

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



CDTA

Mémoire de Master

Mention Électronique

Spécialité Traitement de l'Information et Systèmes Électroniques

Présenté par

KHIAT HAMZA

Etude et Conception de Petits Réseaux d'Antennes Reconfigurables Ou « Small- Cells » pour le Standard 5G

Proposé par : Dr ZOUBIRI BACHIR & Pr AISSAT ABDEL KHADER

Je remercie mon dieu de m'avoir donné l'opportunité de faire cette recherche.

J'aimerais tout d'abord remercier chaleureusement avec tout de respects mes encadreurs Mr Dr ZOUBIRI BACHIR & Pr AISSAT ABDEL KHADER.

Je remercie aussi le centre de recherche et calcules avancé CDTA, et le groupe de département d'électronique Saad Dahleb Blida 1 et sur tous mes enseignants.

Je remercie messieurs les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et

D'évaluer notre travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée lors de la

Rédaction de ce mémoire.

Je dédie ce travail a :

Ma mère et mon père, le couronnement de ma tête qui leur souhaitent de longue vie en santé et bien-être.

Mes frères et sœur, particulièrement ma sœur Siham et son mari qui m'ont aidé et accompagné avec attention jusqu'à la fin de ma recherche.

Mes amis qui sont entrain de préparé la cérémonie de soutenance.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des Matières	iv
Liste des Figures	vi
Listes des Acronymes et Symboles	ix
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur la 5^{ème} Génération	2
1. Introduction :	11
2. Présentation de la 5G	11
2.1. Réseaux cellulaires	11
3. Le standard de demain 5G	13
3.1. Objectifs de la 5G	13
3.2. Nouvelles Applications et catégories d'usages de la 5G	14
4. Conditions de la 5G	15
4.1. Très hauts débits ou débit crête par utilisateur	15
4.2. Efficacité énergétique	16
4.3. Capacité de trafic par zone	16
4.4. Efficacité spectrale	17
5. Meilleure solution possible pour répondre aux attentes de la 5G	17
5.1. La technologie Massive MIMO	17
1.1.5 Beamforming :	18
2.1.5 MU-MIMO :	18
3.1.5 Small Cells	19
6. Réseau ultra Denses	20
7. Conclusion	20
Chapitre 2 : Modélisations des réseaux d'antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement	21
1. Introduction	21
1.1. Définition d'une Antenne :	21
1.2. Antennes imprimée (patches) :	21
1.3. Antenne reconfigurable	23
2. Caractéristiques de rayonnement	23
2.1. Diagramme de rayonnement d'une antenne reconfigurable :	23
2.2. Gain d'une antenne reconfigurable	24
2.3. La directivité d'une antenne :	25
2.4. La bande passante	25
3. Réseaux linéaires d'antennes	26
3.1. Architecture d'un réseau linéaire d'antennes	26
1.1.3 Analyse théorique	26
3.2. Réseau planaires d'antennes	27
1.2.3 Analyse théorique	27
4. Reconfiguration des diagrammes d'un réseau d'antennes	28
4.1. Dépointage par des dispositifs électroniques (ex : Diodes PIN)	29
4.2. Dépointage par réseau d'antennes réflecteur patch	30
4.3. Dépointage par matrice de Butler	30
4.4. Dépointage par la lentille de Rotman patch	31
4.5. Dépointage par réseaux phasés	31
5. Conclusion	33

Chapitre 3 : Résultat et discussions	34
1. Introduction.....	35
2. Présentation de l'antenne patch (élément de base).....	35
2.1. Configuration des paramètres Liste pour adapter l'antenne une 3.5 GHz sur logiciel CST	36
3. Etude paramétrique de l'antenne rectangulaire	38
3.1. Effet du positionnement de point d'alimentation sur l'adaptation de l'antenne ..	38
4. Réseau d'antenne :.....	39
4.1. Conception de réseau d'antenne a deux éléments rayonnant 2x1	39
5. Etude sur les performances d'un réseau d'antenne 2x1 éléments	39
5.1. Effets de la dimension de substrat.....	40
5.2. L'effet de l'espacement sur le niveau de couplage.....	42
6. Amélioration de la structure du réseau d'antenne.....	43
6.1. Effet de la nouvelle géométrie (hexagonal) sur le paramètre s.....	44
6.2. L'effet de l'espacement sur le couplage	45
6.3. L'effet de la géométrie hexagonal sur le gain	45
6.4. Etude analytique sur le nombre d'élément rayonnant.....	50
7. Structure proposé	50
8. Mécanisme d'isolation de la structure proposée.....	52
8.1. Etude sur l'amélioration de la structure proposée	52
1.1.8 L'effet de troncature sur le plan de mass	52
2.1.8 L'effet de l'isolateur sur le niveau de couplage	53
8.2. Etude Dimension de la structure avec mécanisme d'isolation optimisé	54
9. Conclusion	55
Conclusion Générales	60

Liste des Figure

Figure 1.1 Wireless Communication Technologies	11
Figure 1.2 Un réseau cellulaire de base	12
Figure 1.3 Applications et usages de la 5G	14
Figure 1.4 Système massive MIMO avec N antennes pour desservir K utilisateur.....	18
Figure 1.5 Système Massive MIMO en transmission multiutilisateurs.....	18
Figure 1.6 Antenne massive MIMO 5G et formation de faisceaux 3D.....	19
Figure 2.1 Présentation de la structure d'une antenne imprimée (patch).....	22
Figure 2.2 Représentation 3D diagramme de rayonnement	23
Figure 2.3 Diagramme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire (a) θ constant, (b) ϕ constant	24
Figure 2.4 la directivité d'une antenne patch a une fréquence 3.5 GHz	25
Figure 2.5 Evolution de $S_{2,1}$ en fonction de la fréquence	25
Figure 2.6 Structure d'un réseau linéaire d'antenne	26
Figure 2.7 Structure d'un réseau planaire d'antennes	27
Figure 2.8 les trois différents types de rayonnement d'une antenne : (a) omnidirectionnelle, (b) directive, (c) multifaisceaux	29
Figure 2.9 Schématique d'une antenne reconfigurable par commutation d'éléments parasites..	30
Figure 2.10 Schématique d'un réflecteur patch	30
Figure 2.11 Schématique de la matrice standard de Butler 4x4.....	31
Figure 2.12 Schématique de Dépointage par la lentille de Rotman	31
Figure 2.13 Schéma d'un représente le déphasage entre les éléments rayonnant du réseau d'antennes leur diagramme de rayonnement	32
Figure 3.1 conception de l'antenne de base d'une forme rectangulaire	36
Figure 3.2 Dimension de point d'alimentation (port)	36
Figure 3.3 niveau de coefficient de réflexion S_{11} (dB) dans la repense fréquentiel de 3.5 GHz .	36
Figure 3.4 Diagramme de rayonnement en 1D de l'antenne patch alimentée par un câble coaxial à la fréquence de 3.5 GHz	37
Figure 3.5 Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne rectangulaire	37
Figure 3.6 Antenne patch de forme rectangulaire, (a) : vue dessus (b) : vue dessous.....	39
Figure 3.7 Configuration de réseau : $S_{2,1}$ Coefficient d'isolation, S_{11} Coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement à la fréquence de 3.5 GHz.....	41
Figure 3.8 Diagramme de rayonnement en 3D du réseau 2x1 rectangulaire.....	41

Figure 3.9 Diagramme de rayonnement en 1D du réseau 2x1 à la fréquence de 3.5 GHz.....	42
Figure 3.10 La variation de $s_{2,1}$ l'isolation (dB) en fonction de la fréquence (GHz).....	43
Figure 3.11 La variation de Coefficient de réflexion $s_{2,1}$ (dB) en fonction de la fréquence (GHz)	45
Figure 3.12 Diagramme de rayonnement 3D du réseau d'antenne hexagonal de gain 8.07 (dB)	45
Figure 3.13 Diagramme de rayonnement 1D de réseau d'antenne hexagonal.....	47
Figure 3.14 Diagramme de rayonnement de (a) : Matrice 8x8,(b) :matrice 16x16 (élément rayonnant).....	50
Figure 3.15 Méthodologie de conception de l'antenne proposée : a) Vue en dessus, b) Vue dessous.....	50
Figure 3.16 La variation de $s_{1,1}$ (dB) en fonction de la fréquence (GHz)	51
Figure 3.17 La variation de $s_{2,1}$ (dB) en fonction de la fréquence (GHz)	51
Figure 3.18 vue dessous de l'antenne : a) avant la troncature, b) après la troncature.....	52
Figure 3.19 l'effet de troncature sur le $s_{2,1}$ (dB).....	52
Figure 3.20 Vue de face sur les dimensions de la conception d'antenne proposée.....	54
Figure 3.21 l'effet de l'isolation des (porter d'alimentations et les éléments rayonnants) individuellement et ensemble sur le $s_{2,1}$ (dB)	54

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

CDMA : Code Division Multiple Access

CSI : Channel state information

CoMP : coordinated multipoint

eMBB – Enhanced Mobile Broadband

FCC : Federal Communications Commission

FDMA : frequency division multiple access

IMT-2020: International Mobile Telecommunications

IP: internet protocol ISM Industrial, Scientific and Medical

LTE: Long Term Evolution

Massive MIMO: Massive Multi Input Multi Output

mMTC: Massive Machine Type Communications

MU-MIMO: multi-user MIMO

OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

RAN: Radio access network

SNR: Signal to noise ratio

TDMA: Time Division Multiple Access

UDN: Ultra Dense Network

UIT-R: International Telecommunication Union Radio communication

uRLLC: Ultra-Reliable and Low Latency

WIMAX: Worldwide interoperability for microwave access

Introduction générale

La 5G est l'abréviation de «5e génération », le nom de la prochaine génération de réseaux cellulaires mobiles. Techniquement parlant, la «5G» est définie uniquement comme un ensemble de normes - telles que la latence, la densité de connexion réseau et le taux de transfert de données - que la prochaine génération de réseaux mobiles devrait être en mesure d'obtenir. Une fois ces normes respectées, la 5G devrait pouvoir gérer jusqu'à 1000 fois plus de trafic que les réseaux actuels et être jusqu'à 10 fois plus rapide que la 4G LTE.

Pour être en mesure de répondre à ces normes, diverses nouvelles technologies seront nécessaires. Par exemple, pour prendre en charge une augmentation considérable du nombre d'appareils en ligne, une nouvelle bande sur le spectre des fréquences radio (entre 30 et 300 GHz) sera ouverte à l'utilisation. Par conséquent, des milliers de petites stations de base (« technologie des petites cellules ») doivent être installées, formant une équipe de relais intelligents pour transmettre des signaux autour des obstacles.

Les travaux envisagés dans le cadre de ce mémoire consistent à concevoir et réaliser un petit réseau d'antennes ou « Small Cells » couvrant la bande [3,4-3,8 GHz] et dont la taille permettrait l'intégration de plusieurs éléments dans une cellule de taille raisonnable. Pour cela nous envisageons de développer des nouvelles structures d'antennes plus performantes et efficaces pour répondre aux exigences de cette nouvelle génération de réseaux mobile.

Pour ce faire nous utilisons un outil de simulation numérique Fullwave adapté à l'étude de telles structures développées par CST Microwave studio, ce simulateur est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

La méthodologie suivie pour réaliser ce travail de mémoire se résume dans les étapes suivantes :

Dans le premier chapitre, nous commencerons par la présentation des exigences de la 5G après un rappel sur ses notions générales.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des réseaux d'antennes. Nous abordons les concepts théoriques et la modélisation pour concevoir antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement.

Le dernier chapitre présente la démarche de conception et les résultats de la simulation des structures proposée pour différentes formes obtenues par le simulateur CST, un intérêt particulier sera porté sur la structure hexagonale avec un nouveau mécanisme d'isolation, les résultats obtenus seront commentés et interprétés.

Finalement, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

1. Introduction :

Les systèmes de communications mobiles de 5^{ème} génération répondent à une large gamme de besoins des services hétérogènes devraient fournir des améliorations de (le débit, faible latence, la capacité et l'efficacité de trafic, efficacité spectral...).

Le contenu de chapitre 1, représente la 5^{ème} génération, ces objectifs, catégories d'usage, applications, leurs conditions. Et terminer avec quelque technologie proposée qui est utilisée comme solution pour répondre à l'attente de la 5G.

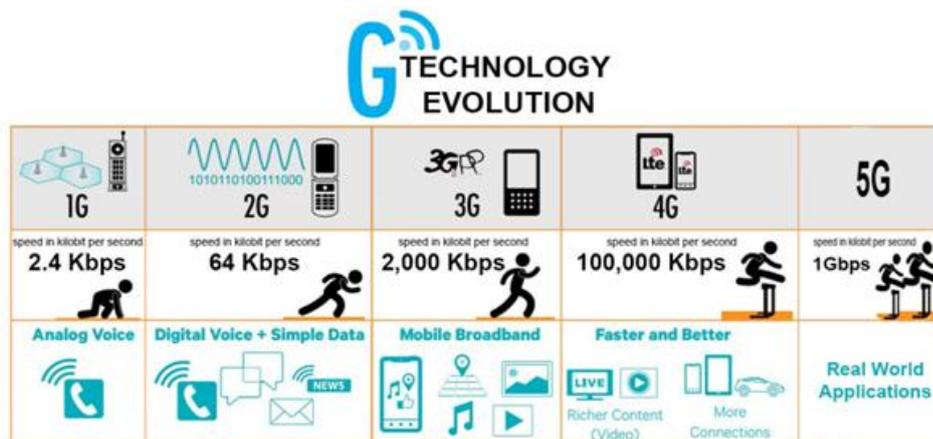


Figure 1.1 Wireless Communication Technologies

2. Présentation de la 5G

2.1. Réseaux cellulaires

Dans les réseaux cellulaires ou plus généralement mobiles, les terminaux des utilisateurs situés dans une zone géographique donnée sont desservis par plusieurs stations de base. Chaque station de base dessert simultanément un certain nombre de terminaux situés dans la zone de couverture de la station de base, comme illustré à la figure 1.2. Une telle zone de couverture est appelée cellule, ce qui permet de partitionner une zone géographique étendue en cellules [1].

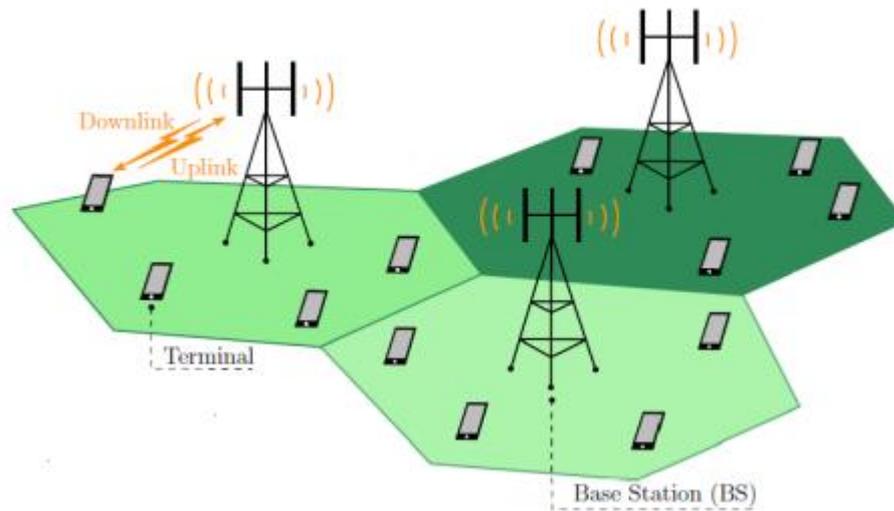


Figure 1.2 Un réseau cellulaire de base [1]

La communication entre les terminaux et BS est bidirectionnelle ou au format duplex. Sur la liaison descendante (DL), la station de base transmet des signaux aux terminaux affectés, alors que sur la liaison montante (UL), les terminaux transmettent des signaux à la station de base, comme illustré à la Figure 1.2.

En général, TDD et le FDD sont utilisés comme schémas de transmission en duplex. Une mesure de performance pertinente des réseaux cellulaires est le débit de la zone. La métrique de performance de débit surfacique, est donnée par :

$$\text{Débit de surface (bit/s/k}^2\text{)} = B \text{ (Hz)} \cdot D \text{ (Cells/km}^2\text{)} \cdot SE \text{ (bit/s/Hz/Cells)}.$$

1G	2.4 kbps	
2G	64 kbps	26x
3G	2 000 kbps	31x
4G	100 000 kbps	50x
5G	100 000 000 kbps	1000x

Tableau 1 Vitesses permises par les différentes générations de réseaux de téléphonie mobile

3. Le standard de demain 5G

La 5G est la cinquième génération des standards pour la téléphonie mobile Elle succède à la quatrième génération, appelée 4G¹, et prolonge l'exploitation technologique LTE. Il est parfois difficile de trouver un signal 4G hors agglomération. Cependant les industriels, les chercheurs, les institutions et les opérateurs pensent déjà à la prochaine génération de connexion sans fil [1] [2].

La 5G correspond à la prochaine génération de réseau de téléphonie mobile. Elle remplacera petit à petit le relais de la 4G et 4G+ (LTE) et sera déployée par les opérateurs d'ici 2020. Par rapport à la 4G et la 4G+, la 5G aura un débit largement plus élevé et une latence des transmissions de données en baisse. A l'heure actuelle, le temps de réaction des réseaux mobiles atteint la demi-seconde sans surcharge de réseau. La bande passante de canal minimale définie pour FR2 est de 50 MHz et le maximum est de 400 MHz, avec l'agrégation à deux canaux prise en charge dans 3GPP. Plus la fréquence n'est élevée, plus la capacité à prendre en charge des vitesses de transfert de données élevées est grande.

La puissance de transmission de l'antenne se situe entre 250 mW (exprimé en 24 dBm) pour une petite cellule et 120 W pour les plus grands réseaux 5G MIMO (soit 50 dBm). Une antenne 2G, 3G ou 4G typique a une puissance de transmission de 20 W (43 dBm).

3.1. Objectifs de la 5G

Après les prés requis définissant les besoins puis les technologies mobiles, l'objectif de l'IMT-2020 n'est rien d'autre que d'anticiper les besoins des utilisateurs de services mobiles dans les prochaines décennies. Dans cette deuxième phase qui sera marquée par le développement des standards, les chercheurs du monde entier ont jusqu'à 2020 pour proposer. Ce document a permis de définir les bases nécessaires pour la recherche et le développement de la 5G [3].

Les principaux industriels et opérateurs du secteur des communications sans fil élaborent actuellement les objectifs et standards de la cinquième génération de réseau mobile 5G. L'étape de standardisation démarrée au sein de différents consortiums d'opérateurs et industriels (3GPP, NGMN...) permettra de mettre en place une

règlementation à l'horizon 2021. Le premier objectif à atteindre concerne le débit montant et descendant alloué à chaque utilisateur afin d'assurer un accès internet haut débit depuis un smart phone ou tablette. Dans un contexte d'utilisation en mobilité faible ou nulle, le débit visé en bord de cellule par utilisateur est supérieur à 100 Mbit/s et le débit maximum par utilisateur devra dépasser les 10 Gbit/s.

L'objectif est d'obtenir un délai de transmission inférieur à 10 ms. Pour d'autres applications de l'IoT (télémédecine, sécurité...), un haut niveau de fiabilité sera également requis. L'UIT abonde dans le même sens par la voie de son secrétaire général Houlin Zhao [4].

3.2. Nouvelles Applications et catégories d'usages de la 5G

La 5G fournira la connectivité sans fil pour un large éventail de nouvelles applications présentées sur la Figure 1.3 :

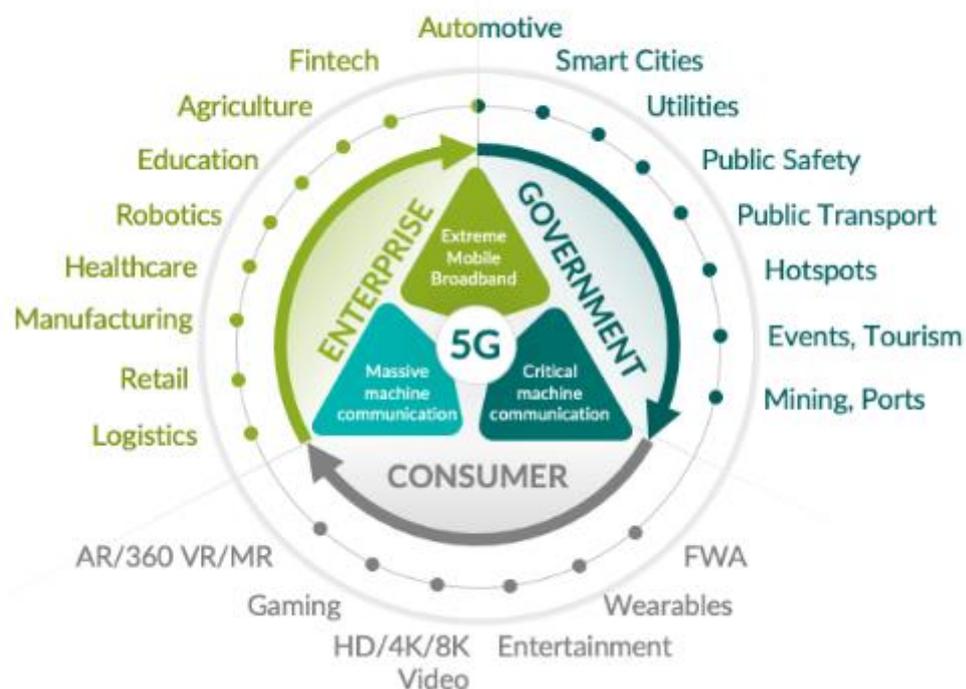


Figure 1.3 Applications et usages de la 5G [5]

La 5G va pénétrer dans chacun des éléments de notre société future et créer un écosystème d'information multidimensionnel centré sur l'utilisateur. A moyen terme (c'est-à-dire jusqu'en 2020 environ) et au-delà, le développement futur des IMT-2020 va

sans doute évoluer en fonction des exigences du marché. En étudiant les différents cas d'utilisation et les besoins des usagers, trois grandes catégories d'usages ont été regroupées [5] [6] [7] :

La nouvelle architecture 5G rendra possible un certain nombre de nouvelles applications [8]. On pourra bénéficier de vidéos en ligne avec une bonne qualité de réception, même dans des zones à forte densité d'utilisateurs comme durant un événement sportif important où chaque spectateur utilise un dispositif connecté.

Un haut niveau de service (accès à haut débit d'une moyenne de 50 Mbps minimum) est garanti sur tout site géographique (y compris en milieu rural) tant sur des équipements fixes que mobiles et y compris au cours de déplacements rapides comme dans les trains à grande vitesse.

L'Internet des objets (IoT) connectera des milliards d'appareils et de capteurs. Le temps de latence (délai) des données dans les réseaux 5G ne sera que d'une milliseconde (ms), comparé aux 50 ms pour les systèmes actuels, comme par exemple entre deux véhicules sans pilote qui se déplacent en tandem à des vitesses relativement élevées ou pour une réalité virtuelle appliquée [9].

Les drones navigueront en 5G, notamment dans les cas où les autorités devront faire face à une catastrophe naturelle. La 5G promet des communications suffisamment fiables pour être utilisées dans le domaine de la santé, y compris pour relier à distance des médecins à des robots chirurgicaux, On estime qu'en quelques années, des dizaines de milliards de périphériques utilisant cette norme seront connectés [10].

4. Conditions de la 5G

4.1. Très hauts débits ou débit crête par utilisateur

C'est une exigence qui est définie sur tout à des fins d'évaluation dans les catégories d'usages d'eMBB. Elle est définie comme étant le débit de données maximal théoriquement réalisable qui peut être assigné à une seule station mobile en supposant des conditions sans erreur lorsque toutes les ressources radio disponibles sont utilisées pour la liaison correspondante (c'est-à-dire excluant les ressources radio utilisées pour

la synchronisation de la couche physique, les signaux de référence ou les pilotes, les bandes de garde et les garanties) [11].

Le débit total de donnée R est déterminé dans une bande passante en fonction de l'efficacité spectacle.

$$R = \sum_{i=1}^Q w_i \times SE_{pi} \quad (1.1)$$

W_i : bande passante d'un canal.

SE_{pi} : efficacité spectrale de crête dans cette bande.

Selon les objectifs de la 5G, les exigences minimales pour le débit de données de pointe sont les suivantes [11].

- Le débit de crête de la liaison descendante est de 20 Gbit /s.
- Le débit de pointe de la liaison montante est de 10 Gbit/s.

4.2. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est définie comme étant le nombre de bits transmis par Joule d'énergie et elle comporte deux aspects :

- Côté réseau, l'efficacité énergétique correspond à la quantité de bits d'information reçue ou transmise par les utilisateurs, par unité de consommation d'énergie du réseau d'accès radioélectrique (RAN) (en bit/joule) ;
 - Côté dispositif, l'efficacité énergétique correspond à la quantité de bits d'information par unité de consommation d'énergie du module de communication (en bit/joule).
 - L'efficacité énergétique devrait être considérablement améliorée par rapport à la 4G afin d'augmenter la durée de vie des batteries des objets connectés (batteries pouvant être jusqu'à 100 fois moins énergivores) [11].

4.3. Capacité de trafic par zone

La capacité de trafic par zone est définie comme étant le débit total de trafic fourni par zone géographique (en Mbit/s/m²) [11].

4.4. Efficacité spectrale

Le futur environnement des systèmes de télécommunications risque d'être très dense et surtout hétérogène mais devrait être capable d'héberger les trois catégories d'usages cités précédemment mais aussi d'avoir une transmission efficace afin de permettre d'accéder à de nombreux services partout et à tout moment. La transmission des données et des applications multimédia nécessite une haute efficacité spectrale. Cette dernière est définie comme étant la quantité de données binaires (bits) pouvant être transférée durant une seconde sur une largeur de bande de 1 Hz (mesurée en bit / s / Hz / cellule) [11].

Les améliorations de l'efficacité du spectre devraient s'appliquer à la fois aux cellules de petite et de grande taille, dans les bandes de fréquences basses et hautes, dans les scénarios de mobilité élevée et faible. La mesure théorique de l'efficacité η est donnée par l'équation suivante [11].

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N \chi^i}{T.w.M} \quad (1.2)$$

χ_i : représente le nombre de bits correctement reçus par utilisateur dans une liaison montant i ou dans une liaison descendante i dans un système comportant un nombre N populations d'utilisateurs et M cellules.

w : désigne la largeur de bande du canal de transmission et T le temps nécessaires pour que les bits d'informations puissent être reçus par l'utilisateur.

5. Meilleure solution possible pour répondre aux attentes de la 5G

5.1. La technologie Massive MIMO

MIMO peut être résumé selon un principe de multiplexage spatial MIMO consiste à utiliser simultanément les mêmes fréquences radioélectriques pour transmettre des signaux différents. En revanche est un système MIMO avec un nombre d'antennes particulièrement élevé ; Cela signifie que plusieurs antennes d'émission d'une station de base peuvent émettre des signaux différents et que plusieurs antennes de réception d'un appareil peuvent les recevoir et les diviser simultanément.

Les réseaux MIMO standard utilisent généralement deux ou quatre antennes pour transmettre les données et le même nombre pour les recevoir.

Massive MIMO augmente le nombre d'antennes d'émission (des dizaines ou plus de 100 éléments) sur une station de base figure 1.4 [12].



Figure 1.4 Système massive MIMO avec N antennes pour desservir K utilisateur [12]

Massive MIMO propose deux innovations majeures :

1.1.5 Beamforming :

Est un système de signalisation du trafic pour stations de base cellulaires qui identifie la voie de transmission de données la plus efficace pour un utilisateur particulier et réduit les interférences pour les utilisateurs à proximité. Il a pour but de trouver un filtre spécial ou spatiotemporel dont la sortie correspond a une estimée du signal utile bruité venant d'une direction particulière [13] [14].

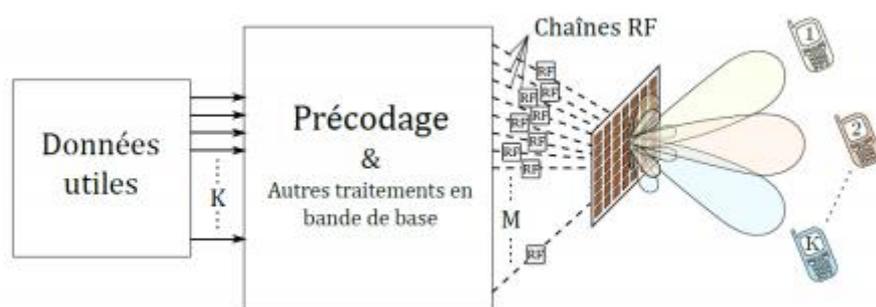


Figure 1.5 Système Massive MIMO en transmission multiutilisateurs [13]

2.1.5 MU-MIMO :

Augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant

ainsi un côté périphérique pratiquement unifié. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grande échelle.

3.1.5 Small Cells

Le standard 5G doit assurer la couverture en haut débit à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments. Cette gestion de la couverture avec une qualité de service a poussé la communauté scientifique vers de nouvelles solutions. L'idée de l'approximation du réseau c'est à dire de diminuer la distance entre les derniers points d'accès du réseau et les utilisateurs sont actuellement considérés comme l'unique solution pour répondre aux exigences en matière de couverture.

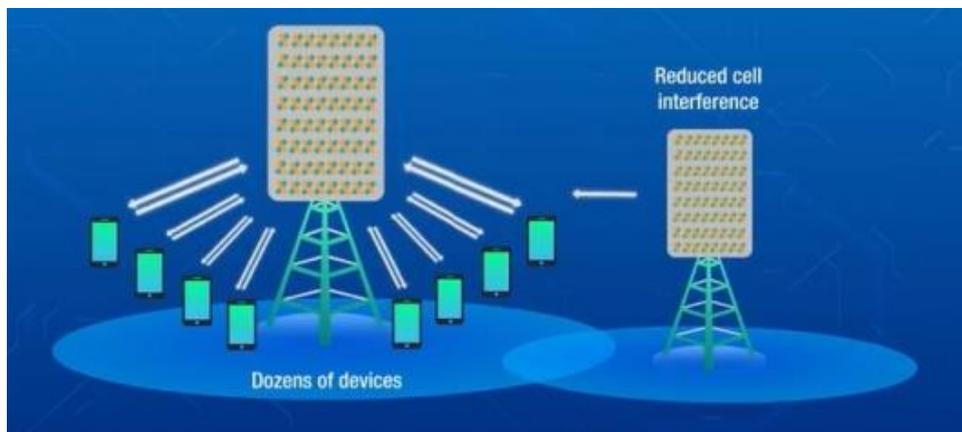


Figure 1.6 Antenne massive MIMO 5G et formation de faisceaux 3D [14]

On distingue aussi, généralement, quatre types de cellules [14] :

- **Pico cellule** : D'une taille de quelques dizaines de mètres de rayon, la puissance de transmission varie entre 24 et 30dBm, elle convient pour la propagation à l'intérieur des bâtiments dans lesquels sont placées les antennes des stations de base.
- **Microcellule** : De quelques centaines de mètres de rayon une puissance maximale d'émission de 40dBm. Elle est adaptée à l'environnement urbain dense. Les antennes des stations de base sont situées sous le niveau
- **Macro cellule** : Il s'agit d'une cellule de quelques dizaines de kilomètres de rayon qui caractérise les liaisons en milieu suburbain et rural. Les antennes d'émission sont, dans ce cas particulier, placées sur des positions élevées.

Petite cellule : de quelques kilomètres de rayon. Elle est particulièrement adaptée à l'environnement urbain. Les antennes des stations de base sont situées sur des bâtiments au-dessus du niveau des toits. En milieu urbain dense, la portée des petites cellules est plutôt de l'ordre de 800 [m]

6. Réseau ultra Denses

Cette technologie jouera un rôle capital face à l'importante demande de trafic de données [15]. Elle va permettre aux Small Cells, particulièrement celles qui sont installées dans les environnements intérieurs où plus de 80% du trafic se produit, de décharger les données provenant des stations de base macro cellules surchargées [16]. Le scénario de l'UDN sera caractérisé par une fragmentation spéciale du réseau en petites cellules où la distance inter cellulaires ne serait que de quelques mètres [17].

De plus, toujours dans le cadre de l'optimisation d'énergie, le rayonnement devrait être dirigé uniquement dans la direction de l'utilisateur pour éviter les pertes d'énergie dans les endroits où il n'y a pas la présence d'un terminal connecté. Ce qui réduira également les interférences intracellulaires. Pour cette raison, la 5G se présente comme une technologie qui utilisera à la fois des fréquences basses ($f < 1$ GHz), des fréquences hautes ($1 \text{ GHz} < f < 6 \text{ GHz}$) et, pour la première fois dans des réseaux grand public, des fréquences très hautes, dites « millimétriques » ($f > 6 \text{ GHz}$).

7. Conclusion

La 5G est devenue une génération majeure grâce à sa grande portée avec une bande de fréquence large. C'est pourquoi les systèmes de communication mobiles et sans fil 5G nécessiteront un mélange de nouveaux concepts de système pour augmenter l'efficacité spectrale et énergétique.

Chapitre 2 : Modélisations des réseaux d'antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons intéresser par les réseaux d'antenne reconfigurables en diagramme de rayonnement avec différentes méthodes...commençant par une présentation d'antenne patch et l'antenne reconfigurable et les caractéristiques de rayonnement

1.1. Définition d'une Antenne :

Une antenne est un dispositif fondamental dans un système radioélectrique qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vice versa en réception afin d'assurer la transmission sans fil de l'information. On peut qualifier les antennes comme des adaptateurs d'impédances entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur.

1.2. Antennes imprimée (patches) :

L'antenne plaquée, appelée aussi antenne patch est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique, possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face, une gravure métallique permet de supporter des courants de surface qui créent le rayonnement électromagnétique (figure 2.1). Les courants sont amenés du générateur à l'antenne par une ligne micro ruban.

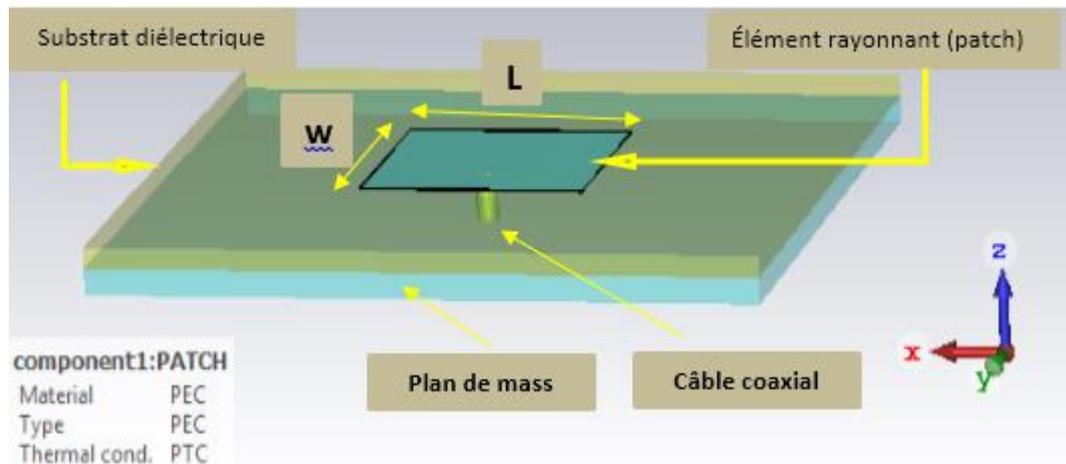


Figure 2.1 Présentation de la structure d'une antenne imprimée (patch)

On a :

- La longueur de patch w :

$$w = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

- La permittivité diélectrique effective :

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \right) \quad (2.2)$$

- La longueur de patch L :

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_e}} - 0.824h \left(\frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \right) \quad (2.3)$$

Avec :

- c : vitesse de la lumière.
- f : fréquence de résonance.
- h : la hauteur du substrat diélectrique.
- ϵ_r : la permittivité diélectrique du substrat.

1.3. Antenne reconfigurable

Est une antenne capable de modifier dynamiquement au moins une de ses caractéristiques en fonction des besoins dictés par l'environnement de l'antenne et les besoins de l'application.

Les antennes reconfigurables diffèrent des antennes intelligentes parce que le mécanisme de reconfiguration se trouve à l'intérieur de l'antenne plutôt que dans un réseau de formation des Faisceaux (beam forming) externe. La capacité de reconfiguration des antennes reconfigurables est utilisée pour maximiser la performance de l'antenne dans un scénario de changement ou pour répondre à l'évolution des besoins opérationnels.

2. Caractéristiques de rayonnement

2.1. Diagramme de rayonnement d'une antenne reconfigurable :

Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ , Φ) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{Pa}{4\pi} \tag{2.4}$$

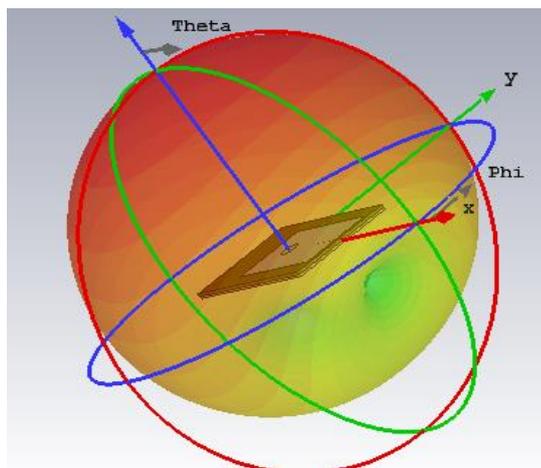


Figure 2.2 Représentation 3D diagramme de rayonnement

2.2. Gain d'une antenne reconfigurable

Le Gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes.

Le gain G est proportionnel à la directivité :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \quad (2.5)$$

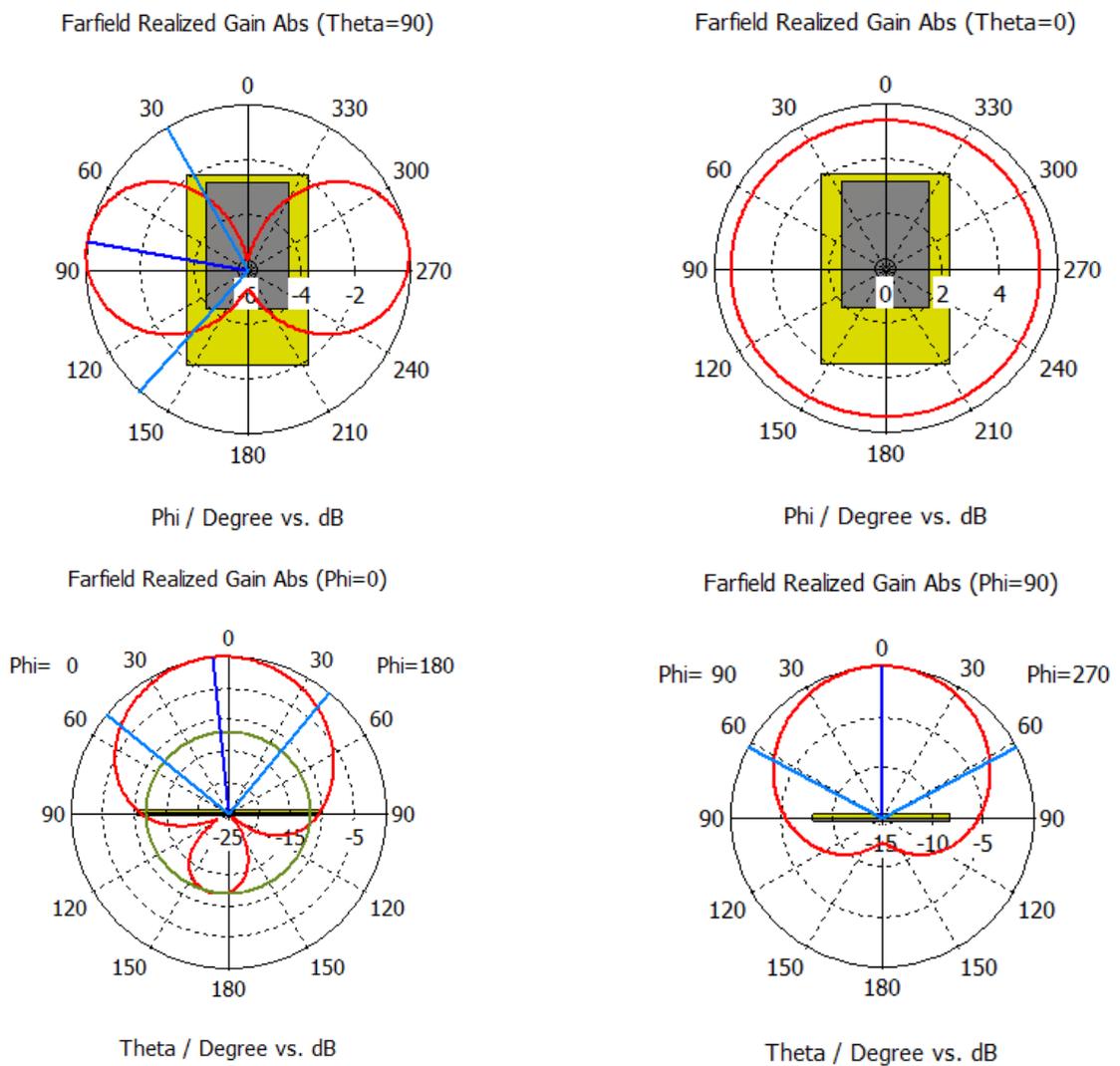


Figure 2.3 Diagramme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire thêta constant, phi constant

2.3. La directivité d'une antenne :

Représente le rapport entre la densité de puissance rayonnée dans une direction donnée et la densité de puissance rayonnée par une source isotrope.

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R} \quad (2.6)$$

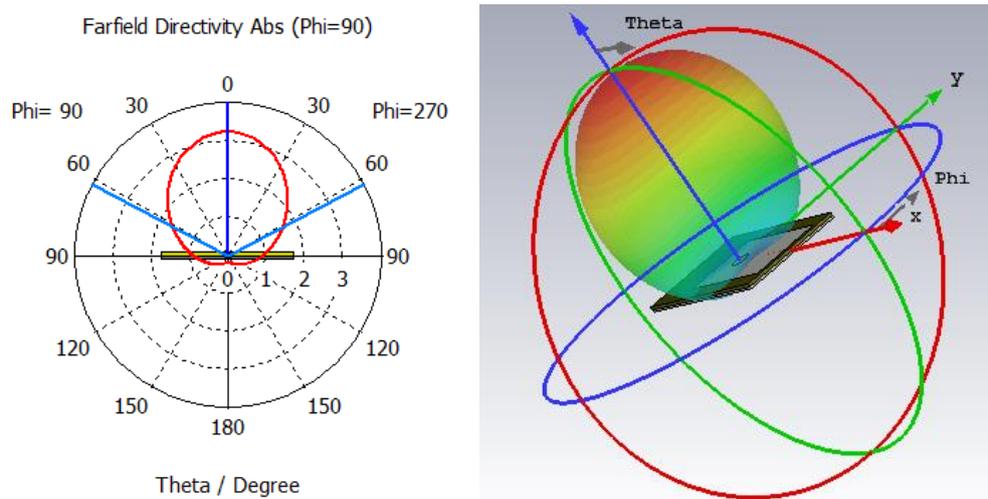


Figure 2.4 la directivité d'une antenne patch a une fréquence 3.5 GHz

2.4. La bande passante

On appelle bande passante d'une antenne, la bande de fréquence où le transfert de puissance du générateur vers l'antenne est maximal. Elle peut être définie en fonction du coefficient de réflexions (2,1 dB) pour les valeurs inférieures à -10 dB.

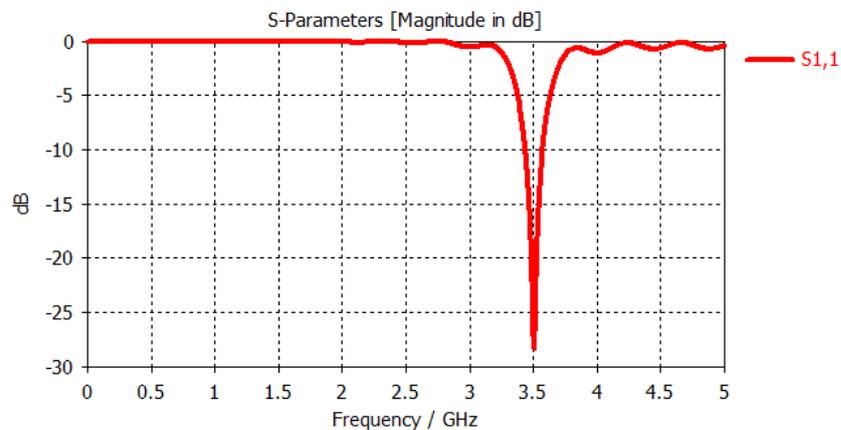


Figure 2.5 Evolution de s1, 1 en fonction de la fréquence

3. Réseaux linéaires d'antennes

3.1. Architecture d'un réseau linéaire d'antennes

La structure d'un réseau linéaire uniforme est considérée comme la structure la plus simple. Ce réseau comporte un certain nombre d'éléments rayonnants, également orientés et équidistants d'un pas de réseau d le long d'une ligne droite [18].

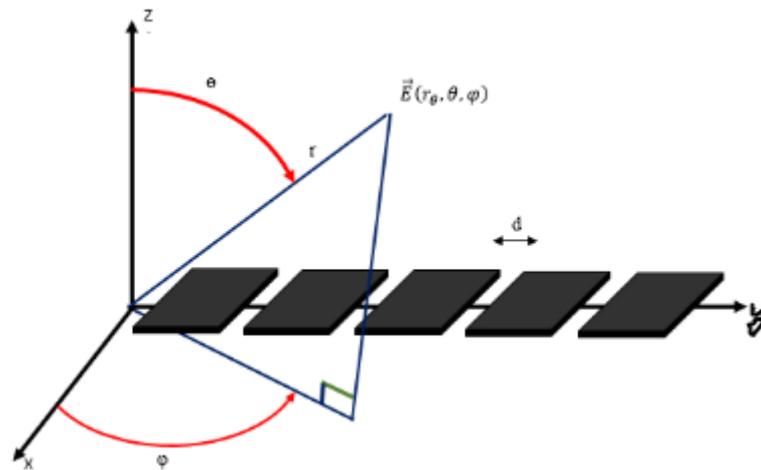


Figure 2.6 Structure d'un réseau linéaire d'antenne [18]

1.1.3 Analyse théorique

Le champ rayonné par un élément en un point n devient [19] [20].

$$E(r, \theta, \phi) = C_n \frac{e^{-jkr_n}}{r_n} e^{j\psi_n} f_n(\theta, \phi) \quad (2.7)$$

Avec θ, ϕ : les coordonnées sphériques

k : le nombre d'onde $2\pi/\lambda$

c_n : l'amplitude d'excitation de la source n ;

ψ_n : phase de la source n ;

r_n : la distance du point d'observation par rapport à la source ;

$f_n(\theta, \phi)$: fonction caractéristique du diagramme rayonnement de la source n.

Si nous considérons le cas d'un réseau phasé, le réseau à loi d'amplitude uniforme ($C_0 = C_1 = C_2 = C_3 \dots = C_N$) et en utilisant la série géométrique dont la somme vaut :

$$\sum_{n=z}^N Z^{n-1} = \frac{1-Z^N}{1-Z} \quad (2.8)$$

Dans le plan XY, $\varphi = \pi/2$, alors le facteur réseau devient :

$$|AF| = C_0 \frac{\sin(\frac{N\Gamma}{2})}{\sin(\frac{\Gamma}{2})} \quad (2.9)$$

$$\Gamma = k d \sin \theta \varphi_0, \quad \text{avec} \quad AF_{max} = N \times C_0$$

3.2. Réseau planaires d'antennes

C'est une structure résonnante en surface constituée d'un rectangle conducteur monté sur un plan de masse séparé d'un diélectrique (substrat), les sources ont été disposées dans une configuration géométrique bidimensionnelle. La Figure 7 illustre l'architecture d'un réseau planaire composé de N×M éléments rayonnants dont les M éléments forment un réseau linéaire uniforme dans l'axe x et les N autres éléments rayonnants dans l'axe y [21].

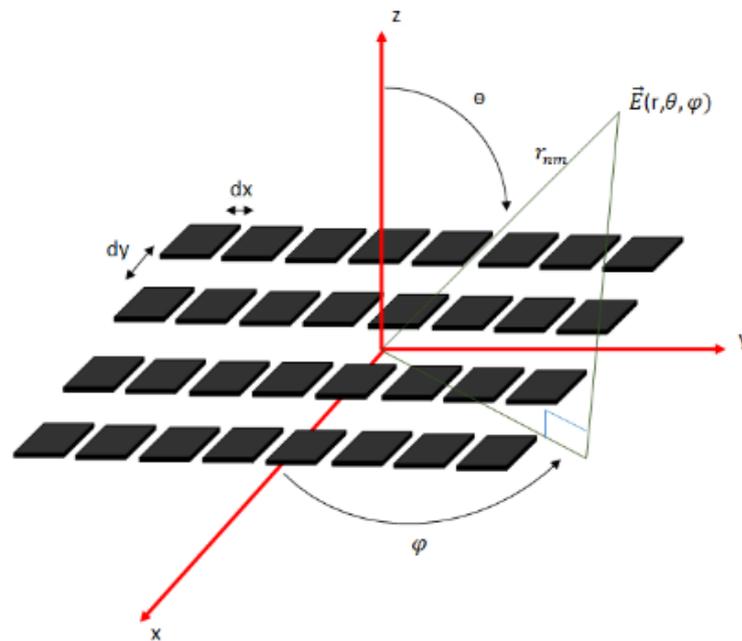


Figure 2.7 Structure d'un réseau planaire d'antennes [21]

1.2.3 Analyse théorique

Comme dans le cas d'un réseau linéaire, le champ électrique total d'un réseau d'antennes bidimensionnel peut également être calculé en sommant l'ensemble des champs électriques de tous les éléments du réseau.

Le champ total devient :

$$E = \frac{e^{-jkr_n}}{r_n} \sum_{n=1}^N C_{mn} e^{j(m-1)kd_x u + (n+1)kd_y v + \Psi_{mn}} f_n(\theta, \phi) \quad (2.10)$$

L'amplitude d'excitation C_{mn} du réseau est égale au produit des amplitudes d'excitation des réseaux linéaires A_m (resp. B_n) Dans les directions x (resp. y) et devient :

$$C_{mn} = A_m \times B_n \quad (2.11)$$

Avec dx (resp. dy) pas du réseau linéaire dans l'axe x (resp. axe y)

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \sin\theta \cos\phi \\ v = \sin\theta \sin\phi \end{array} \right.$$

En découplant les deux axes et simplifiant l'amplitude d'excitation $A_m=B_n=1$, le facteur de réseau planaire devient le produit des deux facteurs réseau linéaire dans les dimensions x et y.

$$AF = \sum_{m=1}^M e^{j((m-1)kd_x \sin\theta \cos\phi + \Psi_x)} \sum_{n=1}^M e^{j((m-1)kd_y \sin\theta \sin\phi + \Psi_y)} \quad (2.12)$$

Tel que :

$$AF = \left(\frac{\sin \frac{M\Gamma_x}{2}}{\sin \Gamma_x} \right) \left(\frac{\sin \frac{M\Gamma_y}{2}}{\sin \Gamma_y} \right) \quad (2.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_x = kd_x \sin\theta \cos\phi + \Psi_x \\ \Gamma_y = kd_y \sin\theta \sin\phi + \Psi_y \end{array} \right.$$

Alors le facteur maximal d'un réseau d'antennes bidimensionnel devient :

$$AF = M \times N$$

4. Reconfiguration des diagrammes d'un réseau d'antennes

Dans les communications mobiles, on distingue trois grandes catégories de systèmes d'antennes : avec des faisceaux différents (Figure 2.8) :

Les antennes directionnelles ont généralement des faisceaux très étroits et focalisés. Par conséquent, elles ont une portée bien meilleure et en plus elles

permettent de réduire l'interférence avec d'autres utilisateurs, d'améliorer le flux de transmission, d'éviter les phénomènes d'évanouissement et d'assurer une meilleure efficacité énergétique dans la transmission du signal [22].

La réduction énergétique et l'augmentation de la couverture occupent des places privilégiées dans les attentes de la 5G et pour ce faire les antennes directionnelles doivent être dotées d'une intelligence dans la transmission du signal au niveau de la réception comme au niveau de l'émission. Ce filtrage spatial est appelé la reconfiguration du diagramme de rayonnement.

De plus, il offre la possibilité d'avoir plusieurs faisceaux directifs simultanément dans le cas où il y a plusieurs utilisateurs dans la zone de couverture afin d'augmenter le débit de données et la diversité spatiale pour obtenir une robustesse au blocage dans les bandes de fréquences millimétriques [23] [24].

Pour ce faire, il existe différentes techniques qui permettent de contrôler la distribution du courant surfacique dans l'antenne afin de changer la direction du faisceau de l'antenne. Les exemples qui suivent donnent un aperçu des méthodes utilisées pour obtenir un dépointage en diagramme de rayonnement dans les réseaux d'antennes.

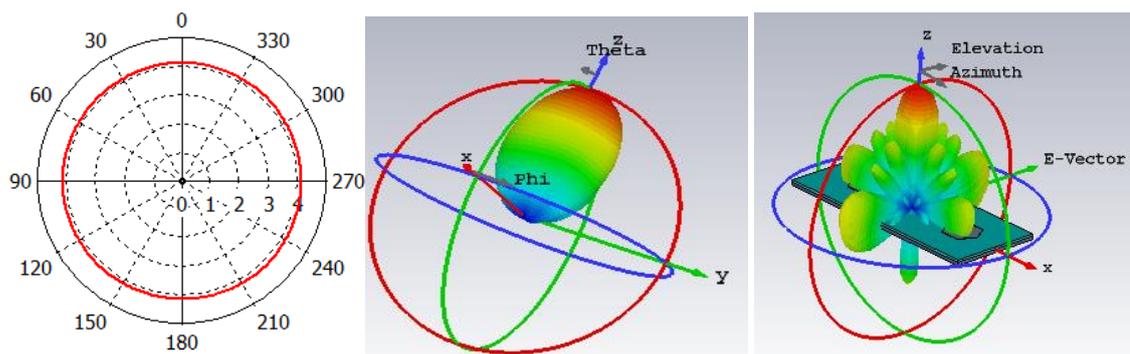


Figure 2.8 les trois différents types de rayonnement d'une antenne : (a) omnidirectionnelle, (b) directive, (c) multifaisceaux

4.1. Dépointage par des dispositifs électroniques (ex : Diodes PIN)

Un exemple d'antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement à diodes PIN exploitant la commutation de la distribution du courant surfacique est présenté Figure 2.9 [25].

L'objectif est de placer des éléments parasites autour de l'élément rayonnant principal dont la densité du courant surfacique est contrôlable via la commutation des composants électroniques.

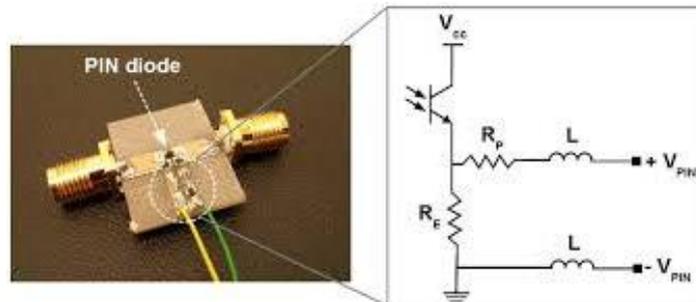


Figure 2.9 Schématique d'une antenne reconfigurable par commutation d'éléments parasites [25]

4.2. Dépointage par réseau d'antennes réflecteur patch

Un réseau réflecteur dans sa configuration la plus simple, est constitué d'un substrat comprenant une face métallisée et d'éléments réflecteurs, que nous appellerons patchs élémentaires, imprimés sur la seconde face du substrat comme représenté en figure 2.10 L'intérêt principal des réseaux réflecteurs, et plus encore dans la gamme millimétrique, réside dans l'utilisation d'une alimentation quasi-optique.

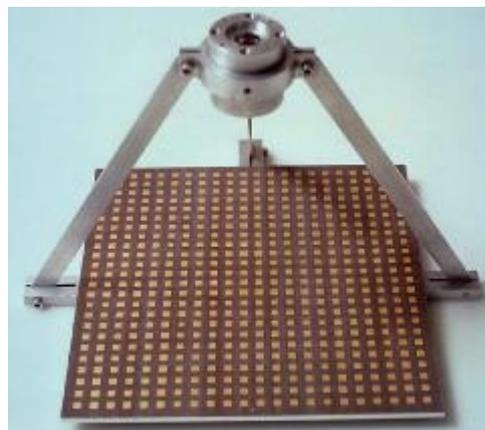


Figure 2.10 Schématique d'un réflecteur patch [25]

4.3. Dépointage par matrice de Butler

La matrice de Butler est aujourd'hui un des répartiteurs de faisceaux les plus employés dans un réseau qui a besoin d'émettre ou de recevoir des faisceaux multiples dans des directions préfixées. La matrice est constituée de plusieurs étages de division de puissance composés de coupleurs directionnels et de déphaseurs fixes [26].

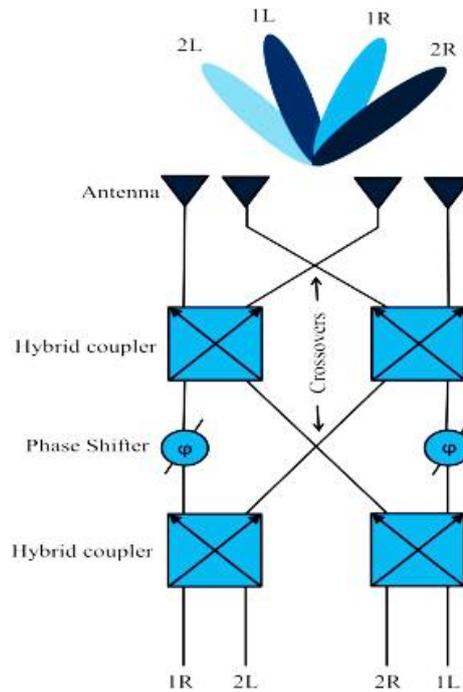


Figure 2.11 Schématique de la matrice standard de Butler 4x4 [26]

4.4. Dépointage par la lentille de Rotman patch

La lentille de Rotman est définie comme étant un réseau d'antennes où les éléments rayonnants ont des phases différentes corrigées au niveau de la circonférence afin de pointer le faisceau dans la direction souhaitée [27].

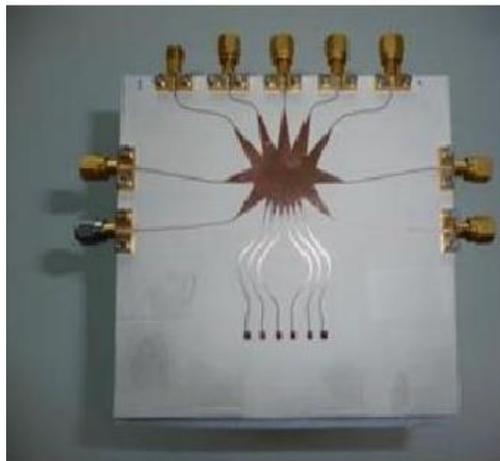


Figure 2.12 Schématique de Dépointage par la lentille de Rotman [27]

4.5. Dépointage par réseaux phasés

Cette technique permet de produire la flexibilité du faisceau en plaçant un réseau de commande de phase entre les éléments rayonnant du réseau d'antennes.

Généralement, un dispositif électronique programmable est utilisé pour gérer ce changement de pondérations entre les éléments.

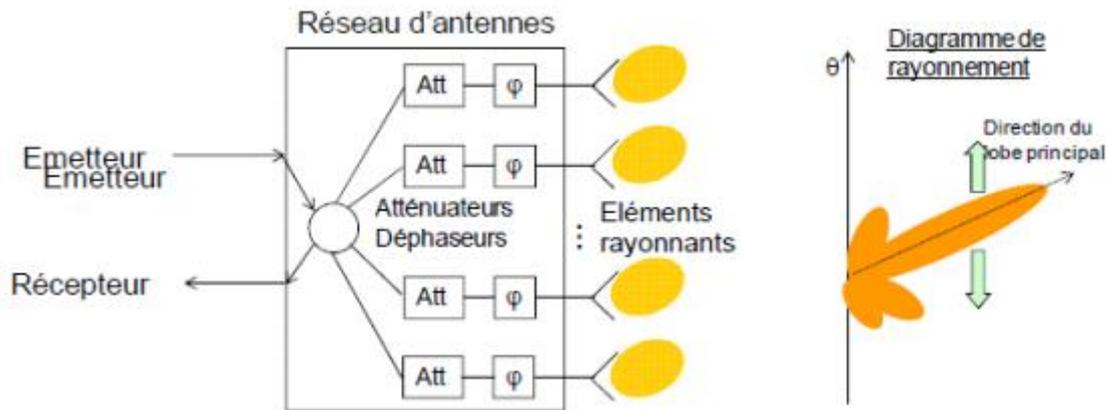


Figure 2.13 Schéma d'un représente le déphasage entre les éléments rayonnant du réseau d'antennes leur diagramme de rayonnement [28][29]

Technique de dépointage	Avantages	Inconvénient
Dispositifs Electroniques (diode PIN)	<ul style="list-style-type: none"> • Poids léger • Faible épaisseur • Niveau de gain pratiquement constant 	<ul style="list-style-type: none"> • Implémentation compliquée • Forte perte d'insertion des composants électroniques • Efficacité faible
Réseau d'antennes Réflecteur	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de fabrication, pour des fréquences millimétriques 	<ul style="list-style-type: none"> • Encombrement • Réflexions incontrôlables

	<ul style="list-style-type: none"> • La focalisation du faisceau assurée par le réflecteur 	
Matrice de Butler	<ul style="list-style-type: none"> • Chevauchements des faisceaux • Simple conception de la matrice 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de pondérations d'amplitude • Nombre de faisceaux limité dans un seul plan
Lentille de Rotman	<ul style="list-style-type: none"> • Faible coût • Fabrication facile • Stabilité en fréquence 	<ul style="list-style-type: none"> • grande taille • Nombre limité de faisceaux avec un manque de précision • Bande passante étroite
Réseau phasés	<ul style="list-style-type: none"> • Très directive • Balayage sectoriel • Très faible niveau de lobes secondaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts plus élevés • Couverture est limitée dans un seul plan

Tableau 2 Bilan sur les différentes techniques

5. Conclusion

Dans ce second chapitre, nous avons passé en revue les réseaux d'antennes, et les différentes techniques pour les rendre commutables en diagrammes de rayonnement. Le facteur réseau deviendra plus important et la structure sera plus directive. Le challenge consiste à maximiser ce facteur réseau avec une flexibilité du faisceau dans une large zone afin d'optimiser les performances dans le cas des Small

Cela, par suite nous avons présenté les différentes techniques les plus répandues pour permettre à un réseau d'antennes de se doter d'une capacité de reconfigurer son diagramme de rayonnement.

Chapitre 3 : Résultats et discussions

1. Introduction

L'intérêt de ce chapitre est de concevoir des structures d'antennes plus performantes, commençant par un seul élément rayonnant de base d'une forme rectangulaire, et étudier les phénomènes qui influent sur le diagramme de rayonnement, pour avoir une bande passante large et un grand niveau de gain afin d'optimiser les performances de l'antenne. Puis nous avons développé la structure de l'élément de base à une forme hexagonale au but d'étudier le réseau d'antenne avec plusieurs éléments rayonnants $N \times N$ (éléments) sur (les l'espacement inter-élément, le couplage et l'augmentation de gain par changement des ports d'excitation ...) et représenter les caractéristiques de rayonnements S_{11} ; S_{21} .

2. Présentation de l'antenne patch (élément de base)

L'antenne patch a une forme rectangulaire gravée généralement sur une plaque imprimée d'épaisseur $t=0.07$ double face alimentée par un câble coaxial, dont le substrat est un diélectrique de caractéristiques appropriées à la transmission THF de type FR-4 (lossy), et un plan de masse rectangulaire de l'autre côté. La figure 1 représente la géométrie de cette antenne une Permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$.

Paramètre	Valeur (mm)	Description
H1	0.07	Épaisseur du patch
H2	2.1	Épaisseur du substrat
L	60	Longueur du substrat
W	60	largeur substrat
r1	2	Rayon de la gaine d'alimentation
R	0.35	Rayon du feeder d'alimentation
h3	2.1	Épaisseur du plan de masse

Tableau 3 Dimensions de l'antenne patch rectangulaire

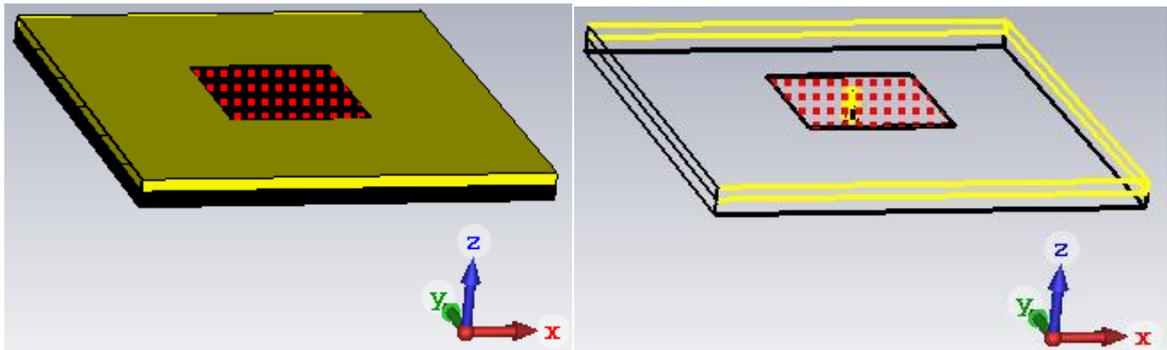


Figure 0.1 conception de l'antenne de base d'une forme rectangulaire

2.1. Configuration des paramètres Liste pour adapter l'antenne une 3.5 GHz sur logiciel CST

L'adaptation de la ligne d'alimentation à 50 Ohm est nécessaire pour assurer un bon Fonctionnement de l'antenne. La géométrie des rayons de point d'alimentation dans le simulateur : $D=2\text{mm}$, $d=0.35\text{mm}$, Permittivité Epsilon_ $\epsilon_r=4.3$, Fréquence = 3.5 GHz.

Impédance caractéristique : $Z_0 = 50 \text{ ohm}$.

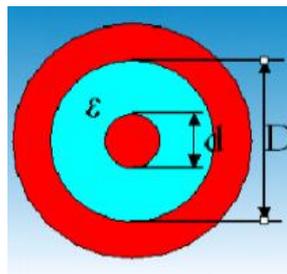


Figure 0.2 Dimension de point d'alimentation (port)

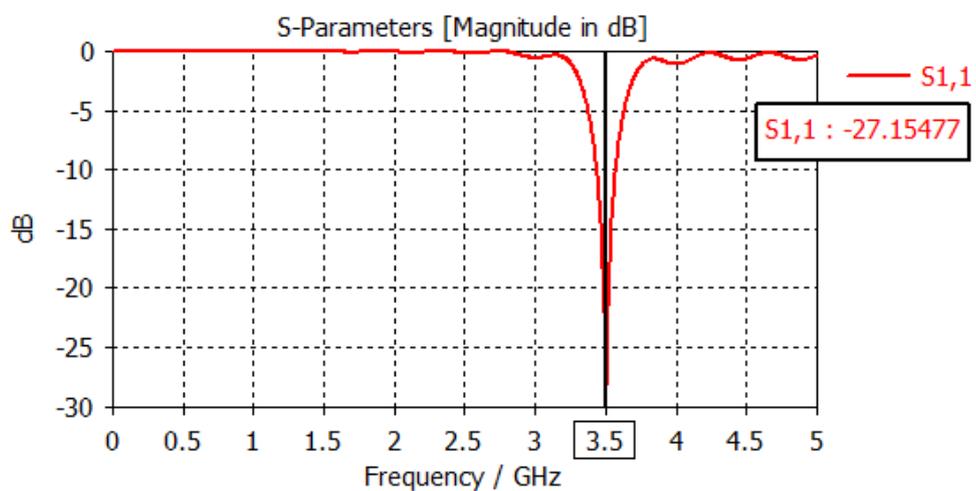


Figure 0.3 niveau de coefficient de réflexion s1 (dB) dans la repense fréquentiel de 3.5 GHz

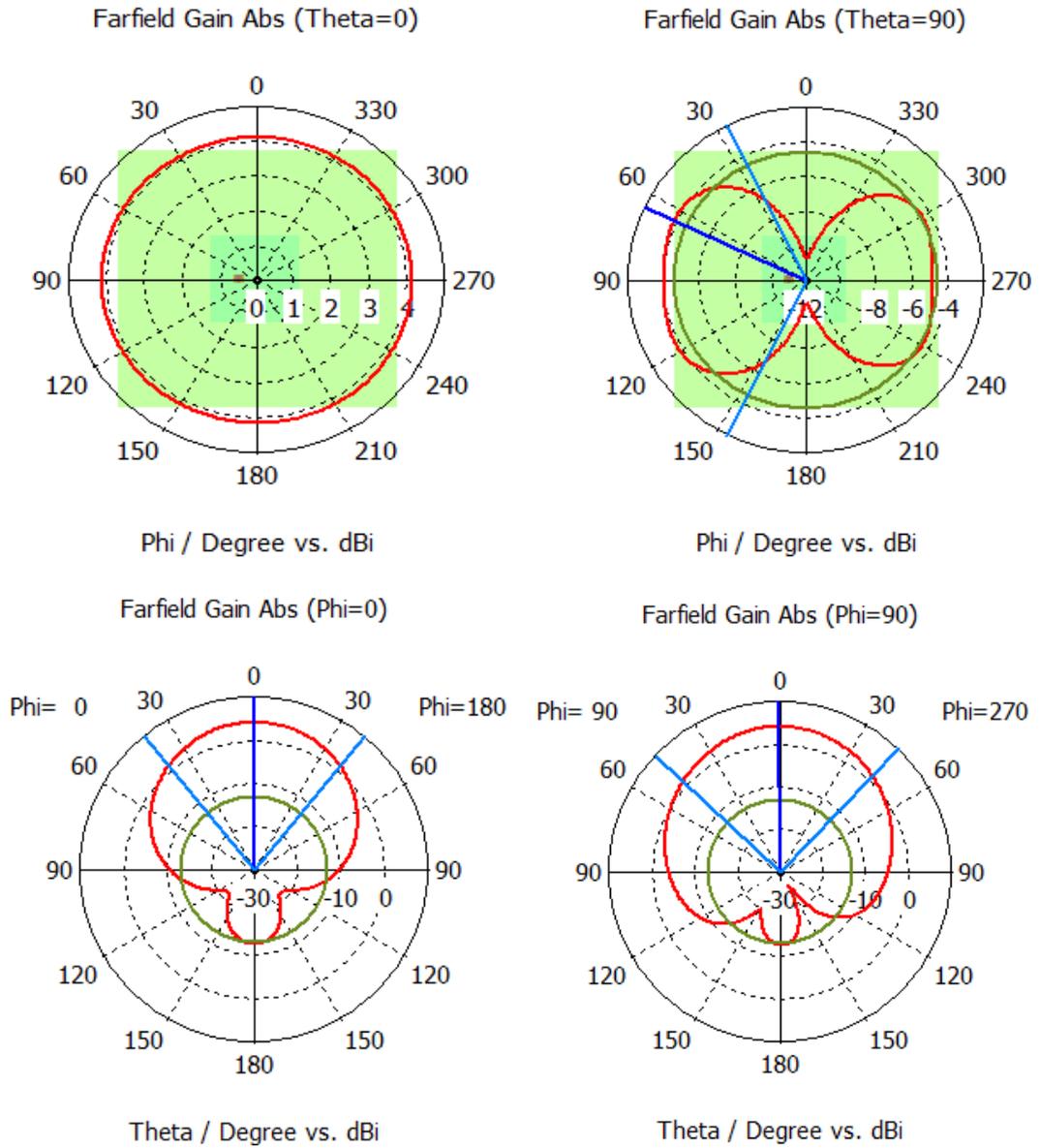


Figure 0.4 Diagramme de rayonnement en 1D de l'antenne patch alimentée par un câble coaxial à la fréquence de 3.5 GHz

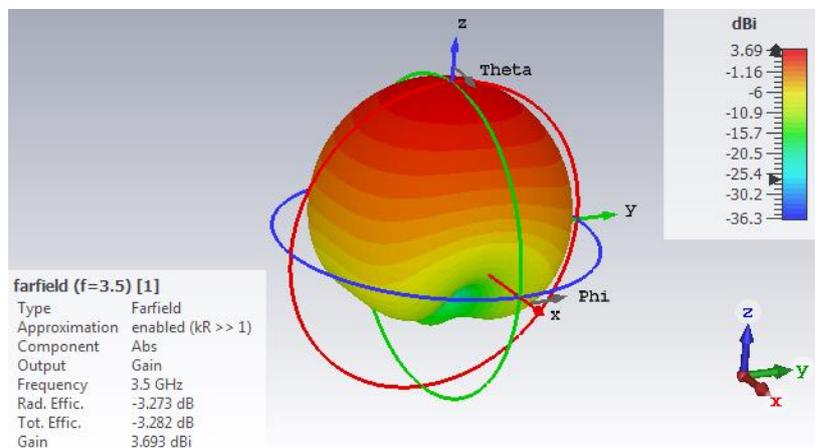


Figure 0.5 Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne rectangulaire

3. Etude paramétrique de l'antenne rectangulaire

3.1. Effet du positionnement de point d'alimentation sur l'adaptation de l'antenne

La ligne d'alimentation sera posée à l'extrémité de l'antenne patch, puis centre et en bas...Les autres paramètres sont fixes.

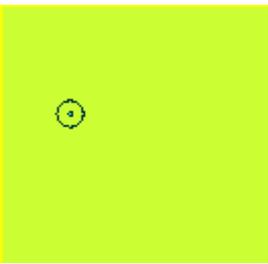
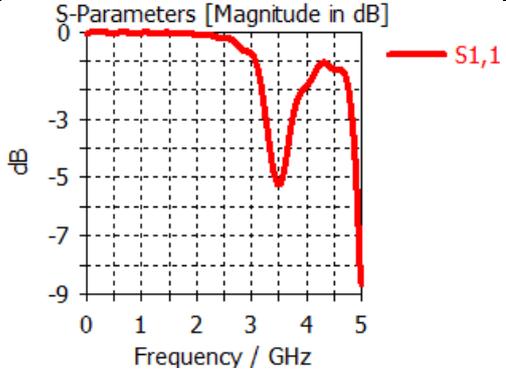
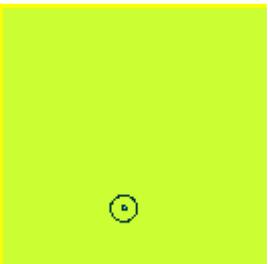
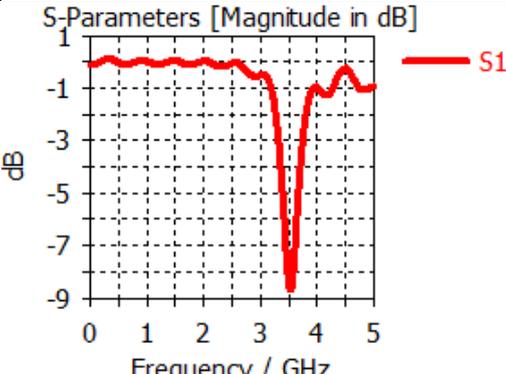
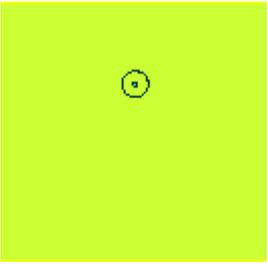
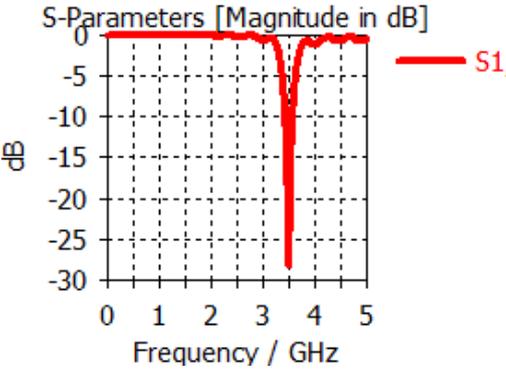
Position de port Sur le substrat	X center (mm)	Y center (mm)	en fonction de La fréquence/GHz coefficient de Réflexion dB
	-5	2	
	-1	-5	
	0	4	

Tableau 4 effets de positionnement de port d'alimentation

Le changement de point d'alimentation cause des effets influents sur les performances de l'antenne ...Alors nous essayons de positionner le point d'alimentation au point où il donne un meilleur résultat c'est le point optimal de 50 ohm qui nous donne l'adaptation et une transmission total.

4. Réseau d'antenne :

4.1. Conception de réseau d'antenne a deux éléments rayonnant 2x1

Au but d'améliorer les performances de l'antenne d'un 1 seul élément rayonnant en réseau de plusieurs éléments ; pour augmenter le dB de gain et garantir un minimum on ajout un deuxième élément rayonnant de même dimensions et paramètres.

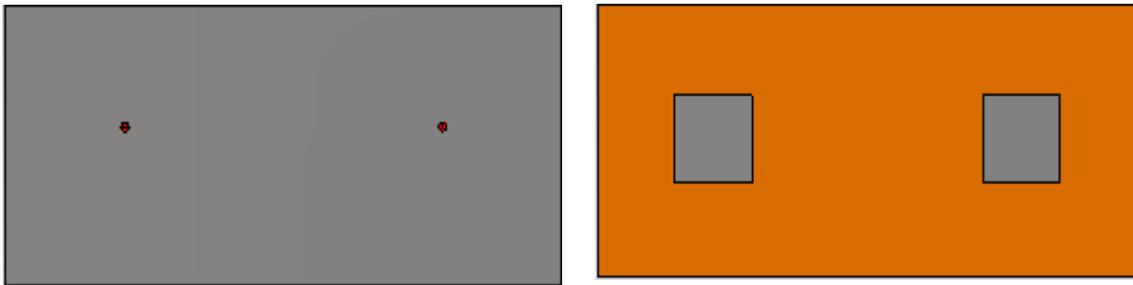


Figure 0.6 Antenne patch de forme rectangulaire, (a) : vue dessus (b) : vue dessous.

5. Etude sur les performances d'un réseau d'antenne 2x1 éléments

En utilisant le simulateur CST, Dans notre étude on va varier les paramètres géométriques de l'antenne patch afin de voir l'effet de chaque paramètre sur les caractéristiques de cette antenne telles que les paramètres S (le coefficient de réflexion S_{11}), le diagramme de rayonnement et le gain.

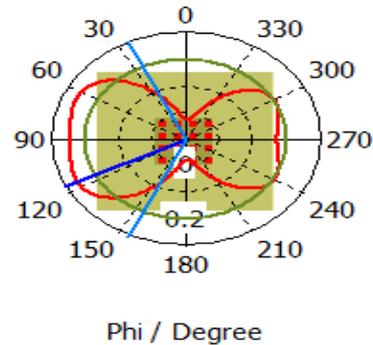
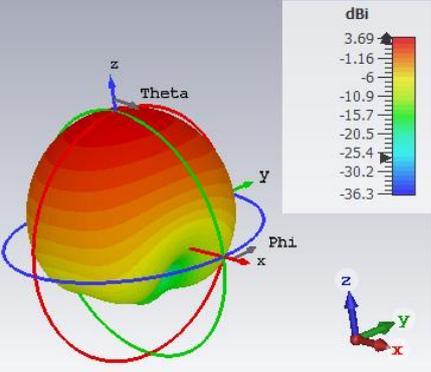
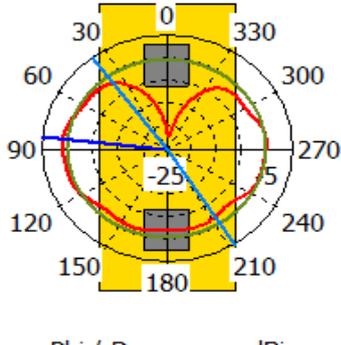
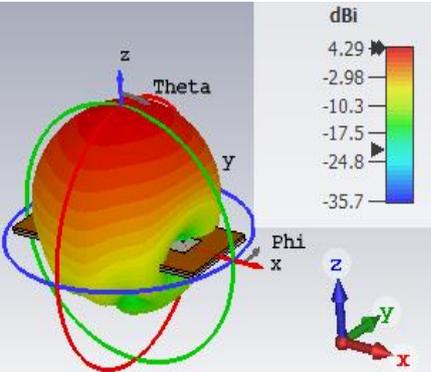
Nombre d'Élément rayonnant	Gain en (dB)	Diagramme de rayonnement 1D	Diagramme de rayonnement 3D
Antenne 1seul élément	3.69dB	<p>Farfield Gain Abs (Theta=90)</p>  <p>Phi / Degree</p>	
Réseau d'antenne 2 éléments	4.29 dB	<p>Farfield Gain Abs (Theta=90)</p>  <p>Phi / Degree vs. dBi</p>	

Tableau 5 niveau de gain (dB), diagramme de rayonnement 1D et 3D d'un seul élément et 2 éléments

Nous constatons que le dB Gain de 2élément rayonnant est grand par rapport le débit d'un seul élément dans le diagramme de rayonnement 3D et même pour le lobe principal dans le diagramme 1D.

5.1. Effets de la dimension de substrat

Il est nécessaire de reconfigurer les dimensions de substrat en fonction de l'espacement entre les éléments rayonnant pour assurer l'isolation des antennes et la réduite de couplage.

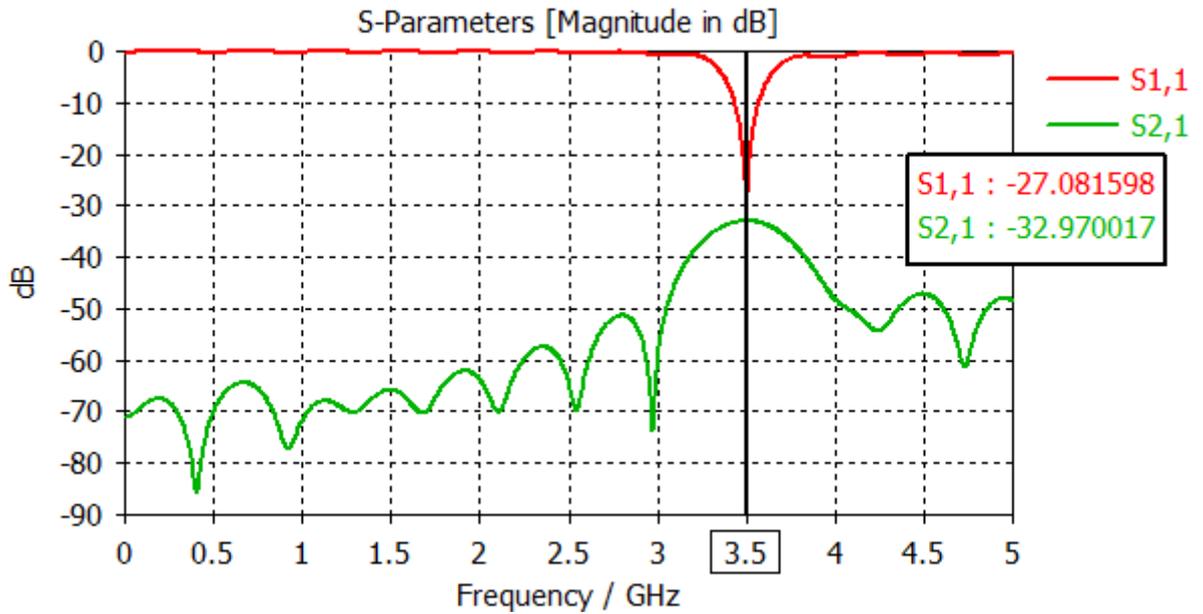


Figure 0.7 Configuration de réseau : S_{2,1} Coefficient d'isolation, S_{1,1} Coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement à la fréquence de 3.5 GHz.

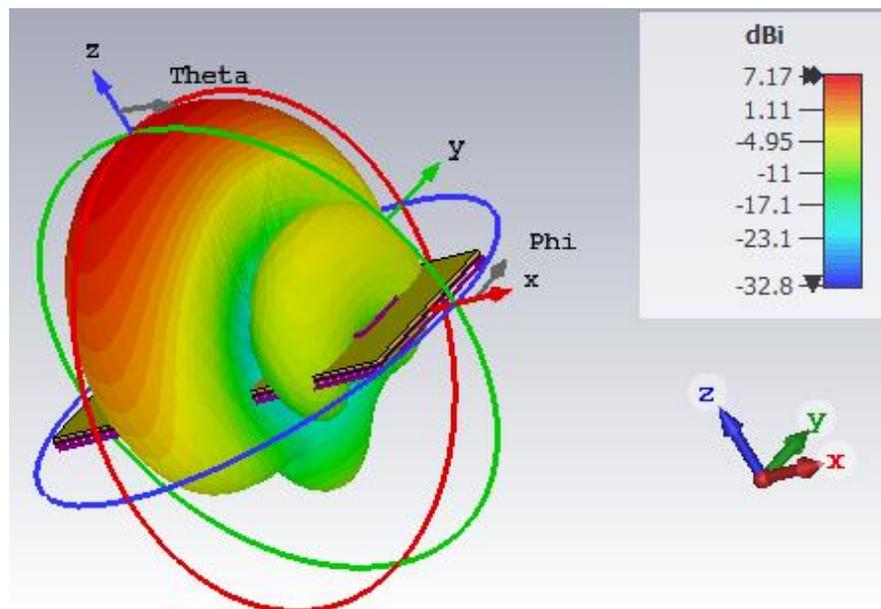


Figure 0.8 Diagramme de rayonnement en 3D du réseau 2x1 rectangulaire

Les Figures 3 représentent les résultats des coefficients de réflexion et d'isolation. Nous constatons que l'antenne est bien adaptée autour de la fréquence de 3.5 GHz avec un niveau de coefficient de réflexion à -10dB.

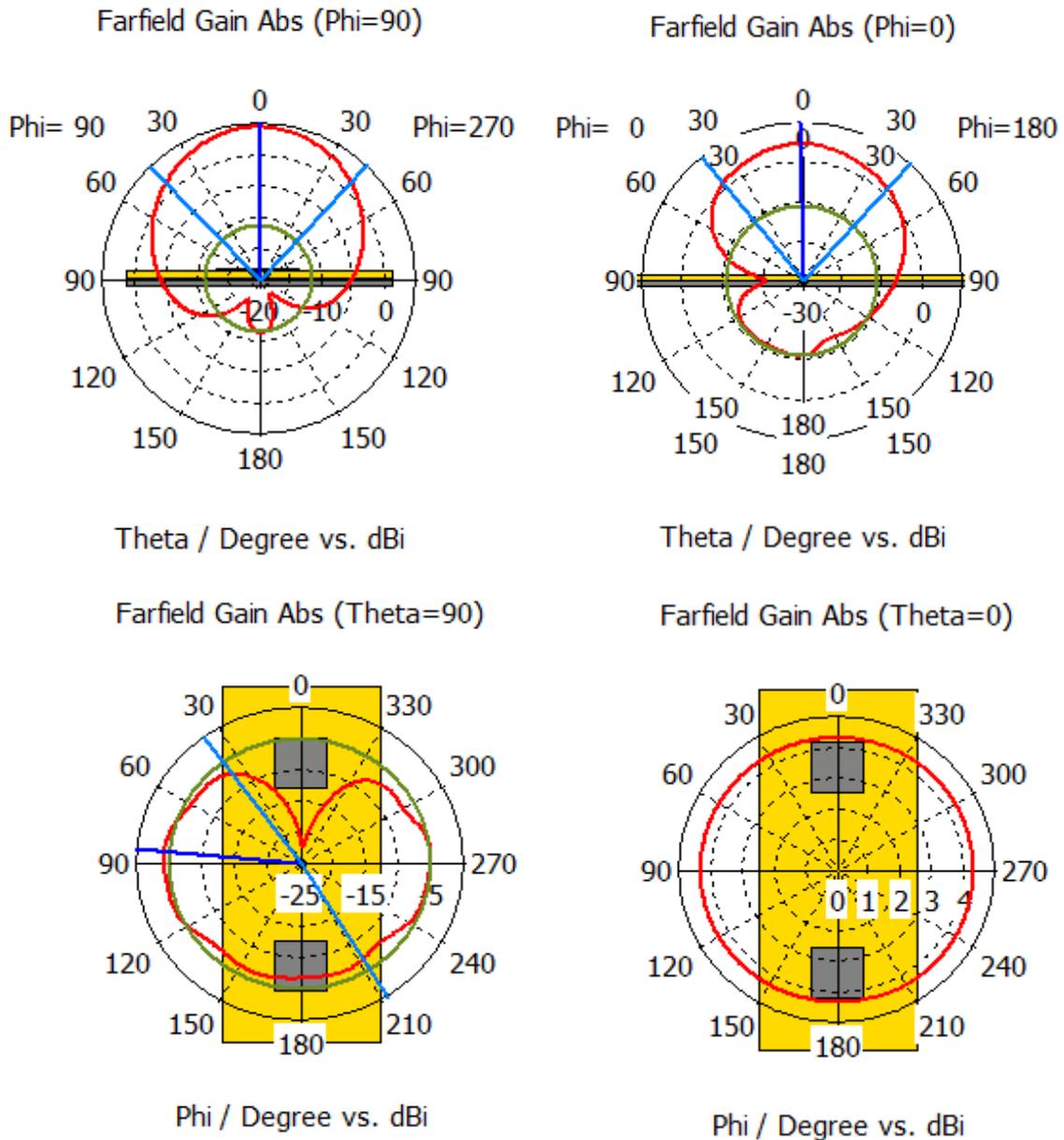


Figure 0.9 Diagramme de rayonnement en 1D du réseau 2x1 à la fréquence de 3.5 GHz

Le fait que le coefficient de réflexion est dispersé le -20 dB, on peut dire que les deux antennes sont isolées. Nous remarquons aussi qu'il y'a une Bonne concordance de développement sur les performances de rayonnement $s_{1,1}$, et $s_{2,1}$.

5.2. L'effet de l'espacement sur le niveau de couplage

L'excitation des ports simulation rédige des interférences constructives, donc pour étudier les effets de l'espacement inter-éléments Lors de la conception d'un réseau d'antenne, il faut prendre en considération un facteur majeur dans le calcul qui est

l'espacement entre les éléments du réseau qui agit directement sur le diagramme de rayonnement et le gain.

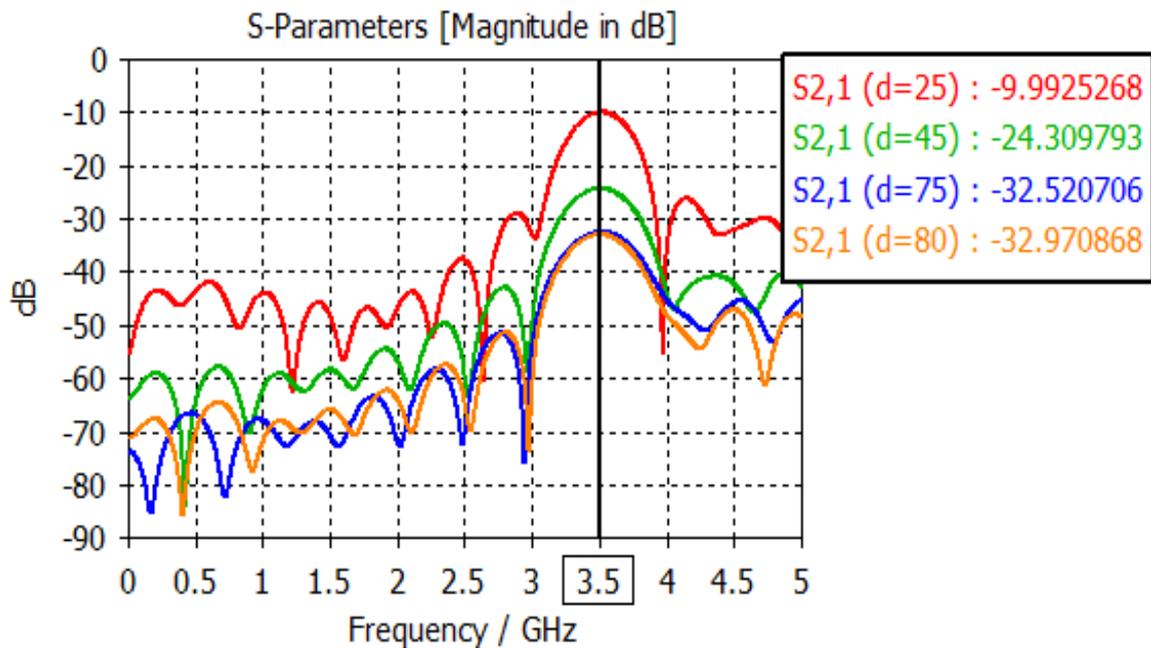


Figure 0.10 La variation de $s_{2,1}$ l'isolation (dB) en fonction de la fréquence (GHz).

Les résultats de simulation montrent le niveau d'isolation. A partir de ces courbes on voit que l'antenne est bien adaptée autour de la fréquence de 3.5 GHz avec un niveau de coefficient de réflexion :

$[\geq -20]$ dB : montre qu'il y'a un couplage quand la distance $d \leq 25$ mm

$[\leq -20]$ dB : montre qu'il y'a un découplage quand la distance $d \geq 35$ mm, 45 mm

Nous remarquons que plus que nous augmentons la distance, le niveau d'isolation $S_{2,1}$ augmente. Alors on constate aussi que l'évolution du niveau d'isolation est proportionnelle avec l'espacement inter-élément jusqu'à le point optimal ou le niveau $S_{2,1}$ change pas et reste constant.

6. Amélioration de la structure du réseau d'antenne

Au but d'améliorer les performances de réseau d'antenne on change la géométrie de l'élément rayonnant à une nouvelle forme hexagonal et discuter leurs effets sur le couplage inter-éléments, l'isolation le coefficient de réflexion.

6.1. Effet de la nouvelle géométrie (hexagonal) sur le paramètre s

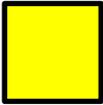
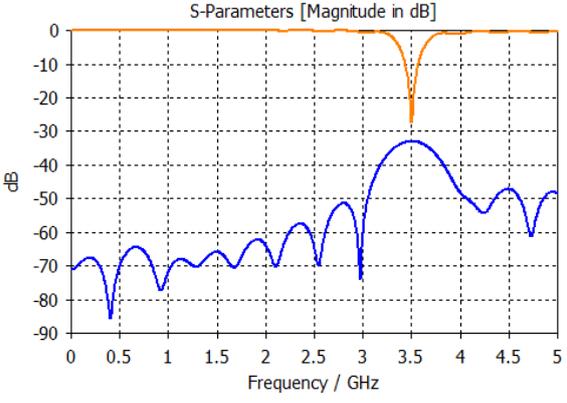
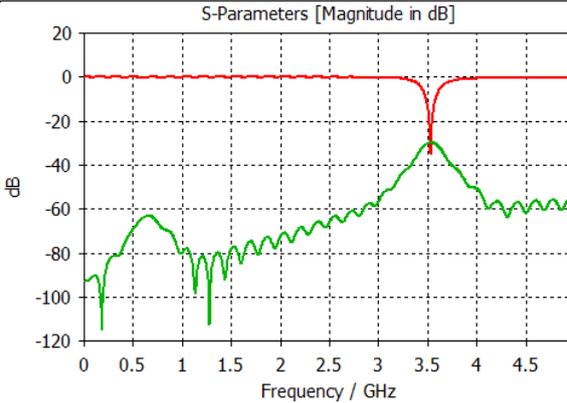
Forme de l'élément rayonnant	Nombre D'élément	L'amélioration de Niveau d'isolation s _{2,1}	Coefficient d'isolation en dB
Rectangulaire 	Deux éléments		S _{2,1} -29.30 dB
Hexagonale 	Deux éléments		S _{2,1} -35.17 dB

Tableau 6 comparaison de niveau d'isolation entre la forme rectangulaire et l'hexagonale

Nous notons que le changement de la géométrie de l'élément rayonnant à la forme hexagonale a amélioré les performances du réseau, ou le niveau de couplage mutuel entre le port 1 et le port 2 est diminué de (-29.30 dB) en (-35.17 dB) et le coefficient de réflexion est augmenté.

6.2. L'effet de l'espacement sur le couplage

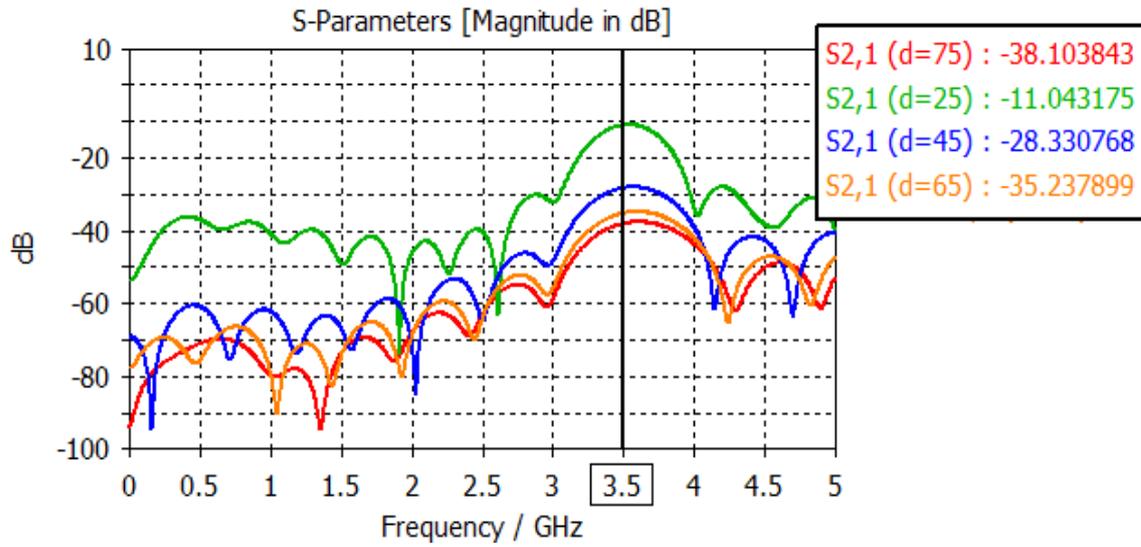


Figure 0.11 La variation de Coefficient de réflexion s_{2, 1} (dB) en fonction de la fréquence (GHz)

La figure 3.11 illustre La variation de Coefficient de réflexion s_{2, 1} (dB) en fonction de la fréquence (GHz). Nous remarquons qu'il y'a un bon résultat sur le niveau d'isolation entre les éléments rayonnants de la forme hexagonal par rapport la forme rectangulaire.

6.3. L'effet de la géométrie hexagonal sur le gain

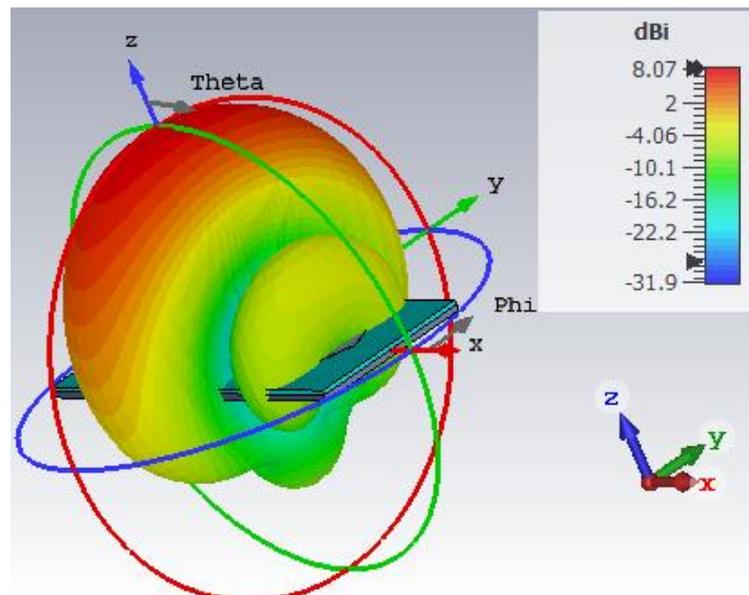
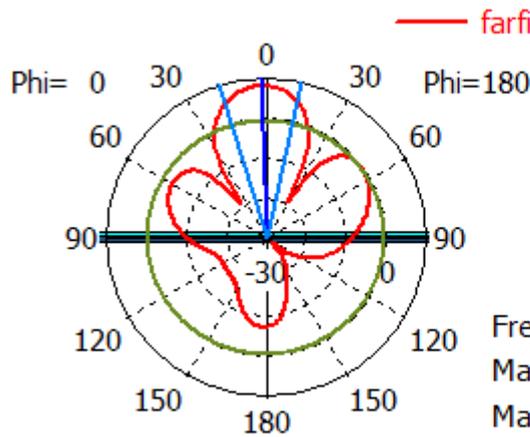


Figure 0.12 Diagramme de rayonnement 3D du réseau d'antenne hexagonal de gain 8.07 (dB)

Farfield Gain Abs (Phi=0)

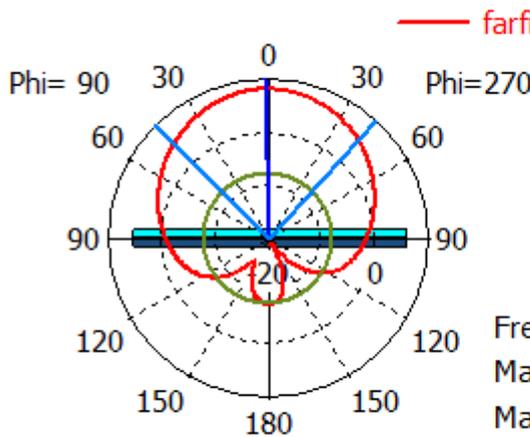


— farfield (f=3.5) [1[1.0,0.0...

Frequency = 3.5 GHz
 Main lobe magnitude = 8.09 dBi
 Main lobe direction = 2.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 29.4 deg.
 Side lobe level = -8.5 dB

Theta / Degree vs. dBi

Farfield Gain Abs (Phi=90)

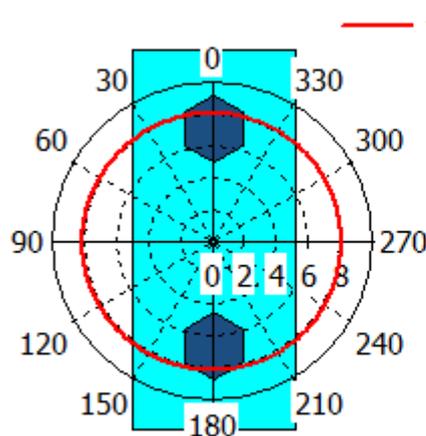


— farfield (f=3.5) [1[1.0,0.0...

Frequency = 3.5 GHz
 Main lobe magnitude = 8.04 dBi
 Main lobe direction = 1.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 86.6 deg.
 Side lobe level = -15.8 dB

Theta / Degree vs. dBi

Farfield Gain Abs (Theta=0)



— farfield (f=3.5) [1[1.0,0.0...

Frequency = 3.5 GHz
 Main lobe magnitude = 8.04 dBi

Phi / Degree vs. dBi

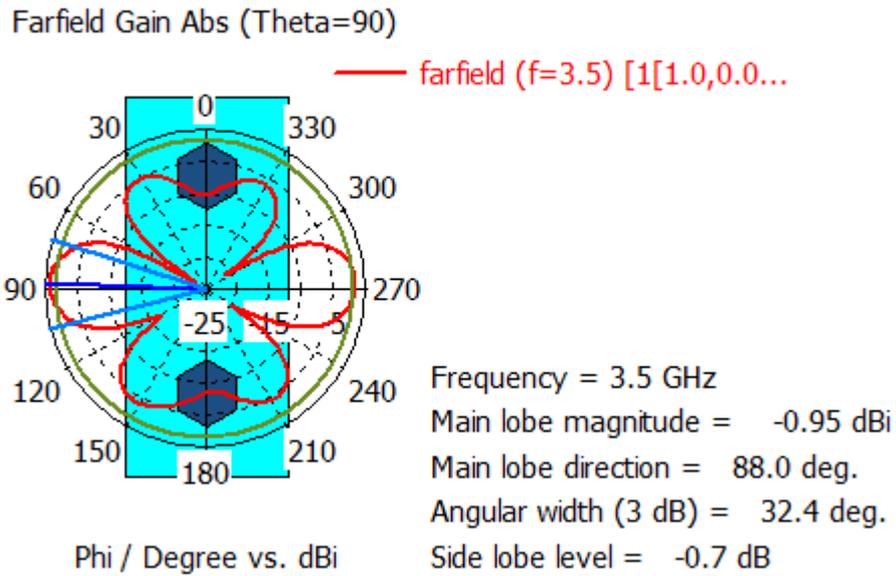
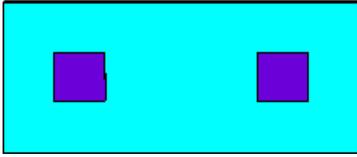
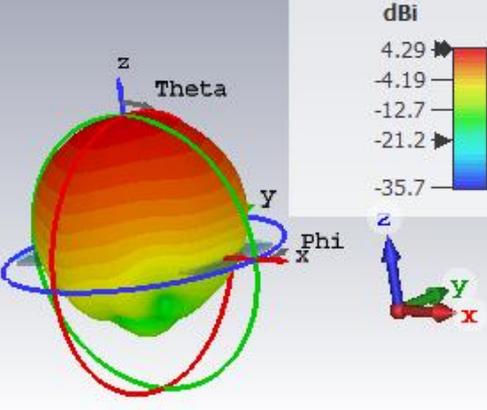
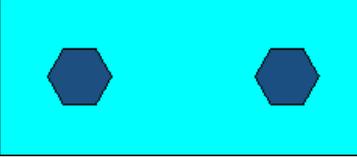
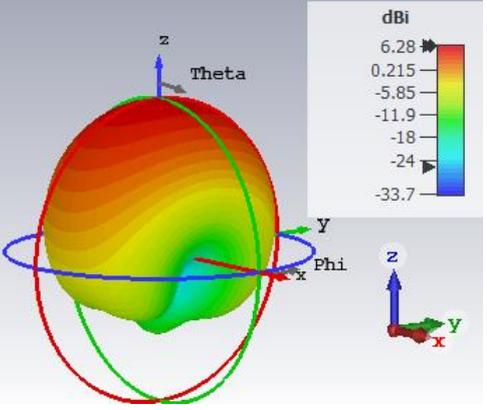
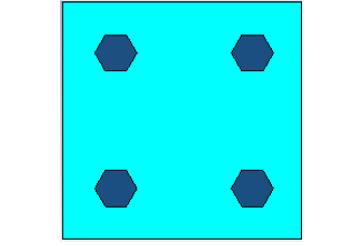
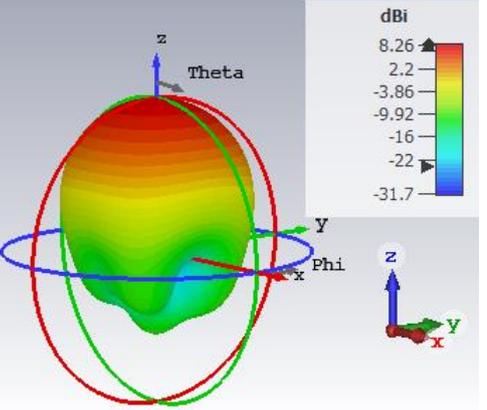
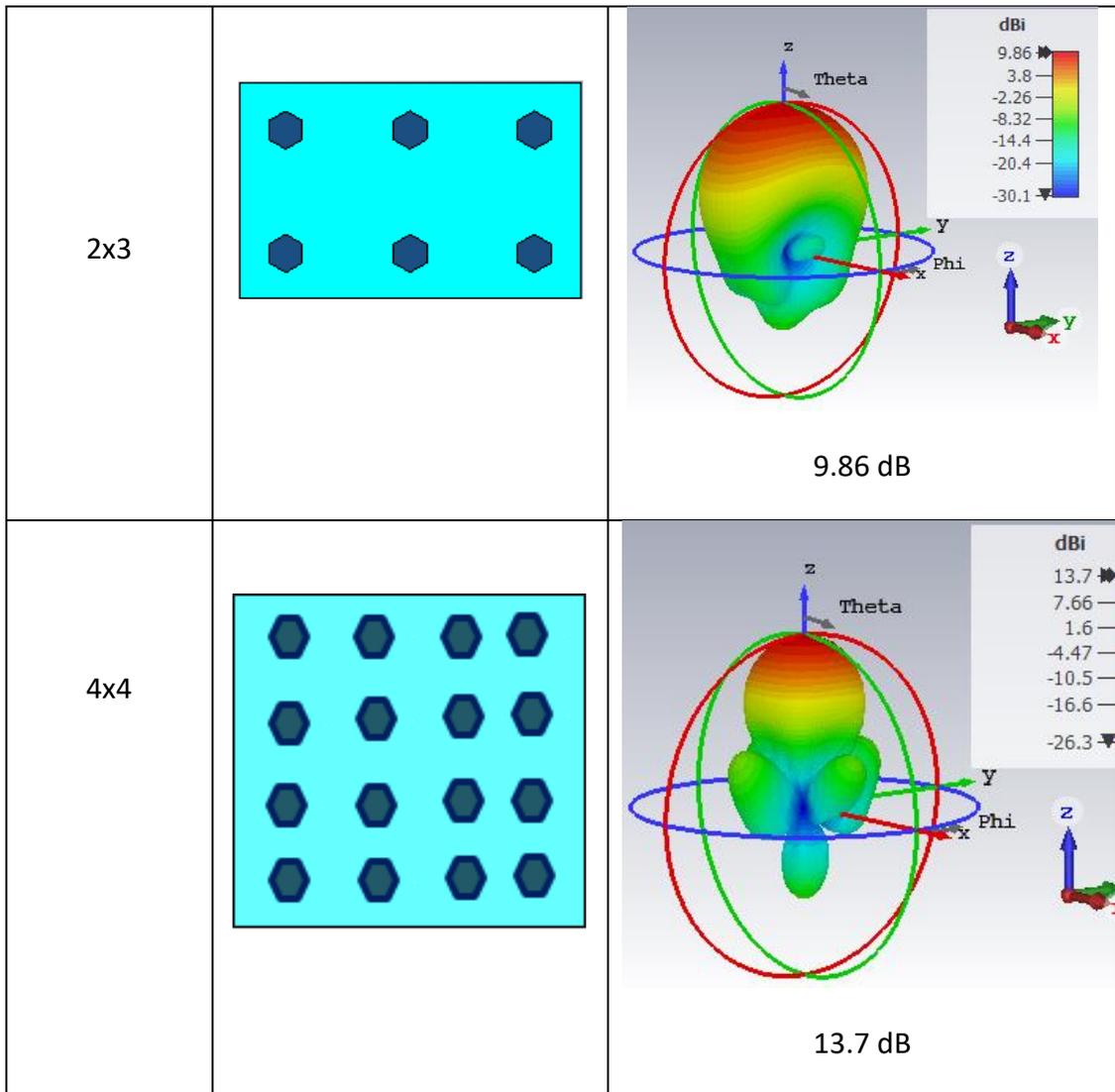


Figure 0.13 Diagramme de rayonnement 1D de réseau d'antenne hexagonal

La figure 4 présente le diagramme de rayonnement en 1D de l'antenne après le changement d'élément rayonnant a la forme hexagonale. Nous voyons que le dB du gain est augmenté ce qui signifie que la forme d'élément joue un rôle essentiel sur les performances de l'antenne.

Configuration d'antenne	Conception géométrique	Digramme de rayonnent du gain en dB
1x1		<p>3.69 dB</p>

<p>2x1</p>	 <p>A rectangular patch antenna layout with two purple square patches on a cyan rectangular substrate.</p>	 <p>3D radiation pattern plot for the 2x1 square patch antenna. The plot shows a main lobe centered at 0 degrees. A color scale on the right indicates dBi values from -35.7 to 4.29. The plot includes axes for Theta, Phi, and a 3D coordinate system (x, y, z).</p> <p>4.29 dB</p>
<p>2x1</p>	 <p>A rectangular patch antenna layout with two dark blue hexagonal patches on a cyan rectangular substrate.</p>	 <p>3D radiation pattern plot for the 2x1 hexagonal patch antenna. The plot shows a main lobe centered at 0 degrees. A color scale on the right indicates dBi values from -33.7 to 6.28. The plot includes axes for Theta, Phi, and a 3D coordinate system (x, y, z).</p> <p>6.28 dB</p>
<p>2x2</p>	 <p>A square patch antenna layout with four dark blue hexagonal patches arranged in a 2x2 grid on a cyan square substrate.</p>	 <p>3D radiation pattern plot for the 2x2 hexagonal patch antenna. The plot shows a main lobe centered at 0 degrees. A color scale on the right indicates dBi values from -31.7 to 8.26. The plot includes axes for Theta, Phi, and a 3D coordinate system (x, y, z).</p> <p>8.26 dB</p>



6.4. Etude analytique sur le nombre d'élément rayonnant

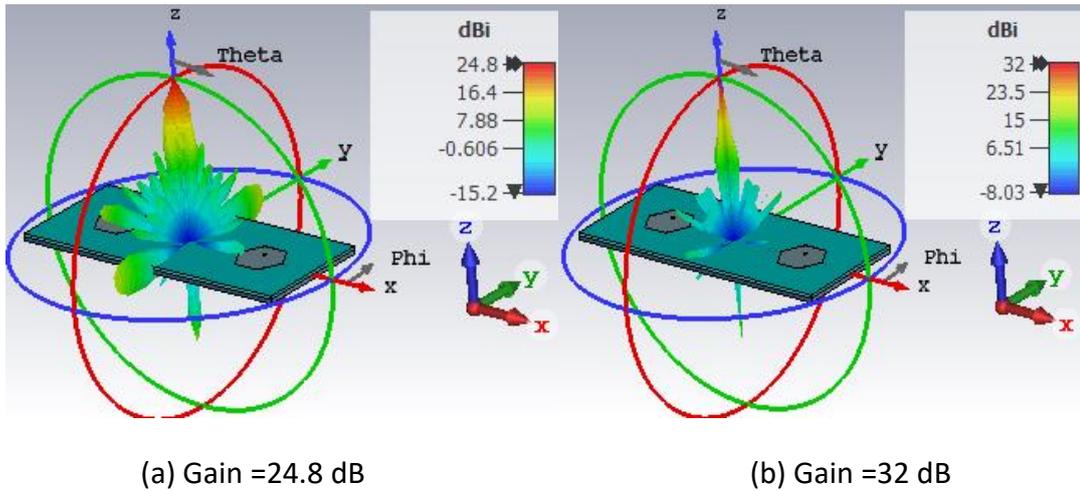


Figure 0.14 Diagramme de rayonnement de (a) : Matrice 8x8,(b) :matrice 16x16 (élément rayonnant)

D'après le tableau et l'étude analytique sur le nombre d'élément, on peut remarquer qu'à chaque fois on augmente le nombre d'élément rayonnant le diagramme de rayonnement change de forme et le niveau de gain augmente.

Alors nous constatons que l'augmentation du niveau de gain est proportionnellement relative avec le nombre d'élément rayonnant.

7. Structure proposé

L'objectif de cette simulation est d'étudier l'efficacité du mécanisme d'isolation en comparant le coefficient de couplage sans et avec la structure d'isolation.

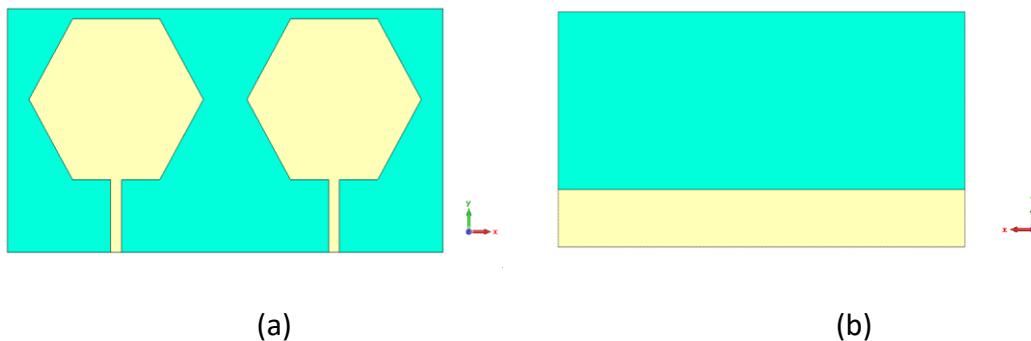


Figure 0.15 Méthodologie de conception de l'antenne proposée : a) Vue en dessus, b) Vue dessous

La figure 3.15 illustre la méthodologie de conception de la configuration d'antenne hexagonale proposée, qui est imprimée sur un Substrat Rogers RTDuroid5880 avec permittivité relative $r = 2,20$, alimentée au moyen d'une ligne d'alimentation optimisée caractérisée à 50Ω .

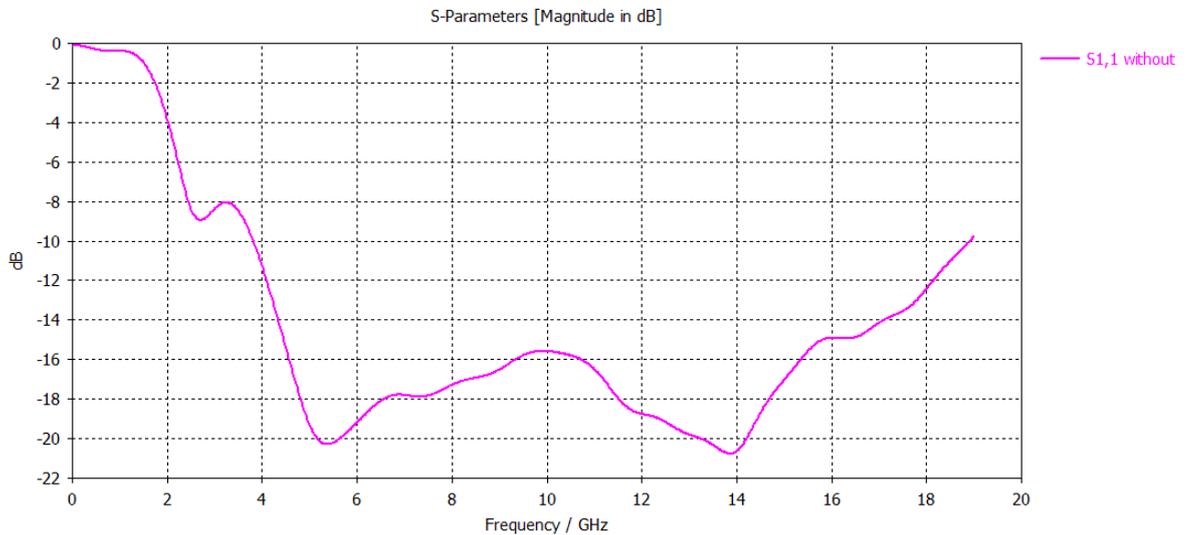


Figure 0.16 La variation de $s_{1, 1}$ (dB) en fonction de la fréquence (GHz)

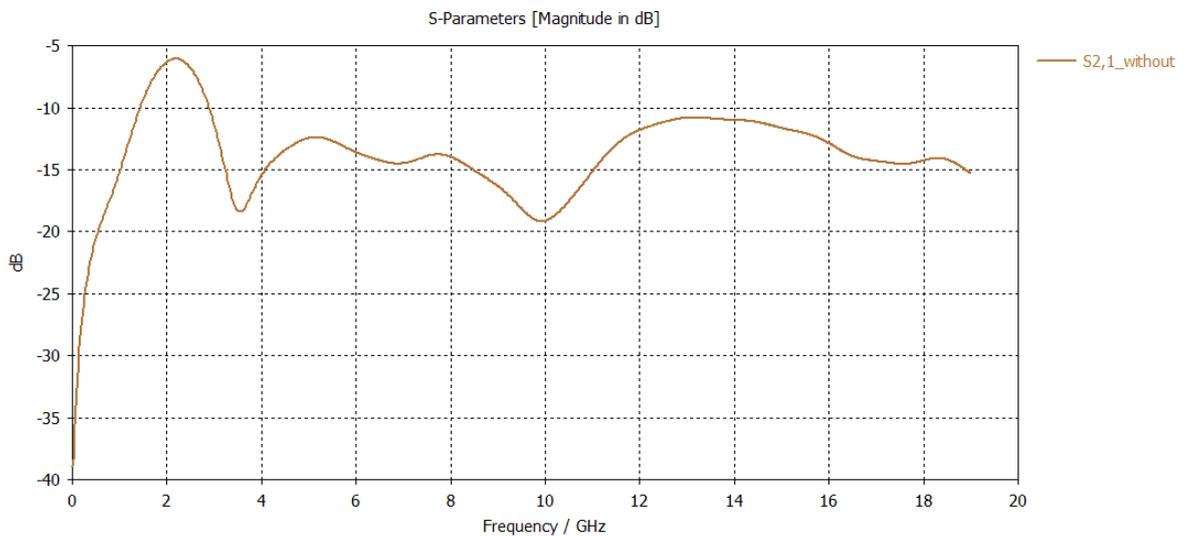


Figure 0.17 La variation de $s_{2, 1}$ (dB) en fonction de la fréquence (GHz)

La figure 3.16 illustre la variation de coefficient de réflexion $s_{1, 1}$ de la structure proposé. On remarque que cette antenne résonne avec un niveau de réflexion élevé dépasse -20 dB dans deux repense fréquentiel, [4.8 – 14] GHz, et un faible coefficient de réflexion entre eux.

La figure 3.17 représente le niveau de couplage de la structure proposé.

8. Mécanisme d'isolation de la structure proposée

Afin d'étudier le mécanisme d'isolation de notre réseau d'antenne, on doit dépasser plusieurs étapes pour améliorer la structure proposer. Donc on va faire des changements sur la géométrie d'antenne au niveau de plan de mass.

8.1. Etude sur l'amélioration de la structure proposée

1.1.8 L'effet de troncature sur le plan de mass

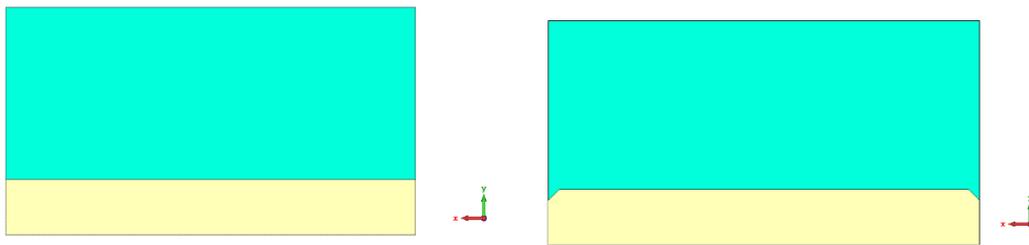


Figure 0.18 vue dessous de l'antenne : a) avant la troncature, b) après la troncature

La figure2 illustre la modification de plan de masse rectangulaire avant et après la troncature pour améliorer isolation.

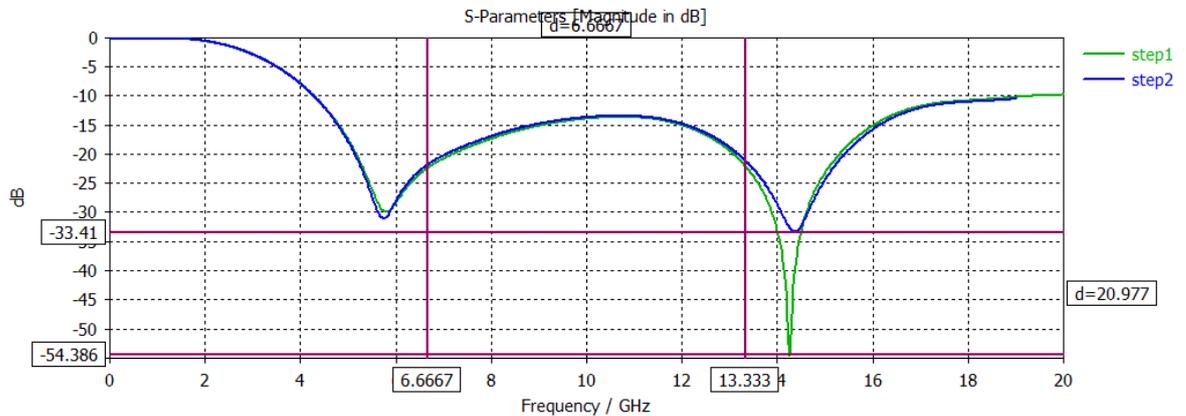


Figure 0.19 l'effet de troncature sur le 2,1 (dB)

La figure 2 montre le résultat de simulation après la troncature. Où s'est-il avéré que le coupe de plan de masse s'est améliorée l'antenne avec une déférence de - 21.977 dB.

2.1.8 L'effet de l'isolateur sur le niveau de couplage

L'isolement est maintenu entre deux ports d'entrée. Pour montrer l'efficacité du mécanisme d'isolation en dois comparer le niveau de couplage entre les deux structures d'isolation étapes 1 et 2.

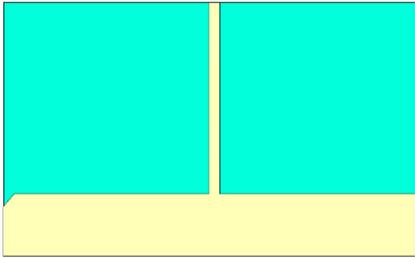
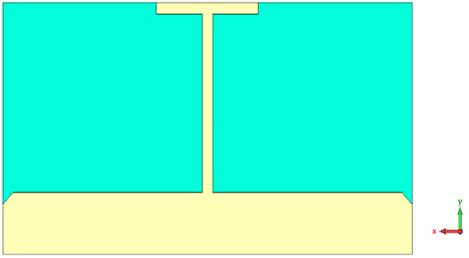
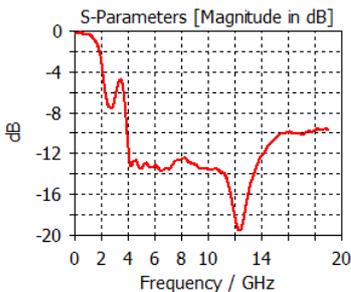
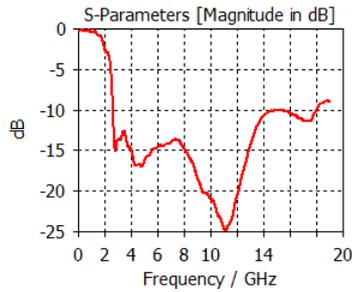
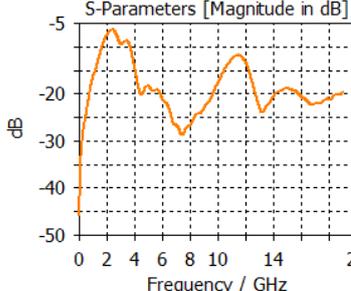
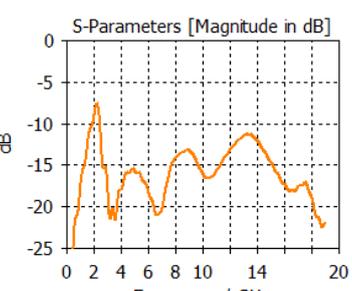
Structure	 <p style="text-align: center;">Etape 1</p>	 <p style="text-align: center;">Etape 2</p>
Coefficient de réflexion $s_{1,1}$ en dB		
Niveau d'isolation en dB		

Tableau 7 effet de mécanisme d'isolation

Le tableau montre la configuration de l'antenne en mode vue dessous compris sans/avec caractéristiques d'isolateur.

On voit une amélioration relative au niveau de $s_{1,1}$ et $s_{2,1}$ dans l'étape 2, ce qui signifie le bon effet de l'isolateur entre élément.

8.2. Etude Dimension de la structure avec mécanisme d'isolation optimisé

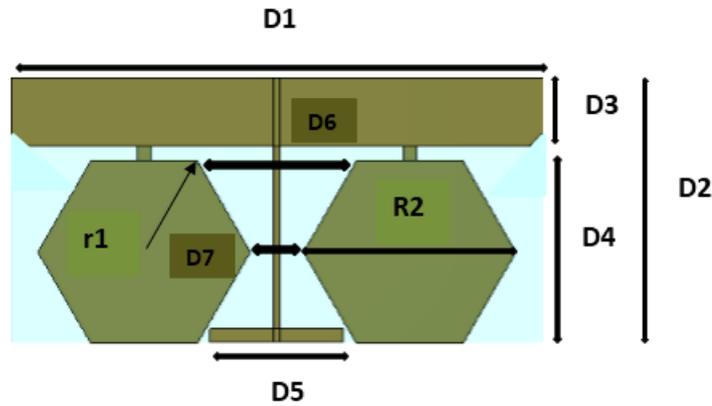


Figure 0.20 Vue de face sur les dimensions de la conception d'antenne proposée

Paramètre	Mm	Paramètre	Mm	Paramètre	Mm
D1	40	D4	14.8	D7	4
D2	20	D5	10	r1	16/2
D3	4.15	D6	12	R2	16

Tableau 8 Paramètres optimisés de l'antenne à double isolation

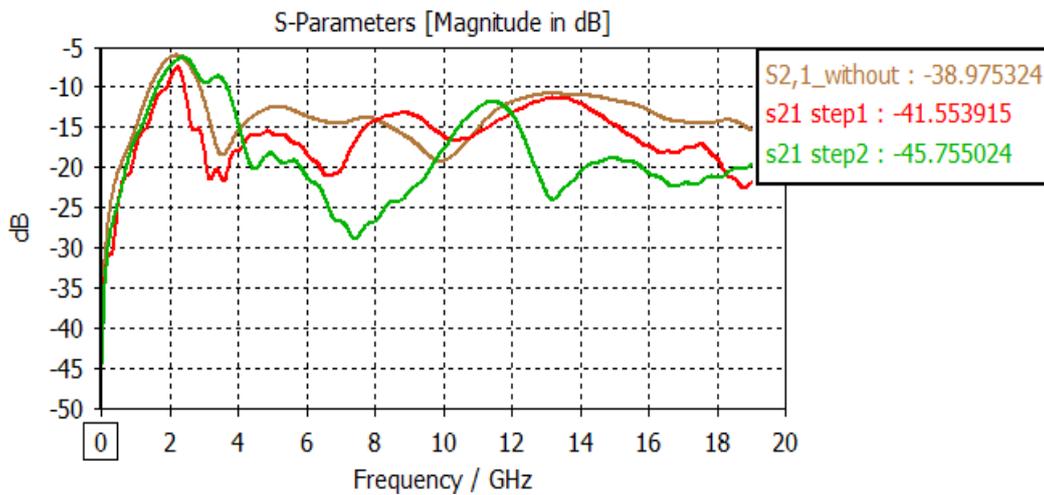


Figure 0.21 l'effet de l'isolation des (porter d'alimentations et les éléments rayonnants) individuellement et ensemble sur le 2,1 (dB)

La figure illustre le changement de niveau d'isolation en dB travers l'amélioration de mécanisme d'isolation en 3 étapes suivant :

- Etape 1 : le $s_{2,1}$ égale a (-38.975 dB).
- Etape 2 : le $s_{2,1}$ est élevé (-40.553 dB), on voit une amélioration.
- Etape 3 : le $s_{2,1}$ est plus élevé (-45.755 dB) une exilant amélioration.

D'après la comparaison des résultats, on constate que l'isolation des portes d'alimentation avec l'isolation des éléments rayonnants optimise les performances de l'antenne ou le $s_{2,1}$ augmente.

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudiés les caractéristiques d'une antenne patch en présentant les avantages et les inconvénients après la simulation. Nous avons aussi traité (les différentes techniques d'alimentation, conception, dimensionnements...).

Nous avons ensuite réalisé la mise en réseau d'antenne avec deux forme différente (rectangulaire, hexagonale) afin étudier les effets de (Effet du positionnement de point d'alimentation sur l'adaptation de l'antenne, dimension géométrique, nombres d'éléments rayonnants...), et voir leurs influence et performance sur le coefficient de réflexion $s_{1,1}$ et le niveau de couplage $s_{2,1}$, configuration et reconfiguration de diagramme de rayonnement en fonction de la repense fréquentiel. Et comparer les résultats obtenus pour choisir la meilleure structure qui présente une adaptation à 3.5 GHz, un découplage entre les éléments rayonnants, un débit de gain plus élevé...

Dans la dernière partie, on a analysé l'étude faite sur la structure proposée avec le mécanisme d'isolation, ou nous avons constaté que le système d'isolation inter-éléments rayonnants et le port d'alimentation garantie une isolation plus élevée.

Conclusion générale

Le domaine de communications numérique sans fils très haut débit dans un contexte de forte mobilité est toujours un domaine de recherche très actif visant à développer des solutions de connectivité sans coupure et offrant une très bonne qualité de service. Donc L'ambition première a été de proposer une nouvelle technique de commutation de faisceau d'un réseau planaire d'antennes afin de satisfaire les besoins des exigences du standard 5G. L'intérêt principal de cette étude est l'optimisation et la caractérisation de réseaux d'antennes reconfigurables en diagramme.

Le premier chapitre est centré par une généralité sur la 5^{ème} génération et Les systèmes de communications mobiles de 5G avec leur besoin de services. Ensuite nous avons attachés à présenter les différentes exigences du nouveau standard 5G. Pour tenter de répondre à ces exigences, nous avons montré les différentes technologies sur lesquelles devront s'appuyer ce nouveau standard, présenter quelque solution tel que la technologie Massive MIMO qui est liées aux augmentations du débit et de l'efficacité spectrale, aussi Small Cells, Réseau ultra Denses.

Dans le chapitre 2, nous avons intéressé par les réseaux d'antenne reconfigurables en diagramme de rayonnement avec différente méthodes. Une étude théorique sur le modèle de l'antenne (patch, reconfigurable) avec leur caractéristique de rationnement. Puis une analyse sur les architectures des réseaux linéaire, planaire et circulaire a été présenté.

Dans le troisième chapitre, Les résultats simulés avec cst Microwave studio qui se base sur la mise en réseau d'antenne avec différente forme d'éléments rayonnants afin de montrer la relation directe entre le nombre d'élément sur l'augmentation gain en dB sur la bande de fréquence de résonance. Une étude comparative sur les différents types d'alimentation a été menée sur des antennes planaires de la forme de rectangulaire, puis la forme hexagonale. Les résultats obtenus par ce changement présentent une évolution sur le niveau de coefficient de réflexion en dB. Ensuite nous avons amélioré la structure de notre réseau afin de minimiser le coefficient de

couplage et réduire la taille d'antenne réseau d'antenne. Ceci est démontré par une étude détaillée sur l'effet de la nouvelle géométrie sur (le gain, l'espacement couplage inter-éléments sur le couplage, l'isolation...). Très forte augmentation au niveau de gain est assurée lors un nombre plus élevé d'éléments.

Le mécanisme d'isolation proposé a été simulé sur la structure proposée, avec une étude sur l'effet de la troncature de plan de masse sur les performances d'adaptation et de rayonnement, avec ce système d'isolation des portes et les éléments rayonnants une très forte isolation est assurée.

De ces résultats, l'évaluation des antennes réseaux optimisés permet d'estimer le potentiel théorique et la capacité de ce type d'antenne d'offrir des performances optimales pour la 5G.

A la suite de cette étude et puisque les résonances dépendent de la taille et de la forme des structures, nous proposons évaluations de la sensibilité des antennes aux imprécisions des procédés de de prototypage et de fabrication. Les principaux défauts qui peuvent être attendus à chaque étape de la fabrication doivent être modélisés et étudiés.

ملخص:

يتكون هذا العمل من دراسة الشبكة الخلوية من الجيل الخامس (5G) والتي أصبحت موضوعًا بحثيًا مثيرًا للاهتمام بشكل متزايد، وتطورها ضروري للاستجابة للنمو الهائل لحركة البيانات بجميع أشكالها. سيتعين على 5G تلبية العديد من الاحتياجات والقيود (تكلفة منخفضة، وكفاءة طيفية أفضل، وسرعات أعلى، وعدد أكبر من المستخدمين، وزمن وصول أقل، وتغطية أفضل، وما إلى ذلك). لذلك، بدأت العديد من الجهود البحثية في الظهور من أجل مواجهة تحديات مثل استخدام تقنية Massive MIMO لتحسين الكفاءة الطيفية للأنظمة واستخدام موجات المليمتر لتوسيع عرض نطاق الإرسال. تحقيق شبكة فائقة الكثافة (UDN) للحصول على تغطية أكثر كثافة وقوة أكبر للعقبات ولزيادة قدرة الشبكة.

في إطار هذه الأطروحة ركزنا على تطوير حل "الخلايا الصغيرة". لذا فإن الهدف هو تصميم وبناء شبكة صغيرة من الهوائيات تغطي النطاق [3.4-3.8 جيجا هرتز] والتي سيسمح حجمها بدمج عدة عناصر في خلية ذات حجم معقول.

كلمات المفاتيح: الجيل الخامس، الهوائي القابل لإعادة التشكيل، شبكة الهوائي.

Résumé :

Ce travail consiste à étudier le réseau cellulaire de cinquième génération (5G) qui devient un sujet de recherche de plus en plus intéressant et son évolution est nécessaire pour répondre à la croissance exponentielle du trafic de données sous toutes ses formes. La 5G devra répondre à de nombreux besoins et contraintes (coût réduit, meilleure efficacité spectrale, débits encore plus élevés, nombre d'utilisateurs encore plus grand, plus faible latence, meilleure couverture,...). Par conséquent, de nombreux efforts de recherche commencent à émerger afin de relever ces défis comme l'utilisation de la technique Massive MIMO pour améliorer l'efficacité spectrale des systèmes et l'utilisation des ondes millimétriques pour étendre la bande passante de transmission. La réalisation d'un réseau Ultra-Dense (UDN) pour obtenir une couverture plus dense, plus robuste aux obstacles et augmenter la capacité du réseau.

Dans le cadre de ce mémoire nous avons concentré sur le développement de la solution de « Small Cells ». Donc l'objectif consiste à concevoir et réaliser un petit

réseau d'antennes couvrant la bande [3,4-3,8 GHz] et dont la taille permettrait l'intégration de plusieurs éléments dans une cellule de taille raisonnable.

Mots clés : la 5^{ème} Génération, Antenne reconfigurable ; Réseau d'antenne.

Abstract :

This work consists of studying the fifth generation (5G) cellular network, which is becoming an increasingly interesting research subject and its evolution is necessary to respond to the exponential growth of data traffic in all its forms. 5G will have to meet many needs and constraints (reduced cost, better spectral efficiency, even higher speeds, even greater number of users, lower latency, better coverage, etc.). Therefore, many research efforts are starting to emerge in order to address such challenges as the use of Massive MIMO technique to improve the spectral efficiency of systems and the use of millimeter waves to extend the transmission bandwidth. The realization of an Ultra-Dense network (UDN) to obtain a denser coverage, more robust to the obstacles and to increase the capacity of the network.

Within the framework of this thesis, we have focused on the development of the "Small Cells" solution. Therefore, the objective is to design and build a small array of antennas covering the band [3.4-3.8 GHz] and whose size would allow the integration of several elements in a cell of reasonable size.

Keywords : 5th Generation, Reconfigurable Antenna; Antenna Network

Bibliographie

- [1] PULKIT GUPTA, « EVOLVEMENT OF MOBILE GENERATIONS: 1G TO 5G », INTERNATIONAL JOURNAL FOR TECHNOLOGICAL RESEARCH IN ENGINEERING, VOL. 1, NO 3, NOVEMBRE 2013 (ISSN 2347-4718, LIRE EN LIGNE [ARCHIVE][PDF]).
- [2] CHRISTOPHE LAGANE, “L’UIT DEVOILE IMT-2020, LE PETIT NOM NORMATIF DE LA 5G.” [ONLINE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.SILICON.FR](https://www.silicon.fr).
- [3] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION RADIO COMMUNICATION SECTOR (ITU-R), “FRAMEWORK AND OVERALL OBJECTIVES OF THE FUTURE DEVELOPMENT OF IMT FOR 2020 AND BEYOND,” 2015.
- [4] CHRISTOPHE LAGANE, “L’UIT DEVOILE IMT-2020, LE PETIT NOM NORMATIF DE LA 5G.” [ONLINE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.SILICON.FR](https://www.silicon.fr).
- [5] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION RADIO COMMUNICATION SECTOR (ITU-R), “FRAMEWORK AND OVERALL OBJECTIVES OF THE FUTURE DEVELOPMENT OF IMT FOR 2020 AND BEYOND,” 2015.
- [6] E. C. STRINATI AND T. CHOI, “THE FIRST 5G SYSTEM POC IN CONJUNCTION WITH THE PYEONGCHANG WINTER OLYMPICS,” 2018.
- [7] CHRISTOPHE LAGANE, “L’UIT DEVOILE IMT-2020, LE PETIT NOM NORMATIF DE LA 5G.” [ONLINE]. AVAILABLE : [HTTPS://WWW.SILICON.FR](https://www.silicon.fr).
- [8] ERFANIAN J. AND DALY B. (2015) AINSI, LORS D’UNE MANIFESTATION SPORTIVE TENUE A L’INDIANAPOLIS SPEED WAY (MAI 2017), L’OPERATEUR VIERZON ET LE FOURNISSEUR D’EQUIPEMENT ERICSSON ONT FAIT UNE DEMONSTRATION D’APPLICATION 5G. LE PILOTE D’UNE VOITURE ETAIT EQUIPE DE LUNETTES DE REALITE VIRTUELLE OU IL POUVAIT VISUALISER LA ROUTE A TRAVERS UN FLUX VIDEO 5G. TOUTES LES FENETRES DE LA VOITURE ETAIENT ENTIEREMENT RECOUVERTES DE FILM PLASTIQUE NOIR, SUPPRIMANT TOUTE VISIBILITE VERS L’EXTERIEUR. LES TEMPS DE LATENCE ETAIENT SI INFIMES QUE LE PILOTE A PU CONDUIRE SON VEHICULE SANS PROBLEME ALORS QU’AVEC LA TECHNOLOGIE 4G LA VOITURE LE RETARD VIDEO CELA AURAIT ETE IMPOSSIBLE.
- [9] VOIR AUSSI ERICSSON (2017). CE DOCUMENT MENTIONNE DE NOMBREUSES APPLICATIONS DONT : LE CONTROLE DE VEHICULES AUTOMATIQUES, LES COMMUNICATIONS D’URGENCE, L’AUTOMATISATION DES CHAINES INDUSTRIELLES, LES TRAINS A GRANDE VITESSE, LES GRANDS EVENEMENTS EN PLEIN AIR, DE NOMBREUX DISPOSITIFS GEOGRAPHIQUEMENT DISPERSES, LES MEDIAS A LA DEMANDE, LA CHIRURGIE ET LES EXAMENS MEDICAUX A DISTANCE, LES CENTRES COMMERCIAUX, LES VILLES INTELLIGENTES, LES STADES, LA TELE-PROTECTION DANS LES RESEAU SMART-GRID, LES EMBOUTEILLAGES, LA REALITE VIRTUELLE ET AUGMENTEE AINSI QUE LE HAUT DEBIT A LA MAISON. ID. A 4.

- [10] J. G. ANDREWS ET AL., "WHAT WILL 5G BE ?," VOL. 32, No. 6, PP. 1065–1082, 2014..
- [11] J. M. AND K. THOMAS, "WHAT IS MASSIVE MIMO TECHNOLOGY?" [ONLINE]. AVAILABLE: [HTTPS://5G.CO.UK/GUIDES/WHAT-IS-MASSIVE-MIMO-TECHNOLOGY/](https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/).
- [12] A. OUKACHI. BEAMFORMING ET DETECTION POUR SIGNAUX NON CIRCULAIRES.
- [13] A. ROZE "MASSIVE MIMO, UNE APPROCHE ANGULAIRE POUR LES FUTURS SYSTEMES MULTI-UTILISATEURS AUX LONGUEURS D'ONDE MILLIMETRIQUE. THESE DE DOCTORAT ELECTRONIQUE.
- [14] X. GE, S. TU, G. MAO, C. X. WANG, AND T. HAN, "5G ULTRA-DENSE CELLULAR NETWORKS," IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 23, No. 1, PP. 72–79, 2016.
- [15] H. ZHANG, Y. DONG, AND S. MEMBER, "FRONT HAULING FOR 5G LET-U ULTRA-DENSE CLOUD SMALL CELL NETWORKS," IEEE COMMUN. MAG., VOL. 23, No. 6, PP. 48–53, 2016.
- [16] R. BALDEMAIR ET AL., "ULTRA-DENSE NETWORKS IN MILLIMETER-WAVE FREQUENCIES," IEEE COMMUN. MAG., VOL. 53, No. 1, PP. 202–208, 2015. INSADE RENNES, 2016.
- [17] NAJIB FADLALLAH, « CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DE LA SYNTHÈSE DU LOBE DE RAYONNEMENT POUR UNE ANTENNE INTELLIGENTE. APPLICATION A LA CONCEPTION DE RESEAUX A DEPHASAGE », THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE LIMOGES, 2005.
- [18] ANDREE FOUQUE. « CONTRIBUTION A LA CONCEPTION D'UN RECEPTEUR MOBILE FAIBLE COUT ET FAIBLE CONSOMMATION DANS LA BANDE KU POUR LE STANDARD DVB-S », THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE BORDEAUX 1, 2012.
- [19] J. HUANG, "PRACTICAL DESIGN OF MICRO STRIP ARRAYS AND REFLECT ARRAYS", IEEE INTERNATIONAL ANTENNAS AND PROPAGATION SYMPOSIUM AND USNC/CNC/URSI NORTH AMERICAN RADIO SCIENCE MEETING, 2003.
- [20] LEILA CHOUDI, « CONTRIBUTION A L'ETUDE D'ANTENNES IMPRIMEES RECTANGULAIRES DOUBLE BANDE ET MULTI BANDES TENANT COMPTE DE L'EFFET DE COUPLAGE », MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE M'ENTOURAI-CONSTANTINE, 2009.
- [21] J. K. S. HONG, "DYNAMIC TWO-STAGE BEAM TRAINING FOR ENERGY-EFFICIENT MILLIMETER-WAVE 5G CELLULAR SYSTEMS," PP. 111–122, 2015.
- [22] D. A. MILLER, "SPATIAL CHANNELS FOR COMMUNICATING WITH WAVES BETWEEN VOLUMES." OPT. LETT., VOL. 23, No. 21, PP. 1645–1647, 1998.
- [23] D. A. MILLER, "COMMUNICATING WITH WAVES BETWEEN VOLUMES: EVALUATING ORTHOGONAL SPATIAL CHANNELS AND LIMITS ON COUPLING STRETCH'S." APPL. OPT., VOL. 39, No. 11, PP. 1681–1699, 2000.
- [24] Y. CAO, K. S. CHIN, W. CHE, W. YANG, AND E. S. LI, "A COMPACT 38 GHz MULTIBEAM ANTENNA ARRAY WITH MULTIFOLDED BUTLER MATRIX FOR 5G APPLICATIONS," IEEE ANTENNAS WIREL. PROPAG. LETT., VOL. 16, NO. C, PP. 2996–2999, 2017.

- [25] R. JANASWAMY, "EFFECT OF ELEMENT MUTUAL COUPLING ON THE CAPACITY OF FIXED LENGTH LINEAR ARRAYS," *IEEE ANTENNAS WIREL. PROPAG. LETT.*, VOL. 1, PP. 157–160, 2002.
- [26] M. DUARTE AND A. SABHARWAL, "FULL-DUPLEX WIRELESS COMMUNICATIONS USING OFF-THE-SHELF RADIOS: FEASIBILITY AND FIRST RESULTS," *CONF. REC. - ASILOMAR CONF. SIGNALS, SYST. COMPUT.*, PP. 1558–1562, 2010.
- [27] [HTTPS://COMPENG.COLUMBIA.EDU/BIGGEST-COMPONENT-FULL-DUPLEX-WI-FI-RADIO-ANTENNA](https://compeng.columbia.edu/biggest-component-full-duplex-wi-fi-radio-antenna)
- [28] A. SABHARWAL, P. SCHNITER, D. GUO, D. W. BLISS, S. RANGARAJAN, AND R. WICHMAN, "IN-BAND FULL-DUPLEX WIRELESS: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES," *IEEE J. SEL. AREAS COMMUN.*, VOL. 32, NO. 9, PP. 1637–1652, 2014.
- [29] [25] D. KIM, H. LEE, AND D. HONG, "A SURVEY OF IN-BAND FULL-DUPLEX TRANSMISSION: FROM THE PERSPECTIVE OF PHY AND