Jr. Landry, qui a accepté de présider ce jury de soutenance, ainsi qu'à Monsieur Dominic Deslandes, qui a bien voulu faire partie de ce jury en qualité d'examinateur. Votre disponibilité et votre engagement à évaluer ce travail de recherche, malgré vos nombreuses responsabilités académiques et professionnelles, représentent un honneur pour moi. La confiance que vous accordez à ce projet de recherche en acceptant d'y consacrer votre temps et votre expertise constitue déjà une reconnaissance précieuse. Je mesure pleinement la chance qui m'est offerte de pouvoir présenter et défendre mes travaux devant un jury de cette qualité.

Je remercie également l'ensemble des membres du laboratoire LACIME pour leur accueil et leur soutien. J'adresse une mention particulière à M. Normand Gravel et M. Mustapha Belhadj pour leur aide précieuse dans le processus de fabrication du prototype, leur disponibilité et leur bonne humeur, qui ont grandement facilité l'avancement de mes travaux en laboratoire.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à mes parents, mes frères, mes sœurs, ainsi qu'à Yamin, pour leur présence indéfectible à chaque étape de ce parcours. Malgré la distance, ils m'ont toujours offert un soutien moral inestimable, beaucoup d'amour et une motivation constante dans les moments les plus exigeants. Je leur dédie ce mémoire avec toute ma gratitude.



# Conception et réalisation d'antennes en technologie LTCC

Chahrazad BENSID

## RÉSUMÉ

La demande croissante en systèmes de communication sans fil à haut débit, tels que les réseaux 5G, les infrastructures IoT et les radars à ondes millimétriques, nécessite des solutions d'antennes compactes et performantes. La technologie LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramics) constitue une plateforme prometteuse pour ces applications grâce à sa structure multicouche, sa stabilité électromagnétique et sa compatibilité avec l'intégration de composants passifs et rayonnants.

Dans ce contexte, ce mémoire porte sur la conception, la simulation, la fabrication et la caractérisation expérimentale d'antennes intégrées réalisées en technologie LTCC. Deux antennes microstrip fonctionnant à 2,45 GHz ont d'abord été développées afin de valider la faisabilité de cette technologie dans la bande ISM. Ces structures ont présenté un gain mesuré supérieur à 1.6 dBi et une efficacité rayonnée dépassant 85 %.

Pour les applications à plus haute fréquence, un élément d'antenne à résonateur diélectrique (ARD) a été conçu puis intégré dans un réseau  $2 \times 2$  avec un réseau d'alimentation corporatif, l'ensemble étant fabriqué sur un substrat LTCC. La structure a atteint un gain mesuré de 11,8 dBi et une efficacité rayonnée supérieure à 90 % dans la bande 26–30 GHz, répondant ainsi aux exigences des communications à haut débit en ondes millimétriques.

Ce travail présente une démarche complète, allant de la modélisation électromagnétique jusqu'à la validation expérimentale, et ouvre la voie à de nouveaux développements d'antennes sur substrat LTCC pour les technologies sans fil émergentes.

**Mots-clés :** LTCC, antenne à résonateur diélectrique (ARD), antenne patch microstrip, bande ISM, ondes millimétriques, réseau d'antennes, intégration haute fréquence



# Design and Implementation of antennas Using LTCC technology

Chahrazad BENSID

## ABSTRACT

The growing demand for high-data-rate wireless communication systems such as 5G networks, IoT infrastructure, and millimeter-wave radar requires compact and high-performance antenna solutions. Low-Temperature Co-fired Ceramics (LTCC) technology offers a promising platform for such applications due to its multilayer architecture, electromagnetic stability, and compatibility with passive and radiating component integration.

In this context, this thesis focuses on the design, simulation, fabrication, and experimental characterization of integrated antennas implemented using LTCC technology. Two microstrip patch antennas operating at 2.45 GHz were first developed to validate the feasibility of this approach in the ISM band. These structures demonstrated a measured gain exceeding 1.6-dBi and radiation efficiency above 85%.

For higher-frequency applications, a dielectric resonator antenna (DRA) element was designed and integrated into a  $2 \times 2$  antenna array with a corporate feed network, all fabricated on an LTCC substrate. This structure achieved a measured gain of 11.8 dBi and radiation efficiency above 90% in the 26–30 GHz band, meeting the performance requirements for mm-Wave communication.

This work presents a complete methodology from electromagnetic modeling to experimental validation and opens the way for future development of LTCC-based antennas in emerging wireless technologies.

**Keywords:** LTCC, dielectric resonator antenna (DRA), microstrip patch antenna, ISM band, mm-Wave, antenna array, high-frequency integration



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE .....	9
1.1 Introduction .....	9
1.2 Technologie LTCC .....	9
1.2.1 Matériaux diélectriques LTCC .....	10
1.2.2 Avantages de la technologie LTCC .....	13
1.2.3 Limitations de la technologie LTCC .....	15
1.2.4 Procédé de fabrication LTCC à l'ÉTS .....	17
1.2.5 Antennes en technologie LTCC .....	20
1.3 Les antennes à résonateur diélectrique .....	26
1.3.1 Investigations sur les antennes à résonateur diélectrique .....	26
1.3.2 Formes des antennes à résonateur diélectrique .....	27
1.3.3 Caractéristiques fondamentales des antennes à résonateur diélectrique (ARD) .....	28
1.3.4 Matériaux utilisés dans les ARD .....	29
1.3.5 Techniques d'alimentation des antennes à résonateur diélectrique (ARD) .....	31
1.3.6 La Technologie LTCC appliquée aux antennes à résonateur diélectrique (ARD) .....	35
1.4 Réseau d'antennes .....	38
1.4.1 Réseaux à alimentation en série .....	38
1.4.2 Réseaux à alimentation en parallèle .....	39
1.4.3 Réseaux à alimentation hybride .....	39
1.5 Conclusion .....	40
CHAPITRE 2 CONCEPTION D'UNE ANTENNE PATCH EN TECHNOLOGIE LTCC À 2,45 GHz .....	41
2.1 Introduction .....	41
2.2 Méthodes de conception .....	42
2.3 La première antenne proposée .....	43
2.4 La deuxième Antenne Proposée .....	51
2.5 Fabrication et mesures .....	57
2.6 Conclusion .....	58
CHAPITRE 3 CONCEPTION ET FABRICATION D'UN RESAUX ARD LTCC POUR DES APPLICATIONS MILLIMÉTRIQUES .....	59
3.1 Introduction .....	59
3.2 Partie I : ARD à un seul élément .....	60
3.2.1 Conception de l'élément résonateur diélectrique .....	60
3.2.2 Simulation et discussion des résultats .....	63

3.2.3	Fabrication et Validation .....	68
3.3	Partie II : Réseau d'ARD .....	70
3.3.1	Conception de l'élément résonateur diélectrique .....	70
3.3.2	Validation et discussion des résultats.....	72
3.4	Conclusions.....	75
CONCLUSION & RECOMMANDATIONS .....		77
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		81

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 0.1	Objectifs et spécifications initiales .....
Tableau 1.1	LTCC comparaison des Propriétés avec d'autres substrats couramment utilisés .....
Tableau 1.2	Matériaux diélectriques utilisés pour la conception d'ARD (2023–2025).31
Tableau 1.3	Comparatif des topologies d'alimentation des réseaux d'antennes .....
Tableau 2.1	Dimensions géométriques de l'antenne conçue .....
Tableau 2.2	Dimensions géométriques de l'antenne conçue .....
Tableau 3.1	Paramètres de conception de l'élément ARD elliptique proposé .....



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Flux de procédé LTCC@ÉTS .....20
Figure 1.2	Géométrie de l'antenne patch proposée. (a) Vue de dessus ; (b) Détail du patch elliptique fendu.....21
Figure 1.3	Photo de l'antenne proposée .....21
Figure 1.4	Vues avant et arrière de l'antenne fabriquée .....22
Figure 1.5	Antenne LTCC à gain élevé intégrée à un LNA .....23
Figure 1.6	Configuration de l'antenne Vue 3D.....23
Figure 1.7	Vue 3D de l'antenne proposée .....24
Figure 1.8	Configuration de l'antenne SAA proposée. (a) Vue de dessus. (b) Vue en coupe des couches LTCC .....25
Figure 1.9	Géométrie de l'antenne LTCC proposée : (a) vue en perspective de la structure métallique, (b) vue latérale.....25
Figure 1.10	Différentes formes d'antennes à résonateur diélectrique .....28
Figure 1.11	Antenne à résonateur diélectrique (ARD) alimentée par une sonde coaxiale .....32
Figure 1.12	Technique d'alimentation de la ligne microruban pour exciter l'ARD.....33
Figure 1.13	Technique d'alimentation coplanaire pour exciter l'ARD .....33
Figure 1.14	Sonde de guide d'ondes alimentant une ARD .....34
Figure 1.15	Alimentation couplée à l'ouverture.....35
Figure 1.16	Topologie de l'antenne ARD planaire à double polarisation proposée : vues éclatées et dimensions de (a) la sous-matrice $2 \times 2$ , (b) les réseaux d'alimentation ; (c) le réseau complet.....36
Figure 1.17	Résonateur diélectrique fabriqué (à gauche) et ouverture d'alimentation (à droite).....36
Figure 1.18	Antenne réseau à résonateurs diélectriques fabriquée .....37

Figure 1.19	Schéma d'antenne ARD couplée par fente à ligne microruban.....	38
Figure 2.1	Paramètres de conception de l'antenne proposée. (a) vue du dessus, (b) vue du dessous .....	44
Figure 2.2	Conception étape par étape d'une antenne proposée .....	45
Figure 2.3	Coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ) pour différentes configurations d'antennes	46
Figure 2.4	Le paramètre $S_{11}$ de l'antenne proposée.....	47
Figure 2.5	Taux d'ondes stationnaires de l'antenne proposée .....	48
Figure 2.6	Impédance d'entrée ( $Z_{11}$ ) de l'antenne conçue .....	49
Figure 2.7	Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2,45 GHz, (a) diagramme de rayonnement 3D, (b) 2D plans E et H .....	50
Figure 2.8	Gain et efficacité de rayonnement de l'antenne .....	50
Figure 2.9	Paramètres de conception de l'antenne proposée .....	51
Figure 2.10	Antenne à conception étape par étape.....	52
Figure 2.11	Paramètre $S_{11}$ pour différentes configurations d'antennes.....	53
Figure 2.12	Paramètre $S_{11}$ de l'antenne conçue .....	54
Figure 2.13	Taux d'ondes stationnaires de l'antenne proposée .....	54
Figure 2.14	Impédance $Z_{11}$ de l'antenne conçue.....	55
Figure 2.15	Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2,45 GHz, (a) diagramme de rayonnement 3D, (b) 2D plans E et H .....	56
Figure 2.16	Gain de l'antenne proposée.....	56
Figure 2.17	Prototype fabriqué de l'antenne proposée , (a) La première antenne proposée et (b) La deuxième antenne proposée .....	57
Figure 2.18	Prototype fabriqué de l'antenne proposée , (a) La première antenne proposée et (b) La deuxième antenne proposée .....	58
Figure 3.1	Géométrie de l'ARD elliptique basée sur la LTCC proposée : (a) vue de dessus, (b) vue de dessous .....	61
Figure 3.2	Antenne résonateur diélectrique de configuration cylindrique.....	63

Figure 3.3	$S_{11}$ simulé de l'élément ARD cylindrique proposé .....	64
Figure 3.4	Affaiblissement de retour simulé ( $S_{11}$ ) de l'élément ARD elliptique proposé.....	65
Figure 3.5	Gain et efficacité de rayonnement simulés .....	65
Figure 3.6	Diagrammes de rayonnement 3D simulés à 28,65 GHz (à gauche) et 29,5 GHz (à droite) .....	66
Figure 3.7	Diagrammes de rayonnement polaire 2D simulés dans le plan E et le plan H à 27.2, 28.65, 29.5 et 30.5 GHz.....	67
Figure 3.8	Distribution simulée du champ électrique à 28.65 GHz et 29.5 GHz .....	68
Figure 3.9	l'antenne ARD fabriquée: (a) vue de dessus, (b) vue de dessous .....	69
Figure 3.10	$S_{11}$ simulés et mesurés d'ARD réalisé .....	70
Figure 3.11	Vue de dessus du réseau ARD $2 \times 2$ avec structure LTCC et réseau d'alimentation de la couche supérieure .....	71
Figure 3.12	Antenne réseau (ARD) fabriquée .....	73
Figure 3.13	Paramètres $S_{11}$ simulés et mesurés du réseau d'ARD réalisé .....	74
Figure 3.14	Gain et l'efficacité de rayonnement simulés pour le réseau ARD proposé	75



## LISTE DES ABRÉVIATIONS

AiP	Antenne intégrée dans un boîtier (Antenna-In-Package)
CST	Computer Simulation Technology
ARD	Antenne à Résonateur Diélectrique (Dielectric Resonator Antenna)
EIRP	Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (Equivalent Isotropically Radiated Power)
EMC	Compatibilité Électromagnétique (Electromagnetic Compatibility)
ERP	Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (Effective Radiated Power)
FR4	Flamme Retardante niveau 4 (type de matériau de PCB)
GHz	Gigahertz – $10^9$ Hertz
HFSS	High Frequency Structure Simulator (logiciel de simulation électromagnétique)
ISM	Industrielles, Scientifiques et Médicales (Industrial, Scientific and Medical)
LNA	Amplificateur à faible bruit (Low Noise Amplifier)
LTCC	Céramique frittée à basse température (Low Temperature Co-fired Ceramic)
MEMS	Systèmes microélectromécaniques (Micro-Electro-Mechanical Systems)
MIMO	Entrée multiple, sortie multiple (Multiple-Input Multiple-Output)
PCB	Circuit imprimé (Printed Circuit Board)
PSO	Optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization)
QFN	Quad Flat No-lead package (boîtier à broches plates sans plomb)
RF	Radio Frequency
SAR	Taux d'absorption spécifique (Specific Absorption Rate)
SMA	SubMiniature version A (connecteur coaxial)
SNR	Rapport signal sur bruit

VSWR	Rapport d'onde stationnaire de tension (Voltage Standing Wave Ratio)
DR	Résonateur Diélectrique
TEM	Mode transverse électromagnétique
TE	Mode transverse électrique
TM	Mode transverse magnétique

## **LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**

Hz	Hertz GHz : Gigahertz
Mm	Millimètre
°C	Degré Celsius
dB	Décibel
W	Watt
µm	Micromètre
pF	Picofarad



## INTRODUCTION

Dans un contexte technologique marqué par la miniaturisation, l'intégration fonctionnelle et les hautes fréquences, les antennes basées sur la technologie LTCC (*Low Temperature Co-Fired Ceramics*) se démarquent comme une solution clé pour les systèmes de communication de nouvelle génération. Le procédé LTCC repose sur la co-cuisson à basse température ( $<1000$  °C) de couches céramiques diélectriques et métalliques, permettant la fabrication de structures multicouches tridimensionnelles, compactes et fiables (Agiwal et al, 2021).

L'un des atouts majeurs de cette technologie réside dans sa capacité à intégrer non seulement les éléments rayonnants, mais aussi des composants passifs tels que les résistances, les capacités et les inductances, directement à l'intérieur du substrat. Cette intégration verticale, rendue possible par la fabrication multicouche, permet de réaliser des modules RF monolithiques où les antennes, les circuits de polarisation, les filtres, et les lignes de transmission sont regroupés dans une seule et même structure (Lee et al., 2006). Ce niveau d'intégration réduit les pertes, améliore les performances RF, diminue l'encombrement, et augmente la robustesse des systèmes.

Grâce à leur composition céramique optimisée, les substrats LTCC offrent une excellente tenue électromagnétique, caractérisée par une faible tangente de pertes, une grande stabilité thermique, ainsi qu'un bon comportement aux hautes fréquences. Ces caractéristiques sont particulièrement bénéfiques pour les applications millimétriques, où les longueurs d'onde plus courtes exigent une très faible atténuation des signaux et une précision dimensionnelle accrue. Le LTCC, par sa faible constante diélectrique et sa capacité à conserver ses propriétés même à des fréquences élevées, s'avère ainsi idéal pour les bandes autour de 28 GHz et au-delà, couramment exploitées dans les réseaux 5G (Tormey et al, 2021).

Par leur nature, les antennes LTCC permettent également des conceptions innovantes telles que des réseaux d'antennes à balayage de faisceau, des antennes à polarisation reconfigurable ou à large bande passante, sans ajout de circuits externes. Ce potentiel les rend particulièrement pertinentes pour des applications critiques telles que la 5G, les réseaux IoT

denses, les radars automobiles embarqués à haute résolution, ou encore les communications par satellite dans des environnements hostiles.

Ainsi, les antennes LTCC représentent une réponse technologique stratégique aux défis de l'ère des hautes fréquences. Leur capacité à conjuguer compacité, fiabilité et performance dans des bandes millimétriques en fait une solution de référence pour les systèmes sans fil de prochaine génération.

## Motivation

Le choix de la technologie LTCC pour la réalisation d'antennes haute fréquence s'inscrit dans un contexte technologique où les exigences de miniaturisation, de performance et d'intégration fonctionnelle sont devenues critiques. Les systèmes de communication modernes, notamment ceux destinés aux applications 5G, aux communications par satellite et aux systèmes embarqués, imposent des contraintes dimensionnelles et de performance qui dépassent les capacités des substrats conventionnels. Cette évolution technologique nécessite une approche matériau qui concilie propriétés électromagnétiques exceptionnelles, flexibilité de conception et compatibilité avec les processus industriels avancés.

Les substrats traditionnels en électronique RF révèlent des limitations critiques pour les applications haute fréquence contemporaines. Le FR4, malgré sa popularité, devient inadéquat au-delà de 5 GHz en raison de ses pertes diélectriques élevées ( $\tan \delta > 0.02$ ) et de ses hétérogénéités structurelles qui dégradent l'efficacité de rayonnement et compromettent la stabilité fréquentielle. L'alumine, bien qu'offrant de meilleures propriétés diélectriques ( $\tan \delta \approx 0.001$ ), impose des contraintes de fabrication majeures avec son processus de cuisson haute température ( $>1500^{\circ}\text{C}$ ) qui limite l'usage de conducteurs nobles et complique l'intégration multicouche, restreignant ainsi les architectures tridimensionnelles essentielles aux antennes compactes modernes et empêchant l'optimisation géométrique fine nécessaire aux performances électromagnétiques optimales.

La technologie LTCC se distingue par des propriétés électromagnétiques exceptionnelles qui répondent directement aux défis des antennes haute fréquence. La permittivité relative stable ( $\epsilon_r = \pm 0.1$ ) sur une large plage de température ( $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+125^{\circ}\text{C}$ ) garantit une stabilité

fréquentielle remarquable, paramètre critique pour les applications où la dérive thermique peut compromettre les performances système. Cette stabilité est particulièrement importante dans les environnements industriels ou embarqués où les variations thermiques sont significatives.

Les pertes diélectriques ultra-faibles du LTCC ( $\tan \delta < 0.005$  à 10 GHz) permettent de maintenir une efficacité de rayonnement élevée même dans la bande millimétrique. Cette caractéristique se traduit directement par une amélioration du gain antennaire et une extension de la bande passante utilisable. L'impact de ces faibles pertes devient particulièrement critique aux fréquences millimétriques où toute dégradation diélectrique entraîne une perte exponentielle de performance. Les mesures expérimentales montrent que les antennes LTCC conservent une efficacité supérieure à 85% jusqu'à 60 GHz, performance inatteignable avec les substrats conventionnels.

Le processus de co-cuisson à température modérée (850-900°C) constitue un avantage technologique déterminant qui distingue le LTCC des autres céramiques techniques. Cette température de cuisson autorise l'utilisation de conducteurs à très faible résistivité tels que l'argent ou l'or, métaux qui conservent leurs propriétés électriques optimales durant le processus de fabrication. Cette compatibilité matériau se traduit par une amélioration significative de la qualité des courants de surface dans les éléments rayonnants, réduisant les pertes ohmiques et augmentant le coefficient de qualité des résonateurs. L'utilisation de conducteurs nobles améliore également la stabilité temporelle des performances antennaires en éliminant les phénomènes d'oxydation et de migration électrolytique. Cette stabilité est particulièrement critique dans les applications spatiales ou industrielles où la durée de vie opérationnelle dépasse dix ans. Les mesures de vieillissement accéléré montrent que les structures LTCC avec conducteurs argent maintiennent leurs caractéristiques électriques avec une dérive inférieure à 0.1% après 1000 heures à 125°C sous contrainte électrique.

Les propriétés mécaniques du LTCC contribuent significativement à sa pertinence pour les applications antennaires exigeantes. La résistance à la flexion ( $>300$  MPa) et la dureté élevée confèrent une robustesse mécanique supérieure aux substrats organiques, caractéristique essentielle pour les applications embarquées soumises aux vibrations et aux chocs.

thermiques. Cette résistance mécanique permet l'utilisation d'antennes LTCC dans des environnements sévères tels que l'automobile, l'aéronautique ou l'industrie lourde. La résistance à l'humidité du LTCC (absorption d'eau < 0.01%) élimine les problèmes de dérive fréquentielle liés à l'absorption hygroscopique, phénomène critique dans les substrats organiques. Cette stabilité hydrique permet un fonctionnement fiable dans des environnements à forte humidité relative sans dégradation des performances électromagnétiques.

L'évolution vers les communications 5G millimeter-wave impose des contraintes de performance qui ne peuvent être satisfaites que par des technologies substrat avancées comme le LTCC. Dans la bande 26-28 GHz, les antennes LTCC démontrent des gains supérieurs à 8 dBi avec des efficacités de rayonnement dépassant 80%, performances inatteignables avec les substrats organiques. Cette performance est directement liée à la faible rugosité de surface des conducteurs LTCC qui minimise les pertes par effet de peau aux fréquences millimétriques.

La technologie LTCC s'impose comme une solution technologique incontournable pour la réalisation d'antennes haute performance répondant aux exigences des communications modernes. La combinaison unique de propriétés électromagnétiques exceptionnelles, de flexibilité architecturale, de compatibilité avec les conducteurs nobles et de robustesse opérationnelle positionne le LTCC comme la technologie de référence pour les applications critiques. L'évolution vers les communications 6G et les fréquences terahertz confirme la pertinence stratégique de cette technologie qui offre une plateforme d'innovation durable pour les antennes de nouvelle génération. L'investissement dans la technologie LTCC représente ainsi un choix technologique stratégique qui anticipe les besoins futurs tout en répondant aux défis actuels de miniaturisation, de performance et de fiabilité. Cette approche technologique constitue un facteur différenciant majeur dans un environnement concurrentiel où l'excellence des performances RF devient un avantage compétitif déterminant.

## Problématique

Malgré les nombreux avantages de la technologie LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramics) pour la réalisation d'antennes intégrées compactes, cette solution reste confrontée

à plusieurs limites techniques qui freinent son adoption à large échelle dans les systèmes de communication avancés. Le LTCC permet en effet l'intégration de composants passifs, de lignes de transmission et d'antennes dans des modules tridimensionnels miniatures, avec une excellente stabilité thermique et une faible perte diélectrique. Ces qualités sont cruciales pour les applications haute fréquence, notamment dans les réseaux 5G, l'IoT industriel, ou encore les systèmes radar embarqués.

Cependant, plusieurs verrous technologiques subsistent. Tout d'abord, le processus de fabrication du LTCC est complexe, reposant sur une co-cuisson multicouche nécessitant un alignement précis, des matériaux uniformes, et une grande rigueur dans le contrôle des contraintes mécaniques. Cette complexité engendre non seulement des coûts élevés, mais également des problèmes de reproductibilité à l'échelle industrielle. De plus, dans le cas des antennes miniaturisées, les compromis entre la taille, le gain, et l'efficacité du rayonnement restent difficiles à maîtriser : réduire les dimensions physiques pour l'intégration se traduit souvent par une baisse de l'efficacité de rayonnement ou une dégradation de la bande passante. Ces contraintes sont particulièrement sensibles dans le cas des antennes à résonateur diélectrique (ARD), dont les performances dépendent fortement de la précision géométrique et de la stabilité diélectrique du substrat.

À cela s'ajoute une exploration encore limitée des propriétés électromagnétiques des matériaux diélectriques utilisés dans les LTCC aux fréquences millimétriques. Bien que certains matériaux présentent une bonne stabilité thermique, les variations de permittivité effective, les pertes diélectriques réelles à très haute fréquence, et leur comportement dans des structures 3D complexes restent mal caractérisés. Ces incertitudes ont un impact direct sur les antennes ARD, dont le fonctionnement repose sur la résonance volumique dans le matériau diélectrique. Toute fluctuation dans les caractéristiques du substrat peut entraîner un décalage de fréquence, une altération du mode résonant, ou une diminution du rendement global.

La problématique centrale repose donc sur la nécessité de développer des structures antennaires LTCC optimisées, capables de combiner miniaturisation, intégration fonctionnelle, et efficacité électromagnétique, tout en maîtrisant les contraintes de

fabrication. Cela implique une meilleure compréhension des matériaux diélectriques à haute fréquence, une adaptation des géométries antennaires notamment pour les structures ARD aux contraintes propres du LTCC, et une approche de conception tenant compte des effets parasites, des pertes et de la densité d'intégration.

## Objectifs

Ce mémoire a pour objectif d'évaluer les possibilités offertes par la technologie LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramics) pour la conception d'antennes compactes à hautes performances, intégrant des résonateurs diélectriques.

Le travail porte sur la réalisation et l'analyse de plusieurs structures d'antennes en LTCC, en étudiant leurs performances en termes de gain, efficacité, bande passante et rayonnement. Il vise également à tester l'intégration de ces antennes dans des configurations plus complexes, notamment un réseau à quatre éléments, afin d'examiner l'adaptabilité de la technologie à des systèmes évolutifs.

L'ensemble du projet combine des aspects de conception, de fabrication et de validation expérimentale, dans une perspective d'application aux communications sans fil et aux objets connectés.

Les spécifications initiales de ce projet ont été ciblant spécifiquement les bandes ISM et les ondes millimétriques, utilisant la technologie LTCC pour répondre aux exigences croissantes des applications IoT et des communications 5G. Les buts poursuivis sont résumés dans le tableau. Ces spécifications permettent d'évaluer l'atteinte des objectifs en comparant les résultats simulés et mesurés aux cibles prédéfinies, tout en tenant compte des contraintes de fabrication en LTCC.

Tableau 1.1 Objectifs et spécifications initiales

<i>Spécification</i>	<i>Antennes microstrip (2.45 GHz)</i>	<i>Réseau ARD 2X2 (26-31 GHz)</i>
Application	bandes ISM	ondes millimétriques
Gain cible	> 3 dBi	> 10 dBi
Efficacité rayonnée	> 80 %	> 90%

Bandé passante	> 100 MHz	> 4 GHz
Dimensions	< 40mm x 40mm	Compacte, multicouche

## Contribution

Cette recherche apporte plusieurs contributions originales à la conception d'antennes haute fréquence sur substrat LTCC, en couvrant à la fois des structures classiques et des configurations à résonateur diélectrique.

Dans un premier temps, deux antennes fonctionnant à 2.4 GHz ont été conçues, réalisées et caractérisées. Ces antennes ont permis d'explorer différentes topologies et approches de miniaturisation compatibles avec la technologie LTCC. Elles constituent une contribution indépendante visant à valider les performances du LTCC dans la bande ISM, souvent utilisée pour les communications sans fil à courte portée.

Ensuite, un élément d'antenne compact intégrant un résonateur diélectrique a été conçu, simulé, fabriqué et mesuré. Cette structure repose sur l'exploitation des modes résonants internes au matériau diélectrique pour améliorer les performances de rayonnement tout en maintenant une compacité élevée. L'intégration dans un environnement LTCC multicouche a nécessité une attention particulière à la géométrie, à la stabilité des propriétés électromagnétiques, et aux pertes diélectriques.

Enfin, ce même élément a servi de base à la conception d'un réseau à quatre éléments, où chaque cellule rayonnante incorpore un résonateur diélectrique. Cette configuration a permis d'étudier les effets de couplage entre éléments, de contrôler le diagramme de rayonnement, et de démontrer la scalabilité de la technologie LTCC dans des topologies d'antennes complexes.

Dans son ensemble, ce travail propose une démarche complète de conception, de réalisation et de validation expérimentale d'antennes avancées en LTCC, en intégrant à la fois des structures classiques et des architectures à résonateurs diélectriques, adaptées aux systèmes RF de nouvelle génération.

## **Organisation de Mémoire**

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres, chacun abordant un aspect spécifique de la recherche sur les antennes et la technologie LTCC.

### **Chapitre 1 : Introduction**

Le premier chapitre présente les motivations de la recherche, les objectifs de la thèse, ainsi que les contributions scientifiques. Il décrit également l'organisation générale de la thèse.

### **Chapitre 2 : Revue de littérature**

Ce chapitre présente une revue des travaux existants sur la technologie LTCC, les antennes microstrip patch et les antennes à résonateur diélectrique (ARD). Il aborde également l'application de la technologie LTCC aux réseaux d'antennes.

### **Chapitre 3 : Conception d'une antenne microstrip en technologie LTCC à 2,45 GHz**

Ce chapitre se concentre sur la conception d'une antenne microstrip utilisant la technologie LTCC à 2,45 GHz, en présentant les méthodes de conception et les résultats de performance.

### **Chapitre 4 : Développement d'un réseau d'antennes ARD utilisant la technologie LTCC**

Le dernier chapitre présente le développement d'un réseau d'antennes ARD à l'aide de la technologie LTCC, en se concentrant sur les résultats expérimentaux et la performance du réseau pour les applications millimétriques et 5G.

## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTERATURE

#### 1.1 Introduction

Ce chapitre présente un état de l'art approfondi portant sur la technologie LTCC, les antennes à résonateur diélectrique (ARD) et les réseaux d'antennes. Il débute par un aperçu des matériaux et procédés associés à la technologie LTCC, puis explore les principes de fonctionnement, les géométries et les propriétés électromagnétiques des ARD. Enfin, il examine les différentes topologies de réseaux d'antennes ainsi que leurs méthodes d'alimentation, en mettant en lumière les avantages, les limitations et les évolutions récentes dans le domaine. Cette revue permet d'identifier les axes d'amélioration ainsi que les choix technologiques les plus adaptés aux exigences de miniaturisation des systèmes sans fil traités dans ce mémoire.

#### 1.2 Technologie LTCC

La technologie LTCC (*Low-Temperature Co-fired Ceramic*) est un procédé de fabrication multicouche développé dans les années 1980 (Imanaka et Yoshihiko.,2005). Le terme « basse température » fait référence au processus de frittage, dont la température peut atteindre environ 950 °C, soit bien en deçà des 1400 °C à 1600 °C requis pour la technologie HTCC (*High-Temperature Co-fired Ceramic*). Cette différence rend possible la réalisation de structures céramiques complexes en couches superposées, favorisant l'intégration de circuits compacts, denses et hautement fonctionnels, avec des composants passifs et actifs inclus dans une seule entité tridimensionnelle (Ahyoune et al.2011).

Une structure LTCC se compose généralement de multiples couches céramiques interconnectées par des vias métallisés, avec des conducteurs internes et des composants montés en surface. Les éléments passifs résistances, inductances, condensateurs peuvent être intégrés à l'intérieur des couches ou imprimés en surface, tandis que les composants

actifs sont assemblés en externe. La LTCC permet également la création de cavités ouvertes ou fermées à l'intérieur du substrat, ce qui renforce la flexibilité de conception.

Cette technologie est particulièrement adaptée à la production en série de dispositifs micro-ondes devant fonctionner de manière fiable dans des environnements contraignants, tout en bénéficiant de la stabilité thermique et des faibles pertes diélectriques des matériaux céramiques haute fréquence .

De plus, la technologie LTCC permet l'intégration de circuits variés (RF, filtrage, interconnexion, etc.) dans une structure unique via des masques multiples, tout en autorisant l'incorporation de matériaux fonctionnels divers notamment des céramiques diélectriques et des composites ferromagnétiques ce qui la rend très avantageuse pour des applications complexes à large bande passante (Parekh et al. 2019).

### 1.2.1 Matériaux diélectriques LTCC

Les matériaux LTCC standards doivent équilibrer les performances diélectriques avec des exigences pratiques telles que la conductivité thermique, la résistance mécanique et la compatibilité avec les matériaux conducteurs. Les principaux défis incluent le contrôle de l'expansion thermique et de la densification afin de garantir la stabilité dans les applications à haute fréquence, où les propriétés diélectriques stables et la compatibilité chimique des matériaux LTCC constituent un avantage.

1. **Permittivité ( $\epsilon_r$ ) des matériaux LTCC :** la permittivité des matériaux LTCC est un facteur clé déterminant leur adéquation dans les applications d'encapsulation électronique. Les matériaux ayant une faible permittivité ( $\epsilon_r = 4$  à 12) sont principalement utilisés comme substrats pour permettre la transmission de signaux à haute vitesse [8], en minimisant le retard de propagation, donné par (Schwartz., 1984) :

$$t_d = L \sqrt{\frac{\epsilon_r}{c}} \quad (1.1)$$

où L représente la longueur de la ligne, et c la vitesse de la lumière. À l'inverse, pour les applications nécessitant des composants intégrés compacts tels que

des condensateurs, des inductances ou des structures résonantes, on préfère des matériaux à permittivité élevée ( $\epsilon_r > 20$ ). Cependant, ces applications exigent un alignement précis entre les couches et des espacements conducteurs plus étroits, notamment pour gérer des tensions de fonctionnement plus élevées.

De plus, la stabilité de la permittivité des matériaux LTCC, avec une faible dépendance à la fréquence en particulier dans les matériaux avancés tels que le Dupont 943 (Gurevich et Kluwer et al, 2005) positionne cette technologie comme un choix fiable pour les applications à haute fréquence et haute performance, où la stabilité, la précision et l'efficacité sont critiques.

2. **Perte diélectrique (facteur de qualité Q)** : pour les applications à haute fréquence, les pertes diélectriques (ou tangente de perte) sont généralement inférieures à  $10^{-3}$ , ce qui conduit à un facteur de qualité Q supérieur à 1000. Ce facteur est défini par :

$$Q = \frac{1}{\tan(\delta)} \quad (1.2)$$

Où  $\tan(\delta)$  est la tangente de perte.

Le facteur  $Q$  est mesuré à la fréquence de résonance et défini comme le rapport entre  $F_0$  (fréquence de résonance) et la largeur de bande à -3 dB sous le maximum. Un  $Q$  élevé garantit une bonne sélection du signal désiré tout en supprimant à haut rendement les signaux parasites grâce à une bande passante étroite. Pour un matériau donné, le produit  $Q \cdot f_0$  reste presque constant dans la gamme de fréquences micro-ondes. Ce produit est couramment noté  $Q_f$ .

Dans les matériaux LTCC commerciaux, le facteur Q peut dépasser 1000 GHz, illustrant leur capacité supérieure à conserver l'énergie comparée à d'autres matériaux comme l'alumine, et surtout le FR-4. Cette faible perte diélectrique est particulièrement avantageuse dans la gamme de 4 à 44 GHz, où les pertes conductrices dominent, garantissant ainsi une dissipation minimale de l'énergie et une excellente intégrité du signal dans les applications exigeantes.

3. **Température de densification des LTCC** : la température de densification des céramiques co-frittées à basse température (LTCC) est un paramètre clé du procédé,

généralement fixée autour de 900 °C lors de l'utilisation d'électrodes à pâte d'argent (Gurevich et al., 1991). Cette température doit rester inférieure à 950 °C pour éviter la fusion de l'argent, dont le point de fusion est de 961 °C. Des électrodes alternatives telles que le cuivre, l'or ou l'or-palladium ont des points de fusion plus élevés, avoisinant 1080 °C. Il est également crucial de maintenir une température de densification supérieure à 800 °C afin d'éviter l'emprisonnement du carbone résiduel issu des liants organiques, ce qui pourrait nuire aux propriétés diélectriques. Pour atteindre des performances diélectriques optimales, la teneur en carbone doit être inférieure à 300 ppm (Tummala et al., 2001). De plus, l'inclusion d'une phase vitreuse dans la composition LTCC contribue à abaisser la température de frittage, mais peut aussi réduire la permittivité relative et augmenter la perte diélectrique, soulignant la nécessité de sélectionner avec soin les matériaux verriers.

4. **Compatibilité chimique des LTCC :** le procédé de co-frittage des céramiques LTCC exige une compatibilité chimique entre les matériaux diélectriques et les électrodes, afin d'éviter des réactions indésirables susceptibles de créer des phases secondaires nuisibles aux performances des modules micro-ondes. Lors du développement de nouveaux matériaux diélectriques, il est essentiel de prendre en compte non seulement les interactions avec des métaux conducteurs comme l'argent, mais aussi avec les additifs contenus dans les pâtes conductrices. Le contrôle du retrait lors du frittage est un autre défi majeur dans la fabrication LTCC, car il est crucial pour garantir l'intégrité et les performances du produit final. La théorie de la courbe maîtresse de frittage (master sintering curve) permet de prédire et de contrôler ce comportement. Cependant, la complexité du procédé réside dans l'utilisation de pâtes contenant à la fois des particules conductrices et des additifs vitreux (ou non vitreux), ce qui peut compliquer les réactions lors du co-frittage (Diantonio et al., 2010).

### 1.2.2 Avantages de la technologie LTCC

La technologie LTCC se distingue par ses propriétés électriques, mécaniques et thermiques exceptionnelles, ce qui en fait un choix idéal pour les applications dans des domaines exigeants tels que les télécommunications, l'aérospatiale, les radars et l'industrie automobile. Ses avantages incluent :

- 1. Faibles pertes et performances RF supérieures :** les substrats LTCC présentent un facteur de dissipation diélectrique faible, généralement compris entre 0,001 et 0,006, et permettent l'utilisation de métaux hautement conducteurs tels que l'or, l'argent et le cuivre, grâce à leur faible résistivité et leur compatibilité avec des températures de frittage inférieures à 950 °C. Cela garantit des pertes linéaires minimales dans les applications RF, surpassant les céramiques traditionnelles comme le HTCC, qui nécessitent l'usage de matériaux à plus forte résistivité en raison de températures de frittage plus élevées.
- 2. Densité d'intégration élevée :** la technologie LTCC permet l'intégration de plusieurs composants passifs, tels que les résistances, condensateurs, inductances, coupleurs et filtres, au sein d'un même empilement multicouche. Cela élimine le besoin de connexions externes, réduit le nombre de composants, simplifie l'architecture des circuits et garantit des pertes réduites, une fiabilité accrue, des coûts moindres et des formats plus compacts.
- 3. Capacités de conception avancées :** la structure multicouche du LTCC autorise des largeurs de ligne et des espacements fins allant jusqu'à 102  $\mu m$  par couche, et permet une intégration tridimensionnelle complexe, prenant en charge des conceptions de circuits à la fois horizontales et verticales. Cette flexibilité permet d'adapter des formes non uniformes et diverses configurations de circuit.
- 4. Durabilité et longévité :** les dispositifs à base de LTCC présentent une durabilité accrue, avec une durée de vie pouvant aller jusqu'à sept fois celle des circuits imprimés traditionnels (PCB). De plus, les matériaux céramiques utilisés dans la fabrication LTCC offrent une faible perméabilité à l'humidité, ce qui les rend adaptés aux environnements humides sans protection particulière.

**5. Stabilité thermo-mécanique élevée :** le faible coefficient de dilatation thermique (CTE) des substrats LTCC, situé entre 5 et 8 ppm/°C, évite toute expansion significative en cas de stress thermique. Cela assure une stabilité structurelle et une fiabilité constantes durant toutes les étapes du cycle de vie du circuit fabrication, test et assemblage. En combinant ces caractéristiques, la technologie LTCC permet non seulement de répondre aux exigences des conceptions de circuits avancés, mais aussi de garantir des performances optimales, une durabilité élevée et une grande adaptabilité dans un large éventail d'applications.

En conclusion, la technologie LTCC se distingue par sa capacité à répondre aux exigences de miniaturisation, grâce à sa permittivité ( $\epsilon_r$ ) contrôlable, ses faibles pertes ( $\tan \delta$ ), et son potentiel d'intégration multicouche. Le tableau suivant compare le LTCC avec d'autres substrats couramment utilisés (FR4, Rogers et alumine), en mettant en évidence ses avantages pour les applications haute fréquence.

Tableau 1.1 LTCC comparaison des Propriétés avec d'autres substrats couramment utilisés

Propriété	LTCC	Duroïd	PCB standard (FR4)	HTCC (Alumine)
Miniaturisation	<b>Excellente</b> ( intégration multicouche 3D, composants passifs, réduction de taille jusqu'à 50 % par rapport aux PCB traditionnels).	<b>Bonne</b> (substrats fins, mais limitée au 2D sans intégration 3D native).	<b>Limitée</b> ( nombre de couches réduit, pas d'intégration 3D native).	<b>Bonne</b> (forte densité possible, mais avec un procédé plus rigide).
Permittivité ( $\epsilon_r$ )	<b>5-22</b> (contrôlable pour l'optimisation des dimensions d'antenne)	<b>3.38-3.55</b> (stable, mais moins flexible pour ajustement)	<b>4.3-4.7</b> (stable, mais non optimisée pour mmWave)	<b>9-10</b> (élevée, favorise la compacité mais augmente les pertes capacitatifs)
Pertes ( $\tan \delta$ )	<b>Très faible</b>	<b>Faible</b> (0.0027,	<b>Élevée</b> (0.015-	<b>Très faible</b>

	(0.0005-0.002) à mmWave, minimisant les pertes diélectriques)	bonne pour RF, mais augmente à mmWave)	0.025, inadaptée au-delà de 10 GHz)	(0.0001, excellente pour ultra-HF mais coût élevé)
Intégration	<b>Haute</b> (intégration monolithique de passifs, actifs et antennes en 3D, compatible avec SiP/AiP)	<b>Moyenne</b> (bonne pour RF, mais intégration limitée, multicouche)	<b>Moyenne</b> (assemblages hybrides nécessaires, pertes accrues)	<b>Haute</b> (similaire à LTCC, mais température de cofrattage élevée limitant la compatibilité)

### 1.2.3 Limitations de la technologie LTCC

Comme toute procédé de fabrication, la technologie LTCC présente certaines limitations qu'il convient d'identifier et de maîtriser afin d'assurer des performances optimales dans les circuits RF. Voici quelques défis courants rencontrés lors de la fabrication en LTCC :

- Impression des conducteurs :** un problème courant dans la technologie LTCC concerne l'impression sérigraphique des conducteurs, en particulier pour les pistes très fines (inférieures à  $100 \mu\text{m}$ ). Les écarts par rapport aux formes prévues peuvent entraîner une impédance incorrecte ou une longueur électrique inappropriée, ce qui peut provoquer des circuits ouverts ou des courts-circuits. Pour y remédier, il est essentiel d'ajuster précisément les paramètres de la machine pendant le processus d'impression. De plus, l'ablation laser peut être utilisée pour corriger les imprécisions dans les formes des pistes, garantissant ainsi les performances attendues du circuit.
- Remplissage des vias :** le remplissage incomplet ou partiel des vias est un autre défi, influencé par des facteurs tels que le diamètre des vias, l'épaisseur des couches et la viscosité de la pâte conductrice. Cela peut compromettre la connectivité électrique entre les couches. Pour atténuer ce problème, il est essentiel d'inspecter les vias critiques à chaque couche. Si des anomalies sont détectées, des ajustements du temps de remplissage, les niveaux de vide ou la viscosité de la pâte peuvent être nécessaires, et un remplissage manuel peut être envisagé pour les zones critiques.

3. **Retrait** : les matériaux LTCC subissent un retrait dans les trois dimensions (x, y et z) lors des processus de laminage et de frittage. Bien que les fabricants fournissent des coefficients de retrait standards, de légères variations peuvent exister d'un lot à l'autre. Cette variabilité peut affecter la précision des dimensions finales du circuit. En mesurant des échantillons prototypes et en ajustant les coefficients de retrait, les concepteurs peuvent garantir que les circuits fabriqués correspondent aux spécifications prévues.
4. **Désalignement des couches** : des désalignements entre les couches peuvent survenir lors de l'impression, de la rotation ou de l'empilement manuel. Ces erreurs peuvent entraîner des connexions de vias défectueuses ou des interconnexions discontinues. Pour minimiser ces désalignements, il est essentiel d'utiliser des motifs d'alignement précis, des outils d'empilement avancés et de faire appel à des opérateurs qualifiés.
5. **Déformation du substrat** : la déformation du substrat durant le processus de co-frittage constitue un problème critique. Elle peut résulter d'un profil de température mal contrôlé ou de l'utilisation de matériaux incompatibles ayant des coefficients de dilatation thermique différents. Pour éviter ces déformations, il est essentiel d'utiliser des matériaux compatibles et d'optimiser le processus de frittage avec un contrôle rigoureux de la température.
6. **Défis de conception à haute fréquence** : à des fréquences de fonctionnement élevées, des largeurs de pistes conductrices plus étroites sont nécessaires, ce qui peut dépasser les limites du processus de fabrication. Cela complique la précision requise pour les dispositifs haute fréquence. Le respect de règles de conception strictes et l'optimisation du processus de fabrication sont essentiels pour surmonter cette limitation et garantir la fiabilité des dispositifs.
7. **Incohérences dimensionnelles dues au retrait** : le retrait des couches LTCC n'est pas toujours homogène sur l'ensemble du substrat. Des variations notables peuvent apparaître entre le centre et les bords, principalement en raison de la distribution asymétrique des éléments métallisés (vias, pistes, plans de masse) et des forces de friction générées entre les couches au cours du frittage. Ce retrait différentiel peut altérer la précision géométrique du circuit, entraînant des erreurs d'alignement ou des

pertes de performances RF. Pour minimiser ces incohérences, il est recommandé d'employer des configurations métalliques symétriques et de s'appuyer sur des modèles de compensation de retrait développés à partir de données expérimentales. Cette approche permet de préserver l'intégrité dimensionnelle du design et de garantir la conformité aux spécifications techniques.

#### 1.2.4 Procédé de fabrication LTCC à l'ÉTS

Au laboratoire LACIME, nous utilisons un procédé de fabrication LTCC développé en interne, bien établi et conforme aux procédures standards, comme illustré à la figure 2.2 et décrit dans (LTCC@ÉTS, 2018). Ce qui suit est un résumé détaillé de notre expérience avec ce processus de fabrication, mettant en lumière les enseignements clés que nous en avons tirés.

- 1. Fichiers de fabrication :** dans un premier temps, les fichiers de fabrication sont préparés dans le format requis, le design étant importé de HFSS vers ADS. La structure est mise à l'échelle pour compenser le retrait du LTCC après cuisson, en tenant compte des tolérances associées. Des repères importants comme les fiduciaux pour l'alignement, les trous d'indexation et les guides de découpe sont intégrés dans le design. Des couches factices sont également ajoutées pour augmenter l'épaisseur de la structure afin d'éviter qu'elle ne devienne trop fragile après cuisson. La surface disponible de la feuille LTCC est utilisée de façon optimale. Les fichiers nécessaires incluent notamment : le fichier de perçage (vias et trous ronds), le fichier de masquage pour l'impression des motifs métalliques, le fichier d'ablation laser pour retirer le métal excédentaire, et le fichier de cavités, qui définit l'usage de matériaux fugaces comme des rubans ou des pâtes selon la taille des cavités.
- 2. Perçage des trous :** pour percer les vias et autres trous dans la structure, deux options sont possibles : la machine à poinçonner et la machine laser. La machine laser offre une meilleure précision de positionnement et peut créer des formes variées, y compris des cavités. Cependant, elle est plus lente et les trous peuvent être irréguliers (non parfaitement circulaires). Elle peut aussi brûler la bande LTCC et générer des bavures

qui compliquent le remplissage des vias. De plus, le faisceau laser n'est pas toujours perpendiculaire à la feuille, ce qui peut provoquer des tailles irrégulières. La machine à poinçonner est plus rapide et produit des vias nets, mais elle nécessite l'achat de têtes de perçage spécifiques pour chaque dimension ou forme. Durant ce processus, des trous de  $4 \times 3$  mm pour l'indexation et de  $4 \times 150 \mu\text{m}$  pour l'alignement sont également réalisés.

3. **Remplissage des vias:** les trous percés sont remplis avec une pâte conductrice à l'aide de pochoirs adaptés à la géométrie du circuit. Ce processus se fait généralement avec une machine de remplissage automatique, à haut rendement pour la production en série mais coûteuse pour les prototypes. En alternative, on utilise la méthode de contre-remplissage : une feuille de Mylar est appliquée à l'arrière de la bande verte LTCC, puis les vias sont remplis manuellement. Le Mylar est retiré avant l'empilement. Une pompe à vide est utilisée sous la couche diélectrique pour faciliter le remplissage, et le diamètre du trou doit dépasser l'épaisseur de la feuille. Pour les feuilles épaisses ( $>10$  mil) ou les trous irréguliers, cette méthode est difficile ; un pochoir plastique peut alors être utilisé pour remplir manuellement depuis le dessus.
4. **Impression des conducteurs :** les lignes conductrices, composants passifs et plans de masse sont imprimés sur chaque feuille LTCC avec la même imprimante que précédemment, mais à l'aide de masques de sérigraphie conçus pour le circuit, au lieu de gabarits. L'alignement des feuilles dans la machine est effectué via quatre trous fiduciaires, ce qui peut être difficile en raison de l'élasticité du matériau non cuit. L'épaisseur standard du métal imprimé est de  $8 \mu\text{m}$ , en utilisant une pâte spécialisée différente de celle employée pour les vias. Après impression, les feuilles sont soit séchées à température ambiante pendant 24 heures, soit mises en étuve à  $60^\circ\text{C}$  pendant 30 minutes.
5. **Empilement des couches :** les couches LTCC préparées sont déposées face vers le bas dans la machine d'empilement, en commençant par la couche supérieure. Avant l'insertion, la feuille de Mylar est retirée. Chaque feuille est manipulée individuellement par une pompe à vide, puis empilée avec précision en s'alignant sur

les trous d'indexation. Une fois alignées, une pression de 150 psi est appliquée pour souder les couches entre elles et former un bloc unifié de haute précision.

6. **Laminage des couches** : après empilement, les couches sont laminées par chauffage et pression. Un système de pressage isostatique à chaud est utilisé. La structure empilée est immergée dans l'eau, maintenue 15 minutes à 70 °C, puis pressée pendant 12 minutes à 108 pascals. Après pressage, les dimensions du métal imprimé doivent être vérifiées car il peut s'élargir au-delà des tolérances. Si besoin, une nouvelle ablation laser peut être appliquée sur la couche supérieure pour corriger. Heureusement, dans notre cas, la structure ne comporte qu'une seule couche.
7. **Découpe** : lors d'un même lot de fabrication, plusieurs exemplaires du circuit sont groupés pour optimiser l'utilisation de la feuille LTCC. Après cuisson, la bande LTCC devient une céramique fragile : elle doit être découpée avant cuisson. À l'aide des repères prédéfinis sur les masques, la découpe est réalisée par guillotine pour une coupe rapide et nette. Pour des formes complexes, une découpe au laser peut aussi être utilisée.
8. **Cuisson** : chaque fabricant fournit un profil thermique spécifique pour la cuisson de la bande verte LTCC, que le four programmable applique. Dans certains cas, un gaz inerte comme l'azote est utilisé pour éviter l'oxydation des métaux. Le processus de cuisson dure généralement une journée complète afin d'assurer une cuisson homogène et conforme au profil thermique prescrit. Le flux typique du procédé LTCC, illustré dans la Figure 1.1, met en évidence les différentes étapes de fabrication, dont le cofriffage, qui correspond à la phase de cuisson finale du substrat multicouche.

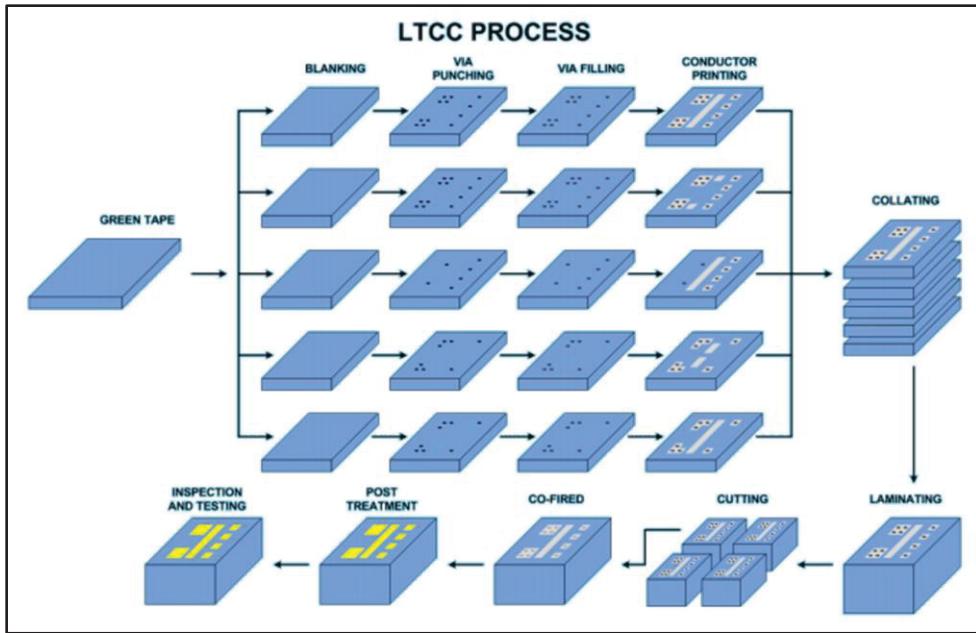


Figure 1.1 Flux de procédé LTCC@ÉTS

Source : LTCC@ÉTS (2018)

### 1.2.5 Antennes en technologie LTCC

Au cours de la dernière décennie, la technologie LTCC a suscité un intérêt croissant dans les milieux académiques et industriels, donnant lieu à plus de 150 publications scientifiques et plus de 400 communications en conférences. Ce volume de recherche met en évidence le potentiel de cette technologie pour la conception d'antennes couvrant une large gamme de fréquences, allant de 1 à 270 GHz. Plusieurs travaux ont proposé des approches innovantes visant à optimiser la bande passante, le gain, la polarisation, le rendement de rayonnement et la miniaturisation, afin de répondre aux exigences des systèmes sans fil modernes.

Sheng et al. (2024) ont proposé une antenne patch large bande en technologie LTCC est conçue pour la 5G et les ondes millimétriques. Grâce à l'ajout de fentes spécifiques et d'une sonde en L, elle atteint une bande passante de 23,8 à 41,1 GHz avec un gain stable de 6,9 dBi. La structure multicouche, basée sur 14 couches de LTCC Ferro A6M ( $\epsilon_r = 5,9$ ), intègre un patch elliptique fendu et une alimentation verticale, rendant l'antenne compatible avec

une intégration en réseau phasé. La géométrie de l'antenne, incluant la vue de dessus et les détails du patch fendu, est présentée à la Figure 1.2.

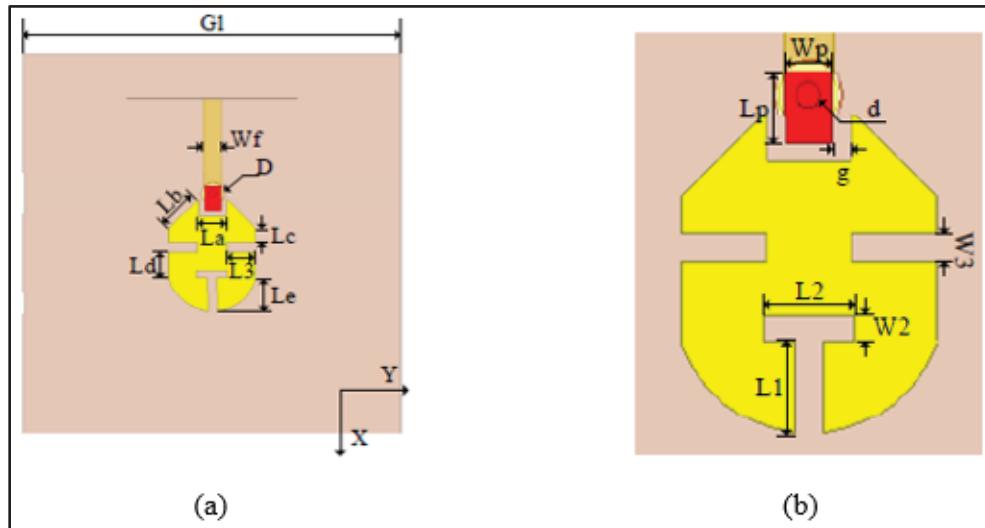


Figure 1.2 Géométrie de l'antenne patch proposée. (a) Vue de dessus ; (b) Détail du patch elliptique fendu

Adaptée Sheng et al. (2024)

Zhou et Xia(2024) ont conçue une structure papillon réalisée sur un substrat LTCC Ferro-A6M ( $\epsilon_r = 5,9$  ;  $\tan \delta = 0,002$ ), compatible avec des fréquences allant jusqu'à 100 GHz. La fabrication repose sur un empilement multicouche LTCC combiné à un PCB simple couche. La Figure 1.3 montre la structure finale obtenue, illustrant la faisabilité de la mise en œuvre du LTCC pour des circuits RF en bande millimétrique.

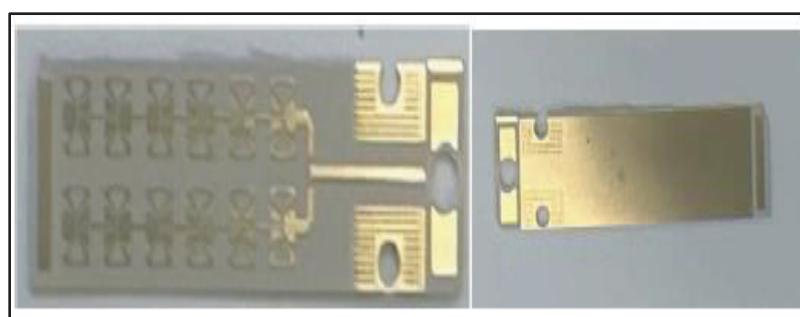


Figure 1.3 Photo de l'antenne proposée  
Tirée de Zhou et Xia. (2024)

Molins et al.(2023) présentent une antenne compacte conçue pour les dispositifs à très faible encombrement, réalisée en technologie LTCC à partir du matériau DuPont GreenTape 9k7 (  $\epsilon_r = 7,1$  ;  $\tan \delta = 0,0009$  ). La structure comprend 13 couches céramiques, cinq métallisations internes et des via en zigzag pour réduire les déformations lors du frittage. L'intégration complète dans l'empilement céramique illustre la flexibilité du procédé LTCC pour les applications IoT (voir Figure 1.4).



Figure 1.4 Vues avant et arrière de l'antenne fabriquée  
Tirée de Molins et al. (2023)

Sun et al. (2011) proposent une antenne réseau à 16 éléments intégrée à un LNA, réalisée sur un substrat LTCC Ferro A6M (  $\epsilon_r = 5,9$  ;  $\tan \delta = 0,002$  ), pour des communications à 60 GHz. L'architecture repose sur cinq couches céramiques LTCC et cinq couches métalliques (M1 à M5), répartissant les antennes, l'alimentation et les plans de masse via des structures GCPW. L'ensemble, de dimensions compactes ( $13 \times 20 \times 1,4 \text{ mm}^3$ ), atteint un gain de 35 dBi et une bande passante supérieure à 8 GHz, comme illustré dans la Figure 1.5.

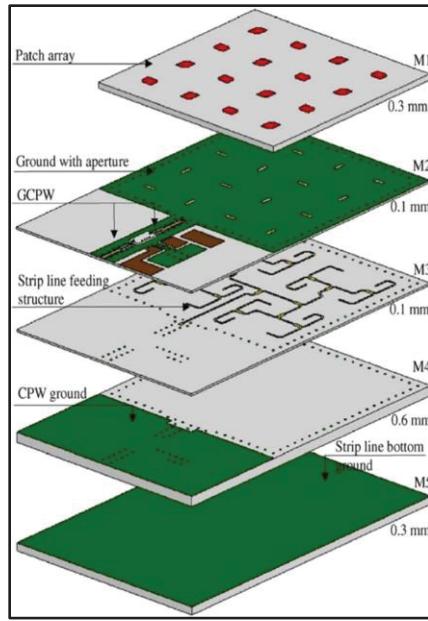


Figure 1.5 Antenne LTCC à gain élevé intégrée à un LNA  
Adaptée Sun et al. (2011)

Han et al. (2024) ont développée Une antenne compacte à polarisation circulaire en technologie LTCC, sur trois couches céramiques ( $\epsilon_r = 7,7$  ;  $\tan \delta = 0,0005$ ). La structure multicouche, incluant une excitation par fente croisée et une ligne  $\lambda_g / 4$ , permet un rayonnement circulaire stable (Figure 1.6). Ce procédé assure une intégration efficace et une bonne stabilité structurelle, adaptée aux modules Antenna-in-Package (AiP).

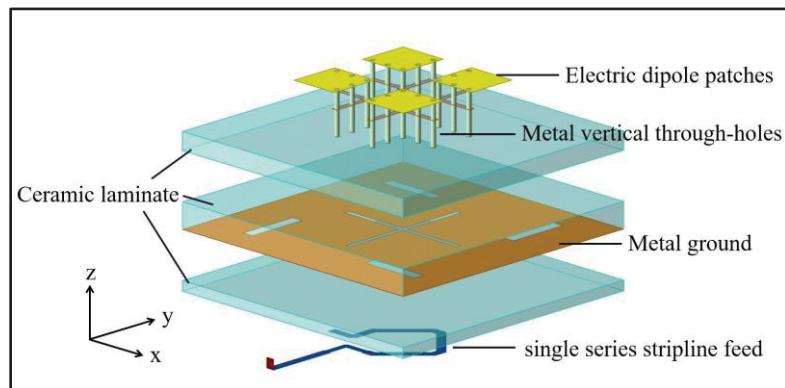


Figure 1.6 Configuration de l'antenne Vue 3D  
Tirée de Han et al. (2024)

Wang et al. (2023) ont proposé une antenne exploitant la technologie LTCC est développée, combinant une structure rayonnante multicouche et une alimentation hybride GCPW–SIW. Le design repose sur six à huit couches céramiques intégrant des vias traversant et des éléments parasites pour optimiser l'adaptation d'impédance et la bande passante en polarisation circulaire. L'efficacité de l'intégration LTCC est confirmée par les performances mesurées dans la bande 5G n257 (Figure 1.7).

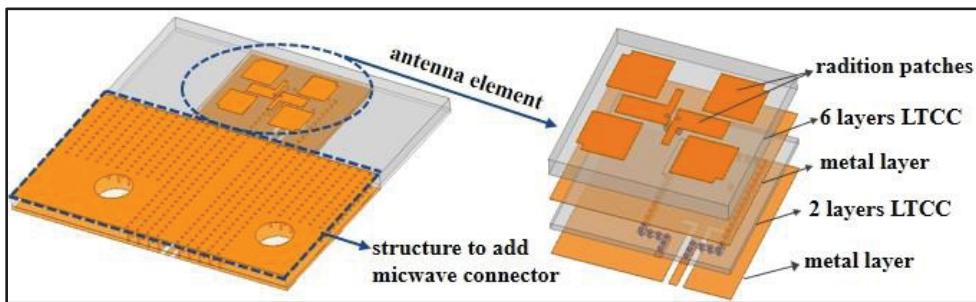
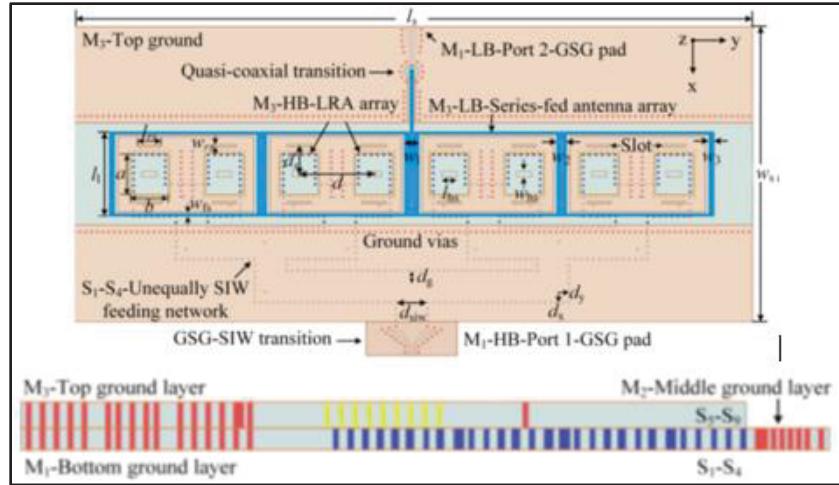


Figure 1.7 Vue 3D de l'antenne proposée  
Tirée de Wang et al. (2023)

Wang et al. (2024) ont proposé une antenne bi-bande réalisée en technologie LTCC sur neuf couches de céramique Ferro-A6M ( $\epsilon_r = 5,9$  ;  $\tan \delta = 0,002$ ). La configuration multicouche intègre une antenne LRA à 77 GHz et un réseau patch en série à 24 GHz, avec des alimentations SIW asymétriques. La Figure 1.8 montre la structure empilée avec les transitions et plans de masse. Cette solution illustre le potentiel du LTCC pour les radars multibande compacts.



### 1.3 Les antennes à résonateur diélectrique

Les résonateurs diélectriques sont des structures en céramique diélectrique polycristalline à faibles pertes, de forme généralement cylindrique ou en disque, qui peuvent être nus ou métallisés.

Ils ont été introduits initialement comme éléments résonants dans les circuits micro-ondes et les oscillateurs, en raison de leur permittivité relative élevée, généralement comprise entre 10 et 100.

Le contraste élevé de permittivité entre le résonateur et l'air ambiant permet de confiner une onde électromagnétique stationnaire à l'intérieur du résonateur, générant une forte résonance exploitable pour les applications antennaires.

#### 1.3.1 Investigations sur les antennes à résonateur diélectrique

Durant plusieurs décennies, les résonateurs diélectriques (RD) ont été principalement utilisés dans les circuits hyperfréquences, notamment dans les oscillateurs et les filtres. Ils sont généralement fabriqués à partir de matériaux à forte permittivité, caractérisés par une constante diélectrique ( $\epsilon_r$ ) supérieure à 20. Ces résonateurs présentent des facteurs de qualité (Q) non chargés compris entre 50 et 500, pouvant parfois atteindre des valeurs exceptionnelles allant jusqu'à 10 000.

Traditionnellement considérés comme des dispositifs de stockage d'énergie électromagnétique plutôt que comme des éléments rayonnants, les RD n'ont commencé à susciter un réel intérêt en tant qu'antennes qu'à la suite de la publication, en 1983, de l'article fondateur sur les antennes à résonateur diélectrique cylindrique (ARD) par Long et al. (1983).

C'est également à cette époque que les bandes de fréquence utilisées par de nombreux systèmes ont progressivement migré vers les domaines millimétrique et sub-millimétrique (100 à 300 GHz). À de telles fréquences, les pertes par conductivité dans les antennes métalliques deviennent particulièrement importantes, ce qui réduit considérablement leur

rendement. Cette limitation a renforcé l'intérêt pour les DR en tant qu'alternatives prometteuses dans la conception d'antennes haute fréquence.

### 1.3.2 Formes des antennes à résonateur diélectrique

L'une des qualités distinctives des antennes à résonateur diélectrique (ARD) réside dans leur grande flexibilité géométrique. Le mode de fonctionnement ainsi que les performances d'une ARD peuvent être ajustés en choisissant un résonateur présentant la forme, les dimensions et la permittivité diélectrique souhaitées (Soren et al., 2014). Cette personnalisation permet de concevoir des diagrammes de rayonnement bien définis et adaptés aux exigences de l'application.

Ainsi, de nombreuses géométries de ARD ont été explorées expérimentalement dans la littérature. La première étude systématique, à la fois théorique et expérimentale, a porté sur la géométrie cylindrique en disque (Long et al., 1983). Par la suite, McAllister et Long (1986) ont étudié les formes rectangulaires, puis les formes hémisphériques (McAllister et Long, 1988). Enfin Mongia et al. (1997) ont mené des travaux approfondis sur la théorie des résonateurs rectangulaires.

D'autres géométries ont également été examinées, telles que l'anneau cylindrique (Tam et al., 2000), la forme triangulaire (Ittipiboon et al., 2002), sphérique (Chen et al., 1999), ou encore conique (Kishk et al., 2002). Ces recherches visent à optimiser les performances des ARD en termes de bande passante, efficacité et directivité. Un aperçu des différentes formes de résonateurs diélectriques explorées dans la littérature est présenté à la figure 1.10.



Figure 1.10 Différentes formes d'antennes à résonateur diélectrique  
Adaptée de Luk et al. (2003)

### 1.3.3 Caractéristiques fondamentales des antennes à résonateur diélectrique (ARD)

Les antennes à résonateur diélectrique (ARD) présentent plusieurs propriétés remarquables qui les rendent particulièrement adaptées aux applications en ondes millimétriques. Leur efficacité de rayonnement élevée, leur large bande passante ainsi que leur flexibilité en matière de polarisation leur confèrent une nette supériorité par rapport aux antennes classiques, telles que les antennes à microbandes (MPA) (Han et al. 2024). Ces caractéristiques font des ARD des candidates prometteuses pour les systèmes de communication sans fil de nouvelle génération.

Les avantages clés des ARD peuvent être résumés ainsi :

- La taille d'une ARD est fonction du rapport  $\frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ , où  $\lambda_0$  désigne la longueur d'onde en espace libre et  $\epsilon_r$  la permittivité relative du matériau diélectrique utilisé.
- L'efficacité de rayonnement est élevée, en grande partie grâce à l'absence d'ondes de surface indésirables.

- Plusieurs techniques d'alimentation peuvent être utilisées pour exciter l'antenne avec un rendement élevé.
- Comparées aux antennes à microbandes, les ARD offrent une bande passante d'impédance nettement plus large. Cela s'explique par le fait que l'ARD rayonne sur l'ensemble de sa surface, à l'exception du plan de masse, tandis que l'antenne microbande émet uniquement à travers des fentes étroites.
- Selon la géométrie du résonateur, différents modes résonants peuvent être excités, permettant d'adapter le diagramme de rayonnement à des besoins spécifiques. De plus, le facteur de qualité (Q) de certains modes dépend du rapport d'aspect de l'ARD, offrant ainsi une souplesse supplémentaire dans la conception.
- Enfin, une large gamme de constantes diélectriques ( $\epsilon_r$  de 10 à 100) peut être exploitée, ce qui permet d'ajuster à la fois la taille physique de l'antenne et sa bande passante (Lai et al., 2008). La figure 10 illustre les différentes formes de résonateurs diélectriques (RD) explorées dans ce domaine. Bien que de nombreuses variantes aient été proposées, les formes cylindrique et rectangulaire demeurent les plus étudiées et les plus couramment utilisées, en raison de leur simplicité de conception, de fabrication et de modélisation analytique.

#### 1.3.4 Matériaux utilisés dans les ARD

L'une des propriétés électriques majeures des matériaux diélectriques employés dans les antennes à résonateur diélectrique (ARD) est leur constante diélectrique (ou permittivité relative,  $\epsilon_r$ ). Celle-ci influence directement la fréquence de résonance, les dimensions physiques de l'antenne, ainsi que son efficacité de rayonnement. En fonction de leur valeur de permittivité et des propriétés qui en découlent, ces matériaux peuvent être regroupés en trois grandes catégories :

1. **Matériaux à faible permittivité ( $\epsilon_r$  entre 6 et 10) :** ces matériaux présentent des pertes diélectriques extrêmement faibles ( $\tan \delta$  de l'ordre de  $3 \times 10^{-5}$  à  $10 \times 10^{-5}$ ), ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications à haute fréquence exigeant une

atténuation minimale des signaux (Benomar et al., 2015). Leur faible permittivité favorise une dispersion plus étendue du champ électromagnétique, augmentant ainsi l'efficacité de rayonnement, mais impliquant des résonateurs de plus grande taille. Ils sont fréquemment utilisés dans les bandes Ku et Ka, notamment pour des applications radar et spatiales.

**2. Matériaux à permittivité moyenne ( $\epsilon_r$  entre 10 et 30):** offrant un bon compromis entre compacité et performance de rayonnement, ces matériaux sont largement employés dans les systèmes de communication sans fil, tels que les réseaux WLAN et la 5G (Masse et al., 1971 ;et Peng et al., 2004). Leur intégration est aisée dans les circuits imprimés, ce qui les rend idéaux pour les architectures compactes.

**3. Matériaux à permittivité élevée ( $\epsilon_r > 30$ ):** principalement utilisés lorsque la miniaturisation est prioritaire, ces matériaux permettent de réduire significativement la taille des antennes, au détriment toutefois de la bande passante et du rendement de rayonnement (Parida et al., 2012). Ils conviennent bien aux dispositifs embarqués ou portables à haute densité d'intégration. Cependant, la forte concentration du champ électromagnétique à l'intérieur du résonateur requiert un contrôle strict des pertes diélectriques et de la stabilité thermique.

En complément, les technologies avancées telles que le LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) permettent l'intégration de matériaux à permittivité modérée (généralement entre 5 et 80) dans des structures multicouches. Cette approche combine miniaturisation, intégration de composants passifs et hautes performances en fréquence (Parida et al., 2012), et est de plus en plus adoptée dans la fabrication de circuits RF compacts, notamment pour les ARD miniaturisées. Un résumé comparatif des matériaux diélectriques couramment utilisés pour la conception d'ARD est présenté dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 Matériaux diélectriques utilisés pour la conception d'ARD (2023–2025)

Matériaux	Constante diélectrique ( $\epsilon_r$ )	Fréquence d'opération (GHz)	Applications	Référence
FR4	4.4	3.66 4.94	Multibands Systems	(Chaudhary et al,2015)
RogersT/Duroid 6010	10.2			
RogersT/Duroid 6006	6.15			
Rogers RT6010	10.2	5.3-6.1	Multibands Applications	(Ain et al, 2014)
Zinc Tantalum	27.5	7.2-7.8		
Bismuth	33.3	2.8	Wideband Applications	(Peng et al,2004)
Bi <sub>3</sub> xZn <sub>2</sub> -3x-Ay	71			
O7	96.7			
Teflon	2.2	3.85-6.2	ARD, patch, réseaux pour 5G et WLAN	(Das et al ,2016)
Alumina	9.8			
LTCC	5,6 – 7,8	1 – 60	ARD, patch, réseaux pour 5G et WLAN	(Niayesh et Kouki,2021)

### 1.3.5 Techniques d'alimentation des antennes à résonateur diélectrique (ARD)

L'antenne à résonateur diélectrique (ARD) peut être excitée par différentes méthodes, selon l'application visée. Chaque technique présente des avantages spécifiques et permet d'adapter les performances de l'antenne.

#### 1.3.5.1 Excitation par sonde coaxiale

La sonde coaxiale peut être insérée dans l'ARD ou placée à proximité. Son positionnement et sa hauteur permettent d'ajuster le couplage et d'exciter différents modes. Une sonde latérale

active le mode  $TE_{11\delta}$  (dipôle magnétique horizontal), tandis qu'une sonde centrale dans un ARD cylindrique excite le mode  $TE_{011}$  (dipôle vertical) (Luk et al., 2003, voir figure 1.11). Cette méthode, compatible avec les systèmes à  $50 \Omega$ , évite l'usage de réseaux d'adaptation. Elle est surtout utile à basse fréquence, lorsque l'excitation par fente devient peu pratique (Zhou et Junker, 1994).

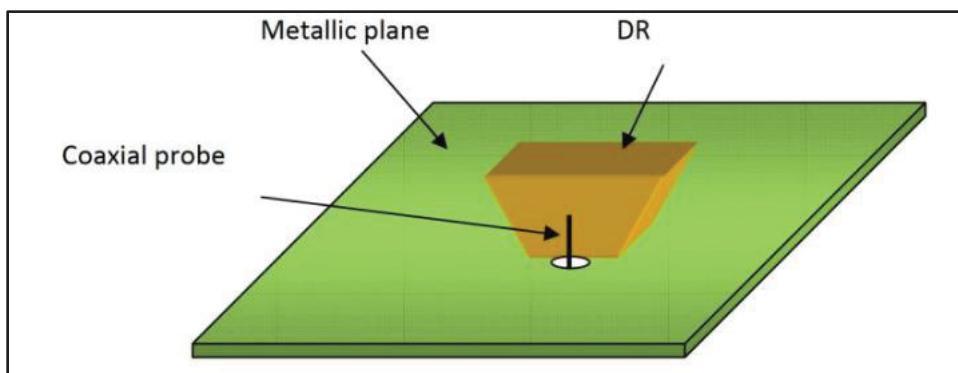


Figure 1.11 Antenne à résonateur diélectrique (ARD) alimentée par une sonde coaxiale

### 1.3.5.2 Couplage par ligne microruban

Le couplage de proximité par ligne microruban est une méthode couramment utilisée pour exciter les résonateurs diélectriques dans les circuits hyperfréquences. Il consiste à graver une bande métallique d'une largeur déterminée sur un substrat diélectrique à faibles pertes, métallisé au verso et relié à la masse.

Ce type d'alimentation génère un champ magnétique dans l'ARD, excitant un mode dipolaire horizontal. Le niveau de couplage et l'impédance d'entrée peuvent être ajustés en déplaçant latéralement le résonateur par rapport à la ligne (Kranenburg et Long, 1988 ; Leung et Yung, 2005), comme illustré à la figure 1.12.

Cette technique est appréciée pour sa simplicité de fabrication et d'adaptation, notamment dans les réseaux d'antennes. Toutefois, à haute fréquence, elle peut induire des ondes de surface dans le substrat, réduisant l'efficacité de rayonnement du ARD (Mongia et al., 1994).

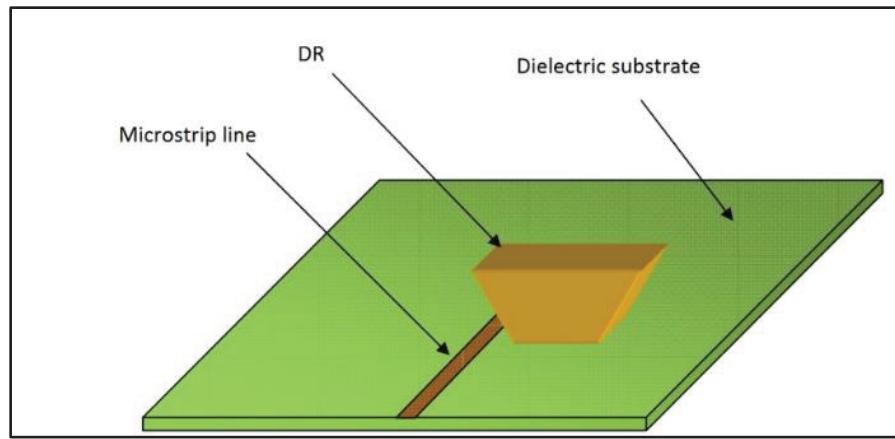


Figure 1.12 Technique d'alimentation de la ligne microruban pour exciter l'ARD

### 1.3.5.3 Alimentation coplanaire (CPW)

L'ARD peut être placé au-dessus d'une boucle ou d'une fente coplanaire, ce qui permet un couplage similaire à celui d'une sonde coaxiale, tout en étant moins intrusif. En déplaçant la boucle du bord vers le centre du ARD, il est possible d'exciter différents modes, comme  $HE_{11\delta}$  ou  $TE_{011}$  dans les structures cylindriques (Zhou et Glisson, 1993 ;Cooper et Petosa, 1996). comme présenté dans la figure 1.13.

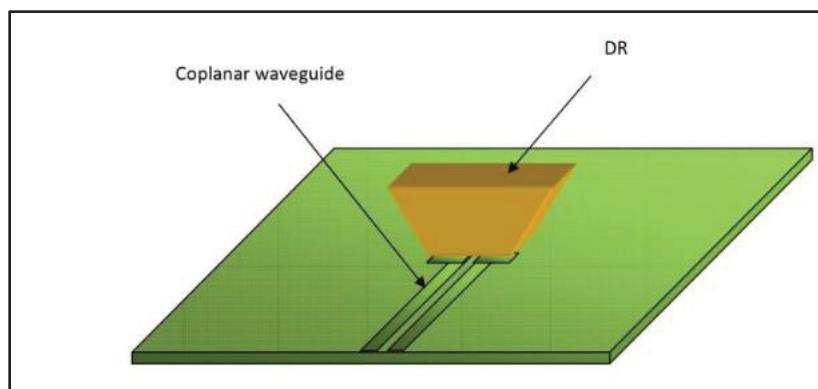


Figure 1.13 Technique d'alimentation coplanaire pour exciter l'ARD

### 1.3.5.4 Couplage par guide d'ondes

Le guide d'ondes se distingue par ses faibles pertes, notamment en bande millimétrique. La propagation confinée dans la structure métallique élimine presque totalement les pertes par rayonnement. Associé à un résonateur diélectrique, tel qu'indiqué dans la figure 1.14, il offre une solution dotée d'un gain élevé et d'une large bande passante pour les systèmes de communication haute fréquence. Le couplage peut se faire par une sonde ou une fente insérée dans le guide (Leung et al, 2002 ; Eshrah et al, 2005).

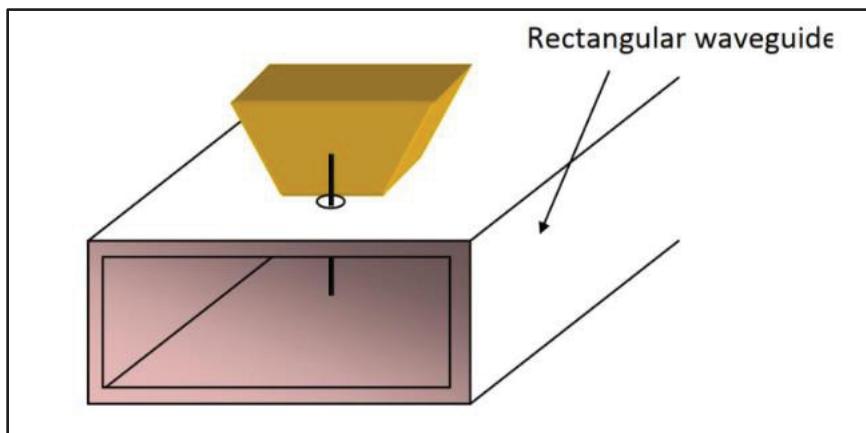


Figure 1.14 Sonde de guide d'ondes alimentant une ARD

### 1.3.5.5 Alimentation par ouverture (fente)

L'utilisation d'une fente de type  $\frac{\lambda_0}{2}$  permet d'améliorer l'excitation d'un mode réel dans le ARD. Ce type de couplage bloque les ondes électromagnétiques indésirables issues de la ligne d'alimentation ou des sondes. comme illustré à la figure 1.15.

Cette méthode permet également de générer des modes orthogonaux ou une polarisation circulaire à l'aide d'une fente transversale asymétrique. Elle est facilement intégrable sur le même substrat que l'ARD (Pozar,2011, Ashraf et Sovan ,2023).

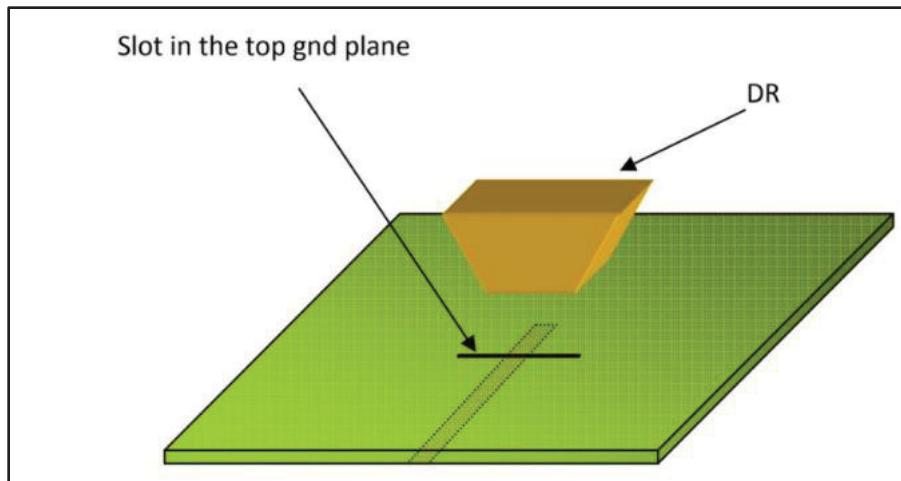


Figure 1.15 Alimentation couplée à l'ouverture

### 1.3.6 La Technologie LTCC appliquée aux antennes à résonateur diélectrique (ARD)

Zhang et al. (2023) présentent une antenne à résonateur diélectrique (ARD) à double polarisation conçue pour des réseaux phasés à balayage large dans la bande millimétrique (28 GHz). La structure repose sur la technologie LTCC, permettant une intégration compacte et une fabrication multicouche précise. L'élément rayonnant intègre deux résonateurs cylindriques empilés, entourés d'un cadre métallique et alimentés via une fente en croix voir figure 1.16. Une cavité annulaire sépare les résonateurs du cadre métallique, améliorant l'adaptation d'impédance. Le réseau  $8 \times 8$  obtenu offre un coefficient de réflexion actif inférieur à  $-10$  dB sur un angle de balayage de  $\pm 60^\circ$ , avec des pertes de balayage variant entre 3,2 dB et 3,9 dB pour les deux polarisations.

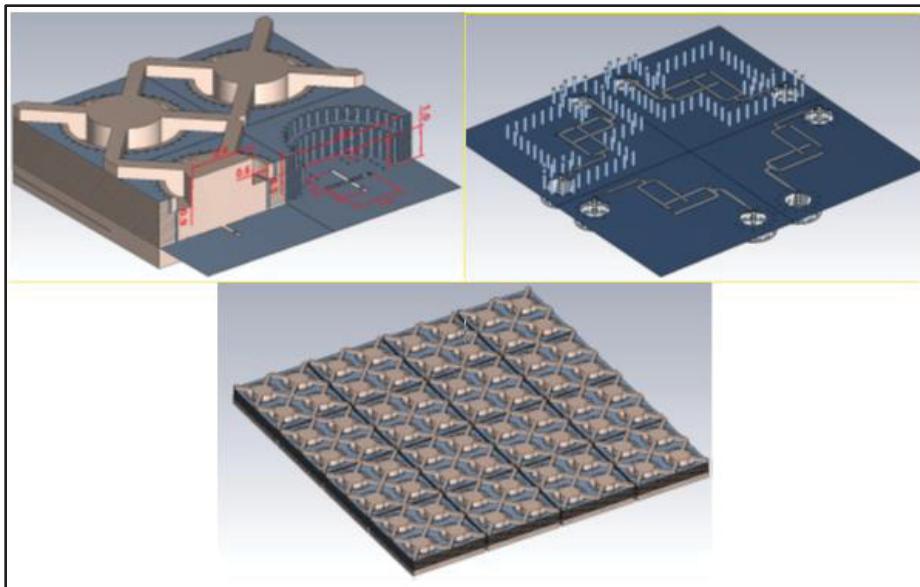


Figure 1.16 Topologie de l'antenne ARD planaire à double polarisation proposée : vues éclatées et dimensions de (a) la sous-matrice  $2 \times 2$ , (b) les réseaux d'alimentation ; (c) le réseau complet

Adaptée de Zhang et al. (2023)

La contribution de (Mrnka et al,2018 ) porte sur un réseau  $4 \times 4$  basé également sur des ARDs cylindriques fabriqués en LTCC. Chaque élément est alimenté par une ligne microruban et espacé de  $0,47\lambda_0$  pour éviter les lobes de réseau. La structure compacte, rendue possible par la précision de la fabrication LTCC, garantit une directivité stable et une bonne isolation inter-éléments dans un format réduit .Un exemple de prototype d'élément unique avec sa fente d'alimentation est présenté à la figure 1.17.

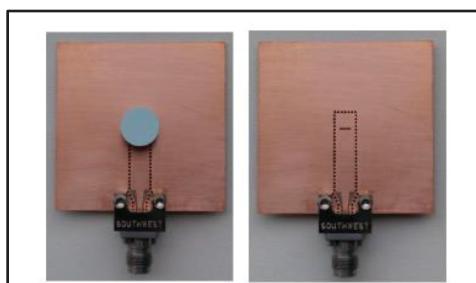


Figure 1.17 Résonateur diélectrique fabriqué (à gauche) et ouverture d'alimentation (à droite)  
Tirée de Mrnka et al. (2018)

L'approche décrite dans (Niayesh et Kouki ,2021) un réseau  $4\times 4$  d'antennes ARD cylindriques est développé en LTCC pour la bande 28 GHz. La technologie LTCC permet ici une intégration verticale de l'antenne et de son réseau d'alimentation corporatif, avec un superstrat rainuré facilitant l'alignement précis des éléments, voir figure 1.18. Les auteurs rapportent un gain réalisé de 15,68 dBi et une efficacité de 88 %, confirmant les avantages de la fabrication monolithique en LTCC pour les systèmes d'antennes planaires à haute fréquence.

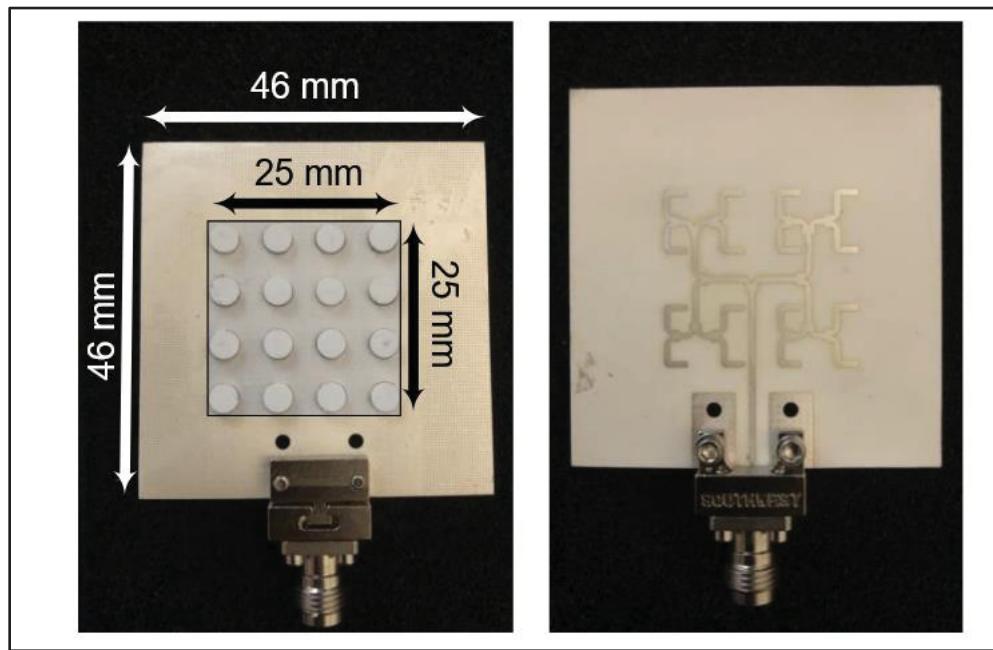


Figure 1.18 Antenne réseau à résonateurs diélectriques fabriquée  
Tirée de Niayesh et Kouki , (2021)

Bernabeau-Jiménez et al.(2014) présentent une antenne à résonateur diélectrique rectangulaire (ARD) conçue pour 60 GHz et intégrée en technologie LTCC à base de substrat Ferro A6M comme illustré à la figure 1.19. L'excitation de l'antenne est réalisée par une fente rectangulaire alimentée par ligne microruban. La conception repose sur la théorie des modes caractéristiques afin d'exciter spécifiquement le mode  $TE_{111}$ , optimisant ainsi les performances de rayonnement. Les résultats montrent une bande passante large (33 %) et une structure adaptée aux applications millimétriques compactes.

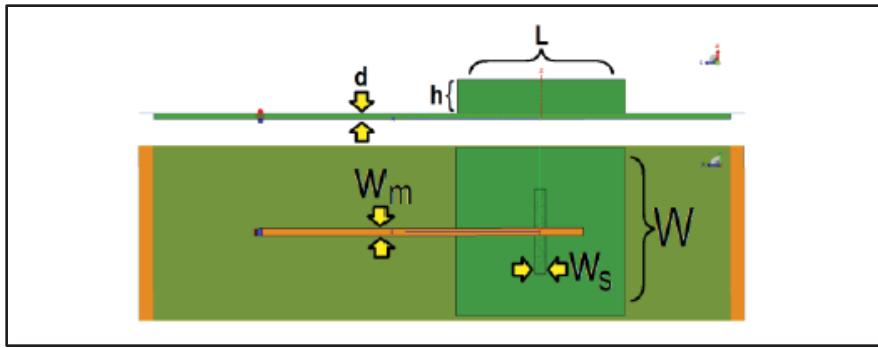


Figure 1.19 Schéma d'antenne ARD couplée par fente à ligne microruban  
Tirée de Bernabeau-Jiménez et al. (2014)

## 1.4 Réseau d'antennes

Les réseaux d'antennes sont des structures fondamentales dans les systèmes de télécommunications modernes, notamment dans les domaines du radar, des communications mobiles, de la navigation ou encore de l'aérospatiale. Ils consistent à disposer plusieurs éléments rayonnants selon une configuration géométrique précise, tout en assurant une distribution maîtrisée du signal. Le schéma d'alimentation retenu influe directement sur le diagramme de rayonnement, la bande passante, l'efficacité, et la complexité de réalisation. Trois principaux types d'alimentations sont généralement utilisés : en série, en parallèle et hybride. Un tableau comparatif des principales caractéristiques de ces topologies est présenté dans le tableau 1.2.

### 1.4.1 Réseaux à alimentation en série

Dans ce type de réseau, les éléments sont connectés les uns après les autres via une ligne de transmission continue. Le signal traverse successivement chaque élément sans être divisé à la source. Cette méthode présente une simplicité de réalisation et une bonne compacité, ce qui en fait une option avantageuse sur le plan électromagnétique pour les systèmes embarqués ou de petite taille. Néanmoins, elle entraîne une perte progressive du signal et une variation de phase entre les éléments qui peuvent dégrader les performances globales. Une analyse de ce type de réseau est présentée dans la littérature classique sur les antennes (Balanis, 2016), où

l'on démontre que bien que l'architecture soit simple, elle impose des contraintes sur le contrôle du faisceau et sur les pertes d'amplitude. Des applications radar à haute fréquence, notamment à 79 GHz, ont démontré son efficacité dans des environnements contraints tout en maintenant un niveau de lobe secondaire faible (Dash et al,2023).

#### **1.4.2 Réseaux à alimentation en parallèle**

Les réseaux à alimentation parallèle utilisent un diviseur de puissance (corporate feed) qui répartit le signal d'entrée équitablement entre tous les éléments rayonnants. Cette méthode offre un excellent contrôle de la phase et de l'amplitude à chaque port, ce qui la rend idéale pour la formation de faisceaux dynamiques et le balayage électronique. Elle est également mieux adaptée aux bandes larges que l'alimentation en série, malgré une complexité de fabrication plus élevée et un encombrement supérieur. Dans les applications réelles, ce type d'alimentation est utilisé dans les réseaux patch destinés aux bandes ISM et 5G, où la stabilité du diagramme de rayonnement est cruciale (Uddin et al, 2020). La distribution en parallèle est également préférée pour les réseaux plans destinés aux systèmes à haute efficacité.

#### **1.4.3 Réseaux à alimentation hybride**

L'architecture hybride combine les approches précédentes en utilisant une alimentation parallèle à l'intérieur de sous-réseaux, connectés en série ou inversement. Cette configuration permet de tirer avantage à la fois de la compacité de la série et de la précision de contrôle de la parallèle. Elle est particulièrement utile dans les systèmes embarqués complexes, les modules RF intégrés, ou encore les réseaux à balayage électronique nécessitant une densité d'intégration élevée. Des implémentations récentes, notamment en technologie LTCC et MEMS, ont permis d'obtenir des réseaux compacts et à haut rendement dans la bande W, avec de très bonnes performances en gain et en contrôle du faisceau (Zhao et al ,2023).

Tableau 1.3 Comparatif des topologies d'alimentation des réseaux d'antennes

Critère	Série	Parallèle	Hybride
<b>Complexité</b>	Faible	Élevée	Élevée
<b>Contrôle du faisceau</b>	Limité	Excellent	Excellent
<b>Largeur de bande</b>	Étroite	Large	Moyenne à large
<b>Encombrement</b>	Faible	Élevé	Modéré
<b>Applications</b>	IoT, radar compact, les bandes millimétriques	Réseaux patch 5G, radar phasé	Radar auto, systèmes embarqués RF, AiP
<b>Coût de fabrication</b>	Faible	Élevé	Moyen à élevé

## 1.5 Conclusion

Ce chapitre pose les bases techniques nécessaires à la suite du mémoire, en particulier pour la conception et l'optimisation de l'antenne proposée. Il a permis d'identifier les paramètres influents sur les performances électromagnétiques, tels que la constante diélectrique, la géométrie du résonateur et les méthodes d'alimentation. Ces éléments serviront de leviers concrets dans les étapes de modélisation, de simulation et de fabrication présentées dans les chapitres suivants.

## CHAPITRE 2

# CONCEPTION D'UNE ANTENNE PATCH EN TECHNOLOGIE LTCC À 2,45 GHz

### 2.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, le nombre de réseaux sans fil s'est accru, augmentant la bande passante pour traiter les volumes massifs de données requis par les applications à haut débit. Il est nécessaire d'augmenter le nombre de technologies sans fil sur le spectre des radiofréquences (RF). Ces technologies comprennent les communications mobiles et par satellite, WiMax, Bluetooth, WiFi, WLAN et les applications médicales. La petite taille, le faible coût et le profil bas sont les conditions requises pour les antennes dans les applications de communication sans fil. Les antennes microruban répondent à toutes ces exigences. L'antenne microruban d'ouverture est devenue accessible au public pour la première fois dans les années 1950. À partir du début des années 1980, le rythme de son développement s'est accéléré et cette antenne est toujours d'actualité. L'émergence de la technologie de communication sans fil a permis aux personnes vivant dans des zones difficiles d'accès de communiquer entre elles. Cette technologie leur permet d'émettre et de recevoir des signaux en même temps.

LTCC est apparu comme une technologie intéressante pour la miniaturisation des appareils électroniques portables. Les appareils électroniques portables d'aujourd'hui pour la communication des données, de la voix et de la vidéo nécessitent des circuits compacts, un poids léger et une fonctionnalité à grande vitesse, comme les téléphones mobiles, les assistants numériques personnels et les ordinateurs personnels. D'autre part, le LTCC est une technologie multicouche qui a été utilisée pour emballer des circuits intégrés (IC) avec un coût comparativement faible et un débit élevé, il a une large gamme d'applications dans des domaines tels que les télécommunications, l'industrie, l'aérospatiale, la médecine, l'armée...etc.

Ce chapitre présente deux conceptions d'antennes d'alimentation en microruban basées sur la technologie LTCC multicouche. L'avantage de cette topologie est qu'un seul paramètre, l'épaisseur du substrat (nombre de couches LTCC), doit être adapté pour optimiser les performances de la bande passante. Les deux antennes sont conçues pour la bande de fréquence de 2,45 GHz, l'une des bandes de fréquence les plus importantes pour les communications sans fil d'aujourd'hui.

## 2.2 Méthodes de conception

Au cours de la phase de conception, il est important de connaître les propriétés des matériaux diélectriques et conducteurs qui composent une antenne. Cela est particulièrement important lors de la conception d'une antenne imprimée, car l'énergie du champ électromagnétique est confinée à l'intérieur du substrat de l'antenne. Mais il est également important de connaître les propriétés des matériaux dans l'environnement proche de l'antenne. Les caractéristiques de l'antenne telles que le gain, le diagramme de rayonnement, l'efficacité, l'impédance et la fréquence de résonance seront modifiées par la présence de matériaux diélectriques ou conducteurs dans l'environnement immédiat.

La première étape est le choix du substrat et du conducteur, dont les caractéristiques à connaître sont les suivantes

- **Pour le substrat :** sa permittivité relative, sa tangente de perte et sa hauteur  $h$ ,
- **Pour le conducteur :** sa conductivité  $\sigma$  et son épaisseur  $t$ .

La conception consiste ensuite à définir

- La longueur, la largeur et la forme de l'écusson,
- La position et le type d'alimentation (coaxiale, microruban ... etc.).

Dans ce travail, un seul type d'alimentation est présenté. Il s'agit d'une alimentation par ligne microruban.

Avant de commencer à concevoir une antenne, il est nécessaire de spécifier les caractéristiques que l'antenne doit avoir en fonction de l'application envisagée : sa bande de fréquence opérationnelle, ses dimensions et son rayonnement. Au cours des dernières

décennies, le nombre de réseaux sans fil s'est accru, augmentant la bande passante pour traiter les volumes massifs de données requis par les applications à haut débit. Il est nécessaire d'augmenter le nombre de technologies sans fil sur le spectre des radiofréquences (RF). Ces technologies comprennent les communications mobiles et par satellite, WiMax, Bluetooth, WiFi, WLAN et les applications médicales. La petite taille, le faible coût et le profil bas sont les conditions requises pour les antennes dans les applications de communication sans fil.

### 2.3 La première antenne proposée

Quelques conceptions d'antennes ont été identifiées dans la littérature comme étant de bons candidats pour nos conceptions initiales. Sur la base de cette recherche, les meilleures conceptions les plus pertinentes en termes de simplicité et de performance sont de type patch. Une antenne imprimée a été redessinée, modifiée et simulée dans le simulateur HFSS afin de vérifier ses caractéristiques et ses performances. Cette antenne a été conçue pour fonctionner à 2,45 GHz.

La géométrie de l'antenne obtenue est illustrée à la Figure 2.1. Elle est réalisée à partir d'un substrat LTCC, avec une tangente de perte de 0,002 et une permittivité relative de 7,2. Les dimensions totales de l'antenne sont de  $22 \times 28 \times 1$  mm<sup>3</sup>. Les différentes dimensions finales ont été déterminées à la suite d'une étude paramétrique détaillée, les principaux paramètres de l'antenne conçue sont présentés dans le tableau 2.1.

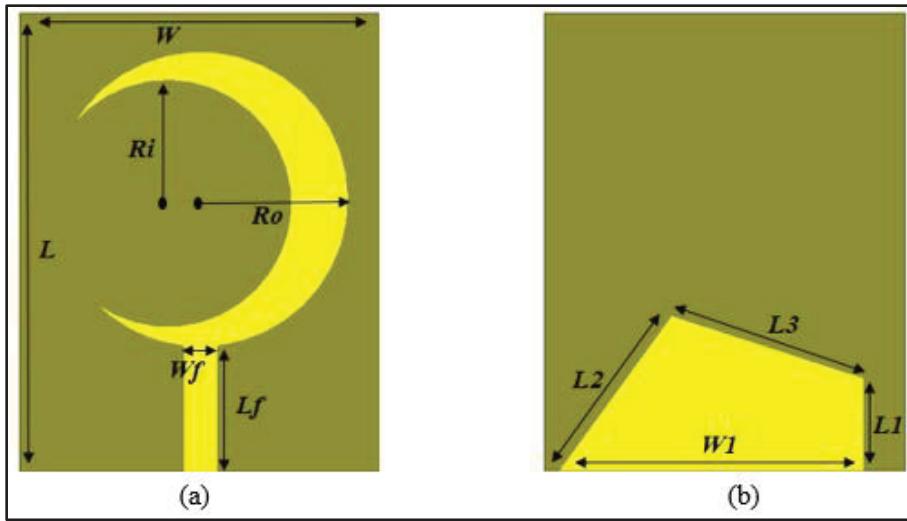


Figure 2.1 Paramètres de conception de l'antenne proposée. (a) vue du dessus, (b) vue du dessous

Tableau 2.1 Dimensions géométriques de l'antenne conçue

Paramètres	L	W	Lf	Wf	Ro	Ri
Valeur (mm)	28	22	7.71	2.1	9	7.5
Paramètres	W1	L1	L2	L3		
Valeur (mm)	18.63	5.67	11.725	12.35		

Les trois configurations d'antennes analysées explorent l'évolution progressive d'une fente circulaire, toutes réalisées sur un substrat diélectrique avec un système d'alimentation par ligne microruban (Figure 2.2). La première configuration (Ant.1) présente une circulaire complète alimentée par un stub rectangulaire centré. Cette géométrie constitue la référence de base pour l'étude. La deuxième configuration (Ant.2) introduit une perturbation significative par l'ouverture partielle de la fente circulaire, créant une structure en forme de croissant ou de C. Cette modification géométrique brise la symétrie circulaire et modifie fondamentalement la distribution des courants de surface. L'ouverture de la fente influence directement les chemins de courant et par conséquent décale la fréquence de résonance tout en modifiant l'impédance d'entrée de l'antenne. La troisième configuration (Ant.3) poursuit, la forme rectangulaire a été remplacée par une forme trapézoïdal du plan de masse.

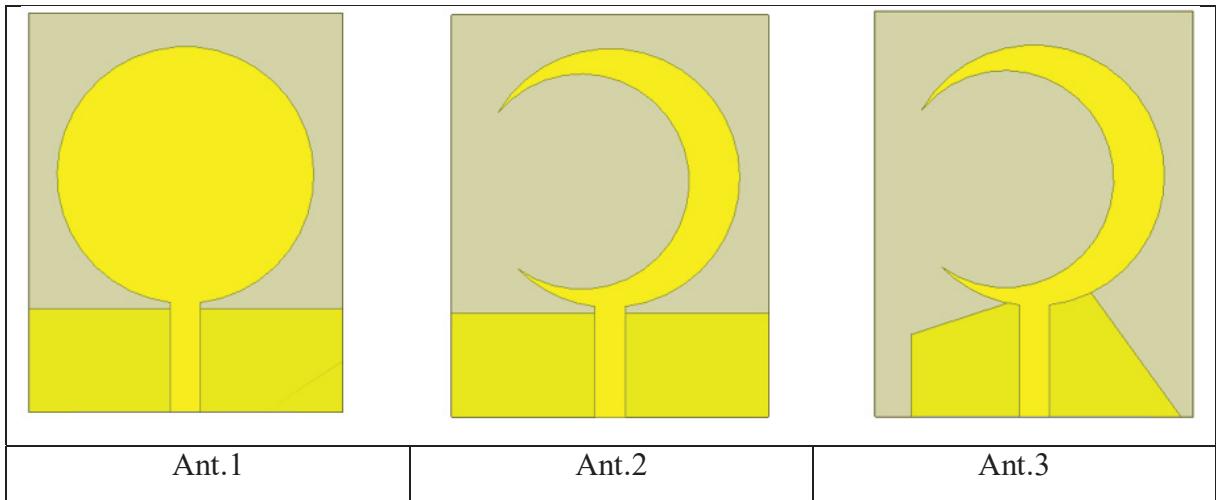


Figure 2.2 Conception étape par étape d'une antenne proposée

L'analyse du coefficient de réflexion  $S_{11}$  révèle des comportements remarquablement distincts pour chaque configuration, démontrant l'influence critique de l'ouverture progressive de la fente sur les performances d'adaptation. Avec sa fente circulaire, présente une résonance bien définie centrée sur approximativement 2,4 GHz, avec un coefficient de réflexion atteignant environ -18 dB. La configuration Ant.3 montre un décalage significatif de la résonance vers les fréquences avec un pic d'adaptation situé aux de 2,45 GHz et un niveau de  $S_{11}$  atteignant environ -26 dB. Cette amélioration remarquable du niveau d'adaptation résulte de la modification de la géométrie de plan de masse et une étude paramétrique pour chaque étape.

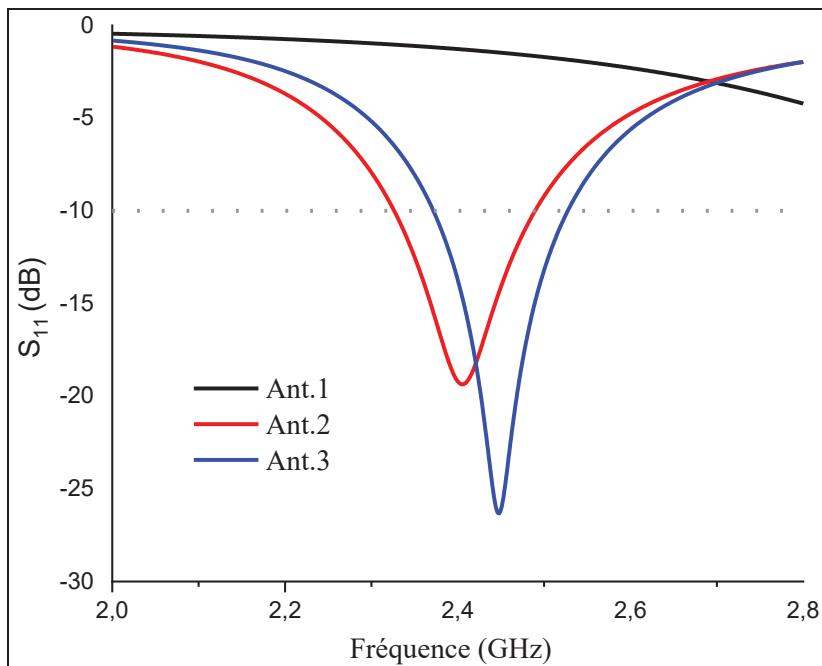


Figure 2.3 Coefficient de réflexion (S11) pour différentes configurations d'antennes

Maintenant que l'antenne a été conçue et optimisée, nous allons démontrer ses différentes caractéristiques de rayonnement et discutons des résultats obtenus.

La qualité d'adaptation d'une antenne est définie par son coefficient de réflexion ou de son impédance caractéristique (généralement 50 ohms). Le coefficient de réflexion, noté  $S_{11}$  correspond au rapport entre la tension réfléchie et la tension incidente, exprimé en décibels. Dans le cas des antennes, Ce paramètre représente le taux d'énergie réellement transféré vers l'élément rayonnant, Sa valeur varie en fonction de la fréquence. Pour assurer une bonne adaptation dans la bande de fréquence requise, on adopte généralement les critères suivants  $S_{11} \leq -10$  dB.

Une valeur de  $S_{11}$  inférieure ou égale à -10 dB signifie que 90 % de la puissance incidente est transmise à l'antenne, tandis que seulement 10 % de la puissance incidente est réfléchie,. L'antenne conçue a une fréquence de résonance de 2,45 GHz avec un affaiblissement de réflexion de -26,13 dB, comme illustré à la Figure 2.4. L'antenne a une largeur de bande de 160 MHz, centrée sur la fréquence de 2,45 GHz, qui appartient à l'intervalle [2,37-2,53] GHz.

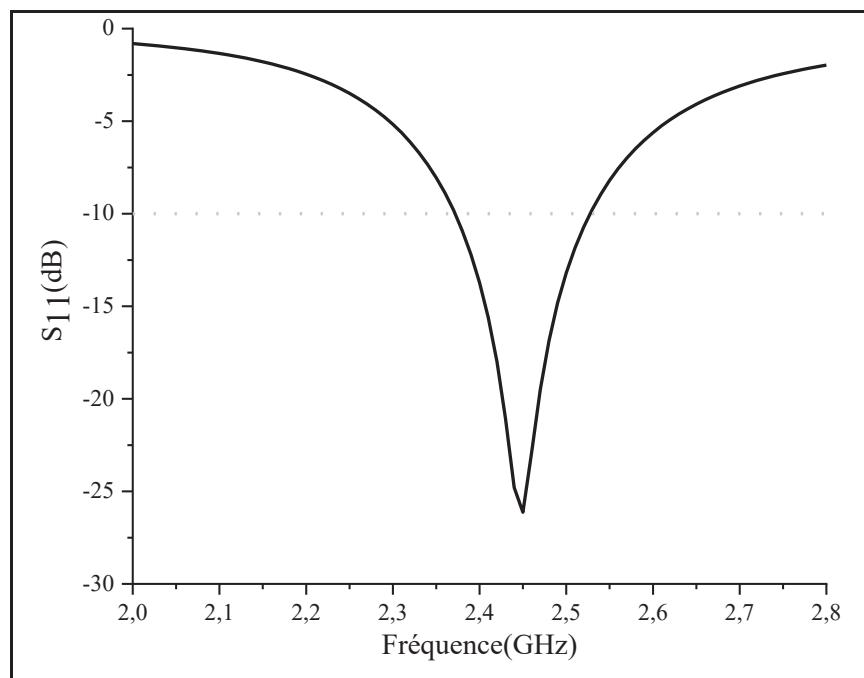


Figure 2.4 Le paramètre  $S_{11}$  de l'antenne proposée

Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) est le quotient entre les champs électriques maximum et minimum dans une ligne de transmission. En d'autres termes, il caractérise la quantité de signal réfléchi aux bornes du composant micro-ondes. Une norme acceptable dans les systèmes de rayonnement électromagnétique est une valeur VSWR inférieure à 2. Le VSWR de notre antenne est illustré à la Figure 2.5. Il est inférieur à 2 dans la bande cible de 2,45 GHz, ce qui signifie un bon ajustement qui se traduit par le plus grand transfert de puissance.

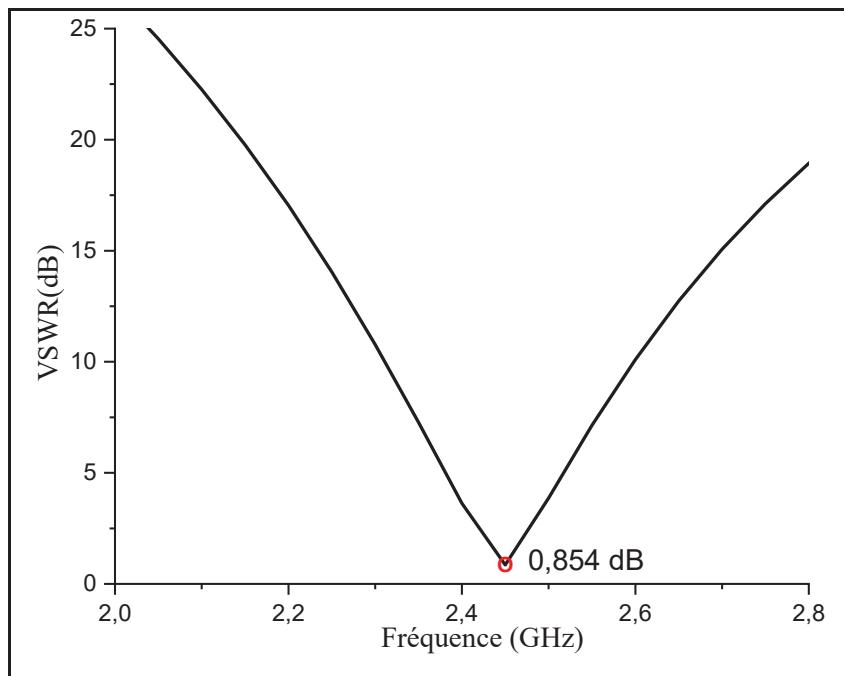


Figure 2.5 Taux d'ondes stationnaires de l'antenne proposée

La Figure 2.6 montre les parties réelle et imaginaire de l'impédance d'entrée. Nous observons une bonne correspondance, autour de 50 ohms dans la bande opérationnelle et égale à 50 ohms au point de résonance.

La partie imaginaire de l'impédance d'entrée représente la puissance stockée dans le champ proche du radiateur. Cette puissance n'est pas considérée comme une puissance rayonnée. Une antenne avec une réactance nulle et une impédance d'entrée réelle (partie imaginaire nulle) est considérée comme résonante à la fréquence correspondante. Les résultats obtenus à partir de la réactance de l'antenne montrent une bonne adéquation entre l'impédance et le spectre de fréquence.

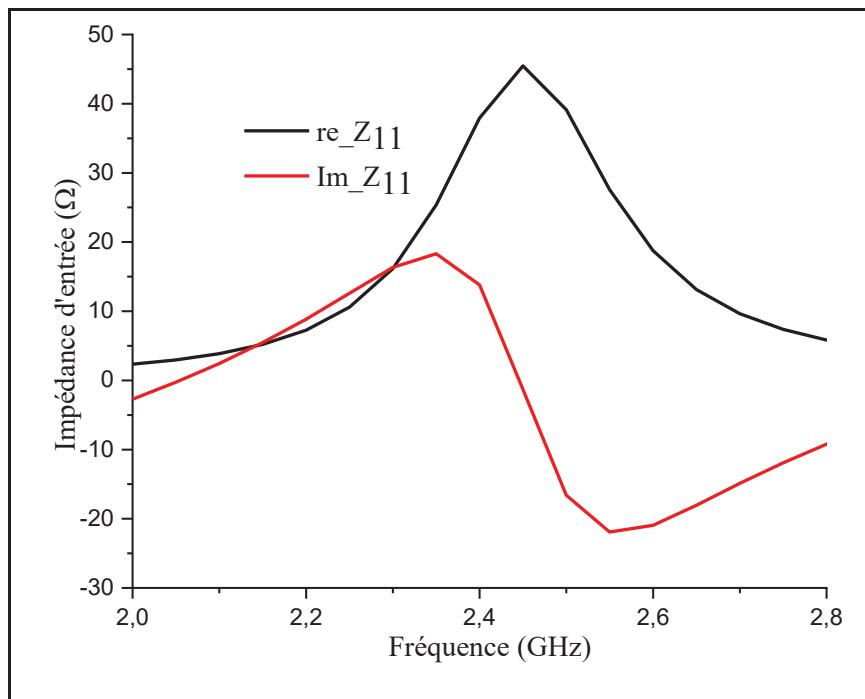


Figure 2.6 Impédance d'entrée ( $Z_{11}$ ) de l'antenne conçue

L'énergie rayonnée par l'antenne est représentée par le diagramme de rayonnement. Le diagramme de rayonnement définit la puissance rayonnée par l'antenne en fonction de la direction dans laquelle l'antenne est orientée et montre la distribution de l'énergie rayonnée dans l'espace.

La Figure 2.7 montre le diagramme de rayonnement. Elle montre clairement que notre antenne a un rayonnement omnidirectionnel dans le plan H et un rayonnement bidirectionnel dans le plan E, ce qui est souhaitable pour les applications sans fil.

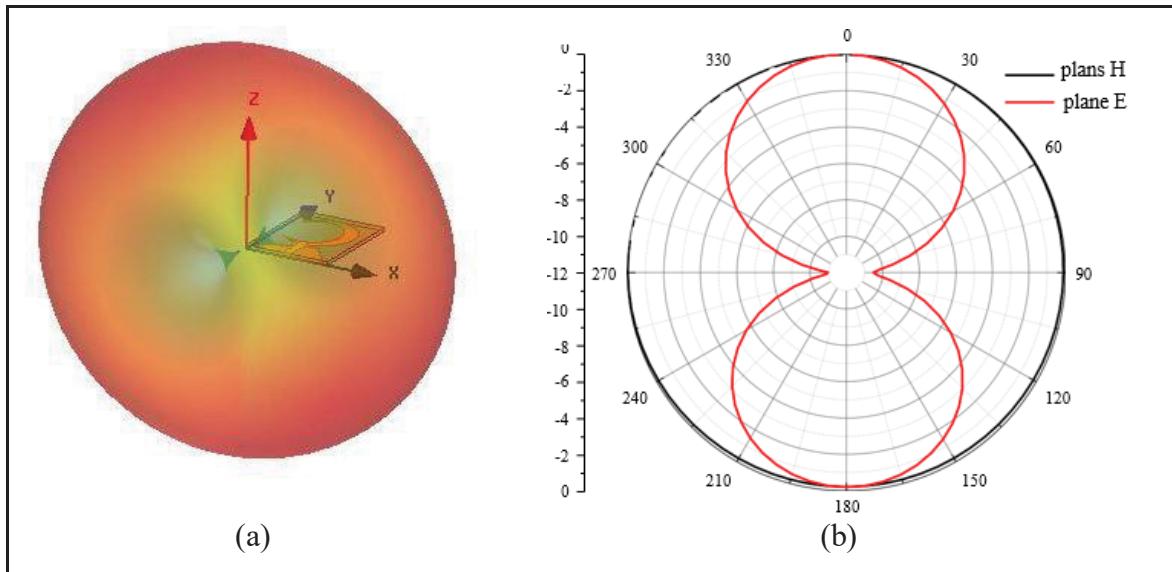


Figure 2.7 Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2,45 GHz, (a) diagramme de rayonnement 3D, (b) 2D plans E et H

Le gain (dBi) et l'efficacité de rayonnement de l'antenne conçue sont également pris en compte et représentés sur la Figure 2.8. L'efficacité de rayonnement de l'antenne conçue est supérieure à 89,5 % à la fréquence de résonance. En outre, on observe que le gain de l'antenne conçue est d'environ 1,61 dBi à la fréquence de résonance, ce qui représente un gain acceptable.

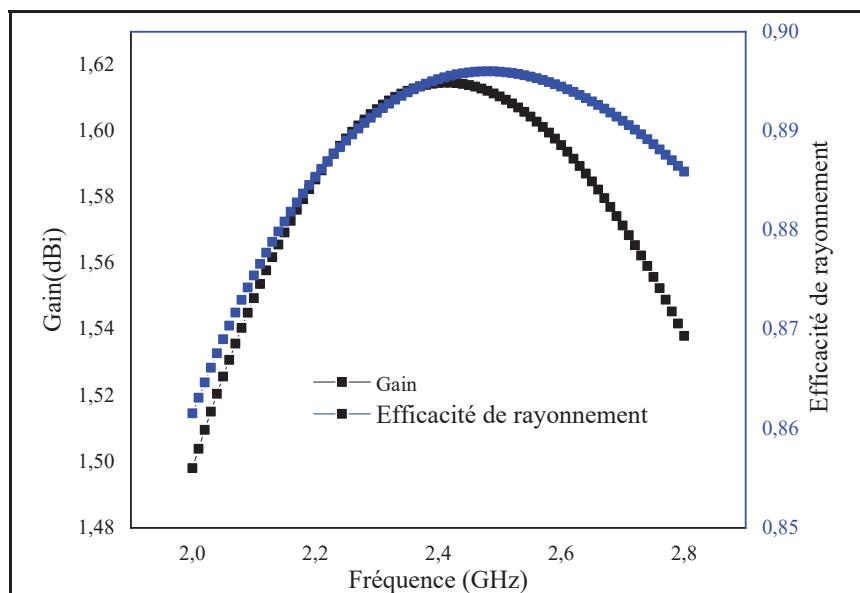


Figure 2.8 Gain et efficacité de rayonnement de l'antenne

## 2.4 La deuxième Antenne Proposée

La deuxième antenne conçue fonctionne à 2,45 GHz, elle a une forme carrée, avec des dimensions de  $24 \times 24 \times 1$  mm<sup>3</sup>. Le patch microruban est constitué de deux lignes perpendiculaires formant un L inversé pour produire le radiateur principal, qui a été modifié et optimisé en plusieurs étapes pour trouver la bande d'intérêt optimale à 2,45 GHz, en utilisant une étude paramétrique pour différentes valeurs de la forme du L et de l'épaisseur du substrat. Le radiateur principal proposé a été conçu comme un simple patch de ligne microruban, directement relié au port d'alimentation par un guide d'ondes coplanaire (CPW). Ce patch a été placé sur le substrat LTCC avec une tangente de perte de 0,002 et une permittivité relative de 7,2. La Figure 2.9 montre la structure de l'antenne conçue à 2,45 GHz, et le tableau 2.2 présente ses dimensions après optimisation.

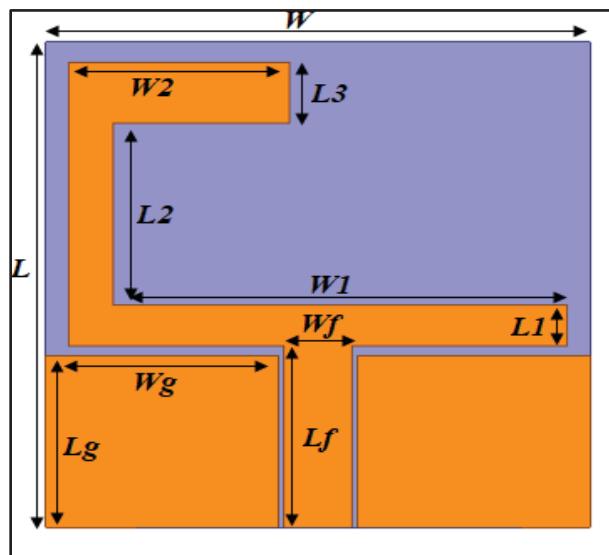


Figure 2.9 Paramètres de conception de l'antenne proposée

Tableau 2.2 Dimensions géométriques de l'antenne conçue

Paramètres	L	W	Lf	Wf	Lg	Wg
Valeur (mm)	24	24	9	3	8.5	10.25
Paramètres	W1	L1	L2	L3	W2	
Valeur (mm)	20	2	9	3	9.75	

Lors de la conception d'une antenne patch microruban, le choix du matériau du substrat est crucial. La permittivité et l'épaisseur du substrat affectent la largeur de bande, l'efficacité et le gain de l'antenne patch microruban. En faisant les bons choix, ces caractéristiques de performance peuvent être grandement améliorées.

L'optimisation des antennes planaires nécessite une approche méthodique où les modifications géométriques progressives permettent d'ajuster les caractéristiques de rayonnement et d'adaptation. Les trois configurations d'antennes étudiées évoluent d'une géométrie simple vers une complexité (Figure 2.10) : l'Ant.1 adopte une structure en T conventionnelle avec un élément rayonnant horizontal alimenté par ligne microruban verticale servant de référence, l'Ant.2 introduit une asymétrie par sa structure en L où l'élément rayonnant perpendiculaire à l'alimentation modifie la distribution des courants et déplace la fréquence de résonance, tandis que l'Ant.3 présente une géométrie en escalier adopte une structure en lettre J.

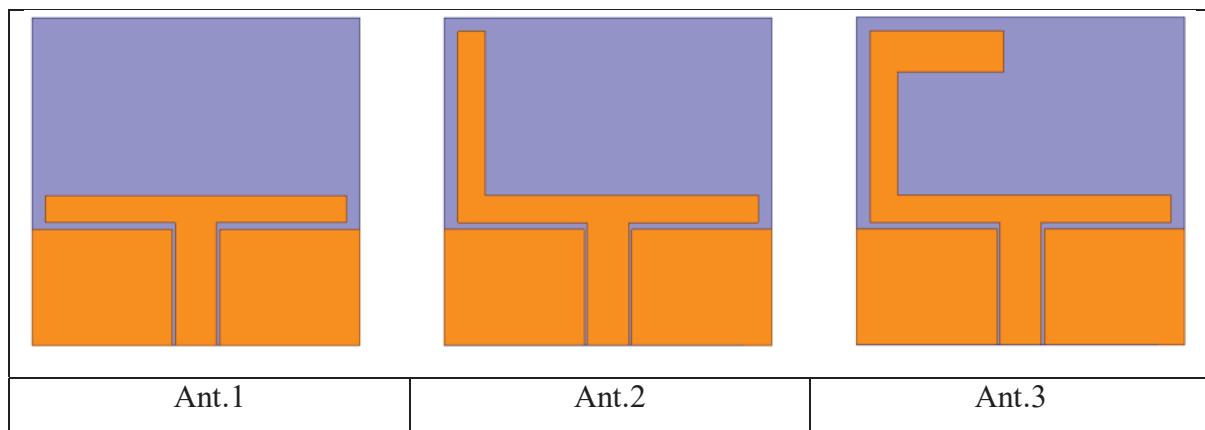


Figure 2.10 Antenne à conception étape par étape

L'analyse du coefficient de réflexion  $S_{11}$  révèle des performances d'adaptation distinctes selon la géométrie : l'Ant.1 présente un comportement stable mais modéré (-2 à -3 dB) sans résonance marquée dans la bande analysée, l'Ant.2 démontre une résonance très prononcée à 2,7 GHz avec un excellent  $S_{11}$  de -13 dB grâce à l'asymétrie en L qui modifie la distribution des courants, tandis que l'Ant.3 offre les meilleures performances avec une résonance

principale exceptionnelle à 2,45 GHz ( $S_{11} = -18$  dB), la géométrie en escalier créant des longueurs électriques qui génèrent ces résonances distinctes.

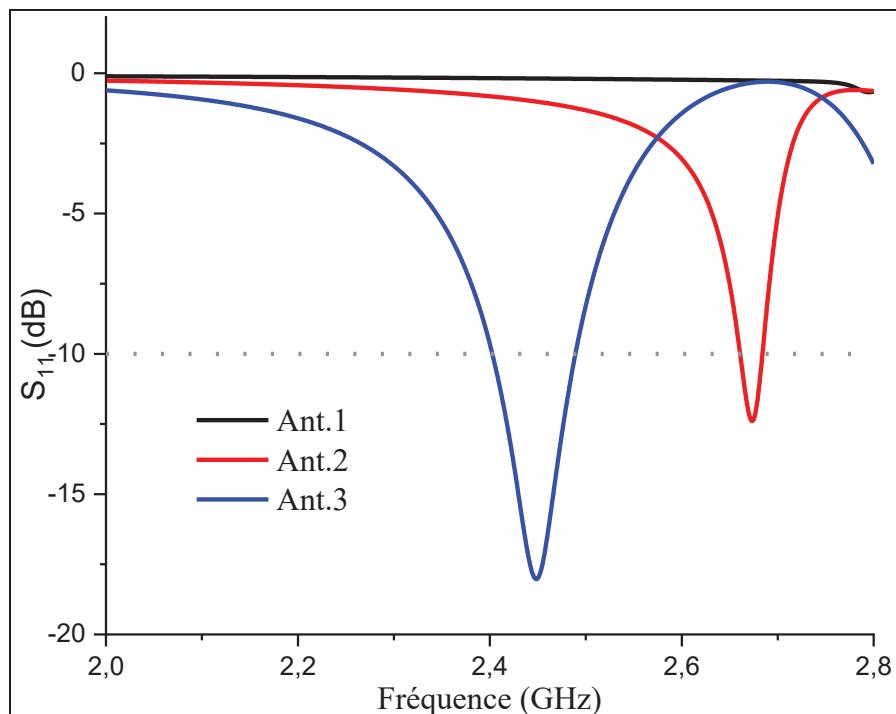


Figure 2.11 Paramètre  $S_{11}$  pour différentes configurations d'antennes

La Figure 2.12 montre le coefficient de réflexion simulé  $S_{11}$  en utilisant le simulateur HFSS. La simulation a été effectuée ; les résultats confirment l'adéquation de l'antenne conçue sur un substrat en matériau LTCC à faible coût. La fréquence de fonctionnement de notre antenne, pour  $S_{11} < 10$  dB, est comprise entre 2,4 GHz et 2,49 GHz, ce qui signifie une largeur de bande de 90 MHz et une fréquence de résonance à 2,45 GHz.

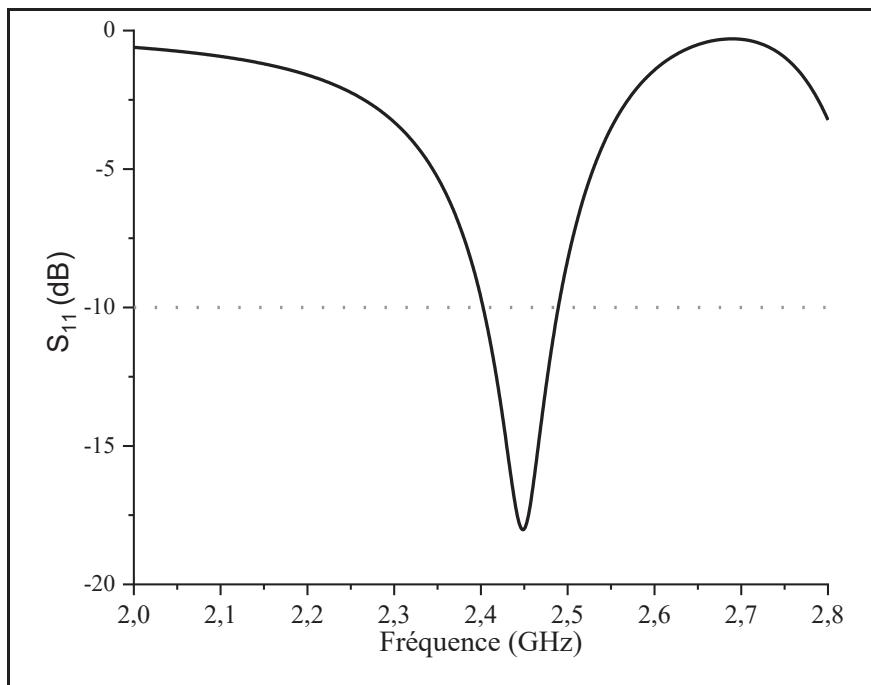


Figure 2.12 Paramètre  $S_{11}$  de l'antenne conçue

La Figure 2.13 montre le rapport d'ondes stationnaires, et il apparaît clairement que le rapport d'ondes stationnaires est inférieur à 1,191 à la fréquence de résonance de 2,45 GHz, ce qui indique une bonne adaptation à la fréquence de résonance choisie.

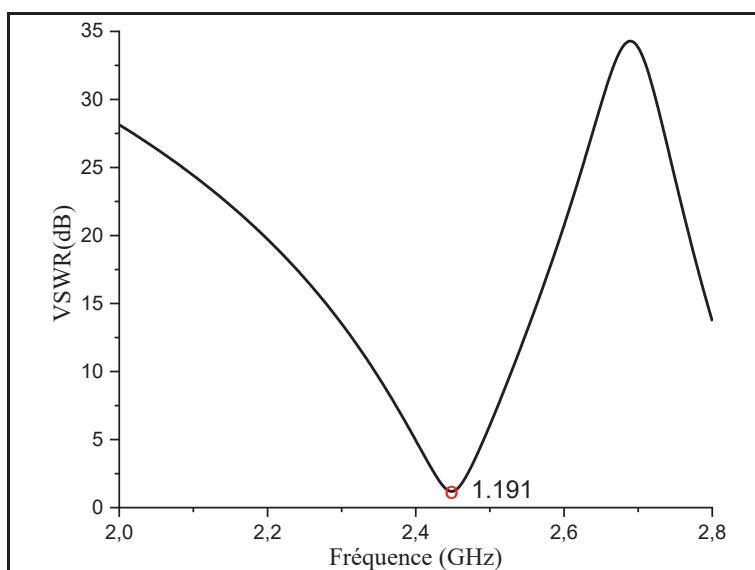


Figure 2.13 Taux d'ondes stationnaires de l'antenne proposée

Les caractéristiques de l'impédance d'entrée de l'antenne conçue dans la bande prévue sont illustrées à la Figure 2.14, qui indique que l'unité recevra au moins 90 % de la puissance d'entrée et réfléchira moins de 10 %, ce qui est suffisant pour toutes les applications.

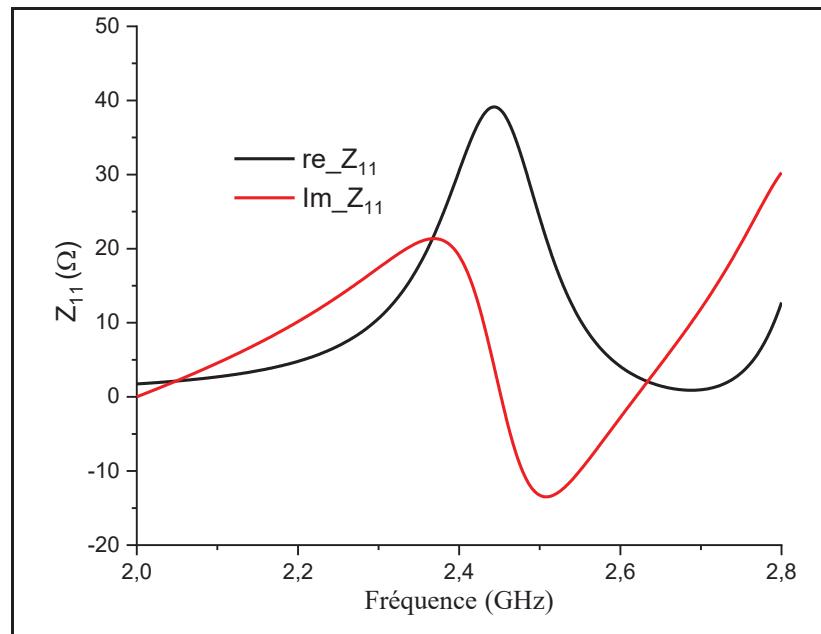


Figure 2.14 Impédance  $Z_{11}$  de l'antenne conçue

Les plans principaux pour la propagation des champs rayonnés sont le plan E et le plan H, qui correspondent aux plans contenant un champ électrique et un champ magnétique, respectivement, et sont fondamentalement les plans principaux pour la propagation du champ de rayonnement. L'antenne conçue a été simulée à 2,45 GHz.

La Figure 2.15 représente le plan E et le plan H à 2,45 GHz. Comme on peut le voir, les diagrammes d'antenne sont omnidirectionnels, ce qui est typique de cette antenne monopôle particulière.

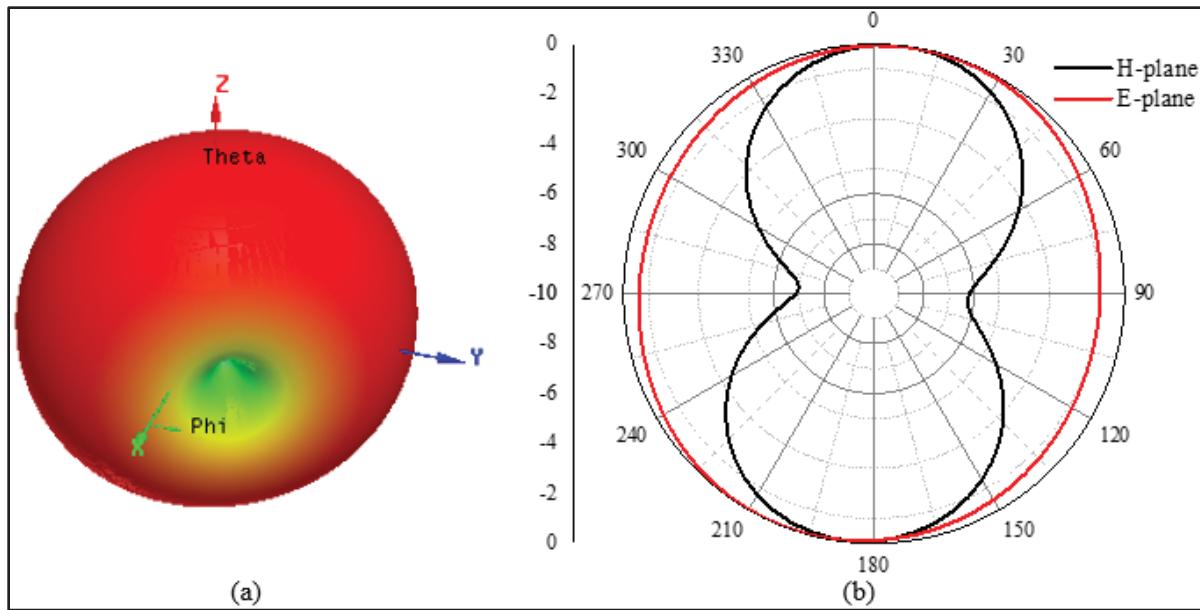


Figure 2.15 Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2,45 GHz, (a) diagramme de rayonnement 3D, (b) 2D plans E et H

Le gain (dBi) de l'antenne conçue est également pris en compte et est illustré à la Figure 2.16. Cela montre que l'antenne conçue à un gain acceptable.

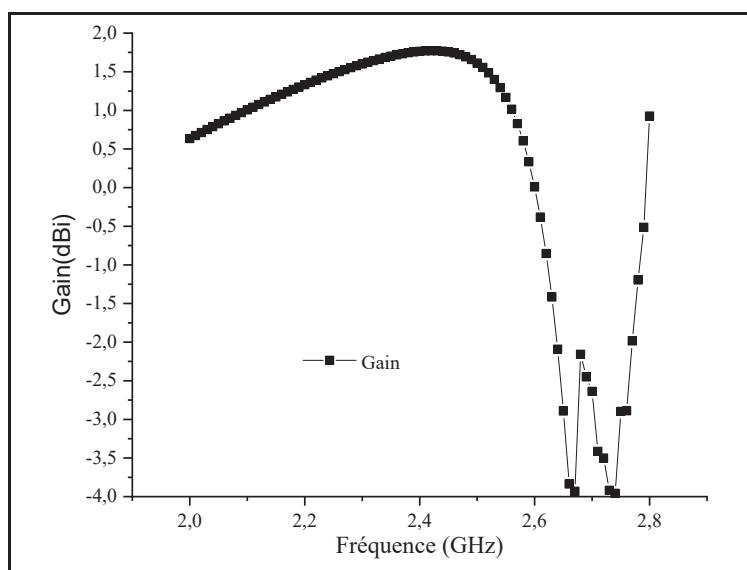


Figure 2.16 Gain de l'antenne proposée

## 2.5 Fabrication et mesures

Afin de valider en pratique le concept de conception d'antenne proposé, l'antenne conçue à 2,45 GHz a été fabriquée et testée. Les antennes fabriquées sont représentées sur les figures 2.17 (a) et (b), respectivement.

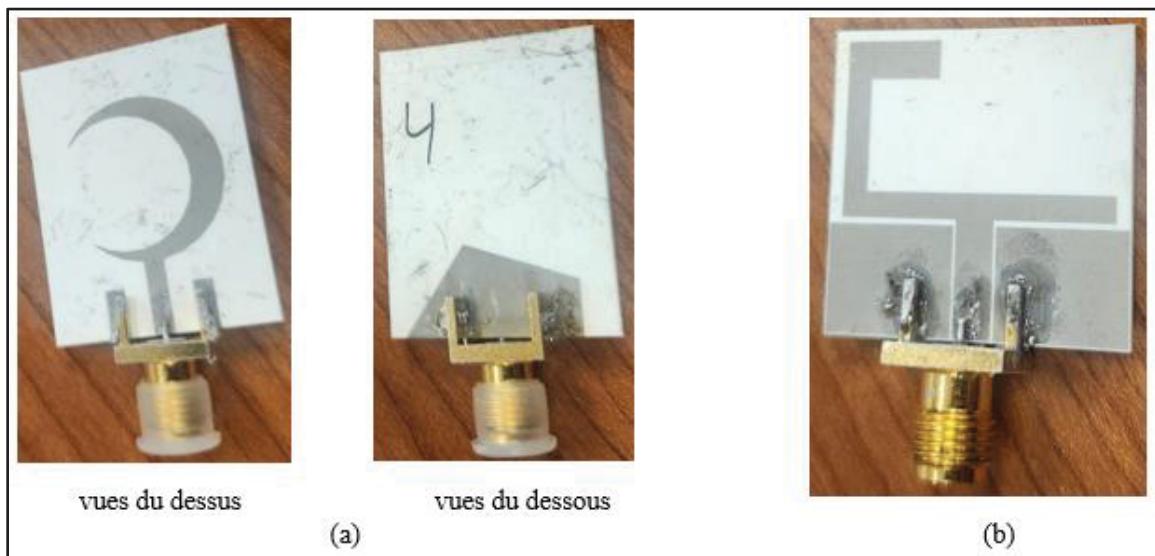


Figure 2.17 Prototype fabriqué de l'antenne proposée , (a) La première antenne proposée et (b) La deuxième antenne proposée

La Figure 2.18 montre les résultats simulés et mesurés de la valeur  $S_{11}$  des deux antennes testées à 2,45 GHz (a) et (b), respectivement. Les figures 2.14 (a) et (b) indiquent que les résultats  $S_{11}$  mesurés concordent assez bien avec les résultats de la simulation. La non-symétrie dans la deuxième antenne peut être due aux imperfections du dispositif de connexion et de la soudure.

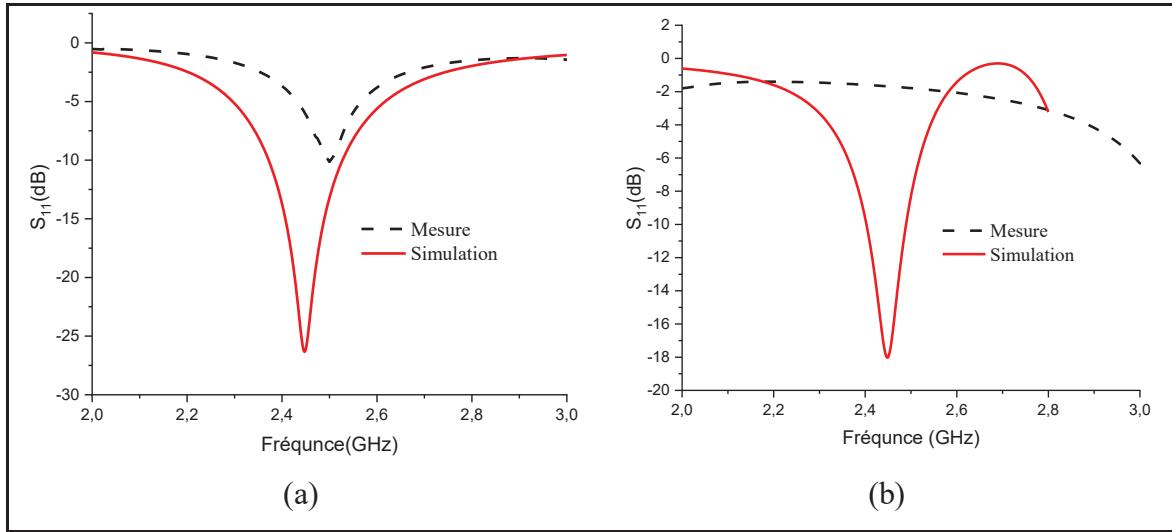


Figure 2.18 Prototype fabriqué de l'antenne proposée , (a) La première antenne proposée et (b) La deuxième antenne proposée

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, deux antennes patch en microruban fonctionnant à 2,45 GHz et basées sur un substrat en céramique cuite à basse température (LTCC) ont été proposées, fabriquées et évaluées avec succès par le biais d'expériences. L'utilisation d'un substrat LTCC a permis de contrôler l'épaisseur du substrat (nombre de couches LTCC) sur la base de la technologie LTCC multicouche, et d'améliorer la stabilité thermique, ce qui rend les antennes idéales pour les applications sans fil à haute performance à 2,45 GHz.

Un bon accord a été observé entre les paramètres  $S_{11}$  simulés et mesurés, confirmant la précision de la méthodologie de conception et la fiabilité du processus de fabrication LTCC. Les écarts mineurs observés dans les mesures ont été attribués à des facteurs pratiques tels que la soudure des connecteurs et les tolérances de fabrication. Dans l'ensemble, ces résultats valident les structures d'antennes basées sur le LTCC comme une solution efficace, robuste et pratique pour les applications sans fil compacts fonctionnant à 2,45 GHz.

## CHAPITRE 3

### CONCEPTION ET FABRICATION D'UN RESAUX ARD LTCC POUR DES APPLICATIONS MILLIMÉTRIQUES

#### 3.1 Introduction

Les bandes de fréquences d'ondes millimétriques, en particulier la gamme 26-30 GHz, sont devenues essentielles pour prendre en charge les débits de données élevés requis pour la 5G et les futurs systèmes sans fil. Cependant, le fonctionnement à ces fréquences présente des défis importants, notamment une perte de propagation accrue, des longueurs d'onde réduites et une plus grande sensibilité aux tolérances de fabrication. Pour résoudre ces problèmes, les systèmes d'antennes doivent présenter un gain élevé, une large bande passante et une grande efficacité de rayonnement. Bien que les antennes imprimées traditionnelles telles que les patchs et les fentes en microruban soient couramment utilisées, elles souffrent souvent d'une bande passante limitée et de pertes accrues dues à l'excitation des ondes de surface et aux effets du conducteur. En revanche, les antennes à résonateur diélectrique (ARD) offrent des performances supérieures en termes d'efficacité et de largeur de bande, ce qui en fait des candidats prometteurs pour les applications à ondes millimétriques. Cependant, lorsqu'ils sont mis en œuvre à l'aide de la technologie PCB conventionnelle, les ARD peuvent être confrontés à des difficultés d'alignement et de fabrication, en particulier dans les configurations en réseau où la précision est cruciale.

Pour surmonter ces limitations, ce chapitre présente le développement d'un réseau ARD à haut rendement utilisant la technologie de la céramique cuite à basse température (LTCC). La technologie LTCC permet l'intégration multicouche avec une grande précision dimensionnelle, ce qui permet la fabrication de structures d'antennes complexes et de réseaux d'alimentation en un seul processus fiable. Le réseau proposé tire parti de ces avantages pour obtenir des performances stables, une large bande d'impédance et une efficacité de rayonnement élevée dans la bande 26-30 GHz, ce qui le rend adapté aux systèmes de communication de la prochaine génération.

Ce chapitre présente un réseau d'antennes à résonateur diélectrique (ARD) à haute efficacité conçu à l'aide de la technologie de la céramique cuite à basse température (LTCC) avec couplage d'ouverture, ciblant les fréquences d'ondes millimétriques et les applications 5G. Le réseau est fabriqué à l'aide d'un seul processus LTCC utilisant un empilement multicouche personnalisé, garantissant un alignement précis et un contrôle dimensionnel. La conception proposée permet d'obtenir une large bande passante d'impédance, un gain constant dans toute la bande passante de fonctionnement et une efficacité de rayonnement élevée. Ce chapitre est organisé comme suit : La section 4.1 décrit la conception de l'élément à ARD unique, la section 4.2 détaille la configuration du réseau et le développement du réseau d'alimentation, ainsi que les résultats simulés et expérimentaux, enfin la section 4.3 résume les principaux résultats et conclusions.

### 3.2 Partie I : ARD à un seul élément

#### 3.2.1 Conception de l'élément résonateur diélectrique

Cette section présente la conception structurelle de l'antenne à résonateur diélectrique elliptique (ARD) proposée, mise en œuvre à l'aide de la technologie de la céramique cuite à basse température (LTCC). L'antenne ARD s'inspire du modèle décrit par Mohsen Niayesh dans l'article de référence Niayesh et Kouki, (2021). L'antenne se compose d'un résonateur diélectrique en céramique MW21, placé sous une fente rectangulaire gravée dans un plan de masse en argent.

L'énergie est couplée au ARD à travers cette fente, qui est excitée par une ligne d'alimentation en microruban située au-dessus du plan de masse, sur la surface supérieure de l'empilement LTCC. Le substrat LTCC est réalisé à l'aide d'un ruban vert Ferro A6M, avec  $\epsilon_r = 5,8$  et une faible tangente de perte, offrant une excellente capacité d'intégration et des performances à des fréquences d'ondes millimétriques. Toutes les couches conductrices, y compris le plan de masse et la ligne d'alimentation, sont réalisées en argent, un matériau compatible avec le traitement LTCC. Cette structure multicouche permet une intégration

complète des éléments d'alimentation et de rayonnement dans une configuration compacte et sans alignement.

La disposition générale de l'antenne est illustrée dans les figures 3.1(a) et 3.1 (b), correspondant aux vues du dessus et du dessous, respectivement. Les paramètres géométriques de la structure de l'antenne sont résumés dans le tableau 3.1.

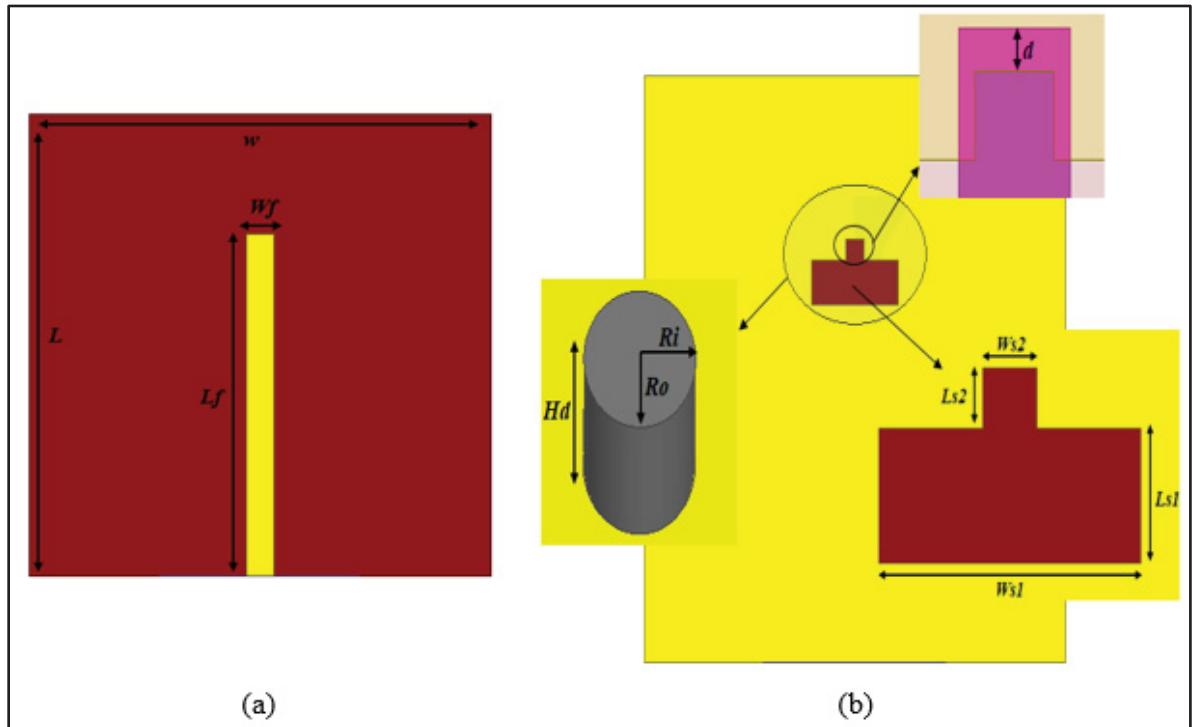


Figure 3.1 Géométrie de l'ARD elliptique basée sur la LTCC proposée : (a) vue de dessus, (b) vue de dessous

Tableau 3.1 Paramètres de conception de l'élément ARD elliptique proposé

Paramètres	W	L	Wf	Lf	Ws1	Ls1
Valeur (mm)	11.5	11.5	8.5	0.7	2.4	0.9
Paramètres	Ws2	Ls2	Hd	Ro	Ri	D
Valeur (mm)	0.5	0.4	2.35	1.95	1.365	0.2

Pour guider le dimensionnement initial du résonateur diélectrique elliptique, une approche analytique est employée pour estimer la fréquence de résonance du mode fondamental. Bien

que le résonateur de cette conception ait une forme elliptique, l'estimation est basée sur des expressions fermées dérivées à l'origine pour des géométries cylindriques. Ces modèles, développés par Petosa, sont largement utilisés comme point de départ fiable dans la conception d'antennes à résonateur diélectrique (ARD), y compris pour les formes non cylindriques, en les traitant comme des cylindres équivalents à des fins analytiques.

Pour le mode fondamental HEM11δ, la fréquence de résonance  $f_r$  d'un ARD cylindrique peut être approximée par l'expression suivante :

$$f_r = \frac{c}{2\pi r_{DR} \sqrt{\epsilon_r}} \left( 1.71 + \frac{r_{DR}}{h_{DR}} + 0.1578 \left( \frac{r_{DR}}{h_{DR}} \right)^2 \right) \quad (3.1)$$

- $f_r$  : est la fréquence de résonance en Hz.
- $c$  : c'est la vitesse de la lumière dans le vide ( $3 \times 10^8$  fois  $10^8$  m/s)
- $r_{DR}$  : est le rayon du résonateur diélectrique
- $h_{DR}$  : est la hauteur du résonateur diélectrique
- $\epsilon_r$  : est la permittivité relative du matériau diélectrique

Dans ce travail, le résonateur diélectrique est fabriqué en céramique MW21 avec une permittivité relative de  $\epsilon_r = 21,8$ . La gamme de fréquences visée est de 26-30 GHz. Les valeurs initiales des dimensions du résonateur ont été calculées à l'aide de cette équation, en supposant une approximation cylindrique équivalente. Ces dimensions ont ensuite été affinées par des simulations de modes propres dans Ansys HFSS afin de garantir l'excitation précise du mode hybride souhaité dans la bande de fréquence spécifiée.

Le modèle analytique fournit un point de départ utile, réduisant la nécessité d'effectuer des balayages paramétriques approfondis pendant l'optimisation à ondes pleines. Les dimensions optimisées finales, ainsi que les paramètres de la fente et de l'alimentation, sont présentés dans le tableau 3.1.

### 3.2.2 Simulation et discussion des résultats

Cette section présente les performances électromagnétiques simulées de l'antenne à résonateur diélectrique elliptique (ARD) proposée. L'évaluation comprend l'affaiblissement de retour ( $S_{11}$ ), le gain, l'efficacité de rayonnement, les diagrammes de rayonnement 3D, les diagrammes polaires 2D et la distribution du champ, tous obtenus par des simulations pleine onde dans Ansys HFSS sur la gamme de fréquences de 26 à 32 GHz.

Avant d'obtenir la forme elliptique, nous avons d'abord touché ou commencé par la forme circulaire, comme le montre la figure 3.2.

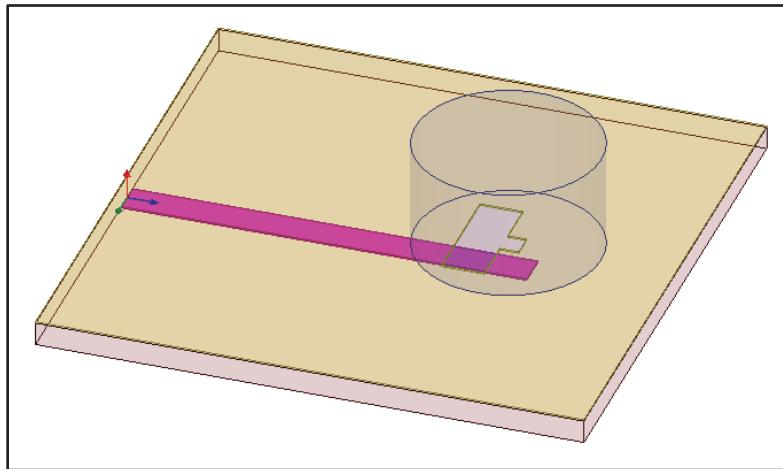


Figure 3.2 Antenne résonateur diélectrique de configuration cylindrique

D'après la figure 3.3, l'absence d'adaptation d'impédance est indiquée par une perte de retour supérieure à -10 dB, ce qui peut s'expliquer par le fait que la distinction géométrique a une forte influence sur les propriétés électromagnétiques de l'antenne, y compris les modes de résonance, la polarisation, la largeur de bande et le diagramme de rayonnement. Le DRA cylindrique, avec sa symétrie axiale, génère des modes dégénérés et offre un rayonnement généralement symétrique, avec une polarisation linéaire facile à exciter. En revanche, l'asymétrie du ARD elliptique permet une séparation naturelle des modes et facilite la génération d'une polarisation circulaire ou double, tout en offrant une plus grande souplesse dans le contrôle du diagramme de rayonnement. De plus, l'architecture elliptique offre souvent une bande passante plus large que la configuration cylindrique.

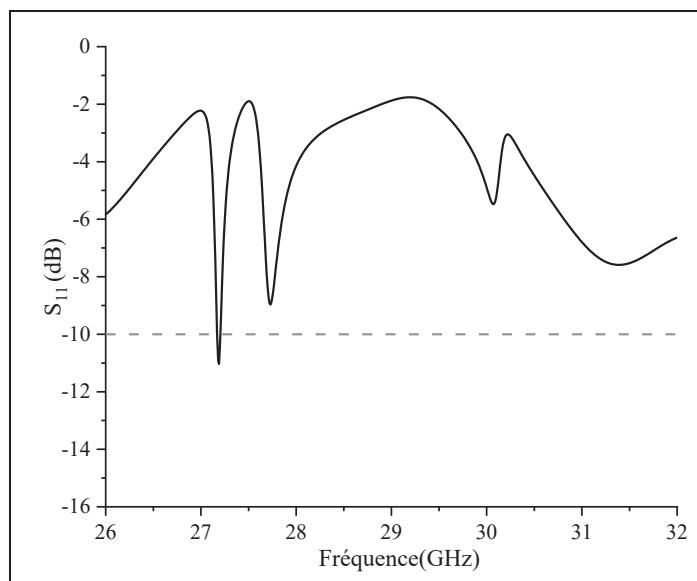


Figure 3.3  $S_{11}$  simulé de l'élément ARD cylindrique proposé

L'antenne présente une bonne adaptation d'impédance avec une perte de retour inférieure à -10 dB de 27,3 GHz à 30,5 GHz, couvrant une largeur de bande de 3,2 GHz, ce qui correspond à une largeur de bande fractionnelle d'environ 11,1 % pour le ARD de forme elliptique (Figure 3.4). Deux creux résonants distincts sont observés près de 28,1 GHz et 29,3 GHz, indiquant une excitation efficace du résonateur diélectrique par l'alimentation couplée à la fente.

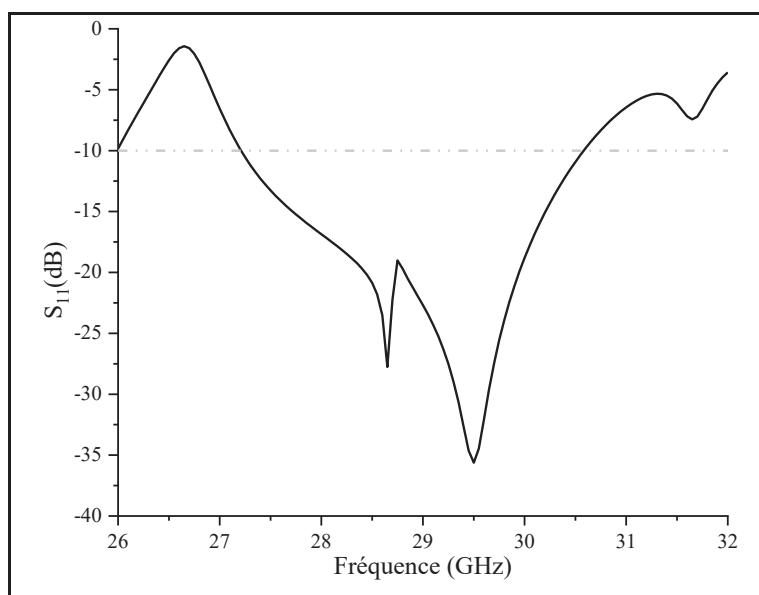


Figure 3.4 Affaiblissement de retour simulé ( $S_{11}$ ) de l'élément ARD elliptique proposé

La figure 3.5 illustre le gain et l'efficacité de rayonnement simulés de l'antenne. Le gain reste relativement stable dans toute la bande passante de fonctionnement, avec des valeurs comprises entre 2,5 dBi et 6,8 dBi, et atteignant un maximum de 6,8 dBi à 31,8 GHz. L'efficacité de rayonnement (en rouge) est constamment supérieure à 90 % et approche 98 % sur la majeure partie de la bande, ce qui démontre de faibles pertes diélectriques et conductrices. Ces résultats confirment l'adéquation de la conception proposée pour les communications en ondes millimétriques nécessitant à la fois une compacité et une efficacité élevées.

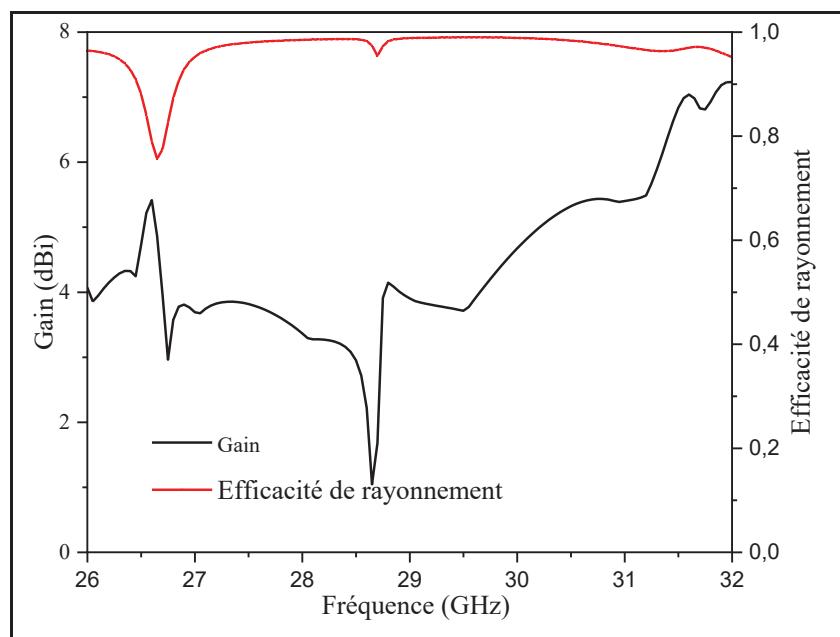


Figure 3.5 Gain et efficacité de rayonnement simulés

À 28,65 GHz et 29,5 GHz, les diagrammes de champ lointain 3D présentent des caractéristiques de rayonnement larges avec des formes quasi-omnidirectionnelles et une directivité modérée. Ces diagrammes confirment la capacité de l'antenne à fournir une bonne couverture spatiale et la rendent appropriée pour l'intégration de réseaux.

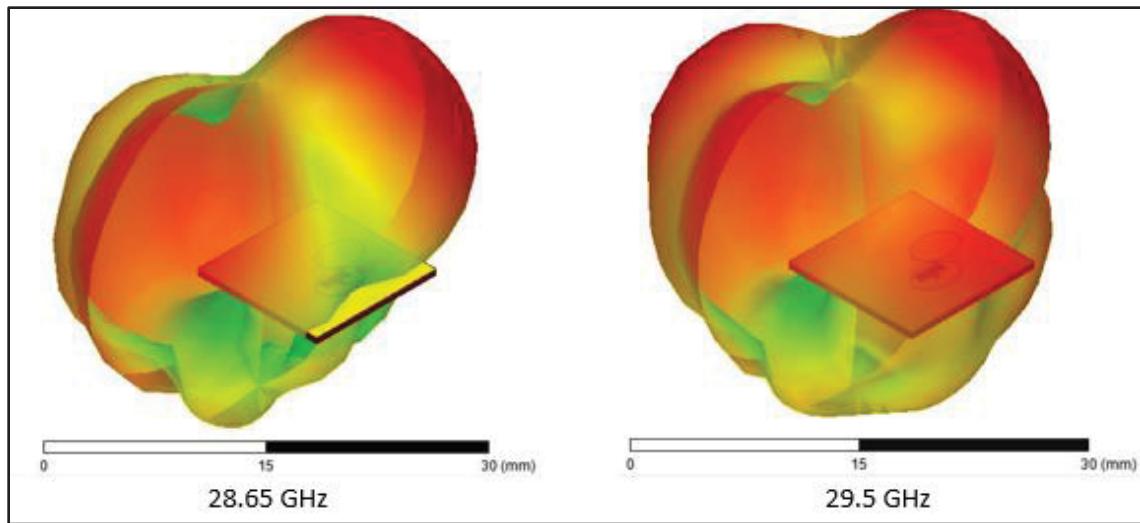


Figure 3.6 Diagrammes de rayonnement 3D simulés à 28,65 GHz (à gauche) et 29,5 GHz (à droite)

La figure 3.7 présente les diagrammes de rayonnement polaire 2D simulés dans les plans principaux E et H à quatre fréquences : 27,2 GHz, 28,65 GHz, 29,5 GHz et 30,5 GHz. Les résultats montrent des lobes principaux clairement définis dans les deux plans avec des largeurs de faisceau relativement cohérentes dans toute la bande passante. Des asymétries et des distorsions mineures sont observées, en particulier dans le plan E, qui peuvent être attribuées à la géométrie elliptique du résonateur et à la nature asymétrique de l'excitation alimentée par la fente. Malgré ces effets, l'antenne conserve un comportement directionnel stable, démontrant une bonne performance de rayonnement dans toute la bande passante de fonctionnement.

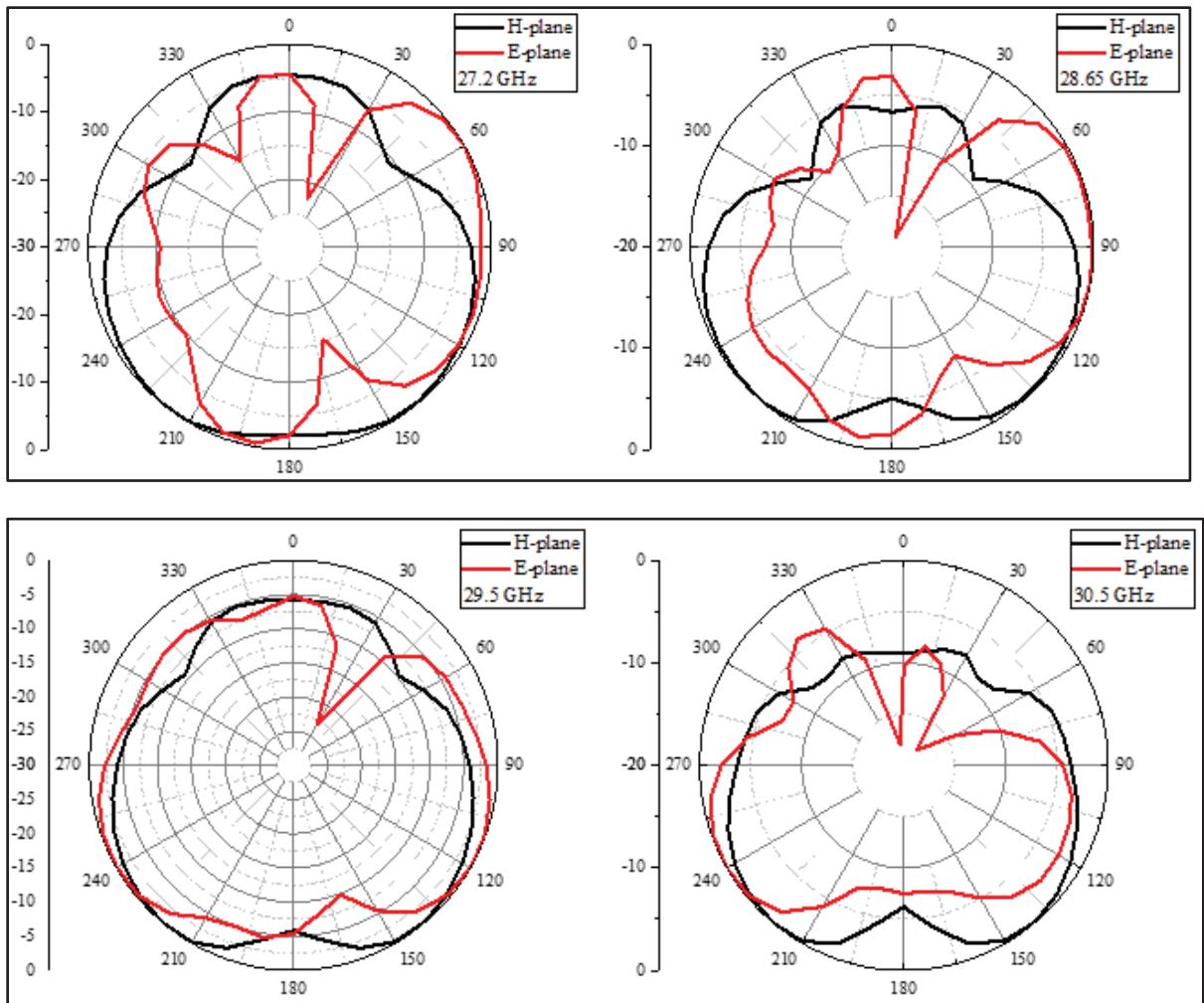


Figure 3.7 Diagrammes de rayonnement polaire 2D simulés dans le plan E et le plan H à 27.2, 28.65, 29.5 et 30.5 GHz

La figure 3.8 illustre la distribution du champ électrique à l'intérieur du résonateur diélectrique à 28,65 GHz et 29,5 GHz, en vue de dessus et de côté. Les modèles de champ confirment l'excitation de modes résonants hybrides avec un fort confinement à l'intérieur du résonateur elliptique MW21. La distribution de l'énergie sur le site est centrée autour de l'ouverture de la fente et se propage symétriquement dans le volume diélectrique, ce qui indique une excitation efficace des modes et un couplage efficace à travers la fente alimentée par microruban. Ces observations valident la capacité du résonateur à supporter le mode prévu dans la gamme de fréquences cible.

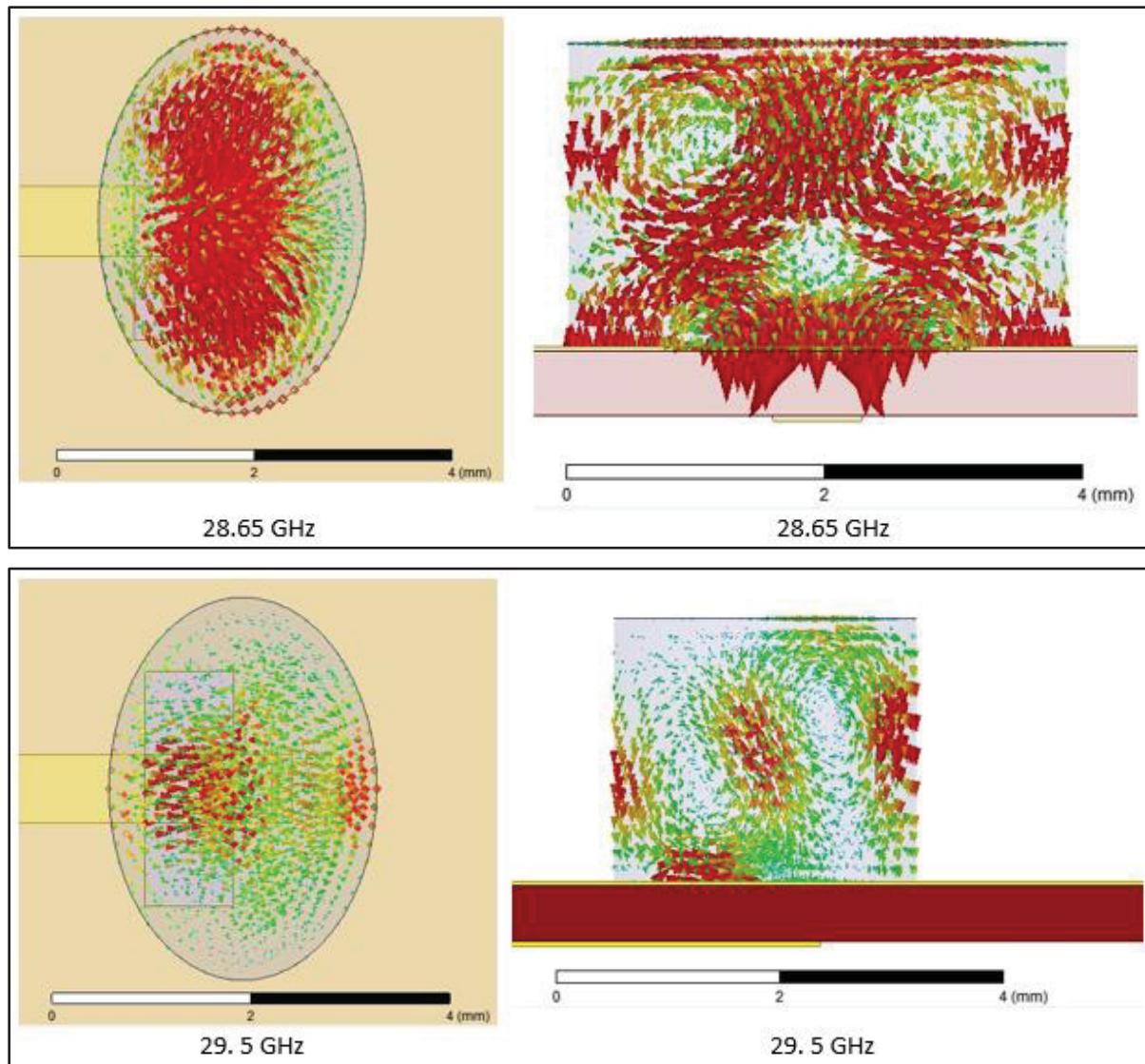


Figure 3.8 Distribution simulée du champ électrique à 28.65 GHz et 29.5 GHz

### 3.2.3 Fabrication et Validation

Dans le but de garantir la validation pratique du concept de conception de l'ARD proposé, un prototype de l'antenne est fabriqué et mesuré pour valider les résultats de la simulation. La figure 3.9 présente une photographie du prototype d'antenne réalisé. Les paramètres S simulés et mesurés pour l'ARD réalisée sont présentés à la figure 3.8.

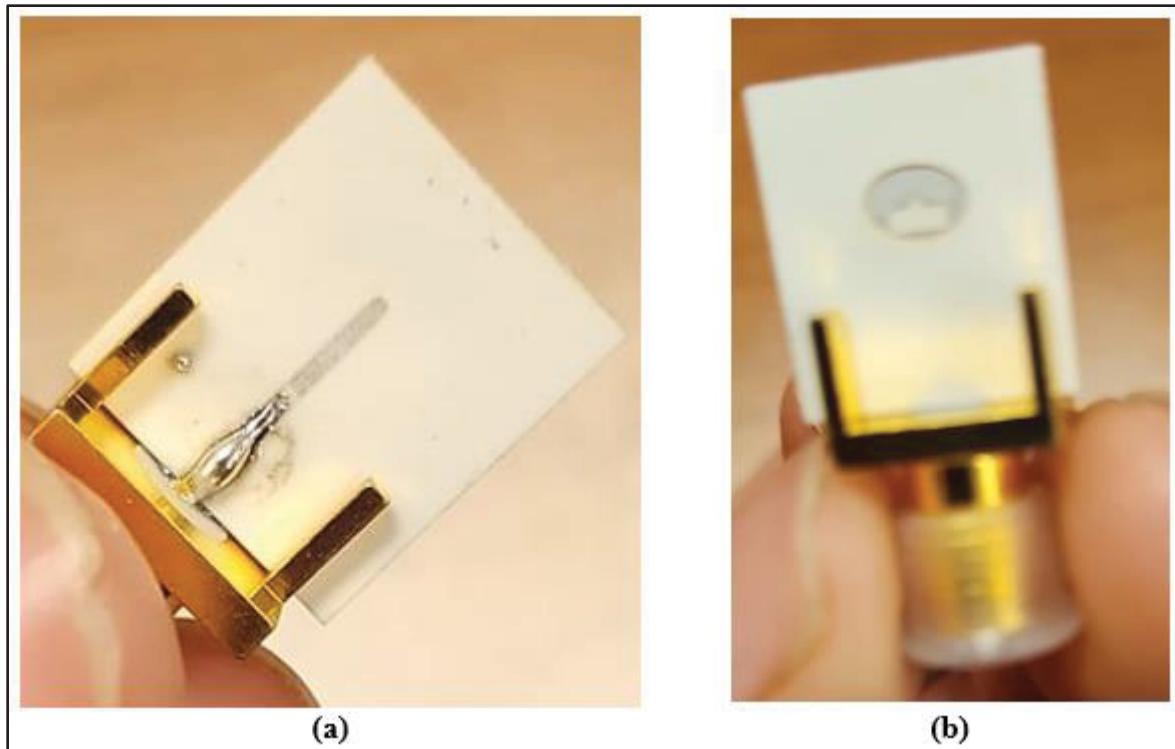


Figure 3.9 l'antenne ARD fabriquée: (a) vue de dessus, (b) vue de dessous

Le paramètre S a été mesuré par un VNA au laboratoire de l'École de technologie supérieure (LTCC@ÉTS, 2025). Le modèle de VNA était le N5247A PNA-X Microwave Network Analyzer, qui peut mesurer les paramètres S jusqu'à 67 GHz.

Les résultats simulés et mesurés concordent dans la bande de fonctionnement. Une adaptation d'impédance est obtenue et les coefficients de réflexion mesurés S11 sont d'environ -22 dB à 28,5 GHz. La résonance légèrement décalée peut être due aux imperfections du dispositif de connexion et de la soudure.

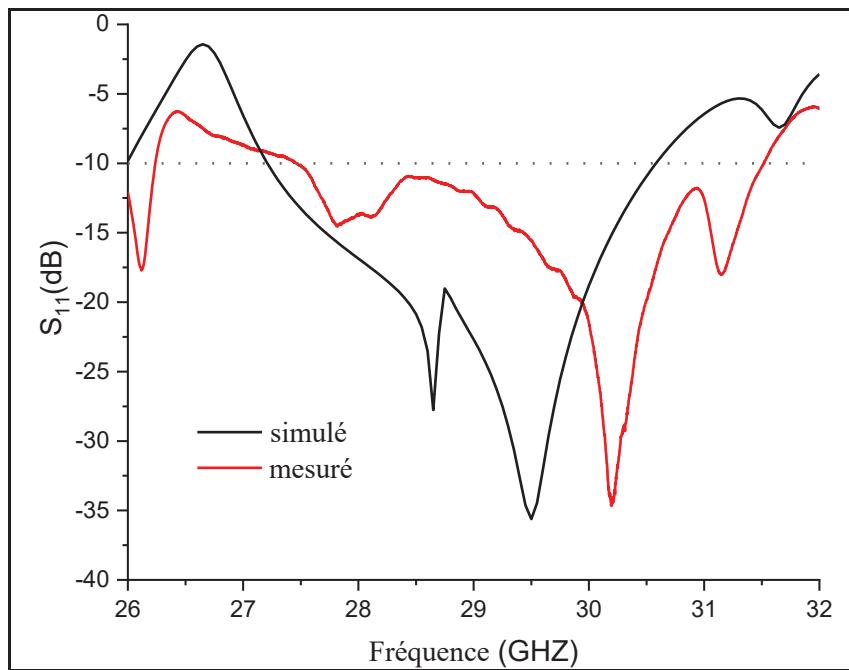


Figure 3.10  $S_{11}$  simulés et mesurés d'ARD réalisé

### 3.3 Partie II : Réseau d'ARD

#### 3.3.1 Conception de l'élément résonateur diélectrique

L'antenne à résonateur diélectrique (ARD) à un seul élément présentée dans la section précédente est étendue pour former un réseau d'antennes  $2 \times 2$  en utilisant la technologie LTCC. La même technique d'excitation est appliquée, où chaque ARD est couplé par une fente gravée dans le plan de masse. Les fentes sont alimentées par un réseau microruban d'entreprise situé sur la couche supérieure de la pile LTCC. Tous les matériaux diélectriques et conducteurs restent les mêmes que dans la configuration à un seul élément. La structure géométrique du réseau et la disposition de l'alimentation sont illustrées à la figure 3.11.

- **Espacement entre les éléments :** l'espacement entre les éléments joue un rôle clé dans la détermination des performances des réseaux d'antennes. Il affecte des paramètres tels que le couplage mutuel, le diagramme de rayonnement, le gain et l'apparition potentielle de lobes de réseau. Bien que les ARDs présentent

généralement un couplage mutuel plus faible que les antennes planaires, un espacement approprié est toujours essentiel pour une performance optimale. Dans ce travail, une étude paramétrique a été menée en faisant varier l'espacement  $S$  entre les éléments adjacents. Des simulations ont été réalisées pour plusieurs valeurs de  $S$ , allant de 4 mm à 9 mm. Le gain du réseau a été calculé pour chaque configuration. Un espacement optimal a été observé autour de  $S = 6,5$  mm, où le gain est maximisé et les lobes de réseau supprimés.

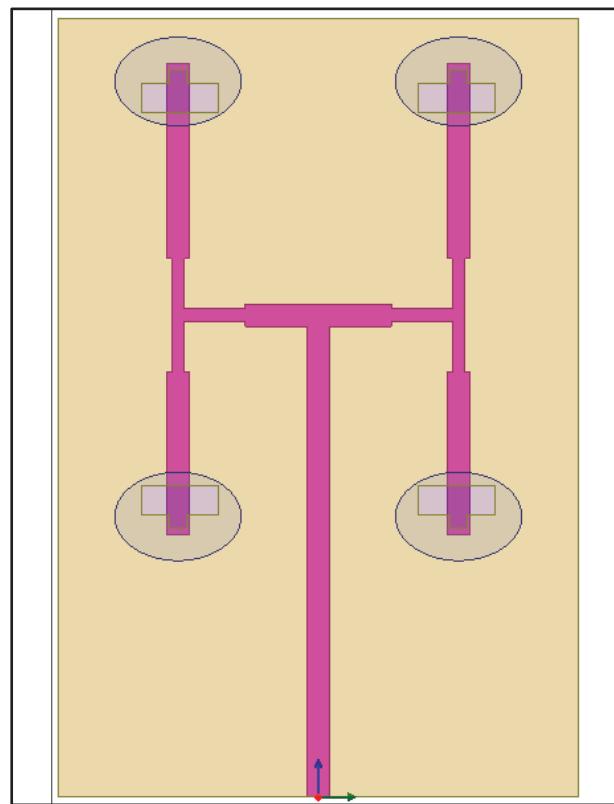


Figure 3.11 Vue de dessus du réseau ARD  $2 \times 2$  avec structure LTCC et réseau d'alimentation de la couche supérieure

- **Conception du réseau d'alimentation :** pour obtenir une excitation uniforme de tous les éléments du réseau, un réseau d'alimentation d'entreprise est mis en œuvre sur la couche supérieure de la structure LTCC. Le schéma du réseau proposé est illustré à la figure 10. L'alimentation commence par une ligne d'entrée verticale de  $50 \Omega$  qui se connecte à une ligne microruban horizontale faisant office de diviseur de puissance

principal. Cette ligne se divise symétriquement en deux branches en utilisant des transformateurs quart d'onde pour assurer l'adaptation d'impédance. Chaque branche se poursuit par des segments intermédiaires qui guident le signal vers les fentes de couplage situées dans le plan de masse.

Les largeurs et les longueurs de toutes les sections de microruban sont optimisées pour assurer une bonne adaptation d'impédance et une distribution de phase égale à chaque sortie. Le réseau d'alimentation est conçu sur la base des propriétés diélectriques du substrat Ferro A6M ( $\epsilon_r = 5,8$ ). L'antenne entière, y compris le réseau et les éléments du réseau, occupe une surface compacte de  $16 \times 24 \text{ mm}^2$ . Les résonateurs diélectriques sont en céramique MW21 avec une hauteur de 2,35 mm, et la couche LTCC séparant l'alimentation et le plan de masse a une épaisseur de 0,5 mm. La structure est simulée dans Ansys HFSS, en tenant compte des pertes diélectriques et conductrices, ainsi que du modèle de connecteur. Les résultats de la simulation sont présentés dans la section suivante.

### 3.3.2 Validation et discussion des résultats

Le réseau d'antennes conçu, y compris le réseau d'alimentation de l'entreprise et les résonateurs diélectriques MW21, a été fabriqué en utilisant la même pile LTCC à base de Ferro A6M. La figure 3.12 montre des images des vues supérieure et inférieure du réseau d'antennes fabriqué. Un étalonnage a été effectué avant les mesures afin de garantir la précision et d'éliminer l'influence du dispositif de mesure. La comparaison entre les résultats simulés et mesurés est présentée.

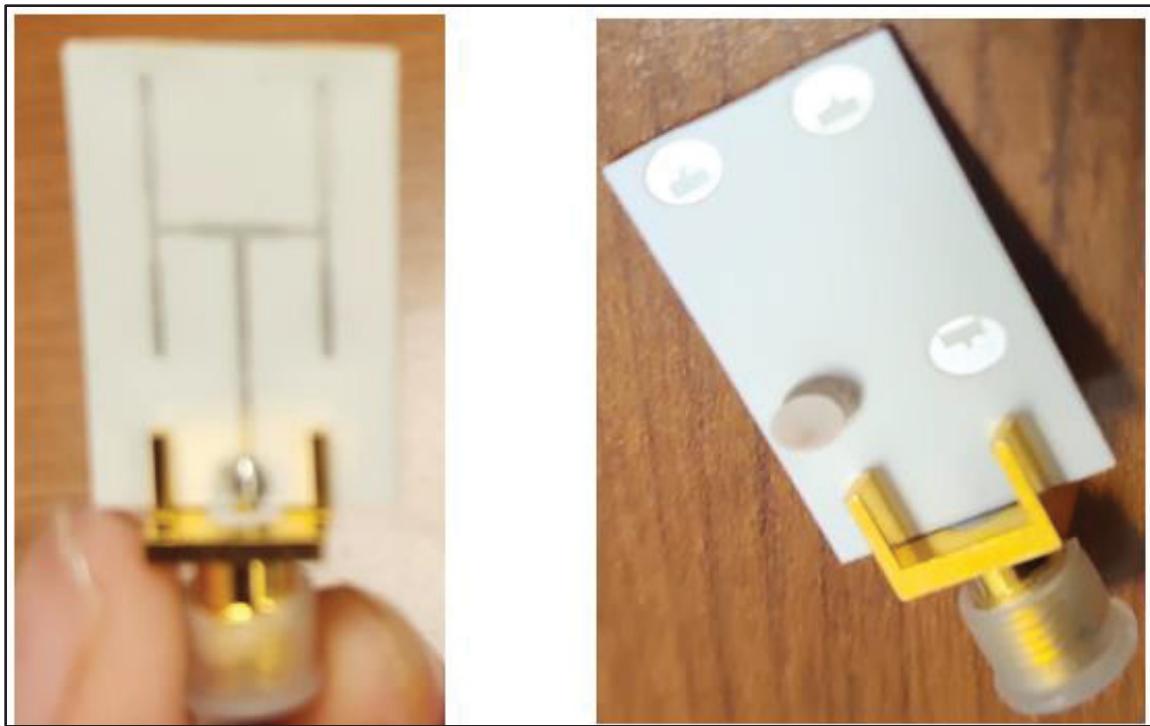


Figure 3.12 Antenne réseau (ARD) fabriquée

La figure 3.13 montre la perte de retour simulée et mesurée ( $S_{11}$ ) du réseau d'ARD  $2 \times 2$  proposé. Un léger décalage de fréquence d'environ 0,2 GHz est observé entre les résultats mesurés et simulés, qui peut être attribué aux tolérances de fabrication ou à des variations mineures dans le rétrécissement du LTCC pendant le processus de cuisson. Comme le montre la figure, la largeur de bande mesurée à -10 dB de l'antenne s'étend d'environ 27,4 GHz à 29,6 GHz, ce qui donne une largeur de bande de 2,2 GHz et une valeur fractionnelle de de largeur de bande d'environ 9,8 % centrée autour de 28,8 GHz.

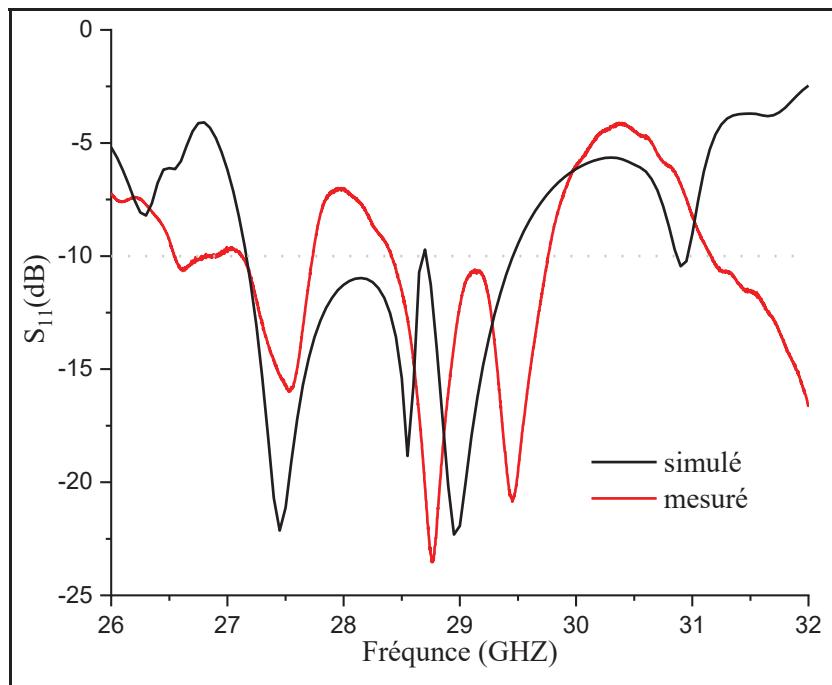


Figure 3.13 Paramètres  $S_{11}$  simulés et mesurés du réseau d'ARD réalisé

Le profil de gain normalisé et l'efficacité de rayonnement simulé du réseau ARD  $2 \times 2$  proposé est illustré à la figure 3.14. Le gain atteint environ 11,8 dBi, ce qui confirme l'efficacité du réseau et la stabilité de son comportement en matière de rayonnement directionnel. Une efficacité maximale d'environ 96 % est atteinte autour de 28,5 GHz, et l'efficacité reste supérieure à 90 % dans toute la bande passante de 27,5 à 31,5 GHz, ce qui démontre des performances stables et à faibles pertes sur une large gamme de fréquences.

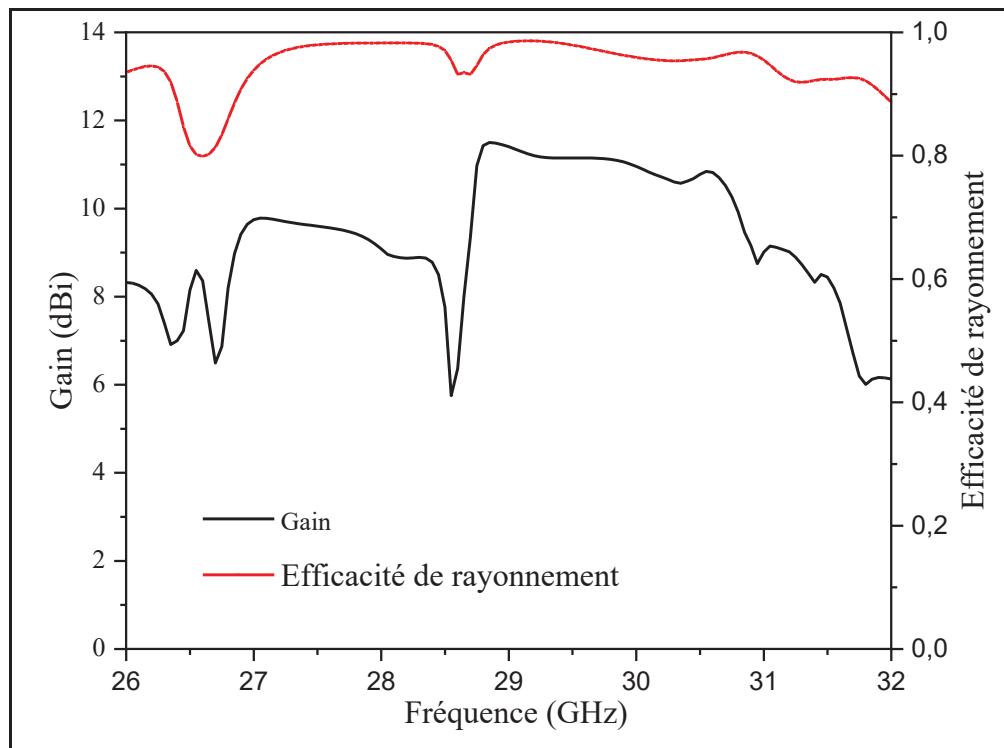


Figure 3.14 Gain et l'efficacité de rayonnement simulés pour le réseau ARD proposé

### 3.4 Conclusions

Dans ce chapitre, un réseau compact d'antennes à résonateur diélectrique (ARD) à ondes millimétriques a été présenté en utilisant un empilement LTCC multicouche qui permet un alignement précis et une intégration complète du réseau d'alimentation. Le réseau se compose de quatre ARD elliptiques MW21 fonctionnant autour de 28,5 GHz, ce qui convient aux applications 5G et à haute fréquence. L'antenne est excitée par des fentes de couplage gravées dans un plan de masse en argent et alimentée par un réseau microruban d'entreprise imprimé sur la couche supérieure de la structure LTCC. Les éléments rayonnants et le réseau d'alimentation sont fabriqués dans le cadre du même processus LTCC, ce qui offre une grande répétabilité et une complexité réduite.

Les résultats des mesures montrent une largeur de bande d'impédance de 2,8 GHz (environ 9,8 %) centrée autour de 28,8 GHz, avec un gain maximal de 13,2 dBi et une efficacité de rayonnement supérieure à 96 % dans toute la bande passante de fonctionnement. Les résultats

simulés et mesurés sont en bon accord, avec de légères différences attribuées aux tolérances de fabrication typiques et aux variations de rétrécissement du LTCC. Grâce à ses dimensions compactes, ses performances élevées et son intégration complète sur le site, le réseau proposé est un candidat prometteur pour les applications à ondes millimétriques nécessitant un gain élevé et un fonctionnement efficace.

## CONCLUSION & RECOMMANDATIONS

Ce mémoire de maîtrise s'inscrit dans le cadre des avancées récentes en matière de conception d'antennes compactes et performantes pour les systèmes de communication sans fil. L'essor des technologies telles que l'Internet des objets (IoT), les réseaux 5G et les systèmes radar exige des solutions d'antennerie à la fois miniaturisées, intégrables et à haut rendement. Dans ce contexte, la technologie LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) a été exploitée dans ce travail afin de concevoir, simuler, fabriquer et caractériser expérimentalement deux types d'antennes innovantes adaptées à ces exigences.

Le premier chapitre a établi les fondements du projet. Il a présenté les motivations scientifiques, les enjeux liés à la miniaturisation des antennes dans les systèmes modernes, ainsi que les limitations rencontrées avec les technologies conventionnelles. Ce chapitre a également permis de formuler la problématique de recherche, de définir les objectifs spécifiques poursuivis dans ce mémoire, de présenter les contributions prévues et de détailler l'organisation générale du document.

Le deuxième chapitre a été consacré à une revue de littérature approfondie portant sur les antennes réalisables en technologie LTCC. Ce travail a permis d'identifier les matériaux céramiques couramment utilisés, d'explorer les structures d'antennes adaptées à cette technologie, et de mettre en lumière les méthodes de conception et d'optimisation proposées dans la littérature. Cette synthèse théorique a constitué un appui fondamental aux décisions techniques prises dans les chapitres expérimentaux.

Le troisième chapitre a porté sur la conception et la validation expérimentale de deux antennes patch opérant à 2,45 GHz. Ces structures ont été simulées avec précision à l'aide du logiciel HFSS, optimisées pour assurer une bonne adaptation d'impédance et une efficacité de rayonnement élevée, puis fabriquées dans les installations du laboratoire LACIME. Les résultats mesurés ont confirmé les performances attendues, avec un gain supérieur à 1.6 dBi et une efficacité rayonnée dépassant 85 %, démontrant la pertinence de l'approche de conception adoptée et la faisabilité d'antennes compactes en technologie LTCC pour des applications en bande ISM.

Le travail réalisé dans ce mémoire a permis de concevoir, simuler, fabriquer et valider expérimentalement des antennes intégrées en technologie LTCC pour des applications dans les bandes ISM et millimétriques. Toutefois, plusieurs pistes restent ouvertes pour approfondir et enrichir les résultats obtenus. L'utilisation de méthodes d'optimisation avancées comme les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim particulaire (PSO) ou les techniques multi-objectifs pourrait contribuer à améliorer davantage les performances des antennes, en particulier en termes de gain, d'efficacité rayonnée ou de réduction de l'encombrement. Une perspective prometteuse que nous envisagerons à l'avenir.

Le quatrième chapitre a élargi la portée du travail aux bandes millimétriques avec la conception d'une antenne à résonateur diélectrique elliptique. Après l'étude de l'élément unitaire, cette antenne a été intégrée dans un réseau  $2\times 2$ , accompagné d'un réseau d'alimentation corporatif, l'ensemble étant réalisé en technologie LTCC. Les performances expérimentales obtenues ont révélé un gain atteignant 11,8 dBi, une efficacité supérieure à 90 %, ainsi qu'une stabilité de rayonnement dans la bande 26–30 GHz, répondant aux exigences des communications à haut débit dans ces fréquences.

Dans l'ensemble, les résultats de ce mémoire valident l'utilisation de la technologie LTCC pour la réalisation d'antennes intégrées à haute performance. Sa compatibilité avec les environnements à haute fréquence, sa stabilité thermique et sa capacité d'intégration multicouche en font une plateforme idéale pour des applications exigeantes, notamment dans les systèmes de communication sans fil embarqués ou à haute densité.

En résumé, cette étude constitue une contribution significative à la conception d'antennes intégrées destinées aux environnements complexes de demain. Elle allie modélisation électromagnétique rigoureuse, fabrication de prototypes et validation expérimentale, tout en ouvrant des perspectives intéressantes vers des solutions plus avancées telles que les antennes reconfigurables ou les architectures adaptatives en bande millimétrique.

Dans le monde réel, nos résultats peuvent être exploités pour un certain nombre d'application. Les antennes fonctionnant dans la bande ISM à 2,45 GHz trouvent de nombreuses applications, notamment dans les smartphones à travers les technologies Wi-Fi et Bluetooth, ainsi que dans les dispositifs de commandes sans fil tels que les claviers, souris

et manettes de jeu. Elles sont également largement utilisées dans le domaine industriel, en particulier pour le monitoring en usine via des capteurs de température, de vibration ou de gaz. De plus, elles équipent les drones pour les fonctions de télécommande et de télémesure, ainsi que les systèmes de suivi logistique dans le transport routier et ferroviaire. En parallèle, les réseaux d'antennes à ondes millimétriques (ARD) ouvrent la voie à des applications à plus haute fréquence, telles que le radar automobile pour la détection d'obstacles et l'assistance à la conduite, les scanners médicaux et systèmes d'imagerie, ou encore les capteurs industriels utilisés pour la détection et la mesure de niveaux de liquides et de solides.

Dans le prolongement direct de ce travail, plusieurs axes de recherche peuvent être envisagés pour approfondir l'exploitation des antennes intégrées en technologie LTCC.

Un premier axe majeur concerne la reconfigurabilité des antennes. L'intégration de composants actifs, tels que des diodes PIN, des commutateurs MEMS, ou des matériaux à permittivité variable (comme les ferroélectriques), permettrait de développer des antennes capables de modifier dynamiquement leur fréquence de fonctionnement, leur diagramme de rayonnement ou leur polarisation. De telles antennes seraient particulièrement utiles dans les réseaux de communication adaptatifs, où la flexibilité est essentielle.

Un deuxième axe porte sur l'évolution vers des réseaux d'antennes intelligents, tels que les réseaux à balayage électronique (beam steering) ou les réseaux MIMO à polarisation contrôlée. Pour cela, il serait pertinent de travailler sur la conception de réseaux phasés passifs ou actifs, avec lignes de déphasage intégrées, voire des circuits de contrôle embarqués dans la structure LTCC.

Un troisième axe de développement réside dans l'intégration fonctionnelle avancée, où l'antenne ne serait plus un composant isolé, mais un sous-système intégré. On pourrait envisager la co-intégration sur le même substrat d'antennes, de filtres, d'amplificateurs à faible bruit (LNA) ou même de circuits de traitement de signal RF, dans une approche modulaire destinée aux architectures System-in-Package.

Enfin, une exploration complémentaire pourrait porter sur l'évaluation de la robustesse des antennes LTCC dans des environnements extrêmes (température, humidité, vibrations), ce qui est essentiel pour des applications industrielles, aérospatiales ou automobiles.

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agiwal, Mamta, Abhishek Roy et Navrati Saxena. 2016. « Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey ». *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no 3, p. 1617 1655. <<https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>>.
- Lee, Jong-Hoon, Kidera Nobutaka, Anya Traille, Stephane Pinel, Joy Laskar et Manos M . Tentzeris. 2006. « Advanced 3D LTCC passive components using cavity structures for 60 GHz gigabit wireless systems ». In *2006 Asia-Pacific Microwave Conference*. (décembre 2006), p. 356 359. <<https://doi.org/10.1109/APMC.2006.4429439>>. Consulté le 26 mai 2025.
- Tormey, Ellen, Chao Ma, John Maloney, Bradford Smith, Sid Sridharan et Yi Yang. 2021. « Low Loss LTCC Ag System for 5G Applications ». *Additional Conferences (Device Packaging, HiTEC, HiTEN, and CICMT)*, vol. 2021, no HiTEC, p. 000105 000111. <<https://doi.org/10.4071/2380-4491.2021.HiTEC.000105>>.
- Imanaka, Yoshihiko, éd. 2005. « Ceramic material ». In *Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology*, p. 21 58. Boston, MA : Springer US. <[https://doi.org/10.1007/0-387-23314-8\\_2](https://doi.org/10.1007/0-387-23314-8_2)>.
- Ahyoune, Saiyd, Javier Sieiro, Jose M Lopez-Villegas, Maria N Vidal, Tomas Carrasco, Francisco Ramos et Josep M Fernandez-Sanjuan. [s d]. « Scalable LTCC library for System-in-Package design ».
- Anon. [s d]. « [https://journals.pan.pl/Content/111715/PDF/\(54-2\)221.pdf](https://journals.pan.pl/Content/111715/PDF/(54-2)221.pdf) ». <[https://journals.pan.pl/Content/111715/PDF/\(54-2\)221.pdf](https://journals.pan.pl/Content/111715/PDF/(54-2)221.pdf)>.
- Parekh, Dishit Paresh, Denis Cormier et Michael D. Dickey. 2019. « Multifunctional Printing: Incorporating Electronics into 3D Parts Made by Additive Manufacturing ». In *Additive Manufacturing*, Second Edition, 2e éd. CRC Press.
- Anon. [s d]. « Tummala, R. R. (2001). Fundamentals of Microsystems... - Google Scholar ». <[https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as\\_sdt=0%2C5&q=Tummala%2C+R.+R.+%282001%29.+Fundamentals+of+Microsystems+Packaging.+McGraw-Hill.&btnG=](https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Tummala%2C+R.+R.+%282001%29.+Fundamentals+of+Microsystems+Packaging.+McGraw-Hill.&btnG=)>.
- SCHWARTZ, B. 1984. « Microelectronics packaging. II ». *Microelectronics packaging*. II, vol. 63, no 4, p. 577 581.

Anon. 2005. « Casting ». In Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology, p. 115–144. Boston : Kluwer Academic Publishers. <[https://doi.org/10.1007/0-387-23314-8\\_6](https://doi.org/10.1007/0-387-23314-8_6)>.

Gurevich, V.L. et A.K. Tagantsev. 1991. « Intrinsic dielectric loss in crystals ». Advances in Physics, vol. 40, no 6, p. 719–767. <<https://doi.org/10.1080/00018739100101552>>.

Diantonio, Christopher Brian et Kevin G. Ewsuk. 2010. « Master sintering curve and its application in sintering of electronic ceramics ». In Sintering of Advanced Materials, p. 130–161. Elsevier. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845695620500066>>. Consulté le 28 mai 2025.

Sheng, Boxi, Shaowei Liao et Quan Xue. 2024. « LTCC-Based Wideband Patch Antenna for 5G Millimeter-Wave Applications ». In 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMWT). (mai 2024), p. 1–3. <<https://doi.org/10.1109/ICMWT61774.2024.10672418>>.

Zhou, Xia et Xiuqi Lai. 2024. « A Broadband 60G LTCC Bow-tie Antenna ». In 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). (avril 2024), p. 1–5. <<https://doi.org/10.1109/PIERS62282.2024.10618389>>.

Molins-Benlliure, Jaime, Eva Antonino-Daviu, Marta Cabedo-Fabrés et Miguel Ferrando-Bataller. 2023. « LTCC On-Ground Chip Antenna for 3.6 GHz IoT Applications ». In 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI). (juillet 2023), p. 1187–1188. <<https://doi.org/10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238290>>.

Sun, Mei, Ya-Qiong Zhang, Yong-Xin Guo, Muhammad Faeyz Karim, Ong Ling Chuen et Mook Seng Leong. 2011. « Integration of Circular Polarized Array and LNA in LTCC as a 60-GHz Active Receiving Antenna ». IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no 8, p. 3083–3089. <<https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2158781>>.

Han, Mengying, Shufeng Sun et Xu Yang. 2024. « A Design of a Broadband Circularly Polarized Antenna Based on LTCC Technology ». In 2024 IEEE 7th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). (juillet 2024), p. 293–295. <<https://doi.org/10.1109/ICEICT61637.2024.10670859>>. Consulté le 28 mai 2025.

Wang, Ting, Jun Wang, Chenyu Ding, Zhuowei Miao, Jie Wang et Lei Zhao. 2023. « A Compact Low-profile 5G Millimeter-wave Circularly Polarized Antenna Based on

- LTCC ». Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), p. 703 709. <<https://doi.org/10.13052/2023.ACES.J.380910>>.
- Wang, Xiaocheng et Gaobiao Xiao. 2024. « Wide-Beam and Low-Sidelobe LTCC Shared-Aperture Antenna for Automotive Radar Applications ». In 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI). (juillet 2024), p. 2243 2244. <<https://doi.org/10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686267>>. Consulté le 28 mai 2025.
- William, Monica Wasfy, Yahia M. M. Antar et A.P. Freundorfer. 2023. « Antenna for Millimeter Wave High Gain Arrays using LTCC Technology ». In 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI). (juillet 2023), p. 1569 1570. <<https://doi.org/10.1109/USNC-URSI52151.2023.10237843>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Anon. [s d]. « Dielectric Resonator Antenna Handbook ». <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9101088>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Long, S., M. McAllister et Liang Shen. 1983. « The resonant cylindrical dielectric cavity antenna ». IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 31, no 3, p. 406 412. <<https://doi.org/10.1109/TAP.1983.1143080>>.
- Soren, Dipali, RowADR Ghatak, RabinADR Kishore Mishra et Dipak Ranjan Poddar. 2014. « DIELECTRIC RESONATOR ANTENNAS: DESIGNS AND ADVANCES ». Progress In Electromagnetics Research B, vol. 60, p. 195 213. <<https://doi.org/10.2528/PIERB14031306>>.
- McAllister, M.W., S.A. Long et G.L. Conway. 1983. « Rectangular dielectric resonator antenna ». Electronics Letters, vol. 19, no 6, p. 218 219. <<https://doi.org/10.1049/el:19830150>>.
- McAllister, M.W. et S.A. Long. 1984. « Resonant hemispherical dielectric antenna ». Electronics Letters, vol. 20, no 16, p. 657 659. <<https://doi.org/10.1049/el:19840450>>.
- Kumar Mongia, R. et A. Ittipiboon. 1997. « Theoretical and experimental investigations on rectangular dielectric resonator antennas ». IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 45, no 9, p. 1348 1356. <<https://doi.org/10.1109/8.623123>>.

- Tam, M.T.K. et R.D. Murch. 2000. « Circularly polarized circular sector dielectric resonator antenna ». IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 48, no 1, p. 126 128. <<https://doi.org/10.1109/8.827396>>.
- Ittipiboon, A., M. Cuhaci, R.K. Mongia, P. Bhartia et Y.M.M. Antar. 1993. « Aperture fed rectangular and triangular dielectric resonators for use as magnetic dipole antennas ». Electronics Letters, vol. 29, no 23, p. 2001 2002. <<https://doi.org/10.1049/el:19931334>>.
- Chen, Hong-Twu, Yuan-Tung Cheng et Shyh-Yeoung Ke. 1999. « Probe-fed section-spherical dielectric resonator antennas ». In 1999 Asia Pacific Microwave Conference. APMC'99. Microwaves Enter the 21st Century. Conference (Cat. No.99TH8473). (novembre 1999), p. 359 362 vol.2. <<https://doi.org/10.1109/APMC.1999.829875>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Kishk, A.A., Yan Yin et A.W. Glisson. 2002. « Conical dielectric resonator antennas for wide-band applications ». IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 50, no 4, p. 469 474. <<https://doi.org/10.1109/TAP.2002.1003382>>.
- Luk, K. M. (Kwai Man) et K. W. (Kowk Wa) Leung. 2003. « Dielectric resonator antennas ». <[https://digital.library.tu.ac.th/tu\\_dc/frontend/Info/item/dc:25916](https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:25916)>. Consulté le 28 mai 2025.
- Anon. 2025. Dielectric resonator antenna. Wikipedia. <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dielectric\\_resonator\\_antenna&oldid=1292032088](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dielectric_resonator_antenna&oldid=1292032088)>. Consulté le 28 mai 2025.
- Lai, Qinghua, Georgios Almanidis, Christophe Fumeaux, Hansruedi Benedickter et Ruediger Vahldieck. 2008. « Comparison of the Radiation Efficiency for the Dielectric Resonator Antenna and the Microstrip Antenna at Ka Band ». IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no 11, p. 3589 3592. <<https://doi.org/10.1109/TAP.2008.2005551>>.
- Benomar, Ahmed. 2015. « Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. : Application aux Réseaux de Télécommunications ». phdthesis, Université de Limoges ; Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen (Tlemcen, Algérie). <<https://theses.hal.science/tel-01172513>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Masse, D.J., R.A. Pucel, D.W. Readey, E.A. Maguire et C.P. Hartwig. 1971. « A new low-loss high-k temperature-compensated dielectric for microwave applications ». Proceedings of the IEEE, vol. 59, no 11, p. 1628 1629. <<https://doi.org/10.1109/PROC.1971.8508>>.

- Peng, Zhen, Hong Wang et Xi Yao. 2004. « Dielectric resonator antennas using high permittivity ceramics ». *Ceramics International*, vol. 30, no 7, p. 1211 1214. <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2003.12.079>>.
- Parida, S., S. K. Rout, V. Subramanian, P. K. Barhai, N. Gupta et V. R. Gupta. 2012. « Structural, microwave dielectric properties and dielectric resonator antenna studies of  $\text{Sr}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  ceramics ». *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 528, p. 126 134. <<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.03.047>>.
- Anon. [s d]. « [26] Chaudhary, R.K., Srivastava, K.V. and Biswas,... - Google Scholar ». <[https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as\\_sdt=0%2C5&q=%5B26%5D+Chaudhary%2C+R.K.%2C+Srivastava%2C+K.V.+and+Biswas%2C+A.%2C+2015.+Multi-band+cylindrical+dielectric+resonator+antenna+using+permittivity+variation+in+azimuth+direction.+Progress+In+Electromagnetics+Research+C%2C+59%2C+pp.11-20.&btnG=>](https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=%5B26%5D+Chaudhary%2C+R.K.%2C+Srivastava%2C+K.V.+and+Biswas%2C+A.%2C+2015.+Multi-band+cylindrical+dielectric+resonator+antenna+using+permittivity+variation+in+azimuth+direction.+Progress+In+Electromagnetics+Research+C%2C+59%2C+pp.11-20.&btnG=>)>. Consulté le 28 mai 2025.
- Ain, M. F., Ubaid Ullah, M. A. Othman, Z. A. Ahmad, I. A Zubir, N. M Mahyuddin, M. Z Abdullah et A. B Marzuki. 2014. « A novel multi-band dual-segment rectangular Dielectric Resonator Antenna ». In 2014 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). (septembre 2014), p. 34 37. <<https://doi.org/10.1109/WPMC.2014.7014786>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Das, Gourab, Anand Sharma et Ravi Kumar Gangwar. 2016. « Two elements dual segment cylindrical dielectric resonator antenna array with annular shaped microstrip feed ». In 2016 Twenty Second National Conference on Communication (NCC). (mars 2016), p. 1 6. <<https://doi.org/10.1109/NCC.2016.7561168>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Niayesh, Mohsen et Ammar Kouki. 2021. « LTCC-Integrated Dielectric Resonant Antenna Array for 5G Applications ». *Sensors*, vol. 21, no 11, p. 3801. <<https://doi.org/10.3390/s21113801>>.
- Zhou, G., A.A. Kishk et A.W. Glisson. 1993. « Input impedance of a hemispherical dielectric resonator antenna excited by a coaxial probe ». In IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. (juin 1993), p. 1038 1041 vol.2. <<https://doi.org/10.1109/APS.1993.385171>>.
- Junker, G.P., A.A. Kishk, A.W. Glisson et D. Kajfez. 1994. « Effect of an air gap around the coaxial probe exciting a cylindrical dielectric resonator antenna ». *Electronics Letters*, vol. 30, no 3, p. 177 178. <<https://doi.org/10.1049/el:19940191>>.

- Junker, G.P., A.A. Kishk et A.W. Glisson. 1994. « Input impedance of dielectric resonator antennas excited by a coaxial probe ». *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no 7, p. 960 966. <<https://doi.org/10.1109/8.299598>>.
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave engineering* (4e éd.). Hoboken, NJ : John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-63155-3.
- Anon. [s d]. « Microwave Engineering, 4th Edition | Wiley ». In Wiley.com. <<https://www.wiley.com/en-us/Microwave+Engineering%2C+4th+Edition-p-9780470631553>>.
- Ashraf, Kamran et Sovan Mohanty. 2023. A Review Paper on Design and Development of Dielectric Resonator Antenna. <<https://doi.org/10.2139/ssrn.4470350>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Kranenburg, R.A. et S.A. Long. 1988. « Microstrip transmission line excitation of dielectric resonator antennas ». *Electronics Letters*, vol. 24, no 18, p. 1156 1157. <<https://doi.org/10.1049/el:19880785>>.
- Leung, K.W., K.Y. Chow, K.M. Luk et E.K.N. Yung. 1997. « Low-profile circular disk DR antenna of very high permittivity excited by a microstripline ». *Electronics Letters*, vol. 33, no 12, p. 1004 1005. <<https://doi.org/10.1049/el:19970718>>.
- Mongia, Rajesh K. et Prakash Bhartia. 1994. « Dielectric resonator antennas—a review and general design relations for resonant frequency and bandwidth ». *International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering*, vol. 4, no 3, p. 230 247. <<https://doi.org/10.1002/mmce.4570040304>>.
- Cooper, M., A. Petosa, A. Ittipiboon et J. S. Wight. 1996. « Investigation of dielectric resonator antennas for L-band communications ». In 1996 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. (août 1996), p. 167 170. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7863898>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Leung, K. W., H. Y. Lo, K. K. So et K. M. Luk. 2002. « High-permittivity dielectric resonator antenna excited by a rectangular waveguide ». *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no 3, p. 157 158. <<https://doi.org/10.1002/mop.10401>>.
- Leung, K.W. et K.K. So. 2003. « Rectangular waveguide excitation of dielectric resonator antenna ». *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no 9, p. 2477 2481. <<https://doi.org/10.1109/TAP.2003.816373>>.

- Eshrah, I.A., A.A. Kishk, A.B. Yakovlev et A.W. Glisson. 2005. « Excitation of dielectric resonator antennas by a waveguide probe: modeling technique and wide-band design ». *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no 3, p. 1028 1037. <<https://doi.org/10.1109/TAP.2004.842638>>.
- Eshrah, I.A., A.A. Kishk, A.B. Yakovlev et A.W. Glisson. 2005. « Theory and implementation of dielectric resonator antenna excited by a waveguide slot ». *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no 1, p. 483 494. <<https://doi.org/10.1109/TAP.2004.838782>>.
- Zhang, Yingqi, Stanislav Ogurtsov, Vasilii Vasilev, Artem R. Vilenskiy, Marianna V. Ivashina et Diego Caratelli. 2023. « Compact Wide-Scan Dual-Polarized Dielectric Resonator Antenna Array Based on LTCC Technology for Millimeter-Wave Applications ». In *2023 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*. (octobre 2023), p. 096 099. <<https://doi.org/10.1109/ICEAA57318.2023.10297663>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Mrnka, Michal, Miroslav Cupal, Zbynek Raida, Alena Pietrikova et Dusan Kocur. 2018. « Millimetre-wave dielectric resonator antenna array based on directive LTCC elements ». *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 12, no 5, p. 662 667. <<https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0492>>.
- Bernabeu-Jiménez, T., A. Valero-Nogueira, F. Vico-Bondia, E. Antonino-Daviu et M. Cabedo-Fabres. 2014. « A 60-GHz LTCC rectangular dielectric resonator antenna design with characteristic modes theory ». In *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. (juillet 2014), p. 1928 1929. <<https://doi.org/10.1109/APS.2014.6905291>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Balanis, Constantine A. 2016. *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 1109 p.
- Dash, Jogesh ChanADR, Debdeep Sarkar et Yahia M. M. Antar. 2023. « Design of Series-Fed Antenna Array with Low SideLobe Level and Improved Azimuth Fied-of-View for Automotive RADAR Application ». In *2023 XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*. (août 2023), p. 1 4. <<https://doi.org/10.23919/URSIGASS57860.2023.10265688>>. Consulté le 28 mai 2025.
- Uddin, Md Nazim et Sangjo Choi. 2020. « Non-Uniformly Powered and Spaced Corporate Feeding Power Divider for High-Gain Beam with Low SLL in Millimeter-Wave Antenna Array ». *Sensors*, vol. 20, no 17, p. 4753. <<https://doi.org/10.3390/s20174753>>.

Zhao, Yu, Hao Luo, Wenhao Tan, Zheng Zhou, Guoqiang Zhao et Houjun Sun. 2023. « Design of a High-Gain Hybrid Slot Antenna Array Based on Bulk Silicon MEMS Process for W-Band Applications ». *Electronics*, vol. 12, no 9, p. 2028. <<https://doi.org/10.3390/electronics12092028>>.