

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID, TLEMCEM
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : BASSAID Feryel & BENHABIB Ghizlene

Sujet

Etude et conception d'une antenne à base de méta-matériaux pour les applications sans fil 5G

Soutenu le **10 /07/2021**, devant le jury composé de :

Mr BOUABDALLAH Réda	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mr BAHRI Sidi Mohammed	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
Mr BOUSAHLA Miloud	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2020-2021

A nos parents.

A nos familles.

A ceux qui nous sont chers.

Remerciements

Allah le puissant dit : « et lorsque votre seigneur proclama : « Si vous êtes reconnaissants, très certainement j'augmenterai mes bienfaits pour vous » » (Coran 14/7).

Au terme de cette étude, On remercie tout d'abord, « **Allah** » du fond du cœur pour tous les bienfaits dont il nous a comblés ainsi de nous avoir permis la réalisation de ce présent travail. Sans sa miséricorde, ce travail ne serait accompli. Qu'**Allah**, source du savoir, soit toujours avec nous tous.

Un remerciement tout particulier à nos familles, nos parents qui ont toujours su nous soutenir et nous ont encouragé à aller plus loin, aucun acte ou expression ne pourra exprimer nos sentiments envers eux.

Nous tenons à remercier spécialement notre encadreur Mr. BOUSAHLA Miloud d'avoir bien assuré l'encadrement de notre travail de mémoire, nous garderons toujours dans nos cœur votre générosité et votre compréhension. Nous vous remercions pour le temps et la patience que vous nous avez accordés tout au long de ce travail, on garde toujours beaucoup de plaisir à discuter avec vous et à bénéficier de vos conseils.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements aux membres de jury d'avoir accepter de juger et évaluer notre travail.

Nos remerciements vont également à tous nos chers enseignants qui ont contribué à notre formation depuis notre première année.

Finalement nous remercions toute la communauté scientifique.

Résumé

L'antenne est le composant clés de n'importe quel système de communication, sa qualité et ses performances déterminent le bon déroulement de la communication sans fil. Il est donc essentiel qu'elle ait les performances correspondant au système de communication moderne.

L'objectif principal de ce travail est l'étude, la simulation et la conception d'antenne imprimée répondant aux exigences de la 5G.

L'étape de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel de simulation, est très importante dans un souci de gain de temps. Nous avons étudié et conçu une antenne bi-bandes qui fonctionne à deux fréquences de la 5G en utilisant le logiciel CST. Puis Nous avons appliqué deux méthodes pour améliorer les performances de l'antenne. La première méthode est basée sur l'utilisation d'un ou plusieurs superstrats à une distance optimisée du patch. La deuxième méthode est basée sur l'application des métamatériaux dans l'environnement de l'antenne.

Mots clés : 5G des réseaux mobiles, les antennes imprimées, méta-matériaux, CST.

Abstract

The antenna is the key component of any communication system, its quality and performance determine the smooth running of the wireless communication. It is therefore essential that it has the performance corresponding to the modern communication system.

The main objective of this work is the study, simulation and design of printed antenna meeting the requirements of 5G.

The design step of an antenna, using simulation software, is very important in order to save time. We studied and designed a dual-band antenna that operates at two 5G frequencies using CST software. Then we applied two methods to improve the performance of the antenna. The first method is based on the use of one or more superstrates at an optimized distance from the patch. The second method is based on the application of metamaterials in the antenna environment.

Key words: 5G mobile networks, printed antennas, metamaterials, CST.

ملخص

الهوائي هو المكون الرئيسي لأي نظام اتصال، وتحدد جودته وأدائه نجاح الاتصال اللاسلكي. لذلك من الضروري أن يكون لديها الأداء المطابق لنظام الاتصالات الحديث.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة وتصميم الهوائيات المطبوعة التي تلبى متطلبات الجيل الخامس.

تعتبر خطوة تصميم الهوائي باستخدام برامج المحاكاة مهمة جداً لتوفير الوقت لقد بحثنا وصممنا هوائياً مزدوج النطاق يعمل على ترددين من الجيل الخامس ثم طبقنا طريقتين لتحسين أداء الهوائي. تعتمد الطريقة الأولى على واحد أو أكثر من الركائز الفائقة على مسافة محسنة من التصحيح وتعتمد الطريقة الثانية على تطبيق المواد الخارقة في بيئة الهوائي.

الكلمات المفتاحية: شبكات المحمول للجيل الخامس، الهوائيات المطبوعة، المواد الخارقة، CST.

Glossaire des termes techniques

MTM : Méta-matériaux

MNG: Magnetic Negative

ENG: Electrical Negative

LHM: Left-Handed material

DPS: Double Positive

DNG : Double Negative

MMG : Matériaux Main Gauche

CMA : Conducteur Magnétique Artificiel

BCC : Bande chargée par capacité

RAF: Résonateur en Anneau Fendu

SRR: Split Ring Resonator

IOT: Internet Of Things (internet des objects).

SDN: Softwark Function Networking

NFU: Network Function Virtualization

UHD: Ultra High Definition

MIMO: Multiple Input Multiple Output

Massive-MIMO: Massive- Multiple Input Multiple Output

MU-MIMO: Multi User-Multiple Input Multiple Output

1G : Première génération

2G : Deuxième génération

3G : Troisième génération

4G : Quatrième génération

5G : Cinquième génération

Glossaire des symboles

μ : Perméabilité

ε : Permittivité

ω : pulsation angulaire

ρ : densité des électrons

λ : Longueur d'onde

S_{11} : coefficient de réflexion

S_{21} : coefficient de transmission

\vec{K} : Vecteur d'onde

\vec{E} : Vecteur champ électrique

\vec{H} : Vecteur champ magnétique

\vec{S} : Vecteur de Poynting

η : Indice de réfraction

V_g : vitesse de groupe

V_φ : vitesse de phase

Liste des figures

Figure 1.2.1. Géométrie d'une antenne imprimée [1].	4
Figure 1.2.2. Diverses formes d'éléments rayonnants dans une antenne patch [2].	5
Figure 1.2.3. Antenne en mode émetteur.	6
Figure 1.2.4. Diagramme de rayonnement : (a) en 3D, (b) en coordonnées polaires.	7
Figure 1.2.5. Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.	7
Figure 1.2.6. Détermination de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.	8
Figure 1.2.7. Alimentation par sonde coaxiale.	9
Figure 1.2.8. Alimentation par ligne microbande.	9
Figure 1.2.9. Alimentation couplée par ouverture.	10
Figure 1.2.10. Alimentation par guide d'onde coplanaire (CPW).	10
Figure 1.3.1. Cellules élémentaires électromagnétiques permettant d'affecter : (a) le champ électrique (b) le champ magnétique.	12
Figure 1.3.2. Métacellule et exemple d'application : la super-lentille.	13
Figure 1.3.3. Exemples de métamatériaux tridimensionnels.	13
Figure 1.3.4. Trièdre direct et indirect caractérisé par la règle de la main droite et main gauche respectivement : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche.	15
Figure 1.3.5. Représentation vectorielle d'une onde plane : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche.	16
Figure 1.3.6. Propagation d'ondes électromagnétique dans différents milieux.	17
Figure 1.3.7. Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité ϵ et de leur perméabilité μ .	18
Figure 1.3.8. Résonateur en Anneau Fendu « RAF » (Split Ring Resonator « SRR ») introduit par Pendry.	19
Figure 1.3.9. (a) Réseau de RAF introduit par Pendry, (b) : Cellule unitaire du RAF.	20
Figure 1.3.10. Métamatériaux ENG formé par un réseau de tiges métalliques.	21

Figure 1.3.11. (a) cellule DNG- "SRR+Tige". (b) perméabilité et permittivité de la cellule "SRR+Tige".....	22
Figure 1.3.12. Cellule DNG sous forme de « Ω ».....	22
Figure 1.3.13. (a) antenne patch à large bande et leur S11 [25], (b) antenne patch avec trois cellules unitaires de type CDRR et leurs S11 [27].....	23
Figure 1.3.14. Structures d'antenne patch monopole à bande coupée et leur S11 [29,30].	24
Figure 2.1. Techniques utilisées dans la technologie 5G.....	28
Figure 2.2. Spectre électromagnétiques (ondes millimétriques) [41].	29
Figure 2.3. Massive MIMO [41].	30
Figure 2.4. L'architecture du réseau 5G [41].	31
Figure 2.5. Centralisation du plan de contrôle dans un software defined network [45].	32
Figure 2.6. Illustration d'une architecture réseau cloudRAN [46].....	32
Figure 2.7. Spectre électromagnétique en 5G.	34
Figure 3.3.1. Géométrie de l'antenne.....	40
Figure 3.3.2. Coefficient de réflexion de l'antenne.....	41
Figure 3.3.3. Adaptation de l'antenne par encoches.	41
Figure 3.3.4. Effet de la longueur des encoches.....	42
Figure 3.3.5. Effet de la largeur des encoches.....	42
Figure 3.3.6. Coefficient de réflexion de l'antenne conçue.	43
Figure 3.3.7. Diagramme de rayonnement du gain en 3D : (a) à 28 GHz et (b) à 33.4 GHz. ...	44
Figure 3.3.8. Diagramme de rayonnement de la directivité en 3D : (a) à 28 GHz et (b) à 33.4GHz.	44
Figure 3.3.9. Diagrammes de rayonnement en plan polaire : (a) à 28 GHz et (b) à 33.4 GHz.	45
Figure 3.3.10. Rapport d'onde stationnaire (VSWR).....	45
Figure 3.3.11. Gain en fonction de la fréquence.	46
Figure 3.3.12. Diagrammes de rayonnement de gain d'un réseau de deux éléments rayonnants espacés de 20mm, équi-amplitude et équi-phase : (a) en 3D, (b) en 2D.....	47

Figure 3.3.13. Diagrammes de rayonnement de gain d'un réseau de deux éléments rayonnants espacés de 12mm, équi-amplitude et équi-phase : (a) en 3D, (b) en 2D.....	47
Figure 3.3.14. Diagrammes de rayonnement de gain en 3D et en 2D d'un réseau de deux éléments rayonnants espacés de 12 mm : même amplitude mais avec une phase de -10 et +10.	48
Figure 3.3.15. Diagrammes de rayonnement de gain d'un réseau de quatre éléments rayonnants : (a) en 3D, (b) en 2D.....	49
Figure 3.3.16. Antenne couplée avec un seul superstrat.	50
Figure 3.3.17. Effet de la distance d_1 sur le coefficient de réflexion pour un superstrat de $\epsilon_r = 2.2$	50
Figure 3.3.18. Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne couplé avec un seul superstrat: (a) à $f=28$ GHz, (b) à $f = 33.5$ GHz.	51
Figure 3.3.19. Effet de la distance d_1 sur le coefficient de réflexion pour un superstrat de $\epsilon_r = 10.2$	52
Figure 3.3.20. Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne couplé avec un seul superstrat de $\epsilon_r = 10.2$: (a) à $f = 28$ Ghz, (b) à $f = 34$ Ghz.	52
Figure 3.3.21. Antenne couplée avec deux superstrats.	53
Figure 3.3.22. Effet de la distance (d_2) sur le coefficient de réflexion pour un superstrat $\epsilon_r = 2.2$	53
Figure 3.3.23. Diagrammes de rayonnement en 3D de l'antenne couplée avec deux superstrats de $\epsilon_r = 2.2$: (a) à $f=28$ GHz, (b) $f=34$ GHz.	54
Figure 3.4.1. Représentation d'une unité de cellule du RAF carré.....	55
Figure 3.4.2. Un réseau de cellules RAF carrés.	55
Figure 3.4.3. Structure de l'antenne où le métamatériau est placé au-dessus de l'antenne.	56
Figure 3.4.4. Coefficient de réflexion de l'antenne à base de métamatériau.	56
Figure 3.4.5. Diagramme de rayonnement de l'antenne à 1 RAF à 28 Ghz: (a) de gain, (b) de directivité.....	57
Figure 3.4.6. Diagramme de rayonnement de l'antenne à 1 RAF à 33.4Ghz: (a) de gain, (b) de directivité.....	58

Figure 3.4.7. Antenne à (2x2) RAFs.	58
Figure 3.4. 8. . Diagrammes de rayonnement de l'antenne à (2x2) à 28 Ghz: (a) de gain, (b) de directivité.....	59
Figure 3.4.9. Diagrammes de rayonnement de l'antenne à (2x2) à 33.4 Ghz: (a) de gain, (b) de directivité.....	60
Figure 3.4.10. Coefficient de réflexion de l'antenne à (2x2) RAFs.	60

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Comparaison entre les caractéristiques des générations mobile.....	35
Tableau 3.3.1. Paramètres géométriques de l'antenne de base.....	40
Tableau 3.4.1. Gain, directivité et S11 pour différentes fréquences de l'antenne à 1 RAF....	58
Tableau 3.4.2. Gain, directivité et S11 pour différentes fréquences de l'antenne à (2x2) RAFs.	60
Tableau 3.4.3. Comparaison du gain et de directivité de l'antenne avec et sans RAF à 28 Ghz.	61
Tableau 3.4.4. Comparaison du gain et de directivité de l'antenne avec et sans RAF à 33.4 Ghz.	61

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Antenne et métamatériaux.....	3
1.1 Introduction.....	4
1.2 Généralités sur les antennes imprimées.....	4
1.2.1 Antenne imprimée ou micro-ruban	4
1.2.2 Les caractéristiques des antennes imprimées	5
1.2.2.1 Impédance d'entrée de l'antenne.....	5
1.2.2.2 Coefficient de réflexion.....	6
1.2.2.3 Diagramme de rayonnement	6
1.2.2.4 Rendement.....	7
1.2.2.5 Gain d'une antenne.....	8
1.2.2.6 Directivité.....	8
1.2.2.7 Bande passante	8
1.2.3 Techniques d'alimentation	9
1.2.4 Avantages et inconvénients des antennes imprimées.....	10
1.2.5 Les applications des antennes imprimées.....	10
1.3 Les métamatériaux	11
1.3.1 Définition	11
1.3.2 Origine et développement des métamatériaux	11
1.3.3 Terminologie	14
1.3.4 Principes et propriétés	15
1.3.5 Classification des métamatériaux.....	18
1.3.5.1 Les matériaux doublement positifs(DPS)	19
1.3.5.2 Les matériaux à perméabilité négative (MNG).....	19
1.3.5.3 Les matériaux à permittivité négative(ENG)	20

1.3.5.4 Les Matériaux doublement négatifs (DNG).....	21
1.3.6 Applications liées aux antennes	22
1.4 Conclusion.....	25
Chapitre 2 : la 5 ^{ème} génération des réseaux mobiles	26
2.1 Introduction	27
2.2 Principe et objectifs de la 5G	27
2.3 Les technologies de la 5G	28
2.3.1 Les ondes millimétriques (bande passante).....	28
2.3.2 Les micro-cells	29
2.3.3 Beamforming.....	29
2.3.4 Full-duplex	29
2.3.5 Massive-MIMO	30
2.4 L'architecture du réseau 5G	30
2.5 La 5G en question de fréquences	33
2.6 Comparaison entre les différentes générations.....	34
2.7 Conclusion.....	36
Chapitre 3 : conception et résultats de simulation.....	37
3.1 Introduction.....	38
3.2 Choix de l'outil de simulation	38
3.3 Antenne étudiée et conçue.....	39
3.3.1 Adaptation de l'antenne.....	41
3.3.2 Etude paramétrique sur les encoches (effet des paramètres géométriques)	42
3.3.3 Performance de l'antenne optimisée	43
3.3.3.1 Coefficient de réflexion.....	43
3.3.3.2 Diagramme de rayonnement	43
3.3.3.3 Rapport d'onde stationnaire (VSWR).....	45

3.3.3.4 Le tracé du gain	46
3.3.4 Conception d'un réseau d'antennes.....	46
3.3.5 Amélioration des performances de l'antenne	49
3.3.5.1 Antenne couplée avec un seul superstrat.....	49
3.3.5.2 Antenne couplée avec deux superstrats.....	53
3.4 Application du métamatériau dans l'environnement de l'antenne.....	54
3.4.1 Résonateur en Anneau Fendu (RAF) carré	55
3.4.2 Un réseau de cellules RAF carrés	55
3.4.3 Conception d'antenne à métamatériaux basé sur un seul RAF	56
3.4.4 Conception d'antenne à métamatériaux basé sur un réseau de 2×2 RAF	58
3.5 Conclusion.....	61
Conclusion générale	62
Références	63

Introduction

générale

Introduction générale

Le monde devient de plus en plus digitalisé où plusieurs centaines de milliards d'objets sont connectés entre eux, sur internet et avec des milliards de personnes. Cependant le réseau 4G actuel reposant sur la norme LTE (Long Term Evolution) dont le spectre de fréquence est assez surchargé ne pourra plus bien assurer les diverses exigences dues à l'essor des objets connectés avec leurs différentes catégories d'usages.

Face à ces problèmes, une nouvelle révolution s'annonce avec un nouveau standard des systèmes de télécommunications mobiles, dénommé 5G. Ce standard ouvre des perspectives pour répondre aux besoins actuels, mais également ceux du futur.

Dans cette perspective, l'objectif principal de ce mémoire est de concevoir une antenne imprimée répondant aux exigences de la 5G.

Ce travail est scindé en trois chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre présente des généralités sur les antennes imprimées, leurs caractéristiques, et leurs techniques d'alimentations les plus utilisées. La seconde partie de ce chapitre, passe en revue les métamatériaux en introduisant les généralités et l'explication nécessaires à la bonne compréhension de ces matériaux.

Dans le deuxième chapitre, et après un rappel sur les objectifs du standard 5G, ainsi que ses technologies clés et son architecture, nous présentons l'évolution des générations en termes de débits, latence et bande de fréquences.

La conception d'antenne imprimée répondant aux exigences de la 5G fait l'objet du dernier chapitre. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la conception d'une antenne microbande circulaire bi-bande permettant d'émettre ou de recevoir aux fréquences 28 et 34 Ghz pour les applications 5G, en citant les différentes étapes et paramétrages géométriques et physique. Nous présentons aussi dans cette partie les résultats de simulation d'un réseau d'antennes.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous nous intéressons à l'amélioration des performances de l'antenne pour un fonctionnement dans la bande 5G. Nous présentons les résultats de simulations obtenus par l'application de deux méthodes qui permettent d'améliorer les performances de l'antenne. La première méthode est basée sur l'utilisation d'un ou plusieurs superstrats à une distance optimisée du patch. La deuxième méthode est basée sur l'application des métamatériaux dans l'environnement de l'antenne.

Notre travail s'achève par une conclusion générale.

Chapitre 1 :

Antenne et

métamatériaux

1.1 Introduction

La science et la technologie ont une soif insatiable de matériaux meilleurs et plus performants qui peuvent pousser les limites du possible. Un dernier venu fait beaucoup parler de lui : le ‘métamatériau’, également appelé (matériaux main gauche, ou left-handed material (LHM) en anglais), une sorte de structure artificielle possédant des propriétés que l’on ne retrouve dans aucun matériau naturel.

Dans ce chapitre, la première partie est consacrée à la présentation des antennes imprimées et leurs caractéristiques en citant leurs techniques d’alimentations les plus utilisées.

Dans la seconde partie du chapitre nous allons définir, en premier lieu, les métamatériaux en présentant leurs différentes dénominations et appellations. Par la suite, un petit historique et quelques principes et propriétés de ces matériaux seront présentés et finalement nous terminerons par une classification globale des métamatériaux ainsi que leurs applications liées aux antennes.

1.2 Généralités sur les antennes imprimées

1.2.1 Antenne imprimée ou micro-ruban

L’antenne imprimée est un élément transducteur. Elle effectue deux fonctions fondamentales le rayonnement (émission) et la réception d’une onde électromagnétique évoluant avec une fréquence compatible à celle de l’antenne.

La structure de base de l’antenne imprimée (figure 1.2.1), se compose d’un plan de masse conducteur et d’un diélectrique appelé substrat, caractérisé par sa permittivité relative ϵ_r , sur lequel est imprimé l’élément rayonnant.

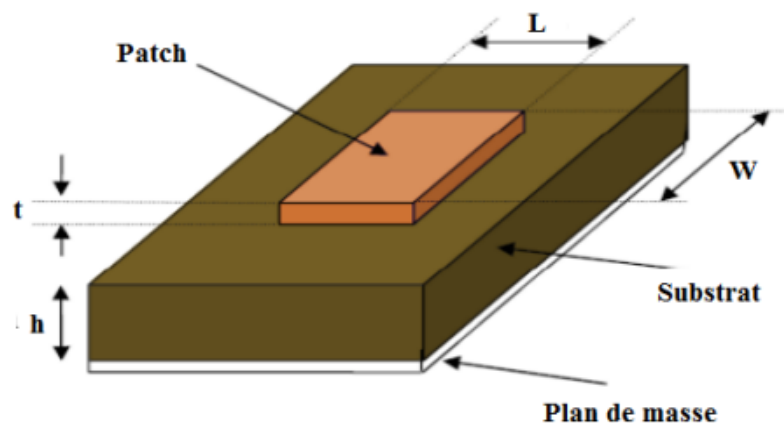


Figure 1.2.1. Géométrie d’une antenne imprimée [1].

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants (figure 1.2.2), le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes micro bandes.

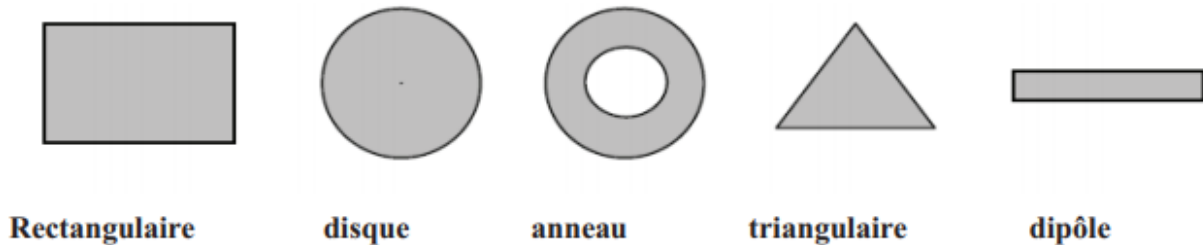


Figure 1.2.2. Diverses formes d'éléments rayonnants dans une antenne patch [2].

Les performances d'une antenne patch dépendent étroitement de la géométrie et des dimensions de tous ses composants. Les paramètres intervenant dans la caractérisation de l'antenne sont :

■ Le substrat

- Hauteur du substrat h .
- Permittivité relative du diélectrique ϵ_r .
- Tangente des pertes $\tan(\delta)$.

■ Le conducteur

- La forme géométrique (carré, cercle, triangle etc.)
- Les dimensions (largeur (W), longueur (L) pour la forme rectangle et rayon pour la forme circulaire).

1.2.2 Les caractéristiques des antennes imprimées

Plusieurs paramètres sont utilisés pour décrire les caractéristiques et les performances des antennes [3].

1.2.2.1 Impédance d'entrée de l'antenne

L'impédance d'entrée est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ; elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e [5].

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = R + jX$$

Avec :

Z =impédance d'entrée aux bornes a et b.

R = résistance de l'antenne aux bornes a et b.

X = réactance de l'antenne aux bornes a et b.

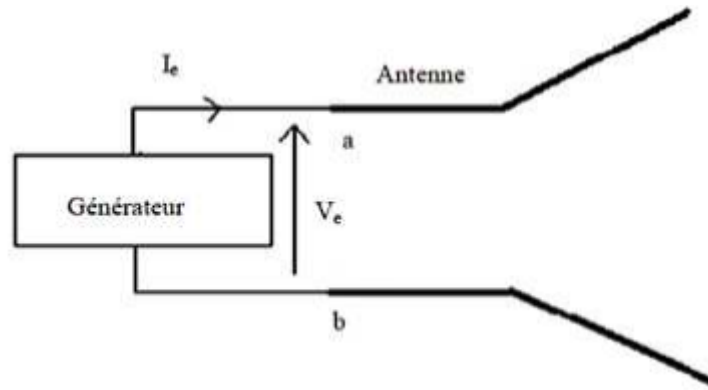


Figure 1.2.3. Antenne en mode émetteur.

1.2.2.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. Il est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne par la relation :

$$S_{11} = \frac{Z_e - Z_0}{Z_e + Z_0}$$

Donc le coefficient de réflexion S_{11} est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident.

1.2.2.3 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est généralement représenté dans des plans de coupe particuliers d'un repère sphérique fournissant suffisamment d'informations sur le rayonnement.

Le diagramme de rayonnement peut être représenté soit en distribution 3D qui nous permette une meilleure visualisation du lobe principale et des lobes secondaires, soit en 2D en une représentation polaire ou cartésienne.

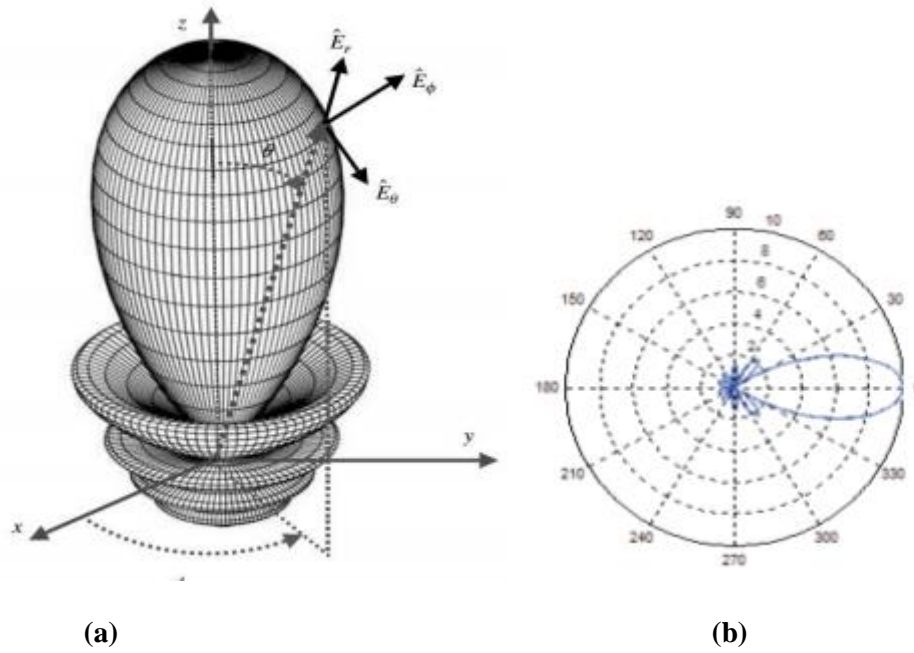


Figure 1.2.4. Diagramme de rayonnement : (a) en 3D, (b) en coordonnées polaires.

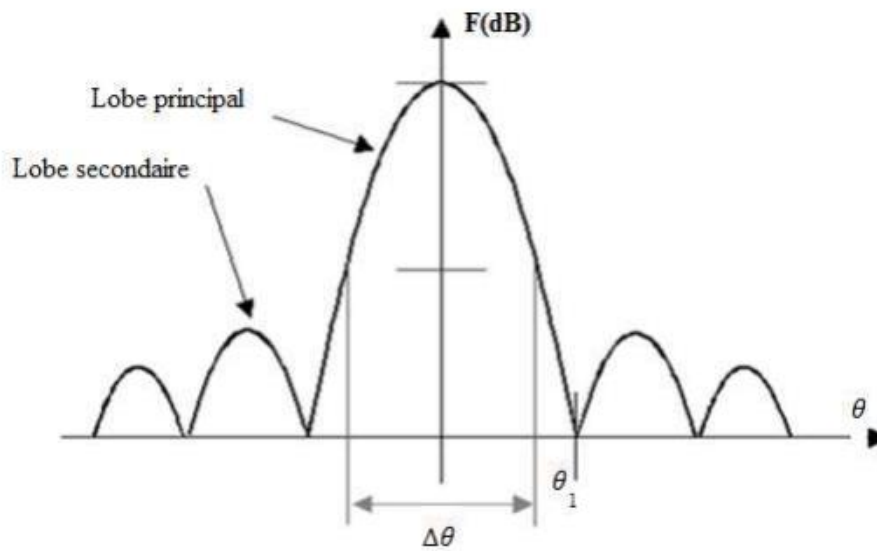


Figure 1.2.5. Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.

1.2.2.4 Rendement

Le rendement η d'une antenne est le rapport entre la puissance totale P qu'elle rayonne et la puissance d'alimentation P_a fournie à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{P}{P_a}$$

1.2.2.5 Gain d'une antenne

Le gain $G(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est exprimé en dB et donné par l'équation : $G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_0(\theta, \phi)}$

Avec : $P(\theta, \phi)$: Puissance rayonnée dans une direction.

P_0 : Puissance rayonnée par l'antenne.

1.2.2.6 Directivité

Caractérise la concentration du rayonnement dans une direction donnée.

$$D = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{\eta P_a(\theta, \phi)}$$

La relation entre le gain et la directivité d'une antenne est donnée par l'équation suivante : $G(\theta, \phi) = \eta \cdot D(\theta, \phi)$

1.2.2.7 Bande passante

La bande passante d'une antenne est la gamme des fréquences où l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante.

Les critères de fonctionnement de l'antenne définissent un domaine de fréquences situées entre une valeur minimale f_{\min} et une valeur maximale f_{\max} , F_1 et F_2 respectivement sur la figure 1.2.6.

La bande passante est exprimée par : $BP = f_{\max} - f_{\min}$

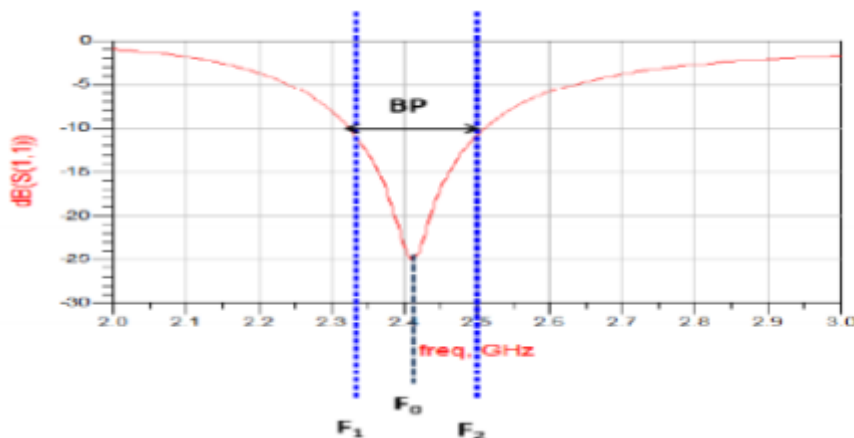


Figure 1.2.6. Détermination de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.

1.2.3 Techniques d'alimentation

A savoir que la technique utilisée peut modifier de façon importante le fonctionnement de l'antenne.

L'alimentation des antennes patch est un élément essentiel dans leur conception. Plusieurs techniques d'alimentation existent et la technique utilisée peut modifier de façon importante le fonctionnement de l'antenne. On distingue deux grandes catégories :

Alimentation par contact où l'alimentation est liée directement à l'élément rayonnant en utilisant un élément de connexion tel qu'une ligne microbande ou sonde.

Alimentation par proximité où le couplage du champ électromagnétique garantit le transfert de la puissance entre la ligne microbande et l'élément rayonnant.

Les cinq techniques d'alimentation les plus utilisées sont : la sonde coaxiale, la ligne microbande, le couplage par proximité, le couplage par ouverture et les guides d'onde coplanaires.

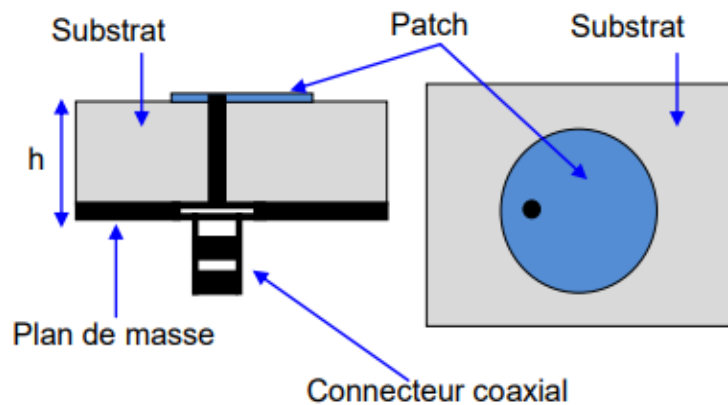


Figure 1.2.7. Alimentation par sonde coaxiale.

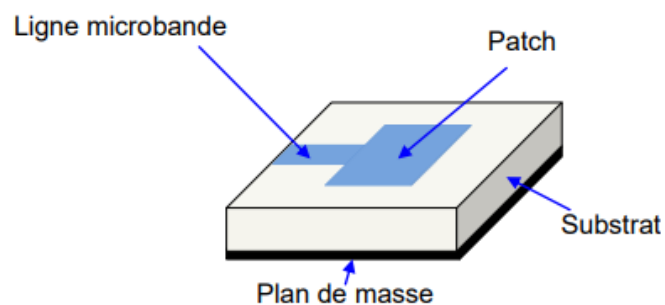


Figure 1.2.8. Alimentation par ligne microbande.

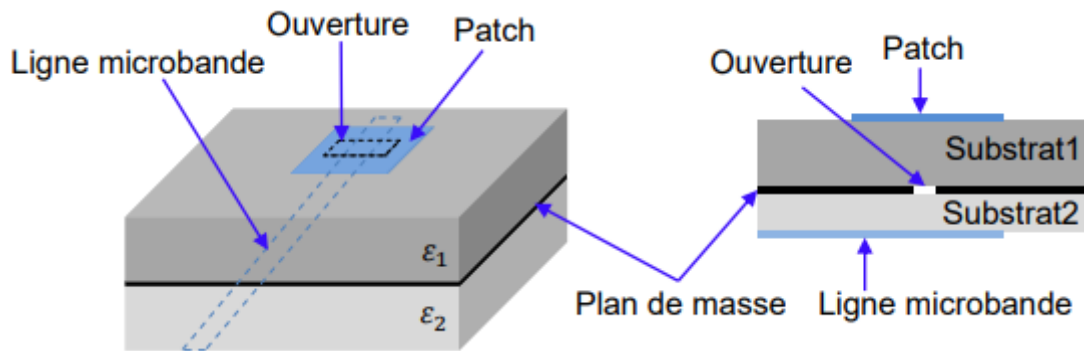


Figure 1.2.9. Alimentation couplée par ouverture.

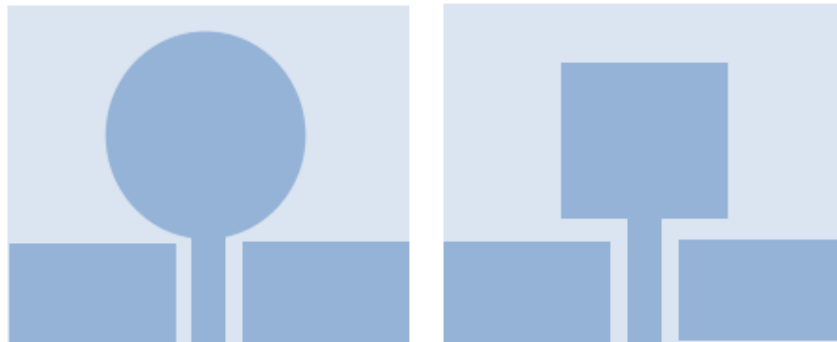


Figure 1.2.10. Alimentation par guide d'onde coplanaire (CPW).

1.2.4 Avantages et inconvénients des antennes imprimées

L'antenne microbande présente de nombreux avantages par rapport aux antennes classiques et par conséquent plusieurs applications dans la large gamme de fréquences allant de 100 MHz à 300 GHz sont réalisables. Parmi ces avantages, on peut citer [7,8] :

- La légèreté ;
- L'encombrement réduit ;
- La facilité de réalisation par la technique du circuit imprimé ;
- Le réseau d'alimentation et d'adaptation fabriqué simultanément avec le résonateur ;
- Le faible coût de fabrication.

Malgré ces avantages elles présentent un nombre d'inconvénients considérables, tel qu'un gain faible et une bande passante étroite, typiquement d'environ 5% ou moins [8].

1.2.5 Les applications des antennes imprimées

Vu les exigences multiples dans le domaine de communication, l'utilisation des antennes micro-ondes classiques [9] devient incapable de répondre à ces exigences. Pour cette

raison, les antennes microbandes remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications. Parmi ces applications on cite :

- Les télécommunications par satellites.
- La commande et contrôle.
- La télémessure par missile.
- Les équipements portatifs.
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine.
- Les récepteurs satellite de navigation

1.3 Les métamatériaux

1.3.1 Définition

Le terme « métamatériau » a été proposé par Walser (2001) avec la définition suivante : « macroscopic composite having manmade, three-dimensional, periodic cellular architecture designed to produce an optimized combination, not available in nature, of two or more responses to specific excitation ». La traduction littérale peut être comme suit : « matériau composite macroscopique présentant une architecture cellulaire périodique tridimensionnelle façonnée par l'Homme en vue de produire une combinaison, non rencontrée dans la nature, de deux ou trois réponses à une sollicitation spécifique ».

Typiquement, la dimension des éléments constitutifs est inférieure à la longueur d'onde du signal entrant et les effets obtenus sont les conséquences d'une dispersion non conventionnelle comme l'indice de réfraction négatif, intervenant dans les concepts d'invisibilité (Guenneau et al., 2015).

Le préfixe "méta" signifie "au-delà de" ou "un niveau au-dessus", le terme métamatériau désigne donc une classe de matériaux dont les propriétés vont d'une certaine manière au-delà de ce l'on peut espérer observer dans des matériaux classiques.

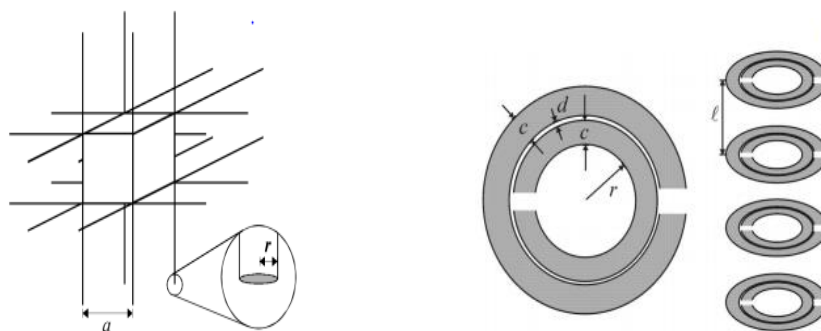
1.3.2 Origine et développement des métamatériaux

En 1966, Victor Georgievich Veselago, physicien théoricien russe, professeur à l'institut de physique et de technologie de Moscou, décrivit théoriquement la propagation des ondes électromagnétiques dans des matériaux possédant une constante diélectrique et une

perméabilité négative [10]. Il fit le constat qu'à priori rien n'interdisait d'avoir un milieu à perméabilité relative μ_r et à permittivité relative ϵ_r toutes deux négatives pour une onde (\vec{E}, \vec{B}) se propageant dans le milieu à la vitesse $V^2 = \frac{1}{\epsilon_r \mu_r}$. Un matériau présentant cette double négativité aurait vis-à-vis de la propagation de cette onde un comportement tout à fait atypique. La vitesse de groupe serait en effet négative, produisant notamment une inversion de l'effet Doppler, de la radiation Cherenkov et de la pression de radiation. Il posséderait également un indice optique négatif, inversant ainsi les lois de Snell-Descartes et permettant d'obtenir une réfraction négative à son interface.

La condition de double négativité resta longtemps difficile à réaliser. On connaissait la possibilité d'obtenir séparément soit une permittivité ϵ_r négative (avec un plasma par exemple) soit une perméabilité μ_r négative, mais la double négativité n'a réellement fait son apparition qu'à la fin des années 90 avec les travaux de J. Pendry, professeur à l'Imperial College. Dans deux articles successifs en 1996 puis 1999, il proposa le concept de cellules élémentaires possédant chacune l'une des négativités recherchées.

Dans un premier article [11], il montra que l'association de fins fils conducteurs (fils d'aluminium) dans une structure de type « cage à poule¹ » conduit dans le domaine du micro-onde $\approx 10\text{GHz}$ à une constante diélectrique effective ϵ_{eff} négative pour une onde se propageant au sein de la structure. Une particularité de ces fils est que leur diamètre est bien plus petit que la longueur d'onde. Dans un second article [12], une cellule en forme d'anneau, appelée « split ring resonator » (SRR), plus petite que la longueur d'onde, est fabriquée afin d'obtenir une perméabilité effective μ_r négative.

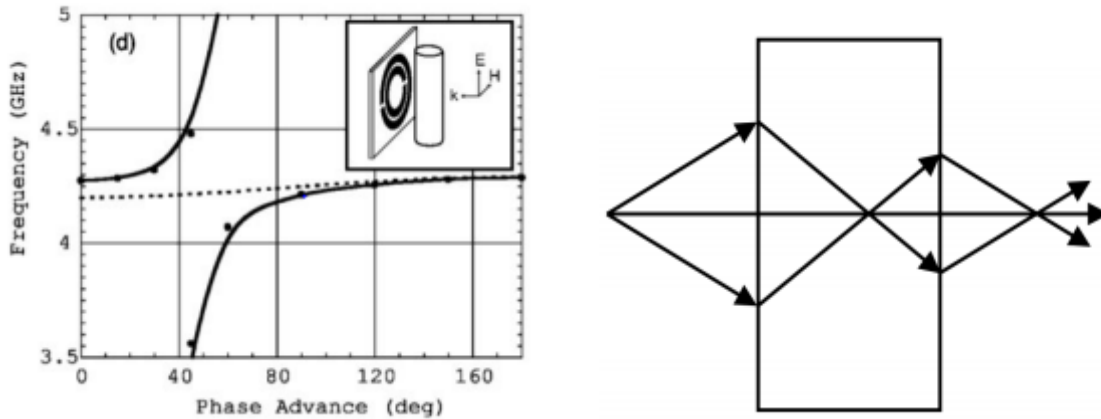


(a) Cellule « fil » avec $\epsilon_r < 0$ [11].

(b) Cellule SRR avec $\mu_r < 0$ [12].

Figure 1.3.1. Cellules élémentaires électromagnétiques permettant d'affecter : (a) le champ électrique (b) le champ magnétique.

1. Cette même structure que l'on trouve dans les parcs de jeux pour enfants.



(a) Métacellule composée d'un fil et d'un SRR – D. Smith [13].

(b) Propagation des rayons dans une lentille plate constituée d'un métamatériau et proposée par J. Pendry [14].

Figure 1.3.2. Métacellule et exemple d'application : la super-lentille.



(a) réseau de fils métalliques cylindriques. (b) réseau de résonateurs circulaires coupés. (c) association des deux réseaux précédents.

Figure 1.3.3. Exemples de métamatériaux tridimensionnels.

L'association de ces deux cellules élémentaires en une « métacellule », dont la fabrication était complètement contrôlée, rendit alors possible l'obtention d'un matériau possédant pour l'onde électromagnétique une permittivité et une perméabilité toutes deux négatives dans le domaine des micro-ondes. Ce travail expérimental fut réalisé en 2000 par l'équipe du professeur David Smith [13]. Le premier métamatériau à résonances locales électromagnétiques d'indice négatif $\eta_{\text{eff}} \approx -3$ était né ².

Cette même année, J. Pendry démontra grâce aux travaux de V. Veselago qu'un tel matériau permettrait la production d'une super-lentille plate exempte d'aberrations [15]. Cette lentille pourrait alors focaliser l'énergie lumineuse sur une taille inférieure à la limite de diffraction [5].

Suite à ces travaux, on prit conscience de la possibilité incroyable qu'offrait ce genre de matériau pour le contrôle de la propagation du champ électromagnétique [16] [17]. Une application directe de cette technologie fut la réalisation d'une cape d'invisibilité dans le domaine micro-onde [18] [19].

1.3.3 Terminologie

Il existe plusieurs synonymes de métamatériaux dans la littérature, pour désigner les Matériaux main gauche. Ils se résument comme suit :

- Matériaux main gauche (left-handed materials) est un terme proposé par Veselago [20] qui souligne la propriété fondamentale des métamatériaux qui est l'opposition entre la vitesse de phase et la vitesse de groupe.

- Matériaux doublement négatif (double-negative materials) avec une permittivité et une perméabilité toutes deux négatives.

- Matériaux à indice de réfraction négatif (negative refractive index materials). Ce terme décrit les matériaux 2D et 3D. En revanche, il ne peut pas être utilisé pour les matériaux 1D car la notion d'angle de réfraction perd tout son sens.

- Matériaux à onde réfléchie (back Ward wave materials). Ce terme souligne une autre propriété mais ne donne pas de réelle information sur la définition d'un métamatériau car les ondes réfléchies peuvent être également visibles dans des structures classiques.

- Matériaux de Veselago (Veselago medium) est un terme qui rend hommage au scientifique considéré comme le père des métamatériaux. Seulement, il ne donne aucune information physique sur les propriétés du matériau.

- Matériaux à vitesse de phase négative (negative phase velocity medium). Ce terme permet de pointer du doigt la nouveauté des métamatériaux, utiliser l'information de phase des paramètres S du système au même titre que le module. Jusqu'à maintenant, le module de ces paramètres était le plus utilisé pour réaliser une fonction. Bien que très précis d'un point de vue sémantique, ce terme est très peu utilisé par la communauté scientifique.

1.3.4 Principes et propriétés

En électromagnétisme, comme les matériaux homogènes tels que le diélectrique ou le conducteur sont caractérisés par leurs paramètres intrinsèques constitutifs qui sont la permittivité (ϵ) et la perméabilité (μ), de l'autre côté, les matériaux non homogènes tels que les métamatériaux peuvent être caractérisés par une permittivité (ϵ) et une perméabilité (μ) dites « effectives », qui s'écrivent sous la forme suivant μ_{eff} , ϵ_{eff} avec un indice de réfraction :

$$\eta_{eff} = \sqrt{\mu_{eff}} \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}$$

A savoir que le Métamatériau peut donner naissance à des paramètres effectifs séparément négatifs ou simultanément négatifs, ce qui est illustré par un $\eta_{eff} < 0$. Ce type de matériau est qualifié de matériau à main gauche (Left-Handed Materials « LHM ») du fait que le vecteur d'onde \vec{K} et le vecteur de Poynting \vec{S} sont antiparallèles et le trièdre formé par les vecteurs \vec{E} , \vec{H} et \vec{K} est en effet indirect (Figure 1.3.4).

Si $\epsilon > 0$ et $\mu > 0$: le trièdre est direct ; sinon, si ces paramètres changent de signe le trièdre devient indirect.

$$\vec{K} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H}$$

$$\vec{K} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{E}$$

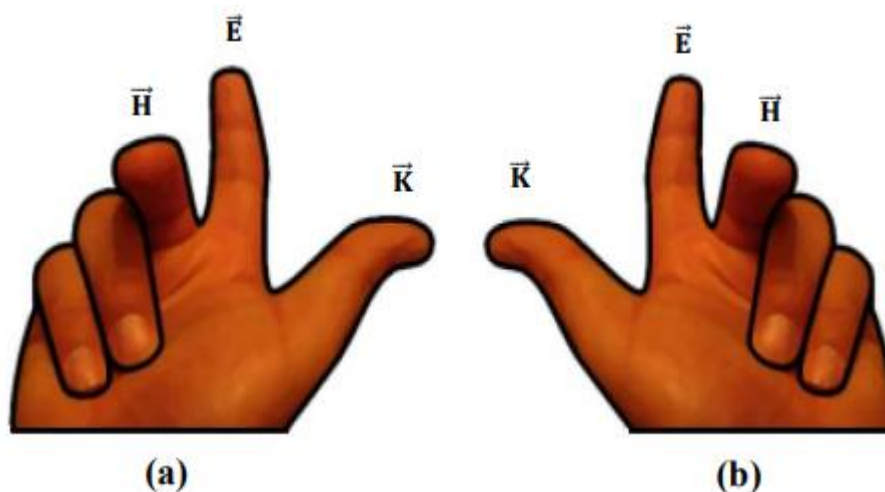


Figure 1.3.4. Trièdre direct et indirect caractérisé par la règle de la main droite et main gauche respectivement : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche.

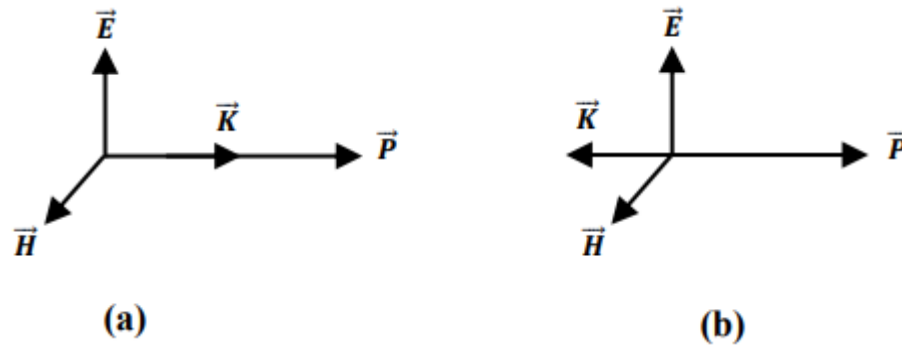


Figure 1.3.5. Représentation vectorielle d'une onde plane : (a) milieu main droite, (b) milieu main gauche

- (a) Selon l'équation $\vec{S} = 1/2 \vec{E} \times \vec{H}$ * le vecteur de Poynting est de sens opposé que celui du vecteur d'onde \vec{K} . Selon Veselago, la permittivité et la perméabilité du milieu main gauche doivent être liées à la fréquence du champ électromagnétique excitant, la densité de puissance U serait aussi négative.

- (b) La vitesse de phase $V_{\varphi} = \omega / \beta$, et la vitesse de groupe $V_g = \partial\omega / \partial\beta$ d'une onde électromagnétique sont opposées.

La vitesse de groupe peut être négative, mais ceci peut provoquer un phénomène d'atténuation. Selon l'équation de la vitesse de phase, la pente de la constante de phase reste positive tandis que le rapport ω / β peut prendre une valeur négative ou positive.

Dans le milieu à main gauche la vitesse de phase négative est schématisée par un phénomène de retro propagation [21]. Selon Veselago ces propriétés engendreront l'inversion des lois de la physique classique telles que :

- L'inversion de la loi de Snell-Descartes avec un indice de réfraction négatif.
- L'inversion de l'effet Doppler.
- L'inversion du rayonnement de Cerenkov.

La figure suivante montre la propagation d'une onde électromagnétique dans différents milieux.

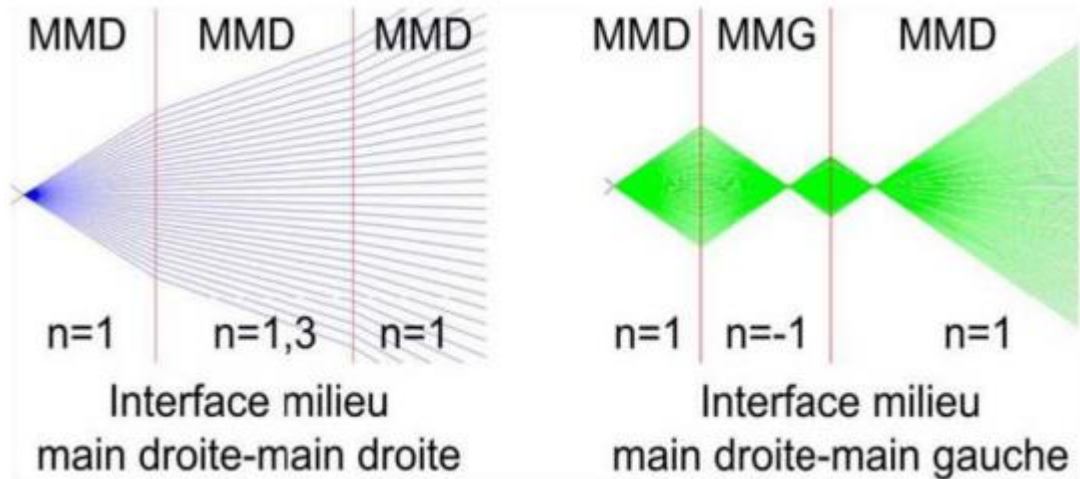
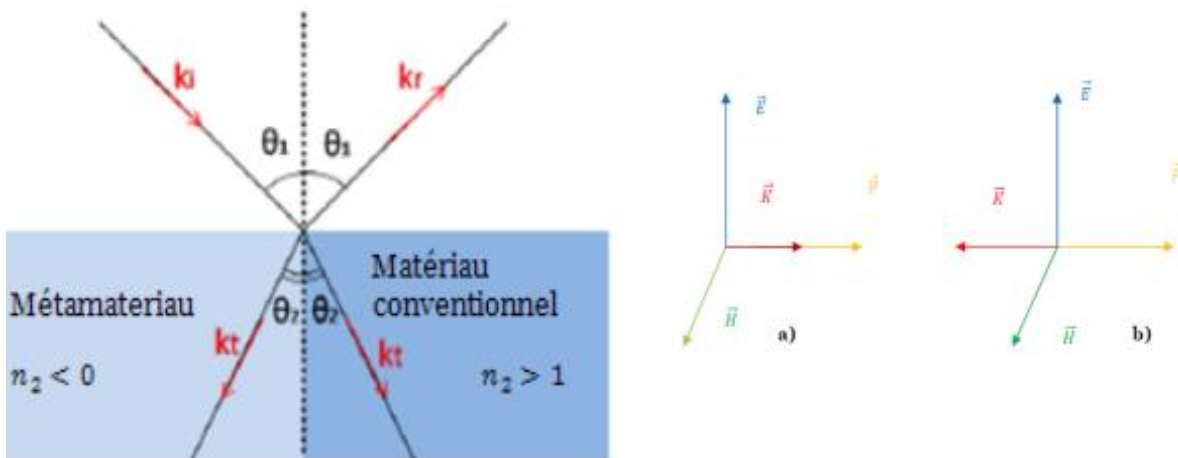


Figure 1.3.6. Propagation d'ondes électromagnétique dans différents milieux.

On résume les propriétés des métamatériaux en ces points :

- Indice de réfraction est négatif ;
- Permittivité perméabilité sont négatives ;
- Lors de la propagation d'une onde plane dans un métamatériau, le trièdre formé par les vecteurs $(\vec{k}, \vec{E}, \vec{H})$ est inversé.
- Les vitesses de phase et de groupe sont opposées (alors qu'elles sont de même sens dans un milieu classique).
- Contrairement aux milieux classiques, ils amplifient les ondes évanescentes.
- L'effet Doppler est inversé.



- L'effet Tcherenkov est inversé.
- Il existe des ondes de surface, appelées « plasmons » pour les deux polarisations, qui peuvent être propagatives ou rétro-propagatives.
- Il existe des modes guidés rétro-propagatifs et des modes à fuite rétropropagatifs.

1.3.5 Classification des métamatériaux

En électromagnétisme, tout matériau homogène peut être décrit par ses paramètres constitutifs que sont la permittivité et la perméabilité. Ces deux paramètres permettent de déterminer la réponse du matériau à un champ électromagnétique. En règle générale ϵ et μ sont à la fois positifs dans des matériaux ordinaires, cela signifie que l'indice de réfraction est positif. Les différentes possibilités du couple (ϵ, μ) sont $(+, +)$, $(+, -)$, $(-, +)$ et $(-, -)$.

Une représentation de ces paramètres dans un plan comprenant quatre cadrans afin d'inscrire les métamatériaux dans le prolongement des matériaux disponibles à l'état naturel est illustrée dans la figure I.3.7 qui résume toutes les configurations possibles.

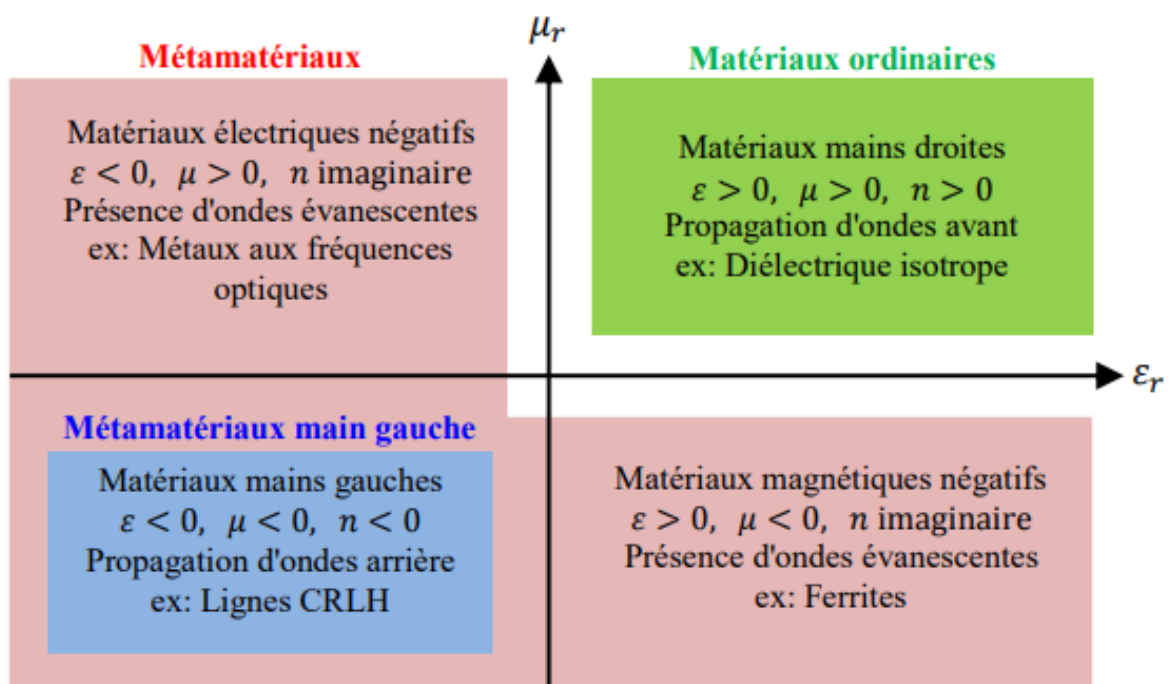


Figure 1.3.7. Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité ϵ et de leur perméabilité μ .

1.3.5.1 Les matériaux doublement positifs (DPS)

Les matériaux DPS (Double Positive) correspondent aux matériaux classiques dits (matériaux main droite (MMD)) sont les matériaux qui présentent des paramètres intrinsèques positifs et non nuls ($\epsilon > 0$ et $\mu > 0$). Les matériaux diélectriques et magnétiques font partie de cette catégorie.

L'expression main droite vient du fait qu'il faille utiliser la main droite pour trouver le trièdre direct $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{K})$.

1.3.5.2 Les matériaux à perméabilité négative (MNG)

Grâce aux travaux de Pendry, la possibilité de créer des milieux non-magnétiques avec une réponse magnétique est devenue une réalité. Ces travaux qui portent sur le magnétisme créé par une inclusion métallique appelée split ring resonator (SRR) ou résonateur en anneau fendu (RAF).

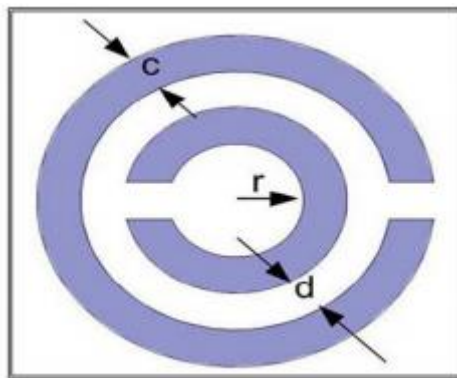


Figure 1.3.8. Résonateur en Anneau Fendu « RAF » (Split Ring Resonator « SRR ») introduit par Pendry.

Ce résonateur est composé de deux anneaux fendus concentriques imbriqués l'un dans l'autre, et disposés d'une façon opposée, dont les dimensions caractéristiques sont petites devant la longueur d'onde incidente, typiquement de l'ordre de $\lambda/10$. Vu ses petites dimensions devant la longueur d'onde, l'onde électromagnétique est incapable de détecter la configuration interne du milieu, par contre elle donne les paramètres effectifs de l'ensemble du milieu.

Cet élément crée en plus de sa résonance, une perméabilité effective négative dans une bande étroite de fréquence autour de sa résonance. Un autre avantage de ce résonateur est son faible encombrement, ce qui rend possible son intégration aux systèmes de télécommunications.

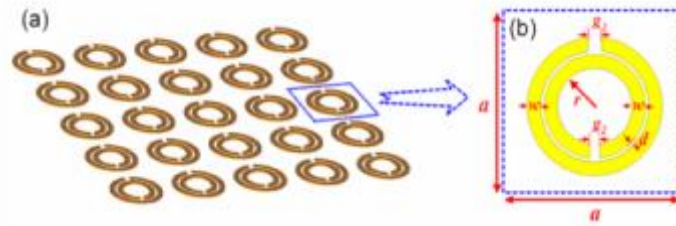


Figure 1.3.9. (a) Réseau de RAF introduit par Pendry, (b) : Cellule unitaire du RAF.

L'expression de la perméabilité effective est donnée par :

$$\mu_{eff} = \frac{F}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma\omega}$$

F : le volume de la structure.

ω : La pulsation angulaire, ω_0 : la pulsation de résonance.

1.3.5.3 Les matériaux à permittivité négative (ENG)

Selon le modèle de Drude, les métaux ne sont pas des milieux préparatifs à partir d'une certaine fréquence qui est la fréquence Plasma électrique (ω_{pe}). En effets, en dessous de cette fréquence les métaux présentent une permittivité négative.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + i\omega_c}$$

Avec : ω_{pe} : la pulsation du plasma électrique.

ω_c : la pulsation de collision.

J.Pendry, proposa de réaliser un plasma artificiel en diluant le milieu métallique afin d'abaisser sa fréquence plasma et de satisfaire les conditions d'obtention d'une permittivité négative en dessous de l'ordinaire.

Sachant que la fréquence plasma électrique s'écrit sous la forme suivante [22]:

$$\omega_{pe}^2 = \frac{\rho e^2}{\varepsilon_0 m_{eff}}$$

Avec : ρ : La densité des électrons.

e : La charge des électrons.

m_{eff} : La masse effective des électrons.

La démarche consistait à réaliser un réseau d'inclusions métalliques plus lourdes et ayant une densité d'électrons plus faible. La configuration retenue (Figure 1.3.10) se base sur un réseau de tiges métalliques de rayon r , avec un pas du réseau a . La fréquence de plasma pour cette configuration devient :

$$\omega_{pe}^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)}$$

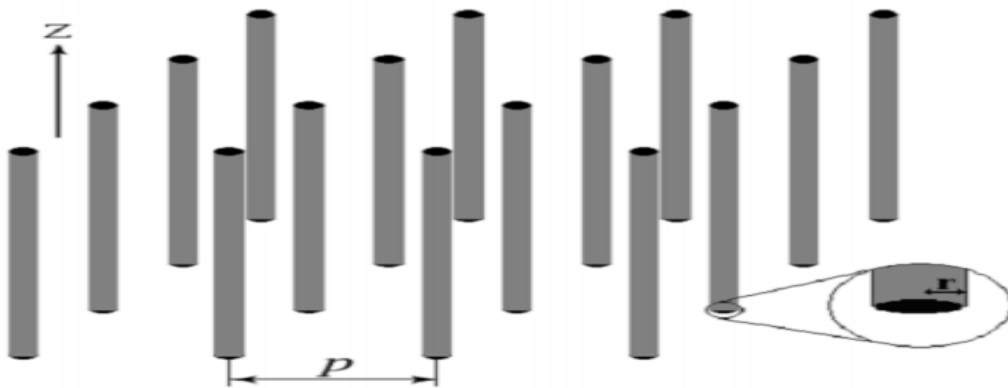


Figure 1.3.10. Métamatériaux ENG formé par un réseau de tiges métalliques.

1.3.5.4 Les Matériaux doublement négatifs (DNG)

Les matériaux DNG sont les matériaux avec une permittivité et une perméabilité simultanément négative, ces métamatériaux peuvent être réalisés par des cellules << imbriquées >> ou des cellules << combinées >>.

Le premier type imbrique deux cellules unitaires basiques : une cellule de type MNG, et l'autre de type ENG. A la résonance cette cellule composite montre un phénomène doublement négatif, l'exemple de ce type, réalisé par l'équipe de D.R.Smithse présente comme une cellule (SRR+Tige), (Figure 1.3.11.a).

Cette cellule imbrique deux cellules unitaires basiques : la SRR ayant une activité magnétique et le réseau de tiges responsable de l'activité électrique.

A la résonance cette cellule composite montre un phénomène doublement négatif (Figure 1.3.11.b).

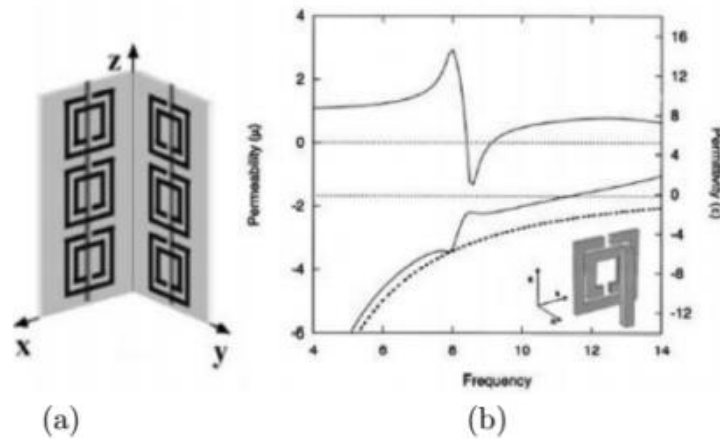


Figure 1.3.11. (a) cellule DNG- "SRR+Tige". (b) perméabilité et permittivité de la cellule "SRR+Tige".

Le deuxième type est basé sur un seul motif responsable sur une double activité simultanément. Comme exemple, la cellule DNG ayant l'allure de la lettre grecque « Ω » a été introduite par l'équipe de N.Engeta [23] (Figure I.3.12), et repoussée par H.Griguer [23-24].

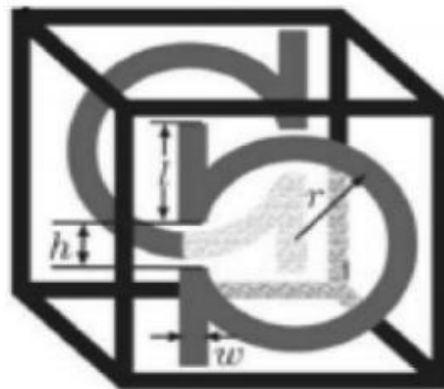


Figure 1.3.12. Cellule DNG sous forme de « Ω ».

1.3.6 Applications liées aux antennes

Les métamatériaux sont à l'étude pour de nombreuses applications. En télécommunication le déploiement est surtout au niveau des antennes à Metamatériaux.

Les applications dans le domaine des antennes, sont l'élargissement de la bande passante, le rejet de bandes de fréquences, l'augmentation de la directivité, l'amélioration du gain et la miniaturisation.

L'élargissement de la bande passante peut être obtenu en utilisant différentes techniques à base de métamatériaux, par exemple on peut concevoir des antennes patch démétallisées sur le patch et le plan de masse par des structures périodiques de deux dimensions, ces structures sont composées de résonateurs en anneaux fendus ou autres types de cellule unitaire à métamatériaux (tel que le résonateur en S ou oméga ... etc) [25,26] comme représente dans la figure 1.3.13 (a).

Chaque cellule unitaire représente une fente qui pourra créer de nouvelle résonance. Le choix de la forme et de la taille de ces fentes déterminera les fréquences de fonctionnement de l'antenne et les impédances d'entrée.

L'association des résonances des fentes avec la résonance de l'élément métallique favoriserait ici l'élargissement de la bande passante. Ainsi que, pour ce type des antennes, le lobe principal du diagramme de rayonnement change de direction vers la position horizontale au lieu de la direction verticale grâce à l'effet du métamatériau.

Une des applications des métamatériaux concernant l'amélioration de l'adaptation des antennes patch est l'utilisation des fentes de type SRR ou DRR dans le patch ou dans le plan de masse. Dans [27], l'insertion de trois fentes de type DRR dans le patch rectangulaire donne une bonne adaptation qui atteint un niveau moins de -15 dB dans toute la bande définie par le FCC (3.1-10.7 GHz) [28].

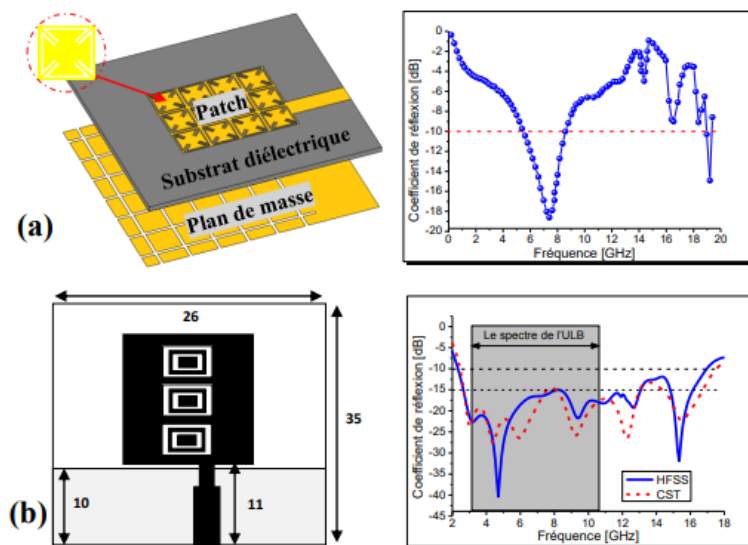


Figure 1.3.13. (a) antenne patch à large bande et leur S11 [25], (b) antenne patch avec trois cellules unitaires de type CDRR et leurs S11 [27].

L'utilisation des structures métamatériaux, RAF (résonateur en anneau fendu) ou RAFC (résonateur en anneau fendu complémentaire), permet également de stopper certaines bandes de fréquence due à leurs propriétés non ordinaires. Quand les ondes électromagnétiques se propagent sur les SRRs le long de la direction, la polarisation de champ électrique est gardée le long de l'axe, et la polarisation du champ magnétique est gardée le long de l'axe. En raison de cette propriété, ces structures réfléchissent parfaitement les ondes EM.

Cheolbok Kim et al. et J. Kim et al [29,30] ont inséré la structure SRR sur l'élément rayonnant et la ligne d'alimentation CPW pour obtenir la fonction stop bande dans l'antenne ULB. Cette méthode est présentée sur la figure 1.3.14.

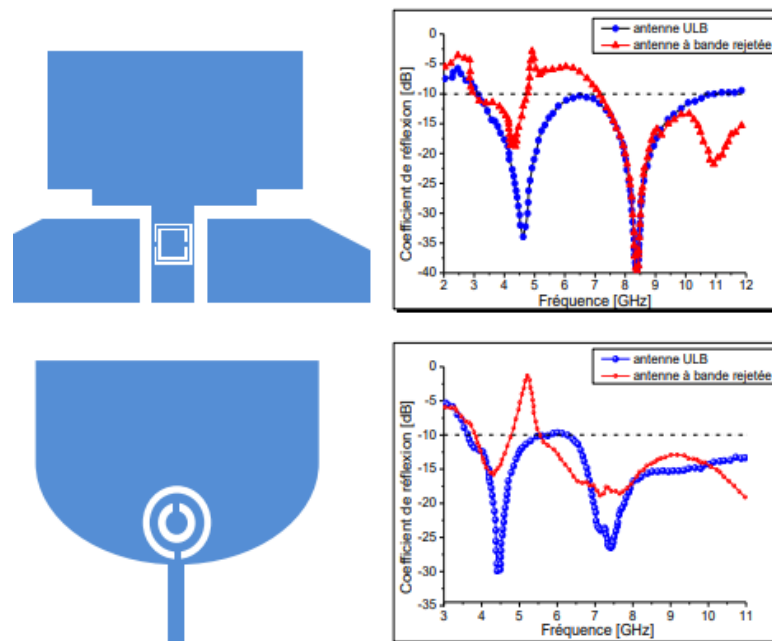


Figure 1.3.14. Structures d'antenne patch monopole à bande coupée et leur S11 [29,30].

Dans le domaine des antennes, certains métamatériaux trouvent également des applications en raison de leurs propriétés en réflexion. En particulier, ils permettent de réaliser des conducteurs magnétiques matriciels (Artificial Magnetic Conductors (AMC)). Du point de vue de leurs propriétés en réflexion, ceux-ci s'apparentent à des équivalents magnétiques des surfaces métalliques, et présentent un déphasage à la réflexion de valeur nulle. Cette propriété permet d'importantes réductions d'encombrement pour les systèmes comportant une antenne et un plan réflecteur arriéré, telles les antennes à cavité [31,32], ou les antennes comportant un plan de masse, telles les antennes patch [33]. De plus, il est possible d'obtenir simultanément une réduction des ondes de surface sur ces plans réflecteurs, qui sont à l'origine de couplages

parasites lorsque l'on souhaite réaliser un réseau d'antennes ou pour des applications Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) [33, 34].

Des applications exploitant les propriétés de réfraction de certains métamatériaux ont également été proposées. Ainsi, si on place une antenne non directive à l'intérieur d'une lame de métamatériau présentant un indice effectif proche de zéro, on obtiendra une forte augmentation de la directivité, avec la formation d'un lobe principal étroit orienté suivant la normale à la lame [35].

Pendant plusieurs années les matériaux à indice négative ont très fortement attiré l'attention des antennistes. Ces matériaux ont été proposés aussi pour réaliser des miniaturisations d'antennes et pour optimiser leurs performances [36]. Ainsi, Mohmoud Abdalla, et al, ont conçu une antenne patch compact triple bande à base de métamatériau pour tous les applications WiMAX [37]. Cette antenne a été conçue à l'aide d'une antenne patch rectangulaire monopôle alimentée par ligne microbande coplanaire CPW et deux cellules à métamatériaux. Chaque cellule peut être conçue séparément pour résonner à une fréquence différente afin qu'il puisse présenter deux bandes de fréquences différentes. L'antenne patch monopôle contribue à obtenir la troisième bande. Une réduction de la taille de 66%, 50% et 25% aux 2.4GHz, 3.5 GHz et 5.5 GHz respectivement a été réalisé.

1.4 Conclusion

Les notions de métamatériaux et de réfraction négative dans les structures artificielles périodiques ont permis d'ouvrir de nouvelles voies de recherche en électromagnétisme, ouvrant la voie à un potentiel immense surtout dans la télécommunication notamment les antennes patch. Ce nouveau type de matériaux appelé métamateriaux a été utilisé intensivement dans la conception des dispositifs microondes tel que les antennes, les guide d'ondes, les filtres... etc. Le chapitre suivant résume l'état de l'art, la théorie et les applications de ce type de matériaux.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les antennes imprimées, leurs caractéristiques, et quelques techniques d'alimentations les plus utilisées.

Dans la seconde partie du chapitre, nous avons passé en revue les métamatériaux en introduisant les généralités et l'explication nécessaires à la bonne compréhension de ces matériaux

Chapitre 2 : la 5^{ème} génération des réseaux mobiles

2.1 Introduction

Aujourd'hui le domaine des télécommunications est devenu très large dans le but de soutenir les demandes croissantes des clients en termes de rapidité, de diversité et de facilité.

La 5G est la nouvelle génération des standards de la téléphonie mobile. En général, les communications mobiles seront couvertes par une nouvelle tranche de bande passante située entre 6 GHz et 300GHz. Cette technologie actuelle qui vise de plus en plus la miniaturisation des composants a permis de mettre en évidence l'importance et l'utilité des antennes imprimées grâce à leurs faibles poids, leurs formes miniatures ainsi que leur faible coût.

Ce chapitre est consacré à la description des objectifs de la 5G ainsi que les différentes catégories d'usage de ce futur système de communication en citant par la suite les défis de cette dernière génération dans le monde.

2.2 Principe et objectifs de la 5G

Le principe de la 5G est d'utiliser les ondes millimétriques pour transférer rapidement une quantité importante des données, ce qui conduira à une meilleure utilisation de la bande de fréquence (UHF entre 6-300GHz) ultra-hautes [38]. L'objectif de cette nouvelle technologie est basé sur l'augmentation de la capacité et de la vitesse des réseaux par rapport aux générations précédentes et principalement sur l'internet des objets qui nous permet d'avoir un monde complètement connecté [39].

Parmi les objectifs de la 5G :

- Un débit de 1Gbps : des meilleurs débits actuellement qui donnent un accès à internet haut débit.
- Faible latence : le temps le plus court qui donne l'impression que le réseau est très réactif.
- Le volume de données (data) est très convenable.
- Une antenne peut faire connecter un nombre de terminaux, 100 fois supérieur (connectivité de masse), le nombre d'antenne dépend des fréquences utilisées.
- Délai de transmission inférieur à 10 ms.
- Disponibilité et couverture.
- La durée de vie de la batterie est 10 ans : moins de consommation et autonomie des batteries.
- L'amélioration de la vitesse de transmission des données : le double par rapport à la 4G.

2.3 Les technologies de la 5G

En plus des technologies déjà utilisées en 4G (tel que les bandes de fréquence de la 4G), la 5G fait aussi appel à de nouvelles bandes de fréquences comme les ondes millimétriques et elle propose de nouvelles technologies (figure 2.1) comme le massive MIMO, beamforming...



Figure 2.1. Techniques utilisées dans la technologie 5G.

2.3.1 Les ondes millimétriques (bande passante)

Actuellement les réseaux mobile utilisent une fréquence de 6Ghz, elle est très petite par rapport au nombre d'objets connecté et pour répondre à ce problème il faut utiliser les hautes fréquence qui permettent de passer plus d'information par seconde et l'augmentation de spectre qui permet d'augmenter le nombre de canaux de transmission [40], ces deux améliorations permettent de désencombrer les réseaux, à ce stade les ondes millimétrique présentent la contrainte de pénétration qui traversent les obstacles difficiles.

La fréquence de 6 Ghz utilisée actuellement dans les réseaux mobiles est très petite par rapport au nombre d'objets connecté. L'augmentation de spectre (figure 2.2) permet d'augmenter le nombre de canaux de transmission [40], donc il faut utiliser les hautes fréquences qui permettent de passer plus d'information par seconde, ce qui permet de désencombrer les réseaux, à ce stade les ondes millimétriques présentent la contrainte de pénétration qui traversent les obstacles difficiles.

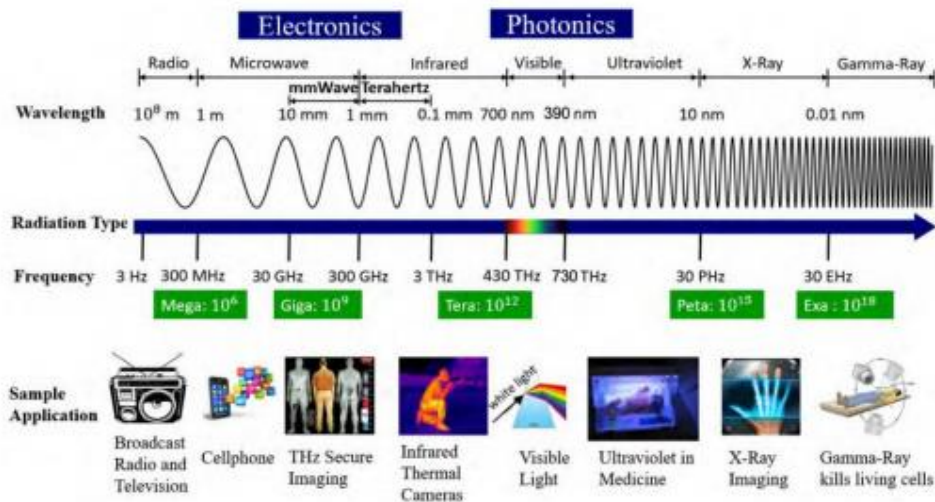


Figure 2.2. Spectre électromagnétique (ondes millimétriques) [41].

2.3.2 Les micro-cells

La réduction de la taille de la cellule où le nombre réduit d'utilisateur par cellule [42] d'une part et d'autre part l'augmentation de l'efficacité spectrale de la zone. La capacité totale du réseau augmente en réutilisant le spectre et en réduisant les cellules.

2.3.3 Beamforming

Localiser les ondes en direction de chaque objet spécifique. Cette précision augmente l'efficacité du signal et réduit les interférences et donc consomme moins d'énergie, en même temps économise de l'énergie et de la bande passante [43].

2.3.4 Full-duplex

Pour éviter les interférences, la transmission et la réception sans fil ne se font pas, généralement, sur les mêmes bandes de fréquences. Pour obtenir des signaux orthogonaux sans interférences, tout système bidirectionnel doit donc séparer le canal montant et le canal descendant en utilisant le domaine fréquentiel FDD ou temporel TDD. Le full duplex permet la transmission et la réception simultanée en même temps et sur la même bande de fréquences. Afin de doubler la capacité du réseau, les réseaux 5G utiliseront le full duplex pour la transmission des signaux. Cette technologie full-duplex augmente les interférences du signal avec un écho, mais ce dernier est facilement éliminé avec les techniques d'égalisation au niveau du récepteur.

2.3.5 Massive-MIMO

Pour répondre à la demande accrue en débit pour un nombre d'utilisateurs très important, les systèmes sans fil actuels utilisent la technique MIMO pour obtenir une efficacité spectrale et une efficacité énergétique élevées.

Les nouvelles technologies MIMO développés comme le MIMO mono-utilisateur (SU-MIMO) et le MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) ne suffisent pas encore à répondre à la demande toujours croissante, vu que le nombre des utilisateurs sans fil a augmenté de façon exponentielle.

Massive MIMO est la technologie la plus captivante pour la 5G et au-delà, elle regroupe des centaines voire des milliers d'antennes à la station de base et desserve des dizaines d'utilisateurs simultanément.

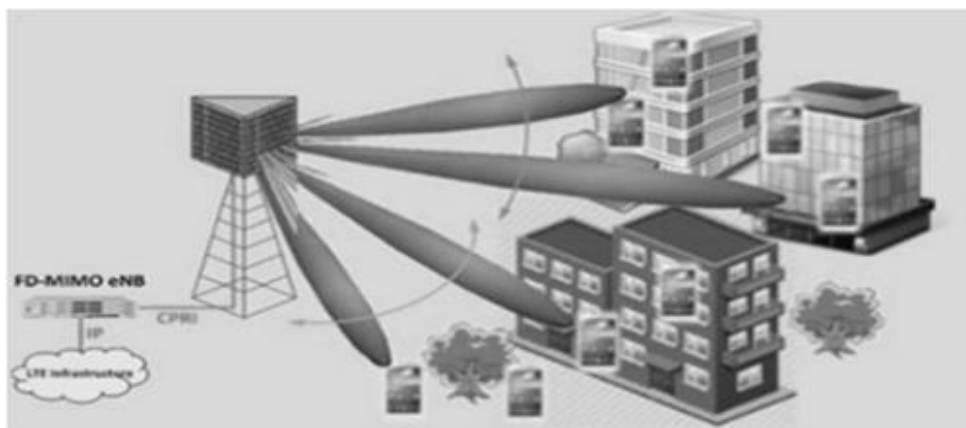


Figure 2.3. Massive MIMO [41].

2.4 L'architecture du réseau 5G

L'architecture du réseau 5G est composée de trois couches principales :

- Services innovants.
- La plateforme d'activation.
- La radio hyper connectée.



Figure 2.4. L'architecture du réseau 5G [41].

•Services innovants

C'est la couche supérieure comprend les services fournis par la 5G qui sont très fiables. D'une façon particulière les vidéo très hautes définitions (UHD : Ultra High Définition).

Parmi les services les plus dominants, les vidéos streaming. D'autre part la bande passante de la 5G facilitera le lancement des services de contrôle des robots à distance et aussi les services de l'internet des objets.

•La plateforme de validation (Architecture et gestion du réseau)

C'est la couche intermédiaire du réseau 5G, elle a comme fonction de créer des valeurs significatives, elle est centrée sur le service pour soutenir la couche supérieure ,en transformant correctement les éléments mécaniques et disjoints , il est utilisé via deux activateurs clés l'un est la virtualisation des fonctions réseau NFV(Network Function Virtualisation) et l'autre pour la virtualisation de l'infrastructure et les services offrir plus de flexibilité et d'intelligence au niveau du réseau SDN(Software Defined Networking).

Le **SDN** (Software Defined Network) a pour objectif de dissocier la partie contrôle d'un réseau de sa partie opérationnelle, ces deux parties liées et distribuées dans le réseau (Figure I.2.6). Le contrôle du réseau utilisé sous forme des logiciels sur des serveurs plus puissants et libres des spécifications des équipementiers cela permet de lancer des services à

forte valeur dans des environnements hétérogènes comme routage intelligent, configuration dynamique.

Le *NFV* un complément de SDN, son but est la virtualisation, remplacer le logiciel sur un serveur. NFV accélère le déploiement et permet des changements rapides.

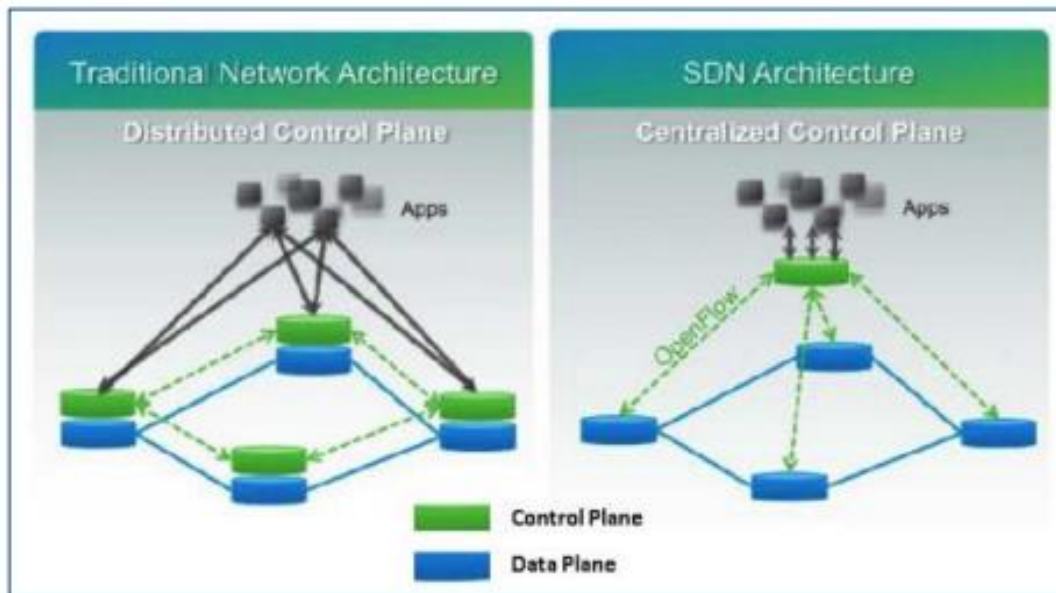


Figure 2.5. Centralisation du plan de contrôle dans un software defined network [45].

Le *CloudRAN* est une fonctionnalité appelée RAN centralisée (RAN-centralized), implique une architecture réseau très différente de ce qui se fait actuellement. C'est une évolution du SDN : les unités de traitement du signal des stations de base, actuellement placées au niveau de la station elle-même, sont déportées dans le cloud et centralisées, elles communiquent avec les têtes de réseau, situées au plus proche de l'antenne, via un réseau fibre optique (technologie Radio over fiber). Cette centralisation permet une vision d'ensemble de toutes les stations déployées et de coordonner le traitement de signal et la gestion des interférences entre cellules et terminaux.

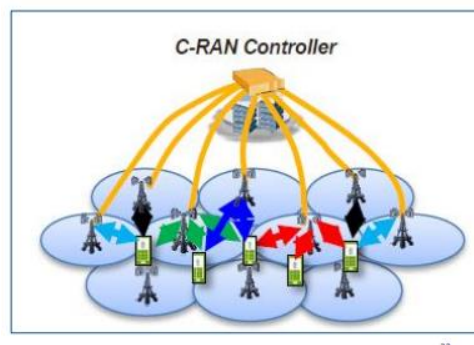


Figure 2.6. Illustration d'une architecture réseau cloudRAN [46].

•La radio hyper connectée

C'est la couche inférieure qui fournit une quantité importante de données à la couche intermédiaire de manière efficace. En raison de l'énorme trafic et des exigences strictes de latence, cette couche inclue de nouvelles technologies de réseau qui sont en cours d'étude par l'organisme de recherche.

2.5 La 5G en question de fréquences

Comme tout système de télécommunication hertzienne, la 5G occupe des fréquences précises sur le spectre des ondes radioélectriques. Le choix d'une bande de fréquence représente toujours un compromis entre couverture (définie par la taille de la zone où le service est accessible) et capacité (caractérisée par exemple par le débit obtenu). Pour assurer une bonne couverture, les fréquences basses sont privilégiées car elles permettent d'avoir de bonnes conditions de propagation. Pour augmenter la capacité, les fréquences hautes sont préférables car les largeurs de bandes disponibles y sont plus importantes, ce qui permet d'écouler plus de trafic. Cependant, les conditions de propagation sont plus difficiles à haute fréquence car l'environnement perturbe alors beaucoup la propagation, notamment à l'intérieur des bâtiments du fait d'une forte atténuation par les murs, ce qui limite la couverture.

Les réseaux de téléphonie mobile recherchent donc un équilibre entre bandes basses pour bien couvrir l'ensemble des populations et bandes hautes pour assurer une bonne capacité dans les zones où les demandes de trafic sont les plus importantes.

Dans ce contexte, la 5G disposera d'une gamme élargie pour son déploiement : elle pourra réutiliser le spectre déjà alloué pour la téléphonie mobile, notamment les bandes basses autour de 1 GHz, pour assurer une bonne couverture et se verra également attribuer de nouvelles bandes de fréquences notamment dans les bandes millimétriques, utilisées pour la première fois pour des services grand public, qui permettront d'augmenter la capacité (figure 2.7).

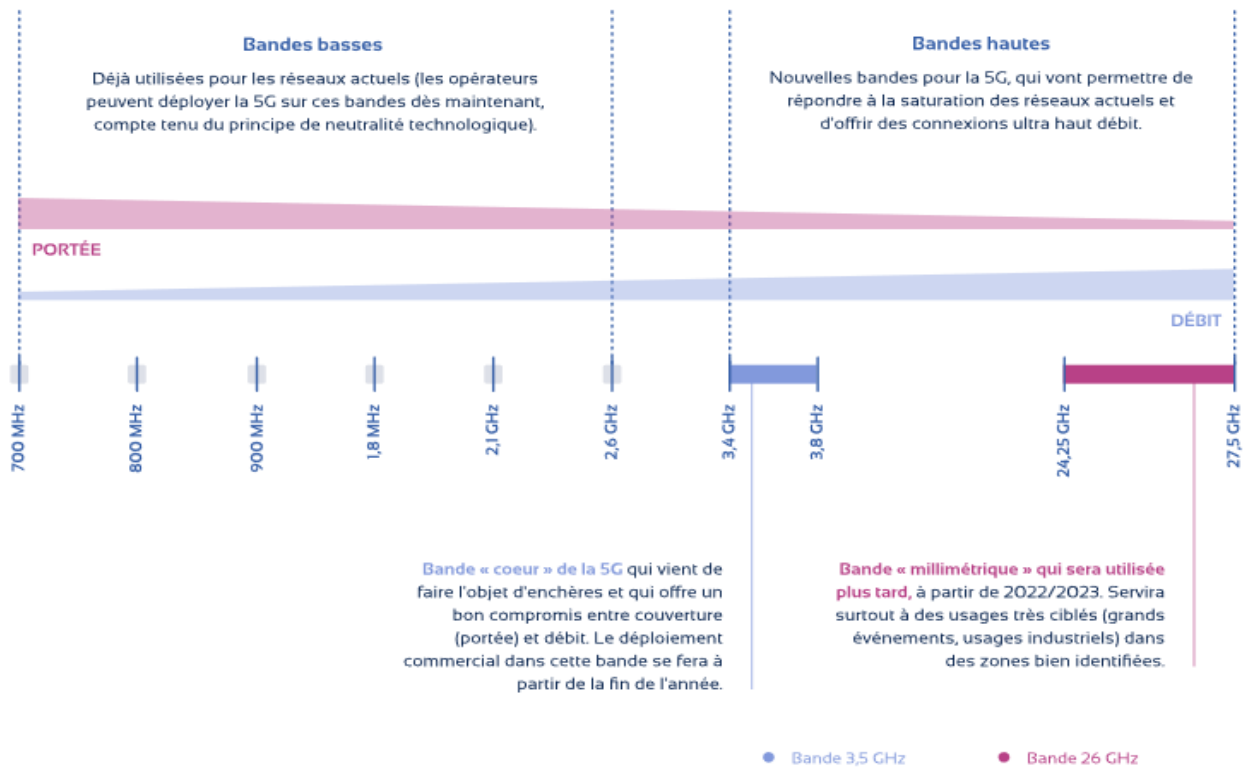


Figure 2.7. Spectre électromagnétique en 5G.

2.6 Comparaison entre les différentes générations

La 5G est une nouvelle génération de technologie des télécommunications sans fil, qui fait suite aux précédentes générations de la téléphonie mobile, elle permet :

- Une augmentation de l'efficacité énergétique.
- Une connexion stable même en mobilité.
- Un réseau haut performances, capable de fonctionner en temps réel, avec des exigences élevées en matière de fiabilité.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de la 5G et celles qui sont actuellement disponibles avec la 4G, 3G, 2G et 1G [47] :

Caractéristiques	1G	2G	3G	4G	5G
Débit maximal	171.2 Kbit/s	9.6Kbit/s	1.9 Mbit/s	1 Gbit /s	20 Gbit /s
Vitesse (Km/h)	/			350	500
Latence (ms)	/		150	10	1
Efficacité énergétique du réseau	/	/	/	1X	100X
Débit sur une zone	/	/	/	0,1(Mbit/s/m ²)	10(Mbit/s/m ²)
Bande passante de donnée	2Kbps	14.4-64Kbps	2Mbps	2Mbps à 1Gbps	1Gbps et plus selon le besoin
La bande de fréquence	150Mhz	1.8Ghz	2Ghz	2 à 8 GHz	3 à 300 GHz
Accès multiple	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA, BDMA
Les technologies	Analogique	Numérique	Large bande passante CDMA, technologie IP	IP unifiée, intégration transparente des réseaux LAN/WAN/PAN et WLAN à large bande	IP unifiée, intégration transparente des réseaux LAN/WAN/PAN/WLAN à large bande et technologies avancées basées sur modulation OFDM utilisée en 5G
Service	Téléphonie mobile (voix)	Voix numérique, messagerie courte de capacité supérieure en paquets	Audio, vidéo et données intégrées de haute qualité	Accès dynamique aux informations sur les appareils portables, streaming HD, itinérance mondiale	Accès dynamique aux informations sur les appareils portables, streaming HD, toute demande des utilisateurs

Tableau 2.1. Comparaison entre les caractéristiques des générations mobile [48].

2.7 Conclusion

Actuellement, l'explosion des objets connectés impose au réseau des changements d'architecture afin d'améliorer leurs performances, ce qui de nos jours représente un vrai challenge pour la prochaine génération. Donc l'arrivée de la 5G devient plus que jamais nécessaire pour répondre aux exigences du futur. Après avoir rappelé les objectifs du standard 5G, ainsi que ses technologies clés et son architecture, nous avons présenté l'évolution des générations en termes de débits, latence et bande de fréquences.

Le prochain chapitre sera consacré à la conception et la simulation d'une antenne répondant aux exigences de la 5G.

Chapitre 3 :

conception et

résultats de

simulation

3.1 Introduction

L'antenne est le composant clés de n'importe quel système de communication, sa qualité et ses performances déterminent le bon déroulement de la communication sans fil. Il est donc essentiel qu'elle ait les performances correspondant au système de communication moderne, en particulier en ce qui concerne la largeur de bande ($VSWR \leq 2$ ou $S_{11} \leq -10$ dB), un rayonnement acceptable, un gain important dans toute leur bande de fréquence.

Dans ce chapitre, nous nous consacrerons la conception d'une antenne microbande circulaire bi-bande permettant d'émettre ou de recevoir aux fréquences 28 et 34 GHz pour les applications 5G et à l'amélioration des performances de cette antenne.

Dans une première partie, nous commençons par la conception d'une antenne microbande circulaire bi-bande permettant d'émettre ou de recevoir aux fréquences 28 et 34 GHz pour les applications 5G, en citant les différentes étapes et paramétrages géométriques et physique. Nous présentons aussi dans cette partie les résultats de simulation d'un réseau d'antennes.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous nous intéressons à l'amélioration des performances de l'antenne pour un fonctionnement dans la bande 5G. L'une des méthodes les plus connues et les plus simples pour améliorer les performances, en particulier le gain d'une antenne est l'utilisation de superstrats, dans laquelle un ou plusieurs superstrats sont placés à une distance optimisée du patch. Ces antennes à superstrat suscitent une grande attention de la part des chercheurs, en raison de leurs avantages intrinsèques de gain élevé et d'efficacité.

La troisième partie de ce chapitre sera consacrée à l'application des métamatériaux dans l'environnement de l'antenne pour améliorer ses performances en termes de gain, de directivité et de puissance rayonnée.

3.2 Choix de l'outil de simulation

Les paramètres les plus significatifs utilisés pour étudier la performance d'une antenne sont le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, la directivité et le gain.

Si on veut optimiser les paramètres de l'antenne, il s'avère incontournable d'employer un logiciel adéquat. La conception de l'antenne par simulation aide à la prise en compte de l'imperfection des paramètres diélectriques et conducteurs des matériaux sélectionnés.

Pour réaliser notre travail, nous avons choisi un outil de simulation électromagnétique 3D puissant et efficace c'est le logiciel CST microwave studio (CST : Computer Simulation Technology), qui utilise comme méthode de calcul, la méthode des intégrales finies (FIT, Finite Integration Technique).

Avec ce logiciel, et après avoir sélectionné l'environnement dans lequel la structure sera créée, l'utilisateur doit dessiner la structure de l'antenne, indiquer les caractéristiques diélectriques et conductrices des matériaux en les sélectionnant à partir d'une librairie, définir les ports pour exciter l'antenne soit avec un port guide d'onde, soit avec un port discret, définir la plage de fréquence dans laquelle on analyse le problème et simuler le modèle pour le calcul et la résolution du problème électromagnétique.

3.3 Antenne étudiée et conçue

L'objectif de ce travail est de concevoir et d'étudier une antenne, très facile à fabriquer et de faible coût de réalisation, pour les applications 5G.

Les antennes imprimées sont utilisées dans plusieurs domaines pour leurs propriétés géométriques et électromagnétiques intéressantes. Parmi les formes d'antennes imprimées actuellement étudiées pour les applications 5G, on retrouve l'antenne patch circulaire. Ses caractéristiques intéressantes sont la simplicité de sa géométrie, la facilité de sa fabrication, sa bande passante large et son diagramme de rayonnement appréciable.

La géométrie de l'antenne conçue est donnée sur la figure 3.3.1. L'élément rayonnant de forme circulaire est imprimé sur la face supérieure du substrat. Le plan de masse d'épaisseur 0.035 mm est imprimé sur l'autre face du substrat.

Nous avons choisi un substrat diélectrique de type Rogers RT5880 avec une épaisseur de 0.787 mm et une permittivité relative de 2.2.

Parmi les diverses techniques d'alimentation les plus couramment utilisées pour alimenter une antenne imprimée, nous avons choisi une alimentation par ligne microruban.

Tous les paramètres géométriques de l'antenne sont regroupés dans le tableau 3.3.1.

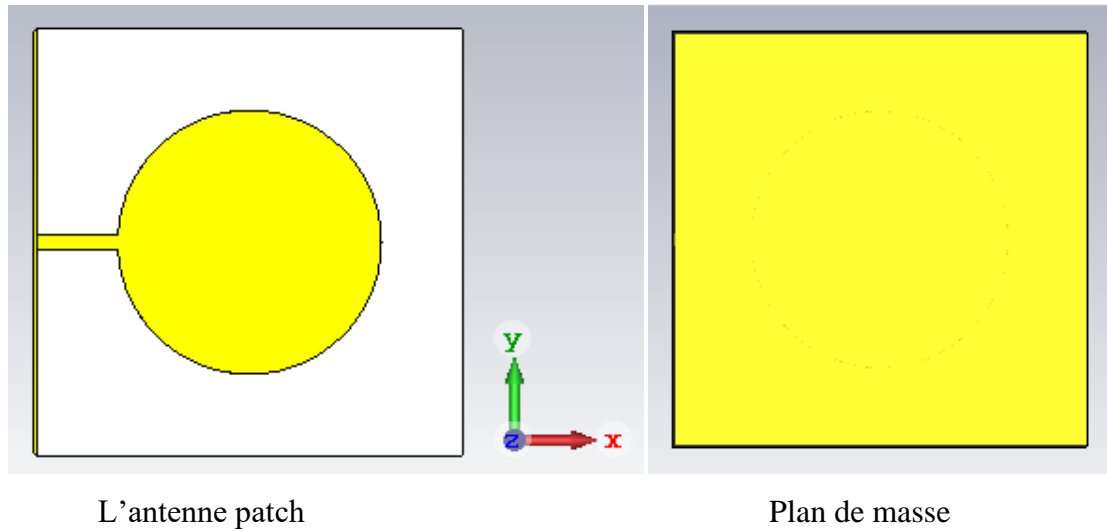


Figure 3.3.1. Géométrie de l'antenne.

Paramètres	Dimensions	Description
W_{sub}	10	Largeur du substrat
L_{sub}	10	Longueur du substrat
h_{sub}	0.787	L'épaisseur du substrat
R	3.1	Rayon du patch circulaire
W_f	0.3	Largeur de la ligne d'alimentation
L_f	2	Longueur de la ligne d'alimentation

Tableau 3.3.1. Paramètres géométriques de l'antenne de base.

Les résultats de simulation du coefficient de réflexion de l'antenne sont représentés dans la figure 3.3.2. Nous constatons que l'antenne ne présente pas une bonne adaptation autour de la fréquence de fonctionnement désirée.

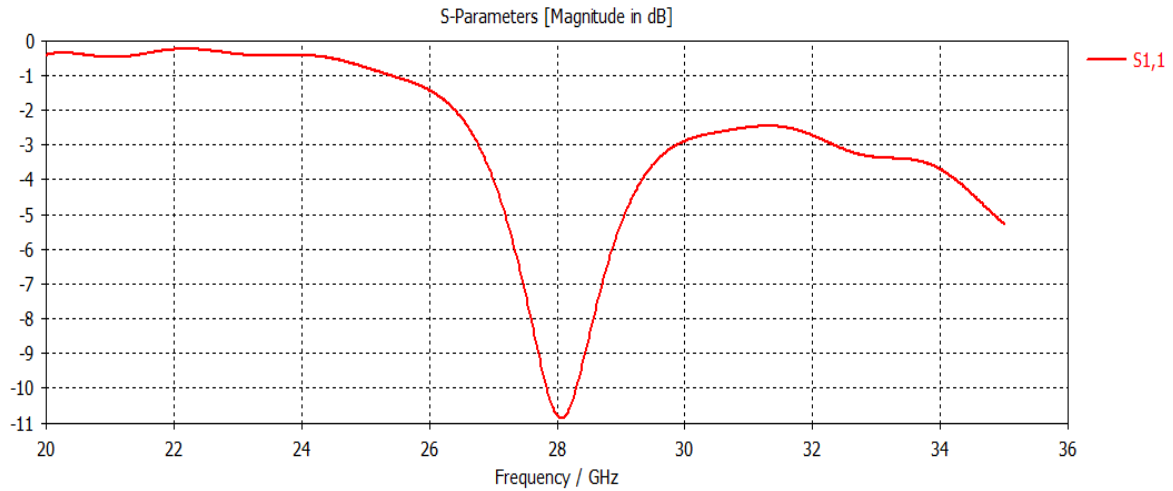


Figure 3.3.2. Coefficient de réflexion de l'antenne.

3.3.1 Adaptation de l'antenne

Afin d'améliorer l'adaptation de l'antenne, plusieurs techniques peuvent être utilisées, parmi ces techniques nous avons opté pour la méthode des encoches pour améliorer le coefficient de réflexion à la fréquence de résonance 28GHz.

La figure 3.3.3 montre la géométrie de l'antenne après l'ajout des encoches à l'entrée du patch.

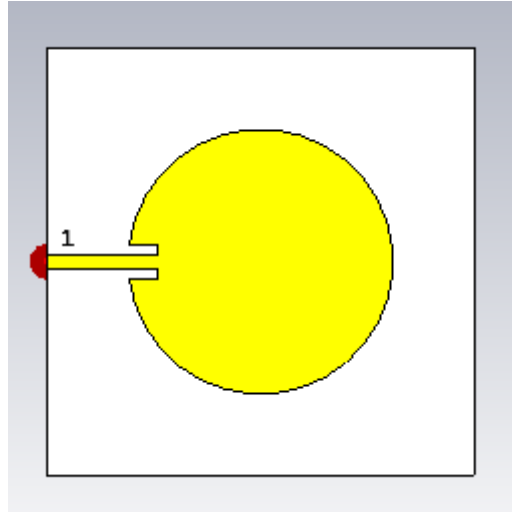


Figure 3.3.3. Adaptation de l'antenne par encoches.

3.3.2 Etude paramétrique sur les encoches (effet des paramètres géométriques)

Les figures 3.3.4 et 3.3.5 montrent l'impact de la longueur L_{gap} et la largeur W_{gap} des encoches sur la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

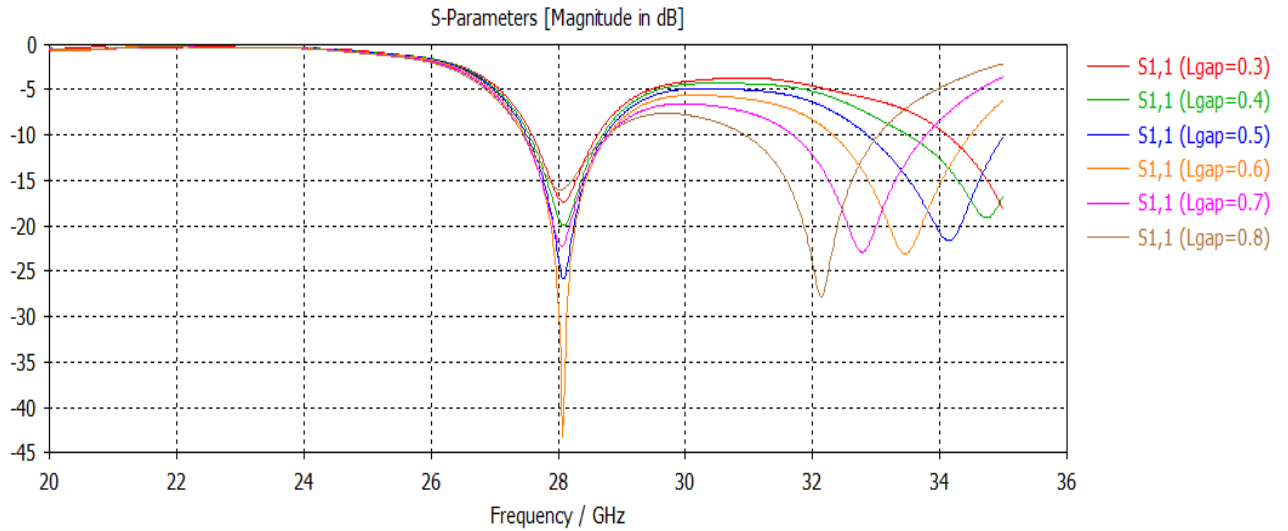


Figure 3.3.4. Effet de la longueur des encoches.

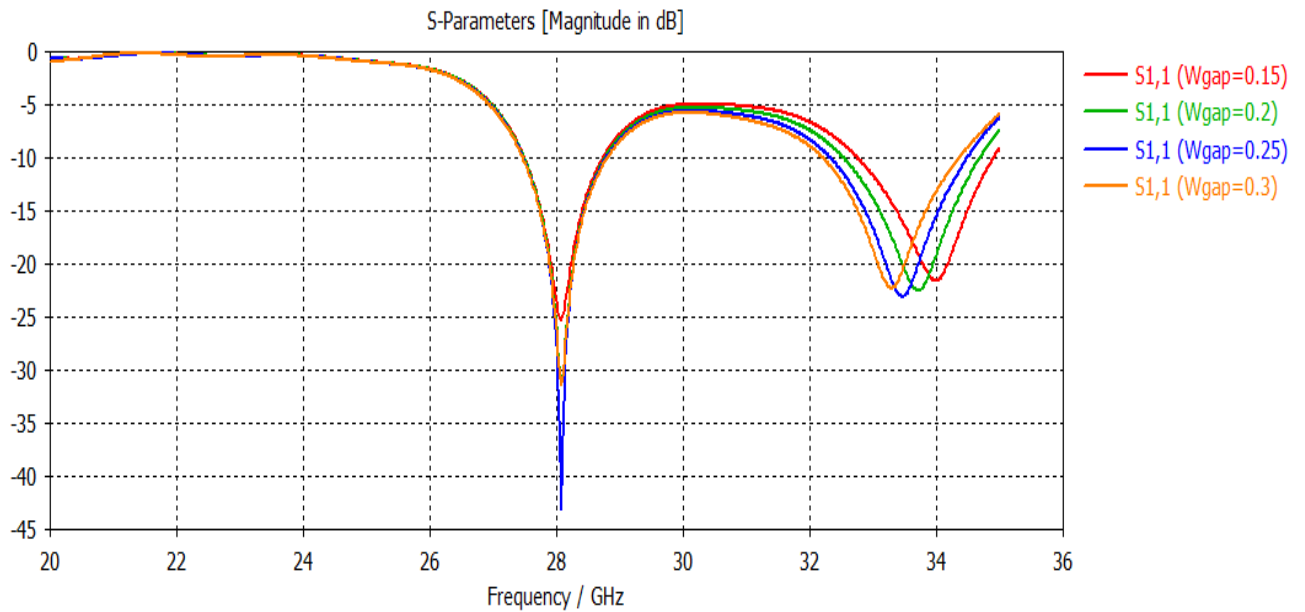


Figure 3.3.5. Effet de la largeur des encoches.

On peut remarquer clairement la variation du coefficient de réflexion avec la variation de la longueur des encoches.

3.3.3 Performance de l'antenne optimisée

3.3.3.1 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion de l'antenne obtenu après une optimisation sur les dimensions des encoches est illustré sur la figure 3.3.6.

La variation du coefficient de réflexion simulé en fonction de la fréquence dans la bande [20, 36] GHz montre que cette antenne possède deux fréquences de résonance : 28 GHz et 33.4 GHz avec un coefficient de réflexion de -43.18 dB et -23.09 dB respectivement, pour une longueur et une largeur d'encoches optimisées respectivement : $L_{gap} = 0.6$ mm, $W_{gap} = 0.25$ mm.

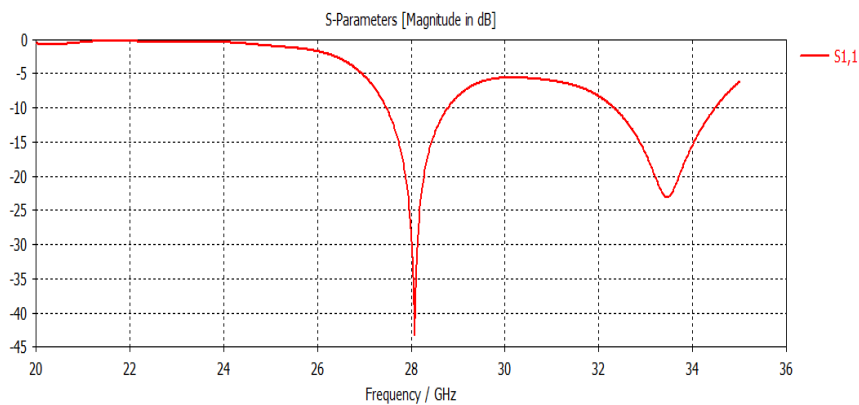
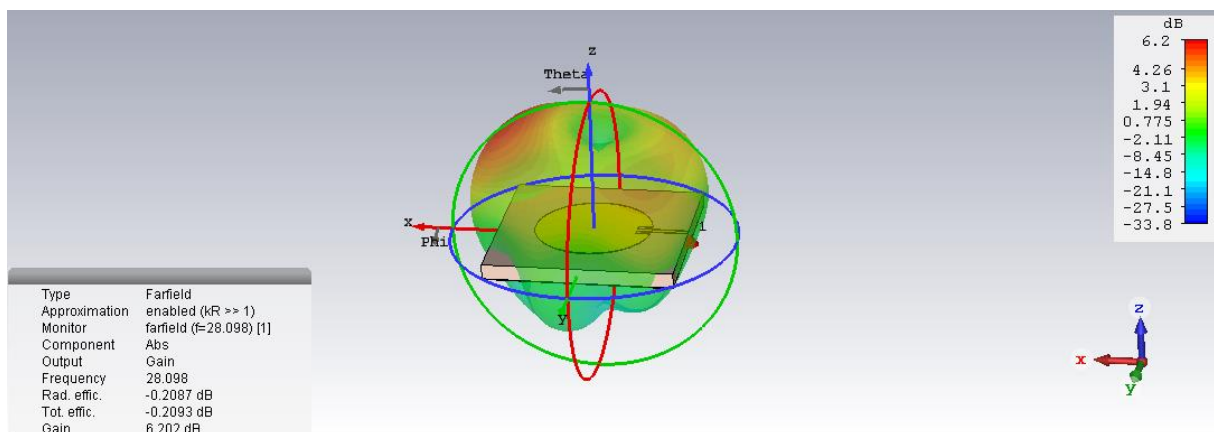


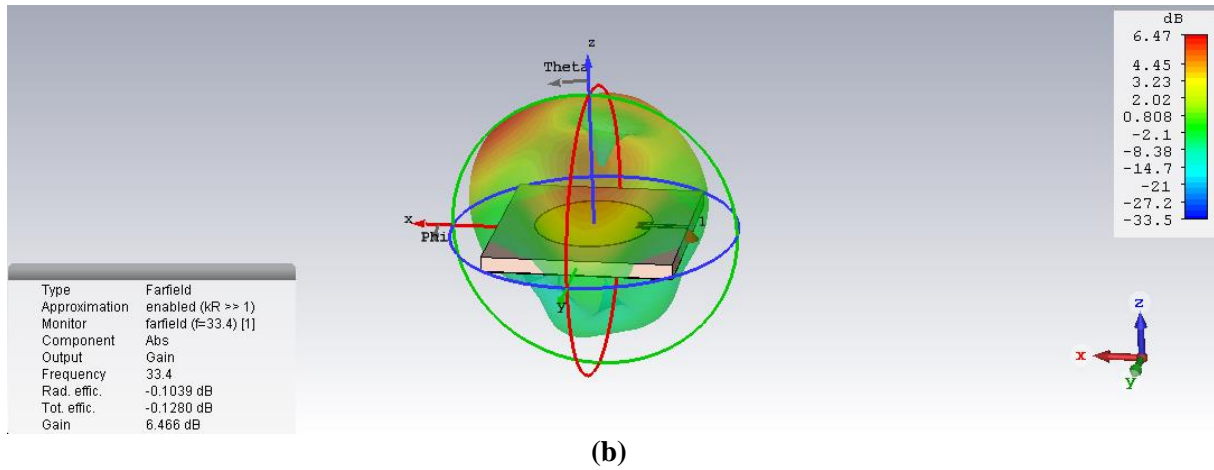
Figure 3.3.6. Coefficient de réflexion de l'antenne conçue.

3.3.3.2 Diagramme de rayonnement

Pour mieux voir le comportement du rayonnement de l'antenne dans l'espace, on présente dans les figures ci-dessous, les diagrammes de rayonnement de gain et de directivité en 3D et en 2D aux deux fréquences de résonance dans les deux plans principaux E et H.

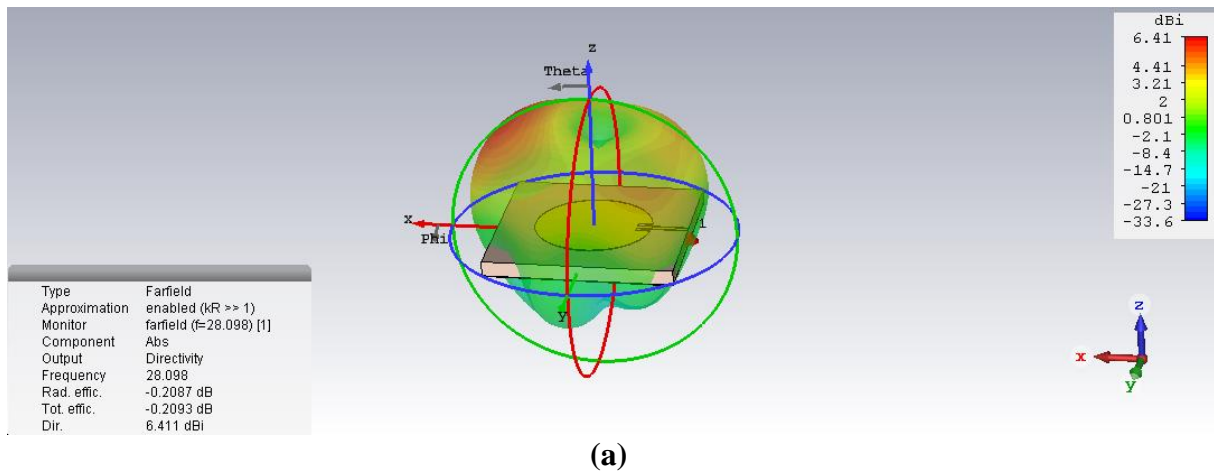


(a)

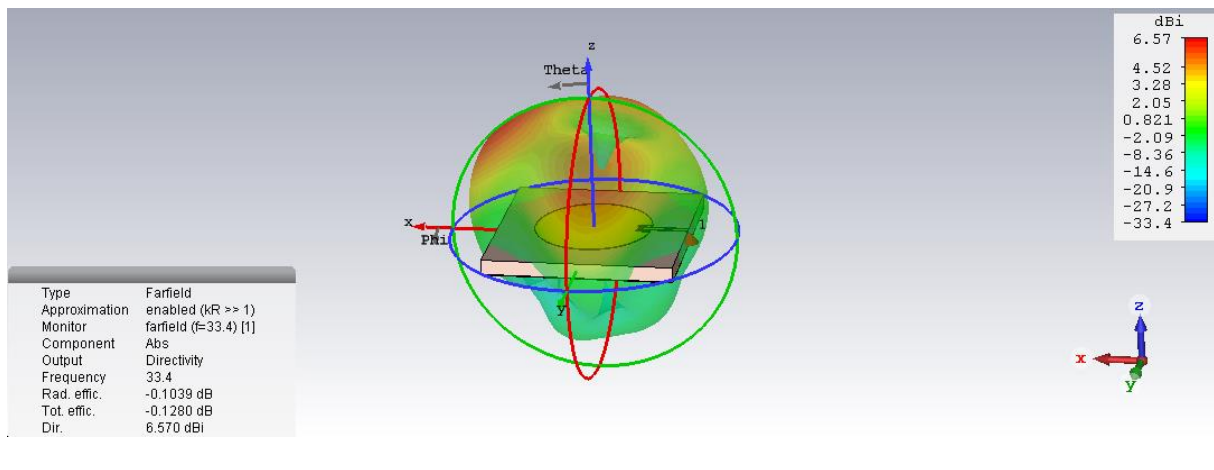


(b)

Figure 3.3.7. Diagramme de rayonnement du gain en 3D : (a) à 28 Ghz et (b) à 33.4 Ghz.



(a)



(b)

Figure 3.3.8. Diagramme de rayonnement de la directivité en 3D : (a) à 28 Ghz et (b) à 33.4Ghz.

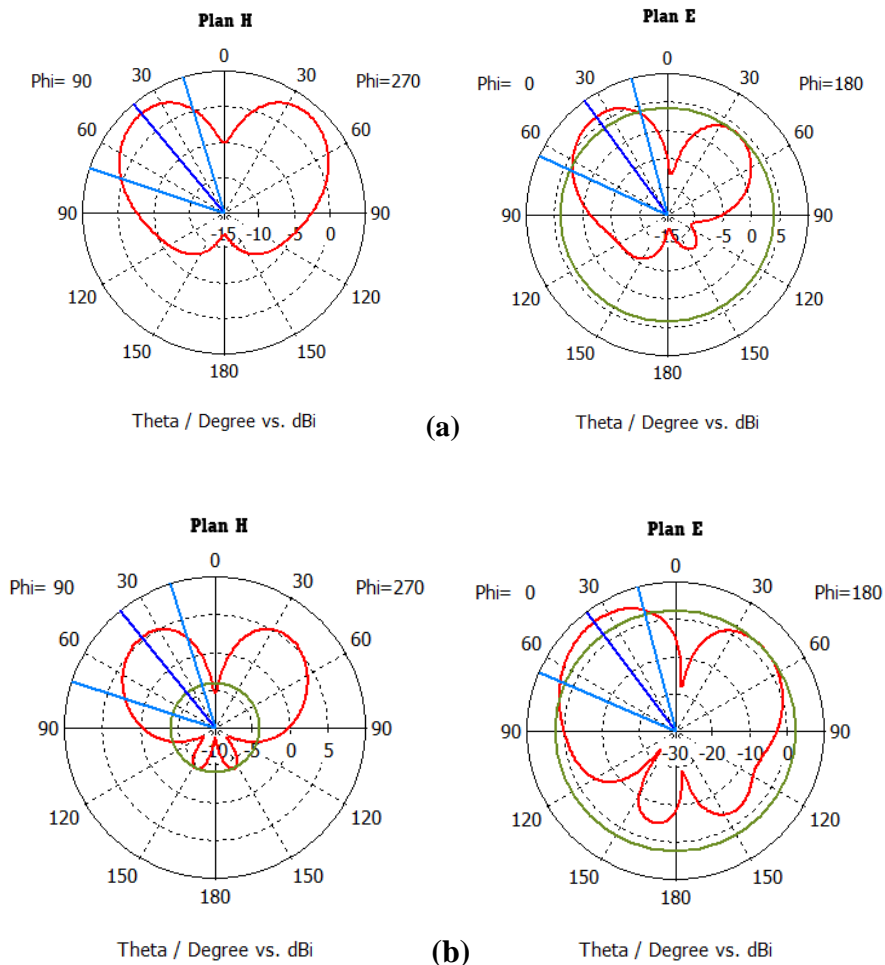


Figure 3.3.9. Diagrammes de rayonnement en plan polaire : (a) à 28 GHz et (b) à 33.4 GHz.

3.3.3.3 Rapport d’onde stationnaire (VSWR)

Le rapport d’onde stationnaire (VSWR) est ≤ 2 aux deux fréquences de résonance donc l’antenne est bien adaptée.

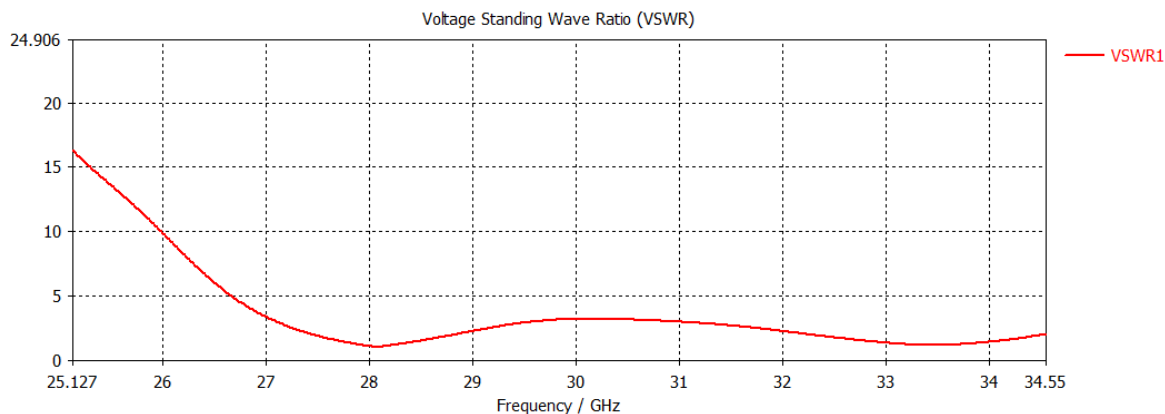


Figure 3.3.10. Rapport d’onde stationnaire (VSWR).

3.3.3.4 Le tracé du gain

Nous nous intéressons maintenant au gain de l'antenne. On remarque que le gain varie avec la fréquence et le maximum de gain est inférieur à 7 dB.

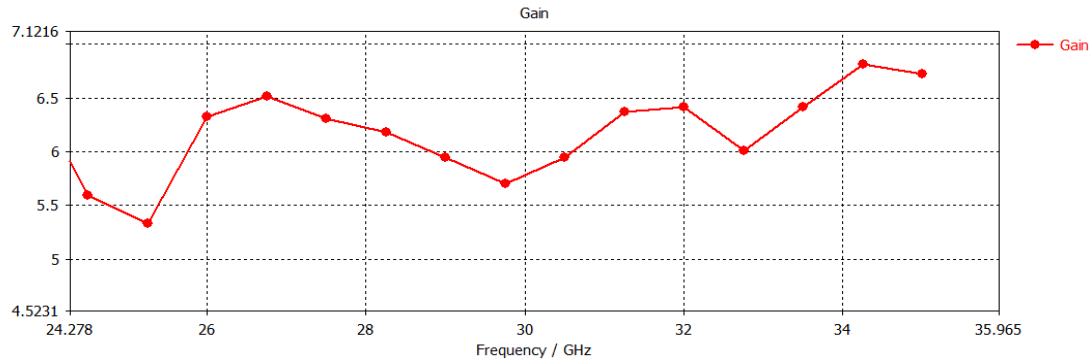


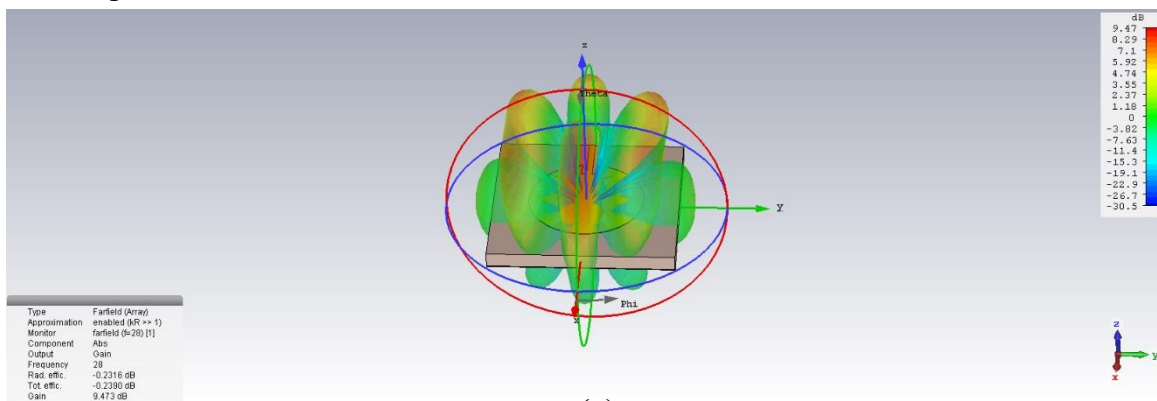
Figure 3.3.11. Gain en fonction de la fréquence.

3.3.4 Conception d'un réseau d'antennes

Dans ce qui précède, nous avons développé une structure à un seul élément rayonnant fonctionnant dans les bandes de fréquences millimétriques. Cependant, malgré un gain maximal de 6.21 dB à 28 GHz, les attentes de la 5G nécessitent beaucoup plus de gain. Pour répondre à ceci, nous devons aller vers d'autres structures avec un gain plus élevé. L'objectif de cette partie du chapitre vise à étudier des réseaux d'antennes afin d'augmenter le gain.

Nous commençons par la mise en réseau de deux éléments rayonnants afin d'étudier la distance inter-éléments pour minimiser le niveau des lobes secondaires.

Les figures 3.3.12 et 3.3.13 représentent les diagrammes de rayonnement de gain en 3D et en 2D d'un réseau de deux éléments rayonnants espacés de 20 et 12 mm à la fréquence de résonance 28 GHz. Les deux éléments rayonnants sont alimentés avec la même amplitude et la même phase.



(a)

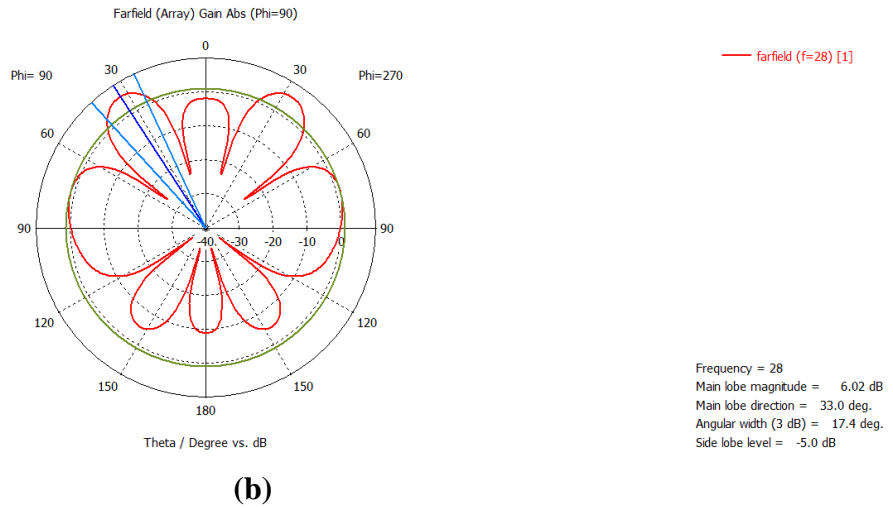


Figure 3.3.12. Diagrammes de rayonnement de gain d'un réseau de deux éléments rayonnants espacés de 20mm, équi-amplitude et équi-phase : (a) en 3D, (b) en 2D.

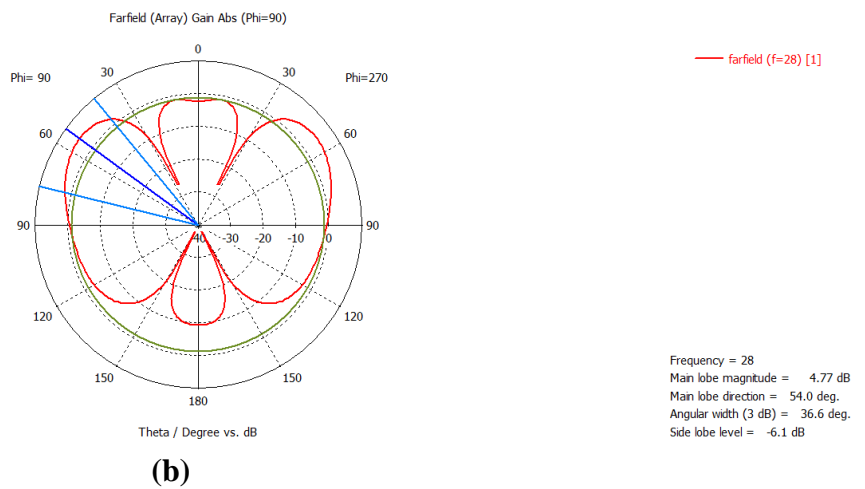
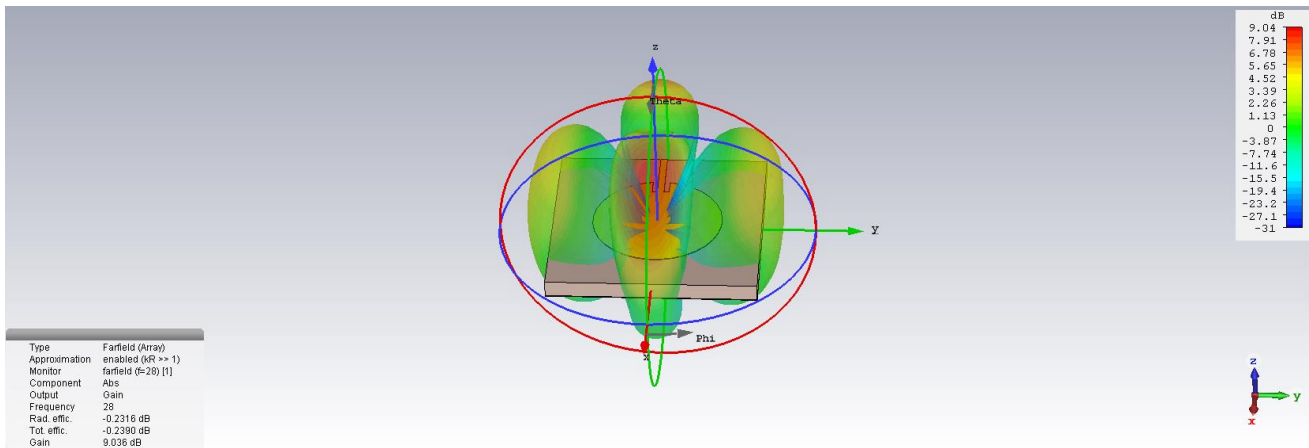
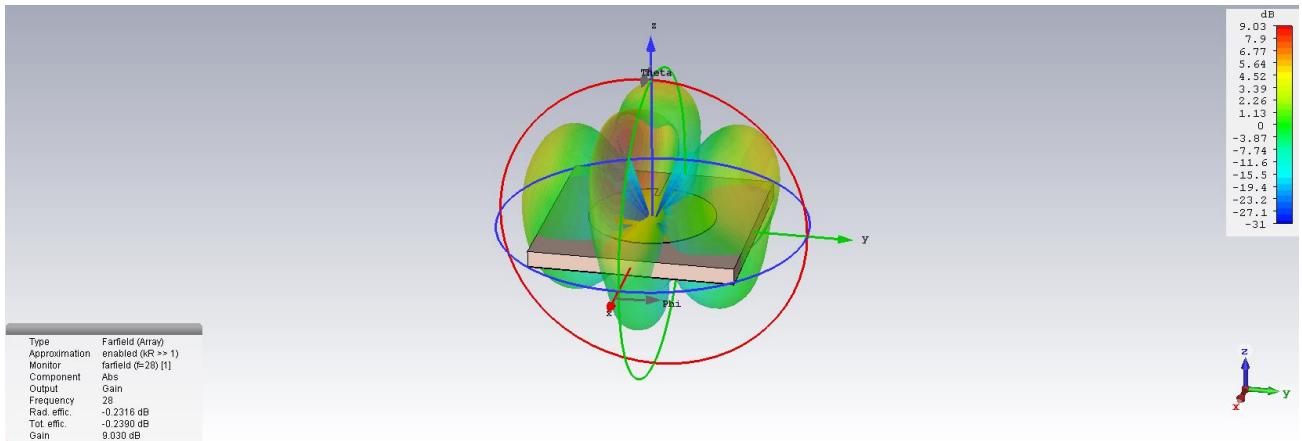
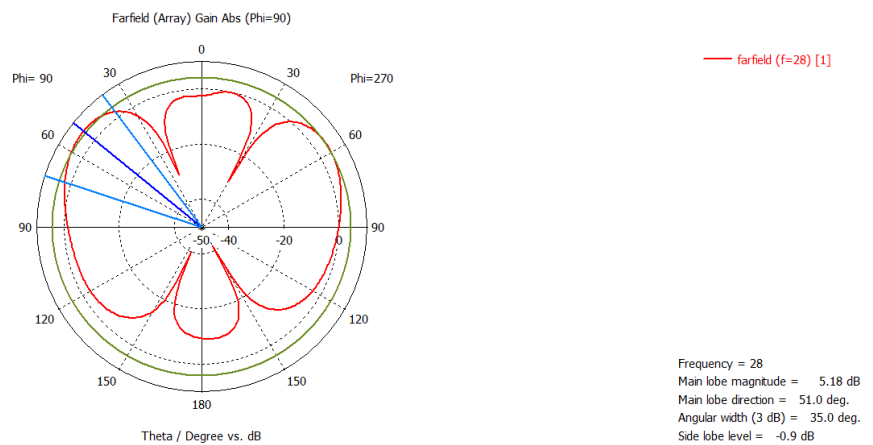


Figure 3.3.13. Diagrammes de rayonnement de gain d'un réseau de deux éléments rayonnants espacés de 12mm, équi-amplitude et équi-phase : (a) en 3D, (b) en 2D.

La figure 3.3.14 représente les diagrammes de rayonnement de gain en 3D et en 2D d'un réseau de deux éléments rayonnants espacés de 12 mm à la fréquence de résonance 28 GHz. Les deux éléments rayonnants sont alimentés avec la même amplitude mais avec une phase de -10 et +10.



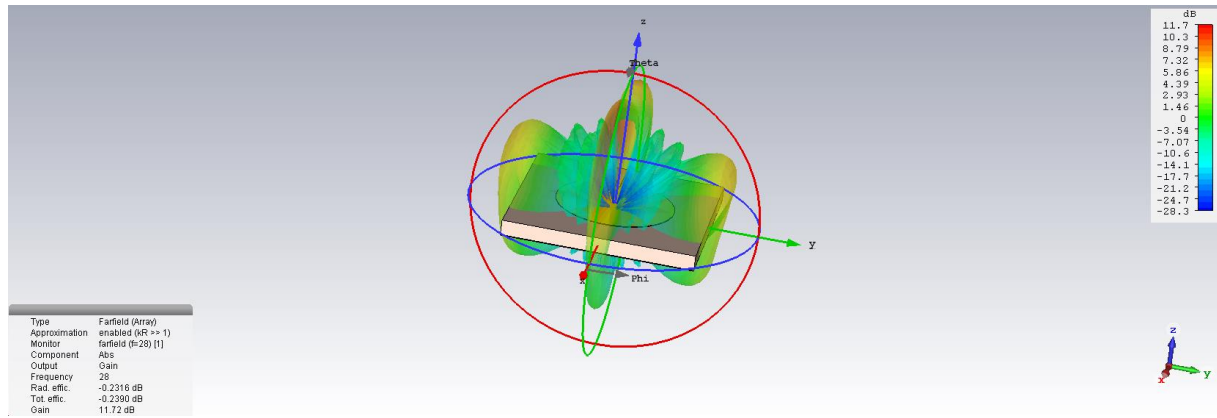
(a)



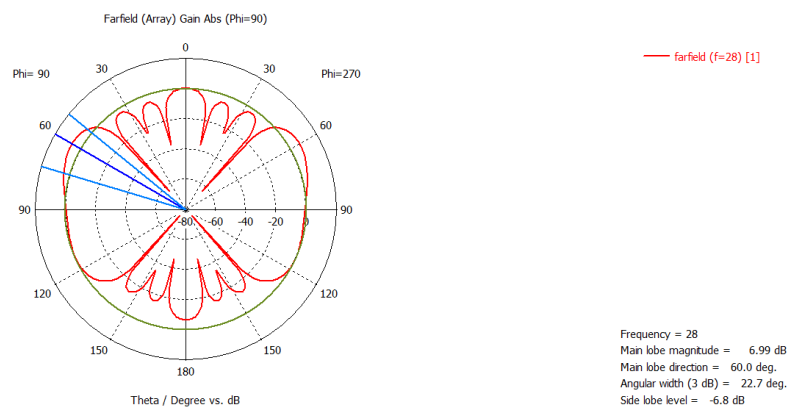
(b)

Figure 3.3.14. Diagrammes de rayonnement de gain en 3D et en 2D d'un réseau de deux éléments rayonnants espacés de 12 mm : même amplitude mais avec une phase de -10 et +10.

La figure 3.3.15 représente les diagrammes de rayonnement de gain en 3D et en 2D d'un réseau de quatre éléments rayonnants à la fréquence de résonance 28 GHz. Les quatre éléments sont alimentés en équi-amplitude et équi-phase et espacés de 12 mm.



(a)



(b)

Figure 3.3.15. Diagrammes de rayonnement de gain d’un réseau de quatre éléments rayonnants : (a) en 3D, (b) en 2D.

3.3.5 Amélioration des performances de l’antenne

Nous nous intéressons maintenant à l'amélioration des performances de l’antenne pour un fonctionnement dans la bande 5G. L'une des méthodes les plus connues et les plus simples pour améliorer les performances, en particulier le gain d’une antenne est l'utilisation de superstrats [49], dans laquelle un ou plusieurs superstrats sont placés à une distance optimisée du patch. Ces antennes à superstrat suscitent une grande attention de la part des chercheurs, en raison de leurs avantages intrinsèques de gain élevé et d'efficacité.

3.3.5.1 Antenne couplée avec un seul superstrat

L'antenne microruban est premièrement couplée avec un superstrat de type TaconicTLY5, d’épaisseur 1.6 mm, de permittivité $\epsilon_r = 2.2$ et de tangente de perte $\tan\delta = 0.0009$, comme le montre la figure 3.2.1, ce superstrat est placé à une distance optimisée $d_1 =$

7 mm de l'antenne, cette distance a été obtenu à partir d'une étude paramétrique sur d_1 présentée dans la figure 3.3.17.

Le superstrat doit permettre d'augmenter le gain avec un moindre impact sur les performances initiales de l'antenne. Dans cette simulation, seule la distance entre le superstrat et l'antenne est réglée pour une performance optimale, tandis que tous les autres paramètres sont maintenus inchangés.

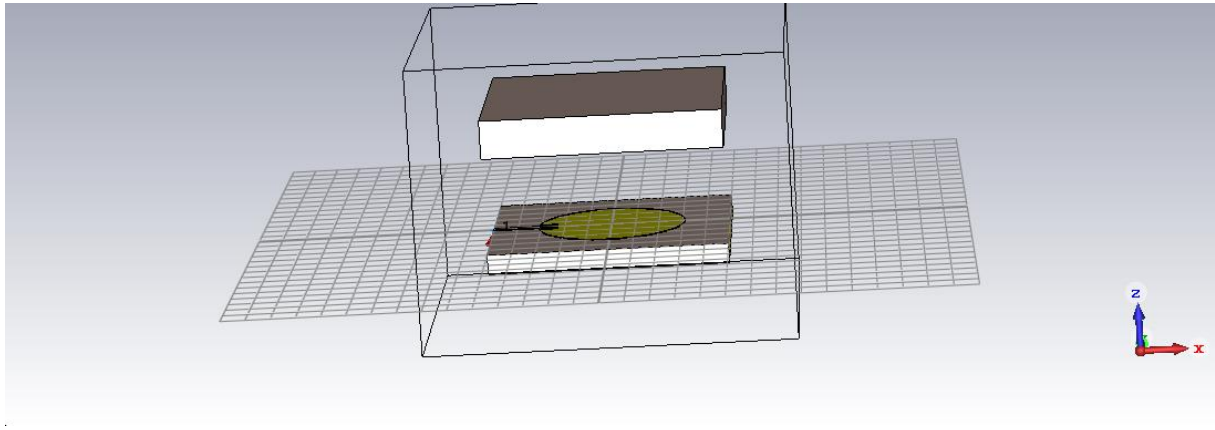


Figure 3.3.16. Antenne couplée avec un seul superstrat.

Étant donné que la couche d'air est un paramètre important dans la conception de telles antennes. Le coefficient de réflexion de l'antenne pour les différentes valeurs de la distance d_1 entre le superstrat et l'antenne est présenté à la figure 3.3.17.

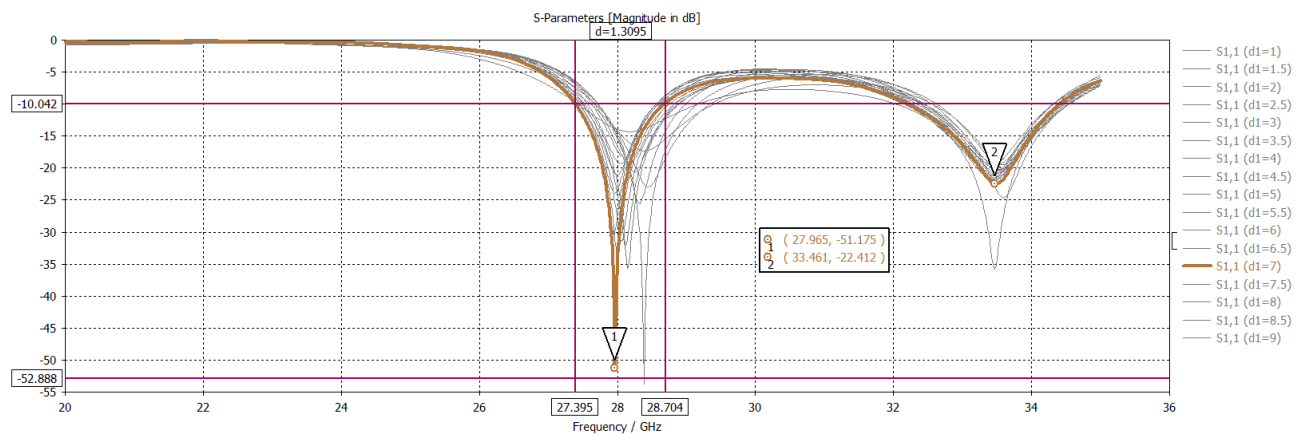
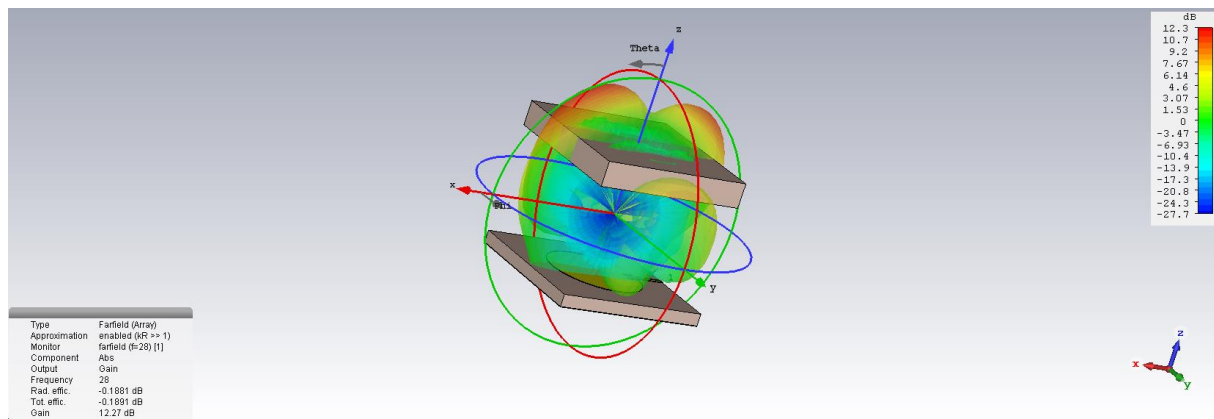
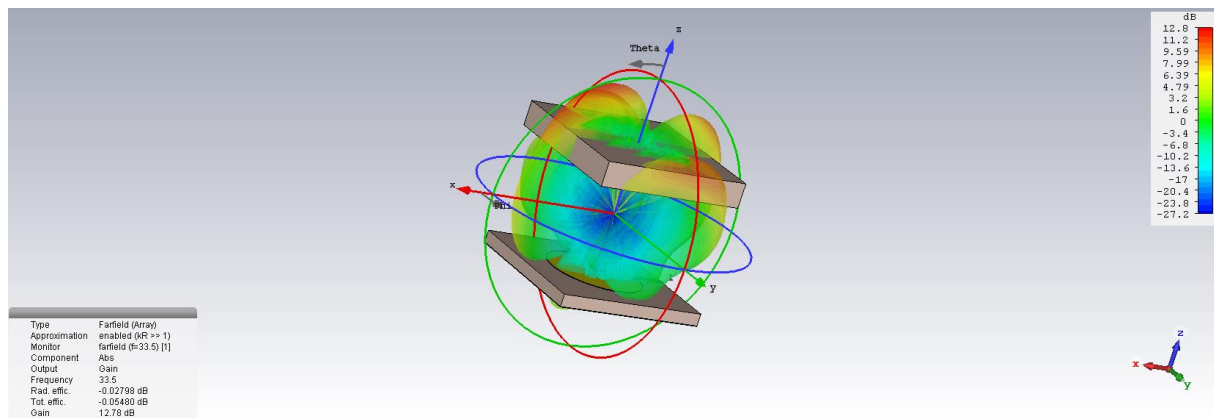


Figure 3.3.17. Effet de la distance d_1 sur le coefficient de réflexion pour un superstrat de $\epsilon_r = 2.2$.

La figure 3.3.18 présente les diagrammes de rayonnement en 3D à la fréquence 28 GHz et 33.5 GHz lorsque la distance d_1 est égale à 7 mm.



(a)



(b)

Figure 3.3.18. Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne couplé avec un seul superstrat : (a) à $f=28$ GHz, (b) à $f=33.5$ GHz.

Nous remarquons une amélioration de l'adaptation et du gain.

Nous changeons maintenant le type du superstrat en prenant un superstrat de type TaconicCER-10 d'épaisseur 1.6 mm, de permittivité $\epsilon_r = 10.2$ et de tangente de perte $\tan\delta = 0.0035$.

La distance d_1 entre le superstrat et l'antenne a un impact important sur les performances de l'antenne. Le coefficient de réflexion de l'antenne pour les différentes valeurs de la distance d_1 entre le superstrat et l'antenne est présenté à la figure 3.3.19.

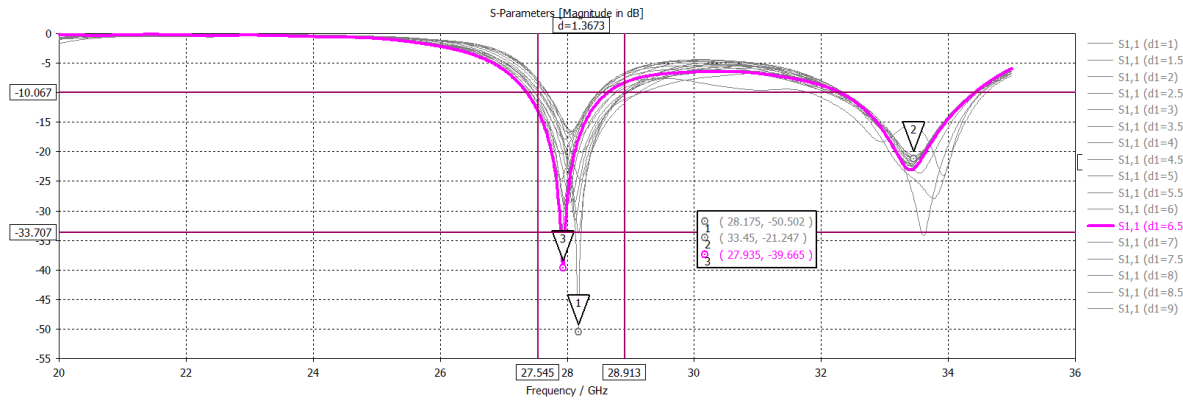
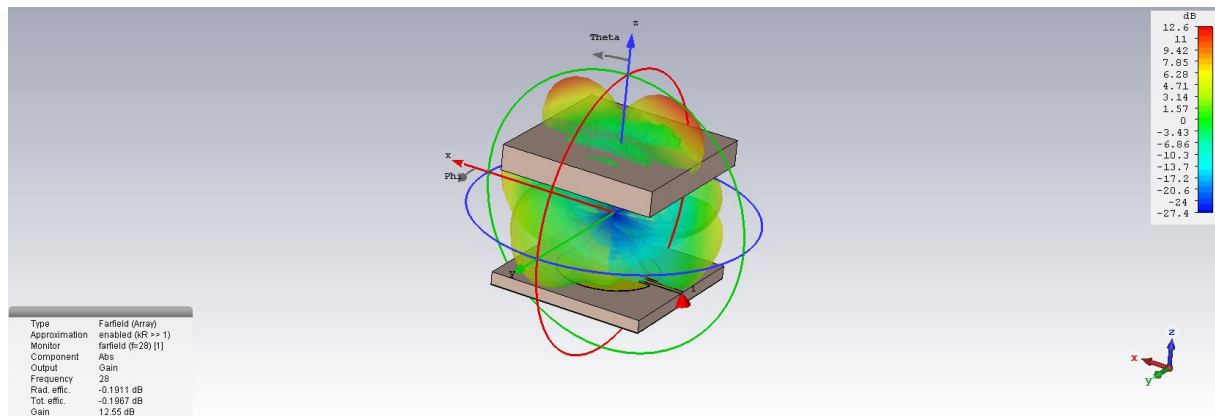
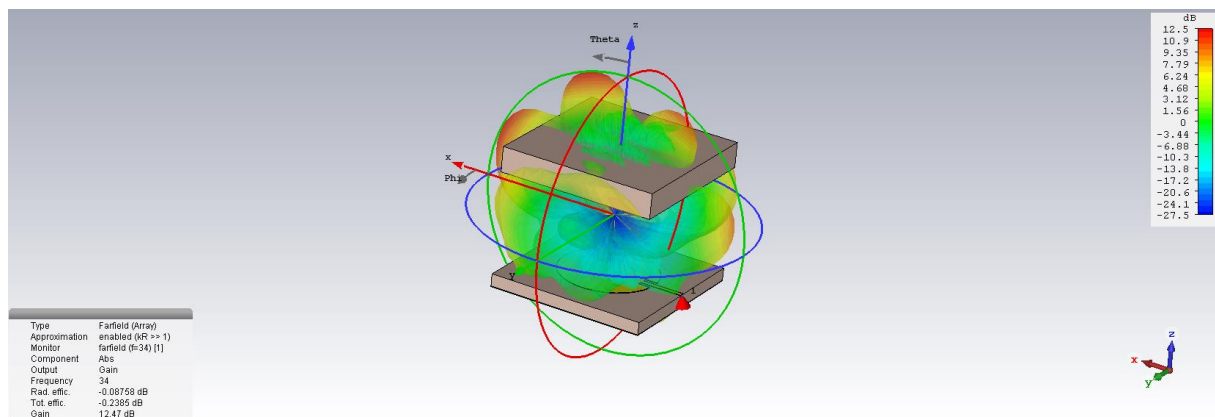


Figure 3.3.19. Effet de la distance d1 sur le coefficient de réflexion pour un superstrat de $\epsilon_r = 10.2$.

La figure 3.3.20 présente les diagrammes de rayonnement en 3D à la fréquence 28 GHz et 34 GHz lorsque la distance d1 est égale à 6.5 mm.



(a)



(b)

Figure 3.3.20. Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne couplé avec un seul superstrat de $\epsilon_r = 10.2$: (a) à $f = 28$ GHz, (b) à $f = 34$ GHz.

Nous remarquons une amélioration du gain de l'antenne accompagnée avec un léger déplacement des fréquences de résonance.

3.3.5.2 Antenne couplée avec deux superstrats

Nous modifions maintenant l'antenne patch avec un seul superstrat par l'ajout d'un autre superstrat identique pour améliorer encore le gain et rendre l'antenne adaptée aux applications 5G à gain élevé.

La figure 3.3.21 illustre l'antenne couplée avec un deuxième superstrat de type Taconic TLY5, d'épaisseur 1.6 mm, de permittivité $\epsilon_r = 2.2$ et de tangente de perte $\tan\delta = 0.0009$, il est placé à une distance optimisée $d_2 = 8$ mm du premier superstrat, cette distance a été obtenu à partir d'une étude paramétrique sur d_2 présentée dans la figure 3.3.22.

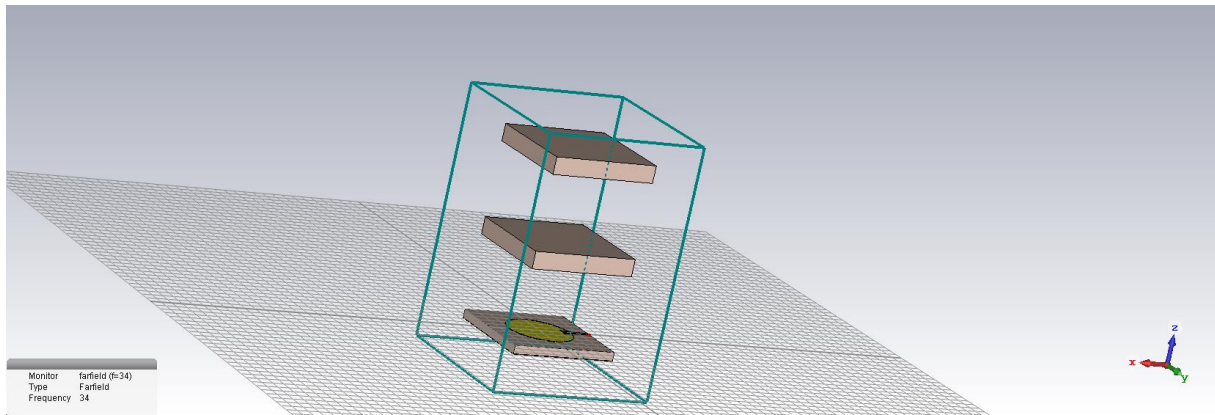


Figure 3.3.21. Antenne couplée avec deux superstrats.

Le coefficient de réflexion pour les différentes valeurs de la distance d_2 entre les deux superstrats est présenté à la figure 3.3.22.

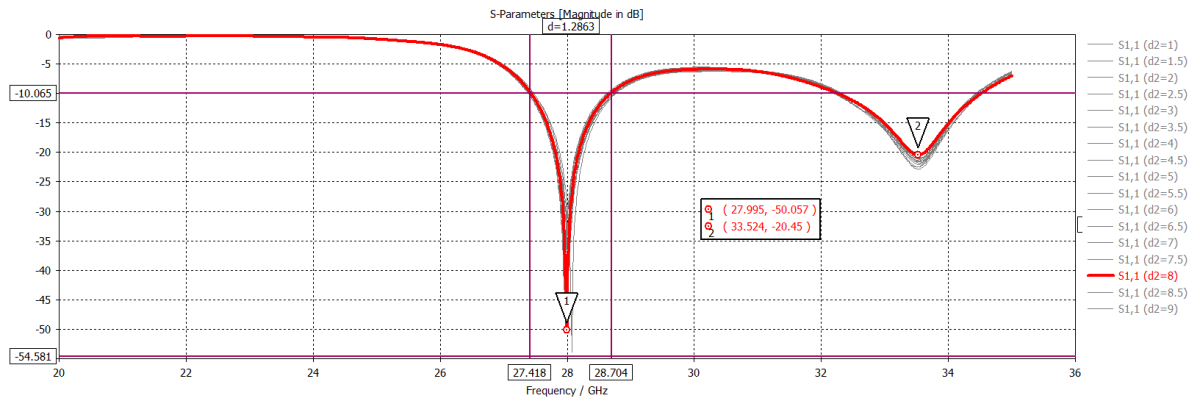


Figure 3.3.22. Effet de la distance (d_2) sur le coefficient de réflexion pour un superstrat $\epsilon_r = 2.2$.

La figure 3.3.23 présente les diagrammes de rayonnement en 3D à la fréquence 28 GHz et 33.4 GHz lorsque la distance d_1 est égale à 7 mm et d_2 est égale à 8mm.

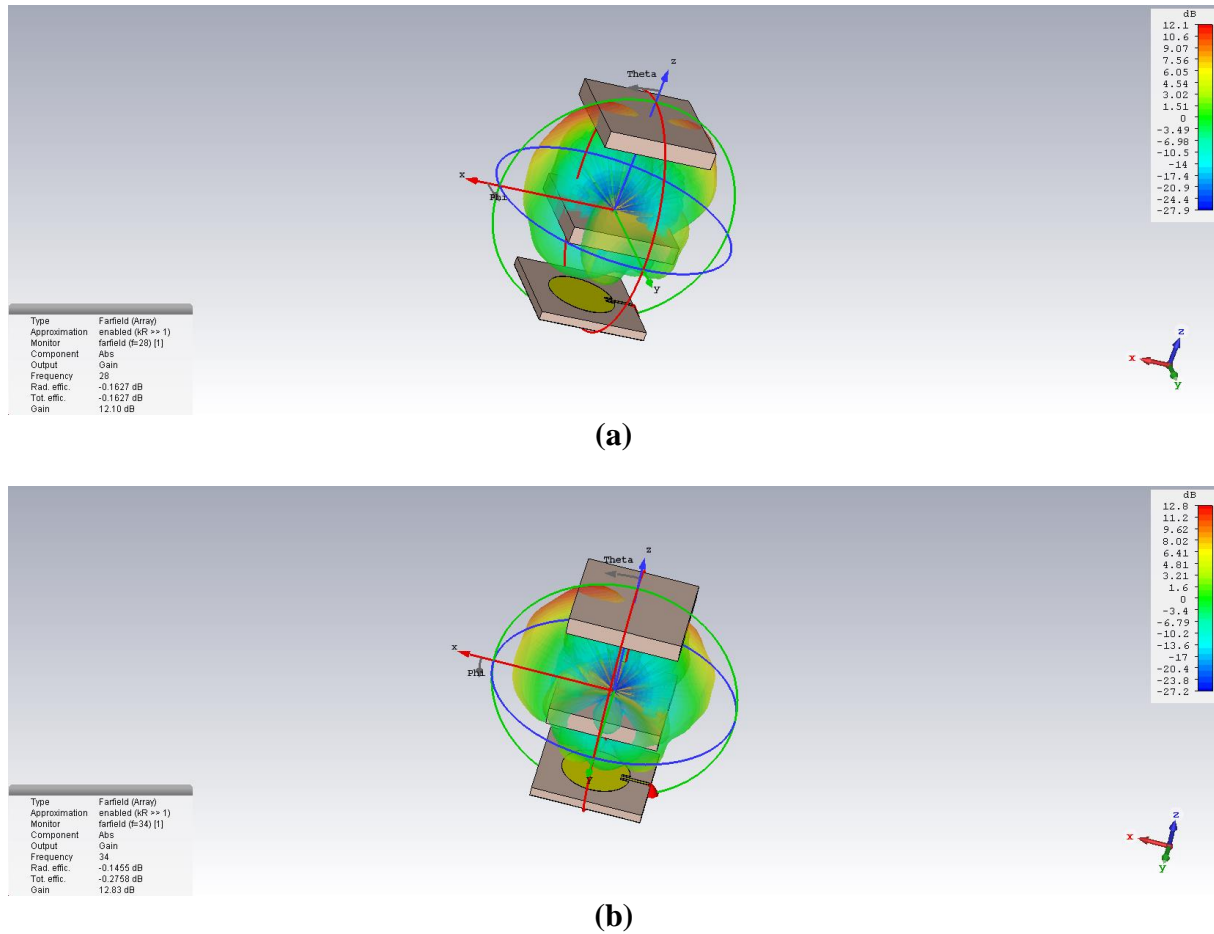


Figure 3.3.23. Diagrammes de rayonnement en 3D de l'antenne couplée avec deux superstrats de $\epsilon_r = 2.2$: (a) à $f=28$ GHz, (b) $f=34$ GHz.

Nous remarquons que l'augmentation du nombre de superstrats n'a pas d'impact significatif sur les performances de l'antenne patch.

3.4 Application du métamatériau dans l'environnement de l'antenne

Dans cette partie, on s'intéressera à l'étude et à la conception d'une antenne basée sur un résonateur en anneau fendu pour obtenir un gain plus élevé que celui de l'antenne sans métamatériau.

Le métamatériau peut être appliqué à l'environnement de l'antenne ou utilisé comme substrat sur lequel repose l'antenne. Il a pour but d'améliorer les performances de l'antenne comme le gain, la bande passante et la puissance rayonnée.

3.4.1 Résonateur en Anneau Fendu (RAF) carré

Le Résonateur en Anneau Fendu (RAF) en anglais Split Ring Resonator (SRR) est en cuivre déposé sur un substrat diélectrique d'épaisseur 1.6 mm de type Taconic TLY5 caractérisé par une permittivité ϵ_r de 2.2 et de tangente de pertes $\tan\delta$ de 0.0009. Le RAF carré utilisé est de côté extérieur égale à 2.2 mm, la largeur de la piste est de 0.2 mm, une coupure dans l'une de ces cotés présente un gap de 0.3 mm. Les deux anneaux sont concentriques et espacés de 0.15 mm, l'anneau interne est de côté extérieur égale à 1.5 mm.

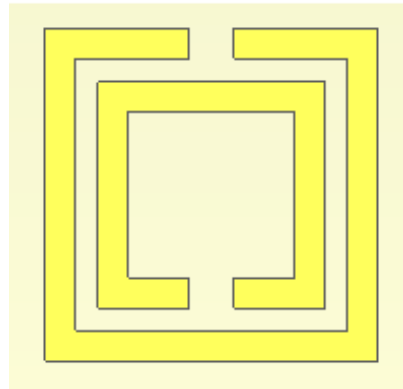


Figure 3.4.1. Représentation d'une unité de cellule du RAF carré.

3.4.2 Un réseau de cellules RAF carrés

Le réseau est composé de 4 cellules de résonateurs en anneau fendu carrés (2x2) est présenté dans la figure 3.4.2.

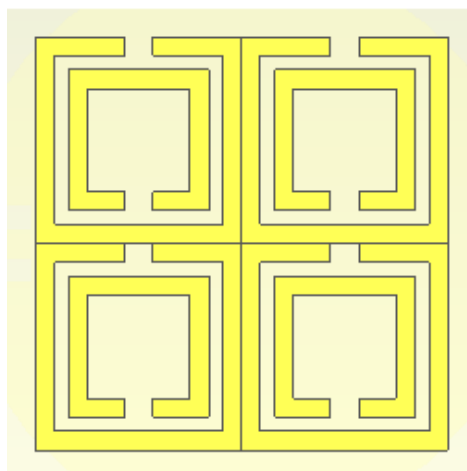


Figure 3.4.2. Un réseau de cellules RAF carrés.

3.4.3 Conception d'antenne à métamatériaux basé sur un seul RAF

On s'intéresse à l'influence du métamatériau sur les caractéristiques de l'antenne. La figure 3.4.3 illustre la géométrie de l'antenne associée au RAF.

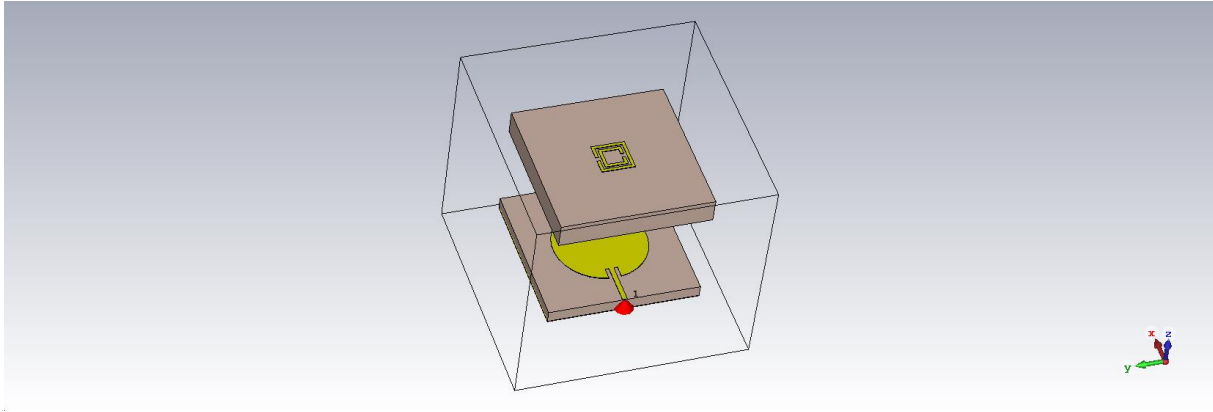


Figure 3.4.3. Structure de l'antenne où le métamatériau est placé au-dessus de l'antenne.

Le coefficient de réflexion de l'antenne est présenté dans la figure 3.4.4.

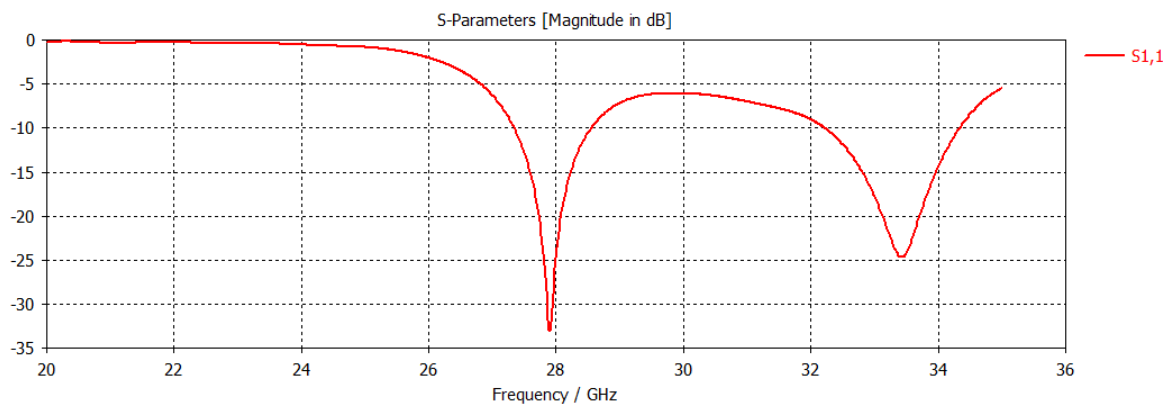
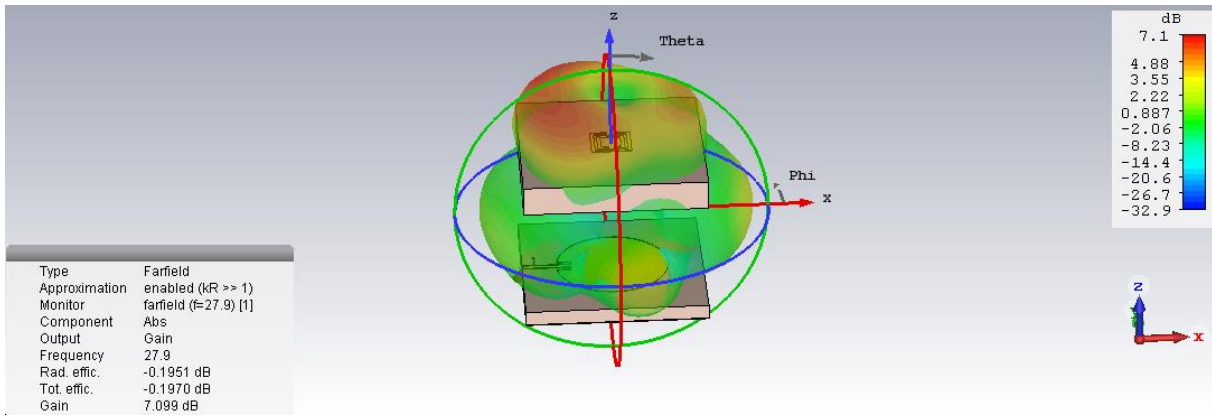
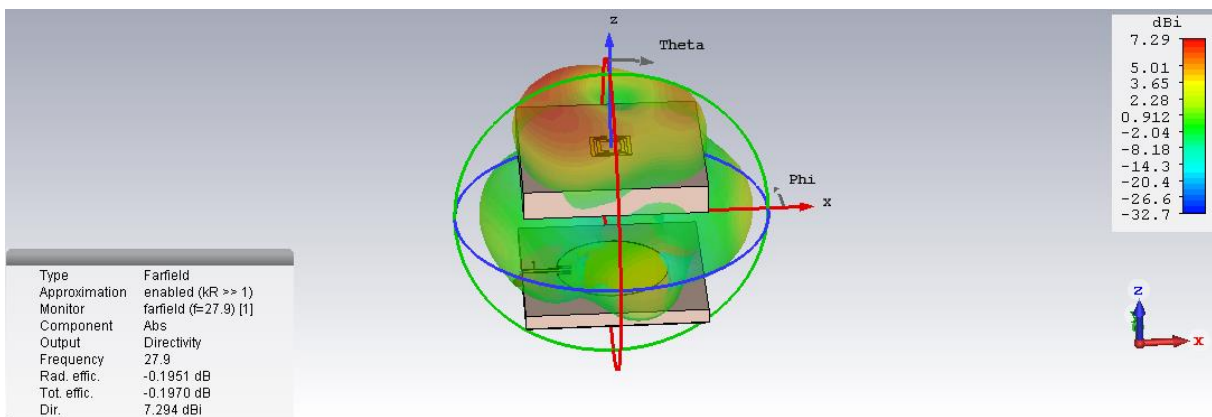


Figure 3.4.4. Coefficient de réflexion de l'antenne à base de métamatériau.

Le gain et la directivité de l'antenne sont présentés dans la figure 3.4.5, on remarque une amélioration des performances de l'antenne en ajoutant un RAF par rapport à l'antenne de base.

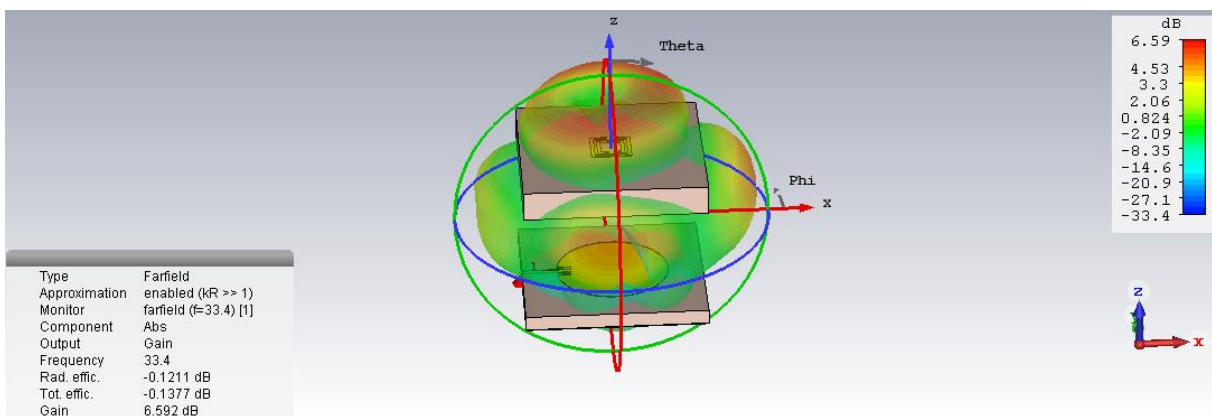


(a)



(b)

Figure 3.4.5. Diagramme de rayonnement de l'antenne à 1 RAF à 28 GHz: (a) de gain, (b) de directivité.



(a)

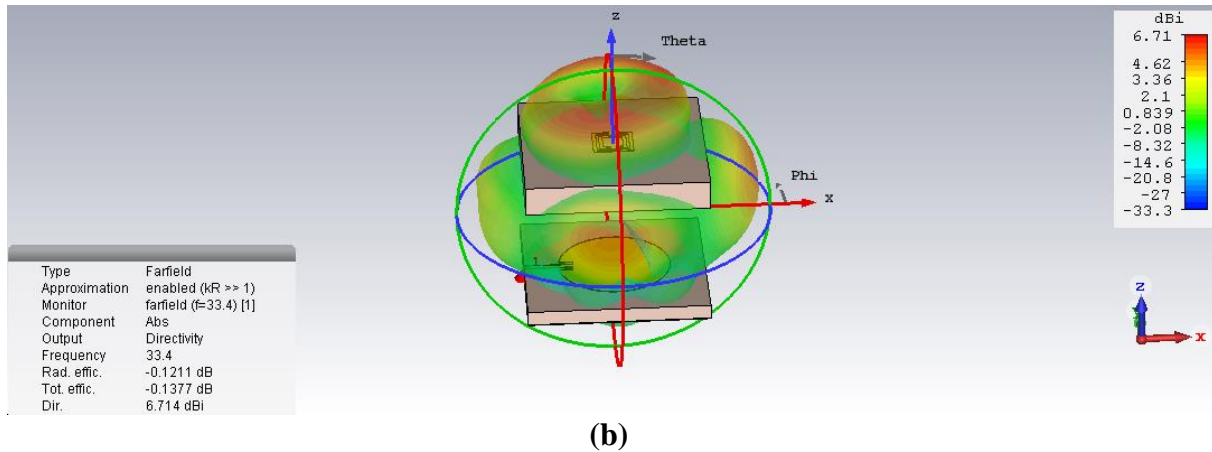


Figure 3.4.6. Diagramme de rayonnement de l’antenne à 1 RAF à 33.4Ghz : (a) de gain, (b) de directivité.

Fréquences	Gain	Directivité	S ₁₁
27.9 Ghz	7.1 dB	7.29 dBi	-33.081 dB
33.4 Ghz	6.59 dB	6.71 dBi	-24.67 dB

Tableau 3.4.1. Gain, directivité et S₁₁ pour différentes fréquences de l’antenne à 1 RAF.

3.4.4 Conception d’antenne à métamatériaux basé sur un réseau de 2×2 RAF

Vu que l’association d’un seul RAF carré à l’antenne adonné une amélioration des performances de l’antenne et afin d’améliorer beaucoup plus le gain et la directivité de l’antenne, un réseau de RAFs composé de (2x2) RAF est utilisé, comme l’illustre la figure 3.4.7.

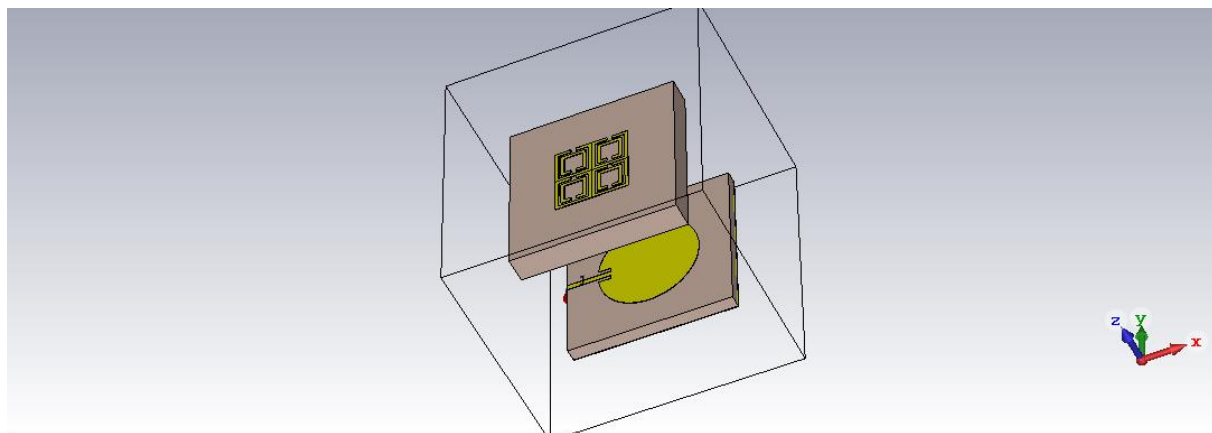
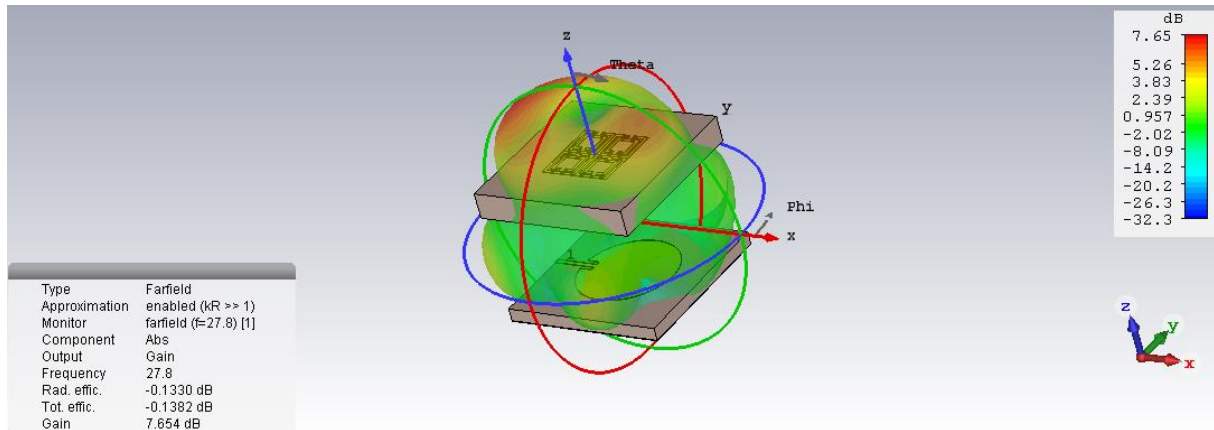
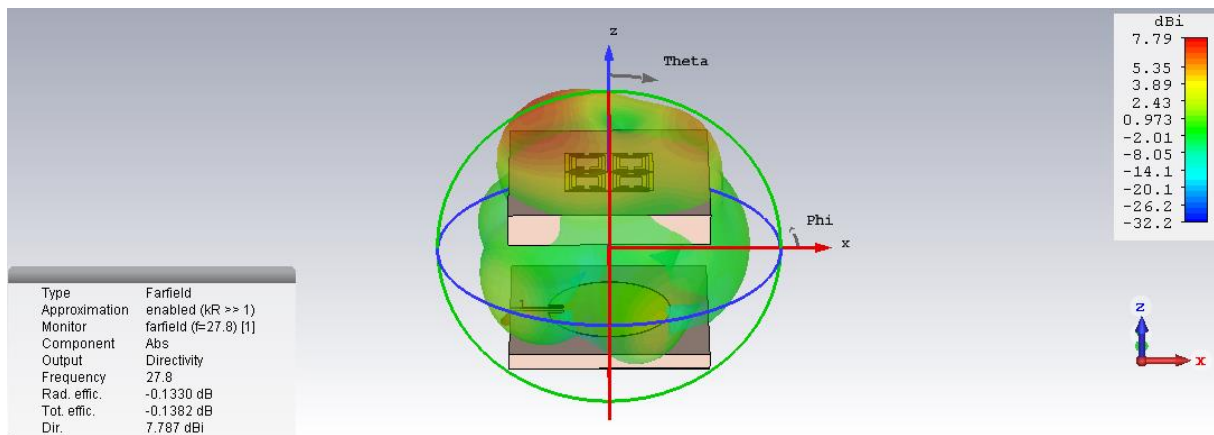


Figure 3.4.7. Antenne à (2x2) RAFs.

Les figures présentées ci-dessous confirment l'amélioration du gain, de directivité et de l'adaptation de l'antenne à base métamatériaux par rapport à l'antenne sans métamatériaux.

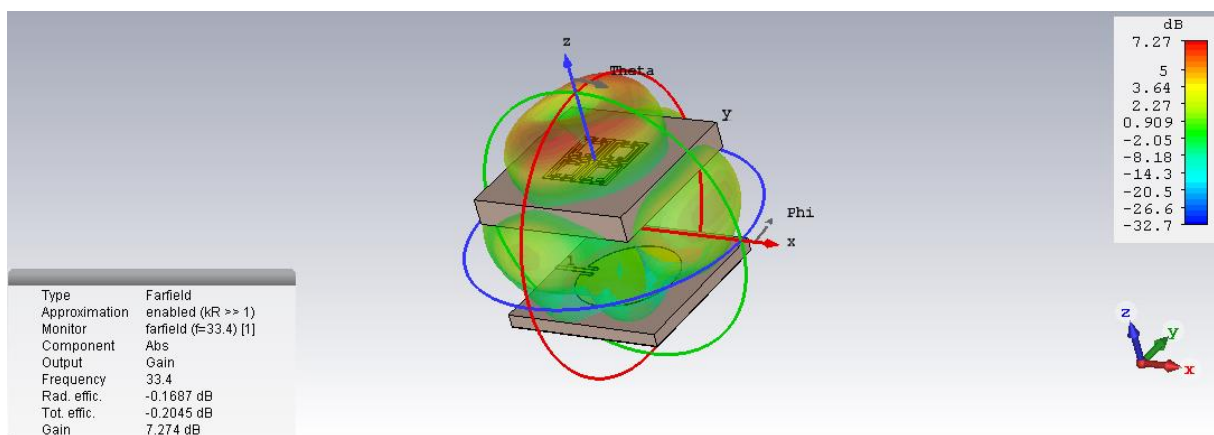


(a)

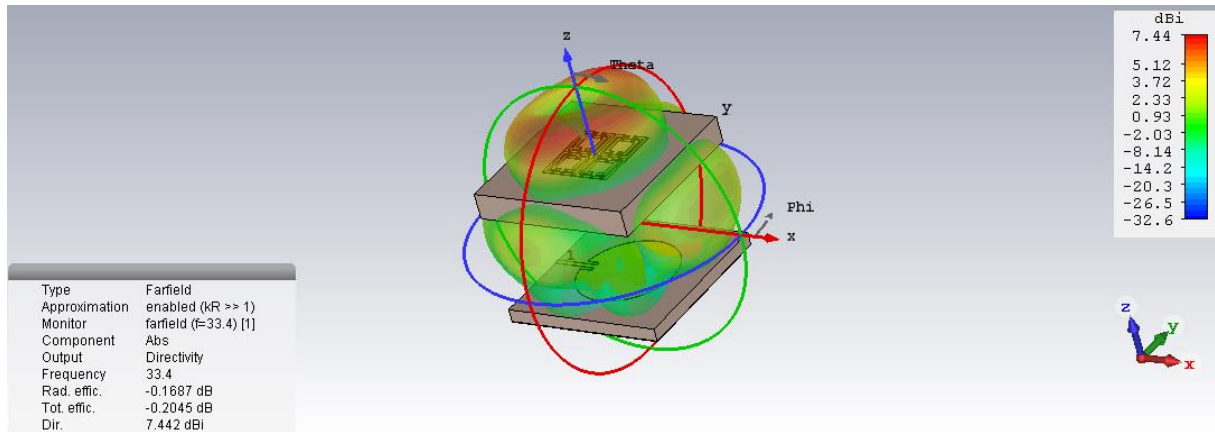


(b)

Figure 3.4. 8. . Diagrammes de rayonnement de l'antenne à (2x2) à 27.8 Ghz: (a) de gain, (b) de directivité.



(a)



(b)

Figure 3.4.9. Diagrammes de rayonnement de l’antenne à (2x2) à 33.4 Ghz: (a) de gain, (b) de directivité.

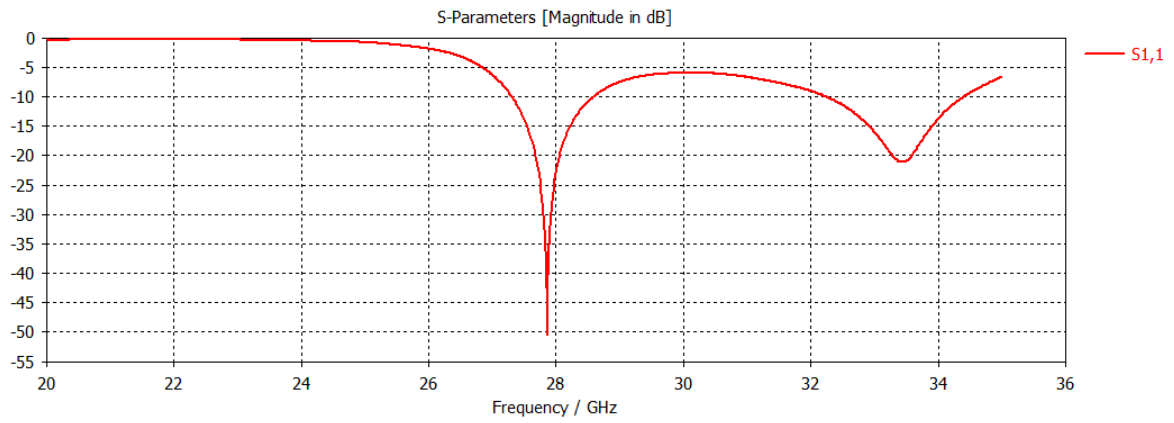


Figure 3.4.10. Coefficient de réflexion de l’antenne à (2x2) RAFs.

Fréquences	Gain	Directivité	S ₁₁
27.4 Ghz	7.65 dB	7.79 dBi	-50.4 dB
33.4 Ghz	7.27 dB	7.44 dBi	-21.022 dB

Tableau 3.4.2. Gain, directivité et S11 pour différentes fréquences de l’antenne à (2x2) RAFs.

	Antenne sans métamatériaux	Antenne à métamatériaux
Gain	6.2 dB	7.65 dB
Directivité	6.41dBi	7.79 dBi

Tableau 3.4.3. Comparaison du gain et de directivité de l'antenne avec et sans RAF à 28 Ghz.

	Antenne sans métamatériaux	Antenne à métamatériaux
Gain	6.47 dB	7.27 dB
Directivité	6.57 dBi	7.44 dBi

Tableau 3.4.4. Comparaison du gain et de directivité de l'antenne avec et sans RAF à 33.4 Ghz.

3.5 Conclusion

Les antennes imprimées, bien qu'elles présentent des géométries simples, exigent des études approfondies dans leur conception.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté la conception d'une antenne microbande circulaire bi-bande permettant d'émettre ou de recevoir aux fréquences 28 et 34 Ghz pour les applications 5G, en citant les différentes étapes et paramètres géométriques et physique.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'amélioration des performances de l'antenne pour un fonctionnement dans la bande 5G. Nous avons, dans un premier temps, fait une étude et une conception d'un réseau d'antennes. Ensuite nous avons utilisé des superstrats dans l'environnement de l'antenne. En fin, la même antenne a été couplée avec un métamatériaux RAF, toujours dans le but d'améliorer ses performances en termes de gain, de directivité et de puissance rayonnée.

Conclusion générale

L'antenne est le composant clés de n'importe quel système de communication, sa qualité et ses performances déterminent le bon déroulement de la communication sans fil. Il est donc essentiel qu'elle ait les performances correspondant au système de communication moderne, en particulier en ce qui concerne la largeur de bande ($VSWR \leq 2$ ou $S_{11} \leq -10$ dB), un rayonnement acceptable, un gain important dans toute leur bande de fréquence.

L'objectif principal de ce travail était de concevoir une antenne imprimée répondant aux exigences de la 5G.

Pour commencer, nous avons présenté dans le premier chapitre, des généralités sur les antennes imprimées, leurs caractéristiques, et leurs techniques d'alimentations les plus utilisées. Ensuite dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons passé en revue les métamatériaux en introduisant les généralités et l'explication nécessaires à la bonne compréhension de ces matériaux.

Dans le deuxième chapitre, et après avoir rappelé les objectifs du standard 5G, ainsi que ses technologies clés et son architecture, nous avons présenté l'évolution des générations en termes de débits, latence et bande de fréquences.

La conception d'antenne imprimée répondant aux exigences de la 5G a été l'objet du dernier chapitre. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté la conception d'une antenne microbande circulaire bi-bande permettant d'émettre ou de recevoir aux fréquences 28 et 34 Ghz pour les applications 5G, en citant les différentes étapes et paramétrages géométriques et physique. Nous avons présenté aussi dans cette partie les résultats de simulation d'un réseau d'antennes.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'amélioration des performances de l'antenne pour un fonctionnement dans la bande 5G. Nous avons présenté les résultats de simulations obtenus par l'application de deux méthodes qui permettent d'améliorer les performances de l'antenne. La première méthode est basée sur l'utilisation d'un ou plusieurs superstrats à une distance optimisée du patch. La deuxième méthode est basée sur l'application des métamatériaux dans l'environnement de l'antenne.

Les résultats obtenus en simulation par CST ont montré que les caractéristiques de l'antenne conçue (gain, bande passante, diagramme de rayonnement) répondent aux exigences de la 5G.

Références

- [1] D. M. Pozar, “Microstrip antennas”, IEEE, Vol. 80, N° .1, pp. 79-91, January 1992.
- [2] Constantine A. Balanis, “Antenna theory analysis and design”, A John Wiley & Sons, INC Publication, Third Edition. Hoboken, New Jersey 2005.
- [3] R. CHANTALAT “Optimisation d’un reflecteur spatial a Couverture cellulaire par l’utilisation D’une antenne a bande interdite Electromagnetique multi sources” Thèse de Doctorat – n° 36-2003 - U.E.R des sciences -Université de LIMOGES- Novembre 2003.
- [4] David M. Pozar & Daniel H. “The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays”.
- [5] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D’antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008.
- [6] J. H. Visser « Array And Phased Array Antenna Basics » Antenna Engineer. The Netherlands 2005.
- [7] Y. T. Lo, D. Solomon, and W.F.Richards, “Theory and experiment on microstrip antennas”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 27 (1979), 137-145.
- [8] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl and A. Ittipiboon, “Microstrip Antenna Design Handbook”, Artech House, Boston London, 2001.
- [9] R. C. Boutout, JR, “Computational methods for electromagnetic and microwaves”, Wiley Interscience publication, New York, Wiley 1990.
- [10] V.G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . Soviet Physics Uspekhi, 10 :509, 1968.
- [11] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart, and I. Youngs. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. Physical Review Letter, 76 :4773–4776, 1996.
- [12] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, and et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47 :2075–2084, 1999.
- [13] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Physical Review Letter, 84(18), May 2000.

- [14] J.B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letter*, 85 :3966–3969, 2000.
- [15] M. Dubois, M. Farhat, E. Bossy, S. Enoch, S. Guenneau, and P. Sebbah. Flat lens for pulse focusing of elastic waves in thin plates. *Applied Physics Letters*, 103, 2013.
- [16] Pendry JB, Schurig D, and Smith DR. Controlling electromagnetic fields. *Science*, 312(ISSN :0036-8075) :1780–1782, 2006.
- [17] Stewart D. Jenkins and Janne Ruostekoski. Theoretical formalism for collective electromagnetic response of discrete metamaterial systems. arXiv :1206.0204, 2012.
- [18] D.Schurig, J.J Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr, and D.R. Smith. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314 :977–980,2006.
- [19] Matthew D. Guild, Michael R. Haberman, and Andrea Alù. Plasmonic cloaking and scattering cancelation for electromagnetic and acoustic waves. *Wave Motion*, 48 :462–482, 2011.
- [20] V. G. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ”, *Soviet Physics USPEKHI*, 10 (1968), 509–514. *Aprévoiser*
- [21] E. Lheurette, « Métamatériaux à indice négatif de réfraction : des micro-ondes aux fréquences térahertz, HDR, ». Thèse de Doctorat ; Université de Lille 1, Juin 2009.
- [22] Lalj H. Griguer H. Drissi M. “Filtre microondes Reject-band à base des Métamatériaux” *Congrès Méditerranéen des Télécoms (CMT2010)*, Casablanca (Maroc), 4p, mars 2010.
- [23] Lalj H. Griguer H. Drissi M. “Compact Bandstop Filter based on Complementary Metamaterial Resonators” *Colloque International Telecom’2011 & 7èmes JFMMA*, Tanger (Maroc), 16-18 Mars, 2011
- [24] Griguer H. Marzolf E. Lalj H. Riouch F. Drissi M. « Investigation and Design of 3D Metamaterial for the Enhancement of Patch Antenna Radiation” *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting*, ISBN: 978-1-4244-3647-7, Charleston (USA), 4p, 1-5 juin 2009.
- [25] L.W. Li, Y.N. Li, T.S. Yeo, J.R. Mosig and O.J.F. Martin, “A broadband and high-gain Metamaterial microstrip antenna”, *Applied Physics Letters*, 96 (2010), 164101.
- [26] H. XIONG, J. S. HONG, and Y.H. PENG, “Impedance bandwidth and gain improvement for microstrip antenna using metamaterials”, *Radio Eng*, 21 (2012), 993-998.

- [27] T. Bougoutaia, D. Khedrouche and A. Hocini “Bandwidth Improvement for Compact Microstrip Patch Antenna Using Metamaterials”, *ActaPhysicaPolonica A*, 129 (2016), 538-540.
- [28] Federal Communication Commission, “First order and report: Revision of part 15 of the Commission's rules regarding UWB transmission systems”, April 22, 2002.
- [29] C. Kim; J. Jang; Y. Jung; H. Lee; J. Kim; S. Park and M. S. Lee, “Design of a frequency notched UWB antenna using a slot-type SRR”, *International Journal of Electronics and Communication*, (2009), 1087-1093.
- [30] J. Kim; C. S. Cho and J. W. Lee, “5.2 GHz notched ultra-wideband antenna using slot-type SRR”, *Electronics Letters*, 42 (2006), 315-316.
- [31] A. P. Feresidis, G. Goussetis, S. Wang et J. C. Vardaxoglou, “Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53 (2005), 209 - 215.) for $06/\lambda$
- [23] A. Ourir, A. de Lustracet J.-M. Lourtioz, “All-metamaterial-based subwavelength cavities (ultrathin directive antennas”, *Applied Physics Letters*, 88 (2006), 084103.
- [33] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. Jimenez Broas, G. Alexopolous et E. Yablonovitch, “impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47 (1999), 2059 - 2074.
- [34] K. M. K. H. Leong, C. J. Lee and T. Itoh, “Compact metamaterial-based antennas for mimo applications”, *International Workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications*, Cambridge, UK, 21-23 March 2007.
- [35] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guerin et P. Vincent, “A metamaterial for directive emission” *Physical Review Letters*, 89 (2002), 213902.
- [36] H. A. Jang, D. O. Kim, and C. Y. Kim, “Size Reduction of Patch Antenna Array Using CSRRs Loaded Ground Plane”, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings KL, MALAYSIA*, 27-30 March, 2012.
- [37] M. Abdalla, U. Abdelnaby and A. A. Mitkees, “Compact and Triple Band Meta-Material Antenna for All WiMAX Applications”, *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Nagoya, Japan, 29 Oct.-2 Nov, 2012.
- [38] Olivier Ezratty. «Opinions Libres» <https://www.oezratty.net>, 20 février 2018.

- [39] <https://www.gemalto.com/france/telecom/inspiration/5g>. Avril 2019.
- [40] François MAGNE. « Télécommunications haut débit en ondes millimétriques », 10 mai 1998.
- [41] S.Sébastien, « Les Enjeux De La 5G » ARCEP ,2017.
- [42] T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Hai, S. Xiaodong, Y. Ning et L. Nan, «Trends in small cell enhancements in LTE advanced», IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 2, pp. 98-105, 2013.
- [43] ShahramShahbazPanahi, Yindi Jing, in Academic Press Library in Signal Processing, Volume 7, 2018.
- [44] Mahmood, Nurul Huda; Gatnau, Marta; Berardinelli, Gilberto. Mogensen, PrebenElgaard. « Full Duplex Communications in 5G Small Cells». International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. pp. 1665-1670.2017.
- [45]http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2014/software-defined_networking/sdn.html
- [46]https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/11/04_10-Nov_Session-3_Takaharu-Nakamura.pdf
- [47] Abdullah Al Mamun, Sultan Anwar, Hassan Ali, "4G and 5G Mobile Communication Networks: Features Analysis, Comparison and Proposed Architecture", Dept. of Computer Engineering, King Fahd University of Petroleum & Minerals, KSA, June 2016.
- [48] DEHEMCHI Marwa ; BOUHAFER Asma ; BOUKHAROUBA ABDELHAK; Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G ; juillet 2019 ; Université 8Mai 1945 – Guelma ; Mémoire pp11.
- [49] Niamet Hussain et al., “A High-Gain Microstrip Patch Antenna Using Multiple Dielectric Superstrates for WLAN Applications”, ACES JOURNAL, Vol. 35, No. 2, February 2020, pp 188,189.

Résumé

L'antenne est le composant clés de n'importe quel système de communication, sa qualité et ses performances déterminent le bon déroulement de la communication sans fil. Il est donc essentiel qu'elle ait les performances correspondant au système de communication moderne.

L'objectif principal de ce travail est l'étude, la simulation et la conception d'antenne imprimée répondant aux exigences de la 5G.

L'étape de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel de simulation, est très importante dans un souci de gain de temps. Nous avons étudié et conçu une antenne bi-bandes qui fonctionne à deux fréquences de la 5G en utilisant le logiciel CST. Puis Nous avons appliqué deux méthodes pour améliorer les performances de l'antenne. La première méthode est basée sur l'utilisation d'un ou plusieurs superstrats à une distance optimisée du patch. La deuxième méthode est basée sur l'application des métamatériaux dans l'environnement de l'antenne.

Mots clés : 5G des réseaux mobiles, les antennes imprimées, méta-matériaux, CST.

Abstract

The antenna is the key component of any communication system, its quality and performance determine the smooth running of the wireless communication. It is therefore essential that it has the performance corresponding to the modern communication system.

The main objective of this work is the study, simulation and design of printed antenna meeting the requirements of 5G.

The design step of an antenna, using simulation software, is very important in order to save time. We studied and designed a dual-band antenna that operates at two 5G frequencies using CST software. Then we applied two methods to improve the performance of the antenna. The first method is based on the use of one or more superstrates at an optimized distance from the patch. The second method is based on the application of metamaterials in the antenna environment.

Key words: 5G mobile networks, printed antennas, metamaterials, CST.

ملخص

الهوائي هو المكون الرئيسي لأي نظام اتصال، وتحدد جودته وأدائه نجاح الاتصال اللاسلكي. لذلك من الضروري أن يكون لديها الأداء المطابق لنظام الاتصالات الحديث.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة وتصميم الهوائيات المطبوعة التي تلبى متطلبات الجيل الخامس.

تعتبر خطوة تصميم الهوائي باستخدام برامج المحاكاة مهمة جدًا لتوفير الوقت لقد بحثنا وصممنا هوائيًا مزدوج النطاق يعمل على ترددين من الجيل الخامس ثم طبقنا طريقتين لتحسين أداء الهوائي. تعتمد الطريقة الأولى على واحد أو أكثر من الركائز الفائقة على مسافة محسنة من التصحيح وتعتمد الطريقة الثانية على تطبيق المواد الخارقة في بيئة الهوائي.

الكلمات المفتاحية: شبكات المحمول للجيل الخامس، الهوائيات المطبوعة، المواد الخارقة، CST.