

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux de Télécommunications

Par : AYAD Zineb et DEF Nihad

Sujet

Conception et réalisation d'une antenne reconfigurable MIMO pour les applications mobiles : Test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

Soutenu publiquement, le 10 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

Mme. BELHADEF Yamina
M. BEHRI Sidi Mohammed
M. BERKAT Abdellatif

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Présidente
Examineur
Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciement

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude envers Allah pour avoir influencé notre parcours de vie.

Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à notre encadrant, Dr. BERKAT Abdellatif, pour son soutien inestimable et ses conseils précieux. Nous sommes également reconnaissants envers les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous remercions également nos belles familles, amis, collègues et tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin.

Merci.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, ceux qui m'ont appris d'apprendre de mes erreurs, à me tenir debout après chaque échec, à leur amour, leur tendresse et leurs prières tout au long de mes études. Que Allah les protège pour moi.

A mes chères sœurs : Houda, Hidayete, Fatima, mon chère frère Mohamed, et à ma précieuse amie Ahlam. Qui m'ont toujours encouragé et soutenu durant ces années d'études. Je vous aime.

A tous ceux qui m'aiment, qui m'ont aidé, qui m'ont donné espoir, et m'ont encouragé.

A mon binôme, et ma copine, avec qui j'ai partagé le chemin pour réaliser le rêve, et relever ce défi, DEF Nihad.

A moi-même.....

Merci.

ZINEB

Dédicace

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à mon très cher père : DEF Abdelhafid, Tu incarnes pour moi l'image parfaite d'un père respecté, intègre et consciencieux, et je tiens à saluer la personne remarquable que tu es. Grâce à toi, j'ai acquis la valeur du travail et de la responsabilité. Je suis reconnaissant pour ton amour, ta générosité et ta compréhension. Ton soutien a été une source de lumière tout au long de mon chemin.

A Ma merveilleuse mère : DEF Amel, qui a toujours supporté les difficultés sans m'en transmettre le poids, elle n'a jamais refusé mes demandes et a tout fait pour mon bonheur.

A Mes chers frères : Mohamed, Israee, et Abdelhak, pour leur soutien et leurs encouragements.

A ma famille entière, je vous suis reconnaissant pour votre soutien inébranlable tout au long de mon cursus universitaire. Que ce travail soit la réalisation de vos souhaits les plus chers, témoignant de votre soutien indéfectible. Votre présence constante à mes côtés est inestimable.

Merci.

NIHAD

Résumé

Les avancées des télécommunications sans fil exigent de nouvelles technologies pour améliorer la transmission et la couverture de champs. Les antennes imprimées sont utilisées comme élément de transmission et de réception sont préférées pour leur intégration facile, particulièrement les antennes dites reconfigurables qui offrent une flexibilité en ajustant leurs paramètres pour diversifier leur performance. Donc, la conception d'antennes reconfigurables pour les applications mobiles présente un défi, nécessitant une adaptation efficace sur une bande de fréquences souhaitées. Bien que la technologie MIMO soit prometteuse, elle nécessite encore des améliorations pour répondre aux besoins croissants. L'objectif du mémoire est de concevoir et réaliser une antenne MIMO reconfigurable en fréquence et en polarisation, et de le tester sous un environnement virtuel avec le logiciel Omnet++.

Mots clés : antenne reconfigurable, antenne MIMO, Omnet++, applications mobiles.

Abstract

Advancements in wireless telecommunications necessitate new technologies to enhance transmission and field coverage. Antennas printed as transmission and reception elements are preferred for their easy integration. Reconfigurable antennas, in particular, offer flexibility by adjusting their parameters for diversity in performance. Therefore, creating reconfigurable antennas for mobile applications is a challenge, requiring efficient adjustment across a desired frequency range. While MIMO technology holds promise, it still needs enhancements to meet increasing demands. The first goal of this thesis is to design a MIMO antenna that is reconfigurable in frequency and polarization. The second goal is to test it in a virtual environment using the Omnet++ software.

Key words: reconfigurable antenna, MIMO antenna, Omnet++, mobile applications.

نبذة مختصرة

يتطلب التطور الواعد في الاتصالات اللاسلكية تقنيات جديدة لتعزيز النقل السريع والتغطية الميدانية. ومن أجل هذا، يُفضل استخدام الهوائيات المطبوعة كعناصر إرسال واستقبال لسهولة ضبطها. توفر الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، على وجه الخصوص، المرونة من خلال تعديل معالماتها من أجل الحصول على تنوع في ادائها. ولذلك، فإن إنشاء هوائيات قابلة لإعادة التشكيل لتطبيقات الهاتف المحمول يمثل تحدياً وارداً، ويتطلب ضبطاً فعالاً عبر نطاق التردد يكون مطلوباً. على الرغم من أن تقنية MIMO تعد تقنية واعدة، إلا أنها لا تزال بحاجة إلى تحسينات لتلبية الطلبات المتزايدة في سوق الاتصالات. وهذا فإن الهدف الأول من هذه المذكرة هو تصميم هوائي MIMO قابل لإعادة التشكيل من حيث التردد

والاستقطاب الهدف الثاني هو اختباره في بيئة افتراضية باستخدام برنامج Omnet++. الكلمات المفتاحية: هوائي قابل لإعادة التشكيل، هوائي MIMO، ++Omnet، تطبيقات الهاتف المحمول.

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace.....	II
Dédicace.....	III
Résumé	IV
Abstract.....	IV
نبذة مختصرة	IV
Table des matières	V
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux.....	XII
Liste des abréviations	XIII
Introduction Générale	1
Chapitre I :	1
Généralités sur les antennes imprimées	1
I. Introduction	4
I.1 Historique sur les antennes imprimées.....	4
I.2 Définition de l'antenne patch	5
I.3 Les différents formes d'antennes imprimées	5
I.4 Les caractéristiques des antennes imprimées.....	6
I.4.1 L'impédance d'entrée d'une antenne	6
I.4.2 Le coefficient de réflexion (S11).....	6
I.4.3 La bande passante (BW).....	7
I.4.4 Le diagramme de rayonnement	7
I.4.5 La directivité.....	8
I.4.6 Le rendement de l'antenne	8
I.4.7 Gain d'une antenne	9
I.4.8 Polarisation d'une onde	9
I.5 Techniques d'alimentation de l'antenne patch.....	10
I.5.1 Alimentation par ligne microbande	10
I.5.2 Alimentation coaxiale direct	11
I.5.3 Alimentation par couplage électromagnétique	11

I.5.4 Alimentation couplée par ouverture dans le plan de masse	12
I.6 Réseau d'antennes imprimées	13
II. Système MIMO (Multi Input Multi Output).....	13
II.1 Architecture MIMO	14
II.1.1 Système SISO (Single Input Single Output).....	14
II.1.2 Système MISO (Multi Input Single Output).....	15
II.1.3 Système SIMO (Single Input Multi Output).....	16
II.1.4 Système MIMO.....	16
II.2 Principe de la diversité	17
II.2.1 La micro diversité	18
II.2.2 La macro diversité	18
Conclusion	18
Bibliographies	19
Chapitre II :	4
Les Antennes patch reconfigurables	4
I. Introduction	22
I.1 Définition	22
I.2 Utilisation des antennes reconfigurables	23
II. Techniques des antennes reconfigurables	23
II.1 Diode varicap.....	24
II.2 Diode PIN	25
II.3 MEMS (Système Micro électromécanique).....	26
II.4 Matériaux agiles	26
II.5 Classification des antennes reconfigurables	26
II.5.1 Antennes reconfigurables en fréquence.....	27
II.5.1.1 La modification géométrique	27
II.5.1.2 Court-circuit commutable	28
II.5.2 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement.....	28
II.5.2.1 Utilisation des diodes PIN	29
II.5.2.2 Utilisation de MEMS	30
II.5.2.3 Utilisation de photoconducteurs	30
Conclusion	30
Bibliographies	31

Chapitre III :	33
Conception d’une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l’antenne dans un environnement virtuel	33
Partie 1 : Conception et simulation	34
I. Introduction	35
I.1 Antenne de base	35
I.2 Conception de l’antenne unitaire	37
I.2.1 Première configuration	37
I.2.2 Deuxième configuration	38
I.2.3 Troisième configuration	39
I.2.4 Distribution de courant	42
I.3 Performances des trois configurations de l’antenne	43
II. Réalisation et mesure	43
II.1 ECC (Enveloppe Correlation Coefficient)	49
Partie 2 : Test des performances de l’antenne dans un environnement virtuel	22
IV.1 Introduction	52
IV.2 Topologie Adhoc	52
IV.3 Topologie Infrastructure	57
IV.4 Conclusion et perspectives	60
Bibliographies	62
Conclusion Générale	63
Annexe	63
Annexe de CST	65
I. Présentation du logiciel CST Microwave Studio	65
II. Description générale des outils CST	67
Annexe d’OMNET++	68
I. Présentation d’OMNET++ (Objective Modular Network Testbed in C++)	68
II. Structure d’OMNET++	68
III. Les principaux fichiers d’OMNET++	69
Bibliographies	71

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure I.1 :	Structure d'une antenne imprimée	05
Figure I.2 :	Types d'éléments rayonnants	06
Figure I.3 :	Exemple de diagramme de rayonnement d'antenne patch rectangulaire	07
Figure I.4 :	Différents types de polarisation d'une antenne	10
Figure I.5 :	Alimentation par ligne microbande	11
Figure I.6 :	Alimentation coaxiale direct	11
Figure I.7 :	Alimentation par proximité	12
Figure I.8 :	Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse	12
Figure I.9 :	Principe de MIMO	14
Figure I.10 :	Système SISO	14
Figure I.11 :	Dispositif MISO	15
Figure I.12 :	Système MISO	16
Figure I.13 :	Dispositif MIMO	17

Chapitre 2 :

Figure II.1 :	Les techniques des antennes reconfigurables	24
Figure II.2 :	Diode varicap	24
Figure II.3 :	Circuit équivalent d'une diode varicap	24
Figure II.4 :	Diode PIN	25
Figure II.5 :	Modèle de la diode en cst	25

Figure II.6 : MEMS (Système Micro électromécanique)	26
Figure II.7 : Antenne bi-bande reconfigurable en fréquence à l'aide d'un varactor	27
Figure II.8 : Antenne fractale reconfigurable en fréquence des commutateurs RF MEMS	28
Figure II.9 : Exemple d'antenne patch à courts-circuits commutables	28
Figure II.10 : Antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation RF	29
Figure II.11 : Diagrammes de rayonnement à 3.5GHz selon les trois modes de configuration.....	29
Figure II.12 : Photographie de l'antenne dipôle commutée	30

Chapitre 3 :

Figure III.1 : Le modèle d'antenne de base publié dans réf. [III.4]	35
Figure III.2 : Le coefficient de réflexion de l'antenne de réf. [III.4]	36
Figure III.3 : Le diagramme de rayonnement de l'antenne de ref. [III.4]	36
Figure III.4 : L'antenne unitaire conçu pour la bande 2.6 GHz sous CST MicroWave ;(a) modèle primaire (b) modèle finale de première configuration	37
Figure III.5 : Le coefficients de réflexion S11 d'antenne unitaire de la première configuration..	37
Figure III.6 : Le diagramme de rayonnement ; 3D et polaire pour la fréquence 2.6 GHz.....	38
Figure III.7 : L'antenne unitaire conçu pour la bande 2.4 GHz sous CST MicroWave ;(a) modèle primaire (b) modèle finale de la deuxième configuration.....	38
Figure III.8 : Le coefficients de réflexion S11 d'antenne unitaire de la deuxième configuration.....	39
Figure III.9 : Le diagramme de rayonnement ; 3D et polaire pour la fréquence 2.4 GHz.....	39
Figure III.10 : L'antenne unitaire conçu pour la bande 5.8 GHz sous CST MicroWave ;(a) modèle primaire (b) modèle finale de troisième configuration	39

Figure III.11 : Le coefficients de réflexion S11 d'antenne unitaire de la troisième configuration.....	40
Figure III.12 : (a), (b), (c) et (d) Le diagramme de rayonnement 3D et polaire ; pour la fréquence 2.3 GHz et 5.8 GHz, respectivement.....	40
Figure III.13 : Le rapport axial de modèle finale.....	41
Figure III.14 : Le coefficient de réflexion S11 des modèles d'antenne 1 ,2 et modèle finale...	41
Figure III.15 : Le VSWR les trois configurations conçus sous CST MicroWave.....	42
Figure III.16 : La distribution de courant de l'antenne finale dans différentes bandes.....	42
Figure III.17 : Photographie de l'antenne unitaire réalisée ; (a) vue de face (b) vue de dessous (c) l'antenne en mesure (d) le coefficient de réflexion S11 mesuré.....	44
Figure III.18 : Comparaison de coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne unitaire.....	45
Figure III.19 : Photographie de l'antenne MIMO 1X2 réalisée ; (a) vue de face ; (b) vue de dessous (c) l'antenne sous mesure ; (d) les paramètres S mesurés.....	46
Figure III.20 : Les paramètres S11 et S22 de l'antenne MIMO 1X2, simulation et mesure.....	47
Figure III.21 : Les paramètres S12 et S21 de l'antenne MIMO simulé et mesuré.....	47
Figure III.22 : Le VSWR de l'antenne MIMO simulé et mesuré ; (a), (b) capture d'écran des résultats de mesure et (c) comparaison entre et résultats de simulation et l'autre de mesure..	48
Figure III.23 : (a), (b), (c) et (d) Le diagramme de rayonnement de l'antenne MIMO 1x2 ; 3D et polaire pour la fréquence 5 GHz.....	49
Figure III.24 : Le rapport d'enveloppe corrélation coefficient (ECC).....	49
Figure III.25 : Coefficient de réflexion S11 de l'antenne sous test.....	52
Figure III.26 (a) et (b) : Topologie Adhoc de réseau de test ; (a) envoi des données(b) Mouvement des hosts.....	53
Figure III.27 : Code source de la topologie Adhoc.....	54

Figure III.28 : Scenario de communication de hosts avec une topologie Adhoc.....	55
Figure III.29 : Débit reçue et envoyer par le périphérique réseau B.....	55
Figure III.30 : Puissance de transmission d'host B.....	56
Figure III.31 : Consommation d'Energie en fonction de la durée d'exécution.....	56
Figure III.32 : Retransmission des données à t=17s.....	57
Figure III.33 (a) (b) (c) : Topologies Infrastructure.....	57
Figure III.34 : Code source de la topologie infrastructure.....	58
Figure III.35 : Scenario de communication de hosts avec la topologie infrastructure.....	59
Figure III.36 : Coupure des communications lors de mouvement d'host.....	59
Figure III.37 : Attachement d'host avec les modems ap1 et ap2.....	60
Figure III.38 : Architecture Indoor d'une entreprise.....	61

Annexe :

Figure IV.1 : Création d'un nouveau projet.....	65
Figure IV.2 : Choix du type et l'environnement de simulation.....	66
Figure IV.3 : Le choix du type d'antenne et le domaine de résolution.....	66
Figure IV.4 : Le choix des unités et la gamme de fréquence d'étude.....	66
Figure IV.5 : Fin de la création de nouveau projet.....	67
Figure IV.6 : L'interface du logiciel CST MWS.....	67
Figure IV.7 : Architecture modulaire d'OMNET++.....	68
Figure IV.8 : Fichier NED en mode graphique.....	70
Figure IV.9 : Fichier NED en mode texte.....	70

Liste des tableaux

Chapitre 3 :

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne de ref. [III.4].....	36
Tableau III.2 : Performances des trois configurations.....	43
Tableau III.3 : Comparaison des performances de l'antenne conçu avec d'autre travaux publiés dans la littérature.....	50

Liste des abréviations

3G	Troisième Génération.
4G	Quatrième Génération.
5G	Cinquième Génération.
MIMO	Multiple Input Multiple Output.
MISO	Multiple Input Single Output.
SIMO	Single Input Multiple Output.
SISO	Single Input Single Output.
MSA	Microstrip Antenna.
CST	Computer Simulation Technology.
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems.
RF-MEMS	Microsystèmes radiofréquences.
ECC	Enveloppe Corrélation Coefficient.
PIN	Positive Intrinsic Negative.
Wi-Fi	Wireless Fidelity.
BW	Bandwidth.
OMNET++	Objective Modular Network Testbed in C++.
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio.

Introduction Générale:

Introduction Générale

Les progrès rapides des télécommunications sans fil touchent tous les aspects de la vie quotidienne. Cette avancée remarquable nécessite l'adoption de nouvelles technologies pour améliorer les performances de transmission, étendre la couverture, améliorer la qualité de service et accroître le nombre d'utilisateurs. Les antennes imprimées sont privilégiées dans ces systèmes pour leur intégration facile dans les petits appareils de communication tels que les téléphones portables et les tablettes, grâce à leur légèreté, leur faible coût et leur adaptabilité. Pour surmonter les limitations des antennes imprimées traditionnelles, plusieurs techniques sont employées, dont les antennes reconfigurables et les techniques de diversité MIMO.

Les antennes reconfigurables, apparues pour la première fois en 1998, élargissent les fonctionnalités des antennes traditionnelles en permettant des modifications de configuration selon les besoins. Cette reconfiguration est réalisée en distribuant les courants ou les champs électromagnétiques dans la surface de l'élément rayonnant de l'antenne, entraînant ainsi des changements réversibles dans son impédance et/ou ses propriétés de fonctionnement. Cette approche offre des avantages significatifs en termes de compacité et de flexibilité. Les antennes reconfigurables s'adaptent à leur environnement radio en ajustant un ou plusieurs de leurs paramètres, tels que la fréquence de résonance, la bande passante, le diagramme de rayonnement ou la polarisation. La conception d'antennes multi-bandes pour applications sans fil de nouvelle génération représente un défi particulièrement ardu. Ces antennes doivent garantir une adaptation efficace sur une bande choisie en préalable de fréquences, un gain acceptable, des diagrammes de rayonnement quasi stables et des polarisation circulaire ou diversifié [I.1] [I.2].

La technologie des multi entrées, multi sorties (MIMO) est un sujet d'actualité car elle permet d'augmenter la capacité des systèmes sans fil en augmentant le nombre d'antennes. Malgré les avantages offerts par ces nouvelles technologies, elles demeurent insuffisantes pour répondre aux exigences croissantes. Afin de trouver une solution plus satisfaisante, nous envisageons de concevoir une antenne MIMO reconfigurable en fréquence et en polarisation. C'est dans cette optique que nous aborderons ce sujet.

Introduction Générale:

L'objectif de ce mémoire est d'explorer et de développer une antenne reconfigurable MIMO (1×2), en fréquence et en polarisation, en utilisant le simulateur électromagnétique CST Microwave Studio version 2019, de la valider expérimentalement et le tester sous un environnement virtuel à l'aide de logiciel Omnet++.

Chapitre I :

Généralités sur les antennes imprimées

I. Introduction

Les télécommunications ont connu un développement majeur, marqué par la réduction de la taille des antennes et la facilité accrue de déplacement des contrôles, des commandes à distance et des systèmes de réception. Cette avancée a ouvert de larges perspectives pour l'utilisation des antennes imprimées, l'intégration des techniques de reconfigurabilité des antennes pour la diversité des performances de l'antenne, et l'adoption des systèmes multi-antenne pour améliorer le gain généralement et le débit en particulier. La majorité des technologies (Wifi, 2G,3G,4G,5G...etc.) exploitent les antennes imprimées, sachant que ces technologies possèdent ses propres caractéristiques qui repends à une application spécifique.

Les antennes sont le composant noyau indispensable dans les communications radio. Les avancées technologiques visent à rendre ces composants plus performants tout en préservant leur capacité d'intégrités dans les petits les systèmes d'émission-réception (téléphone portable...etc.). Dernièrement, de nombreux types d'antennes imprimées ont émergés, avec diverses techniques d'alimentation pour améliorer leurs performances destinées à différents domaines d'utilisation (télécommunication, biomédicale, surveillances...etc.). Des nombreux travaux de recherches publiés sont réalisés pour répondre à ces besoins.

Ce chapitre aborde un aperçu général sur les antennes imprimés, tel que les types de ces dernier les caractéristiques et les performances ainsi que les concepts fondamentaux du MIMO. Il débute un historique et d'une définition des antennes imprimées, en détaillant leurs caractéristiques, avantages et inconvénients, nous explorons les différentes techniques d'alimentation, en présentant le MIMO et leurs points forts. Une conclusion succincte pour clôturer le chapitre [I.1].

I.1 Historique sur les antennes imprimées

L'antenne imprimée (MSA : Microstrip Antenna), également connue sous le nom d'antenne patch, est un type d'antenne relativement récent dont l'utilisation et le développement sont de plus en plus répandus. Les premières mentions remontent à 1953 avec DESCHAMPS et en 1955 avec le dépôt d'un brevet français par GUTTON et BAISSINOT [I.1]. Les premières réalisations concrètes datent de 1970 avec Howell et MUNSON. Ce développement

remarquable des structures imprimées est étroitement lié aux avancées significatives réalisées dans les années 80 en matière de miniaturisation, d'intégration des circuits électroniques et surtout de substrats diélectriques. Il est important de noter que ces antennes présentent des avantages tels qu'un faible poids, un encombrement réduit, un coût de revient bas et une configuration plane compatible avec les circuits intégrés [I.4].

I.2 Définition de l'antenne patch

Une antenne de type patch est composée d'une surface métallique émettrice ou l'élément rayonnant fabriqué en cuivre ou en or située sur un côté du substrat diélectrique et d'autre surface présente le plan de masse situé de l'autre côté [I.1].

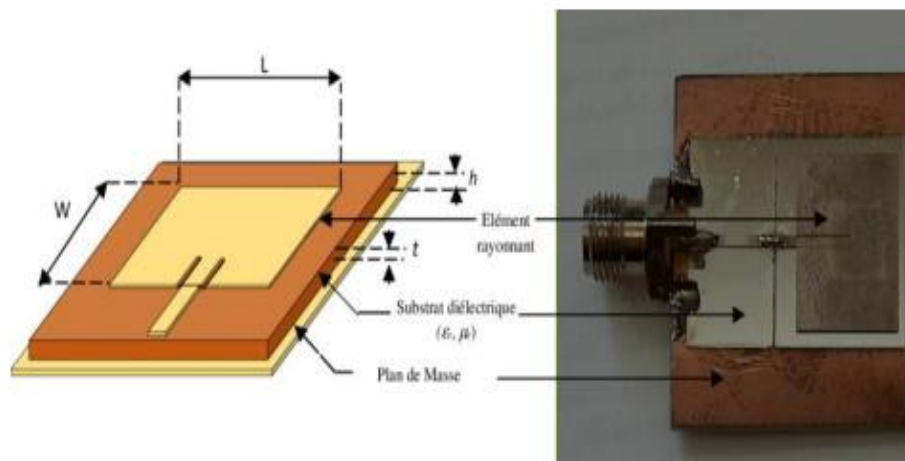


Figure I.1 : Structure d'une antenne imprimée. [I.1]

Le substrat utilisé dans les antennes imprimées est choisi en fonction de sa permittivité relative ($1 < \epsilon_r < 12$) et de son épaisseur [I.1] et dépend aux performances envisagées de l'antenne en question.

I.3 Les différents formes d'antennes imprimées

L'élément rayonnant peut prendre plusieurs formes, telles que des disques, des rectangles, et même des anneaux ou des triangles, comme illustré dans la (Figure I.2). Ces formes sont les plus répandues en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication [I.5] [I.6].

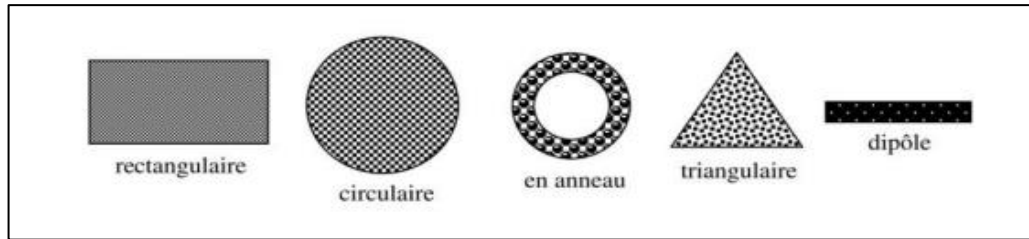


Figure I.2 : Types d'éléments rayonnants. [I.1]

I.4 Les caractéristiques des antennes imprimées

I.4.1 L'impédance d'entrée d'une antenne

Lorsqu'on émet, selon la théorie des circuits linéaires, l'antenne peut être simplifiée en un dipôle avec une impédance d'entrée complexe qui interagit avec la sortie du circuit émetteur, modélisée par une source ayant une impédance interne Z_e . Cette impédance peut être exprimée comme :

$$Z_e = R_e + jX_e \quad (I.1)$$

Où :

Z_e représente l'impédance aux extrémités de l'antenne.

R_e sa résistance.

X_e sa réactance.

La partie réelle de R_e quantifie la puissance rayonnée et les pertes structurales (effet Joule, onde de surface, etc.), tandis que la partie imaginaire, X_e , représente la puissance stockée dans le champ proche de l'antenne [I.7].

I.4.2 Le coefficient de réflexion (S_{11})

Une antenne est considérée adaptée lorsque son impédance d'entrée (Z_e) est égale à l'impédance de la ligne d'alimentation (Z_c). Autrement, un coefficient de réflexion (s_{11}) apparaît [I.1].

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (I.2)$$

Γ peut être exprimé en décibels (dB) :

$$S_{11}(dB) = 20 \log(|\Gamma|) \quad (I.3)$$

I.4.3 La bande passante (BW)

La bande passante de l'antenne représente la plage de fréquences utilisable pour émettre ou recevoir un signal avec une efficacité minimale de 50%. Elle est plus large lorsque le gain de l'antenne est élevé [I.3].

Il est généralement calculé en pourcentage comme suit :

$$Bw(\%) = \left(\frac{\Delta F}{f_c} \right) \times 100 \quad (I.4)$$

Où :

ΔF : représente la différence entre la fréquence maximale et minimale autorisée dans la bande de fréquences.

f_c : la fréquence centrale de l'intervalle $[f_{min}, f_{max}]$.

I.4.4 Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne illustre les variations de la puissance émise par unité d'angle solide dans différentes directions de l'espace. Généralement, une direction de rayonnement maximale concentre la majeure partie de la puissance émise, avec des directions secondaires où une fraction moindre de la puissance est répartie. La fonction de rayonnement caractéristique (θ, ϕ) de l'antenne offre une vue d'ensemble du rayonnement, définie comme le rapport de la puissance émise dans une direction spécifique (θ, ϕ) à la puissance maximale P_{max} dans la direction principale de rayonnement [I.8].

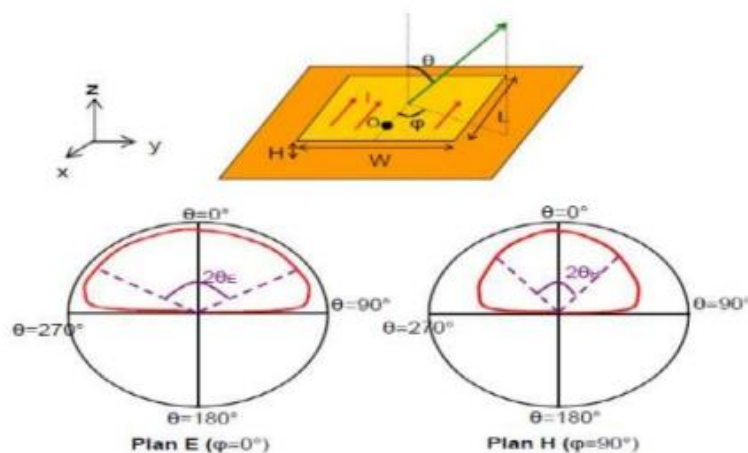


Figure I.3 : Diagramme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire. [I.8]

La fonction de rayonnement caractéristique, notée $r(\theta, \phi)$ est définie de la manière suivante :

$$r(\theta, \phi) = \frac{p(\theta, \phi)}{P_0(\theta, \phi)} \quad (1.5)$$

Avec :

$P(\theta, \phi)$ représente la puissance émise dans une direction spécifique.

$P_0(\theta, \phi)$ indique la puissance maximale émise.

1.4.5 La directivité

La directivité $D(\theta, \phi)$ d'une antenne décrit comment elle focalise le rayonnement dans des directions spécifiques de l'espace c'est-à-dire le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction spécifique $P(\theta, \phi)$ et celle qu'émettrait une antenne isotrope [1.3] [1.9].

Elle est représentée par :

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{p(\theta, \phi)}{P_r} \quad (1.6)$$

Dans cette équation :

$P(\theta, \phi)$: représente la puissance émise par l'antenne dans une direction particulière.

P_r : désigne la puissance totale émise.

1.4.6 Le rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne est exprimé comme le rapport entre la puissance rayonnée efficace, et la puissance d'entrée à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \quad (1.7)$$

Ce rapport représente la quantité de perte interne de l'antenne [1.9].

I.4.7 Gain d'une antenne

Le gain est le ratio entre la puissance émise dans une direction donnée et celle émise par une antenne isotrope sans perte [I.8].

Il est mesuré en décibels (dB) selon l'équation suivante :

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_a} \quad (I.8)$$

Avec :

$P(\theta, \phi)$: représente la puissance rayonnée dans une direction particulière.

P_a : désigne la puissance totale rayonnée par l'antenne.

I.4.8 Polarisation d'une onde

La polarisation d'une onde est essentielle pour l'analyse des antennes car elle détermine la forme de polarisation qu'elles peuvent recevoir en fonction de leur conception. Si la polarisation de l'antenne de réception ne correspond pas à celle de l'antenne d'émission, la puissance reçue ne sera pas maximale [I.10].

$$P = A_x \cos(\omega t + \phi_x) + A_y \cos(\omega t + \phi_y) \quad (I.9)$$

Où (P) est le champ électrique polarisé, (A_x) et (A_y) sont les amplitudes des composantes (x) et (y) de la polarisation, (ω) est la fréquence angulaire, (t) est le temps, (ϕ_x) et (ϕ_y) sont les phases respectives des composantes (x) et (y).

L'antenne est polarisée selon la polarisation de l'onde rayonnée dans une direction donnée.

L'onde EM peut se propager de trois façons distinctes [I.13] :

- Lorsque le vecteur champ électrique suit une ligne, on parle de polarisation linéaire.
- Si le vecteur champ électrique maintient sa longueur constante mais tourne en cercle, on parle de polarisation circulaire.

- Si le vecteur champ électrique change mais tourne en cercle, dans ce cas la polarisation est elliptique.

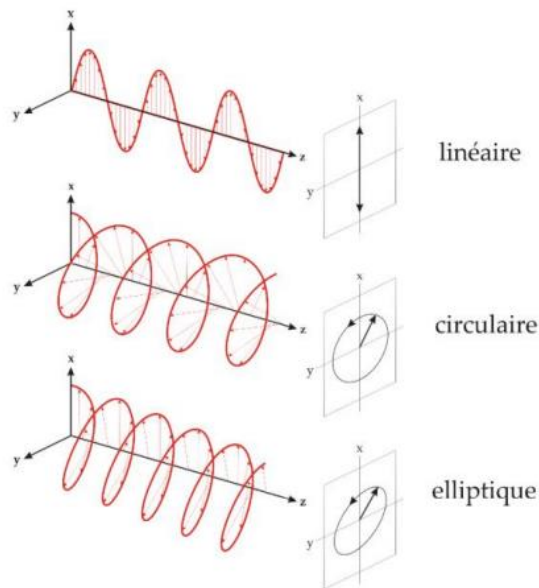


Figure I.4 : Différents types de polarisation d'une antenne. [I.13]

I.5 Techniques d'alimentation de l'antenne patch

L'alimentation de l'antenne est déterminée par son intégration dans le dispositif, et la technique d'alimentation requiert une expertise poussée ainsi qu'une analyse approfondie pour prévenir tout problème potentiel qui pourrait compromettre les performances de l'antenne [I.5].

I.5.1 Alimentation par ligne microbande

Il s'agit de la technique d'alimentation la plus basique et la plus élémentaire. Dans cette configuration, la ligne micro-ruban et l'élément rayonnant sont imprimés sur la même surface du substrat diélectrique (Figure I.5). Cependant, cette méthode présente l'inconvénient de provoquer un rayonnement parasite qui peut perturber le diagramme de rayonnement [I.5].

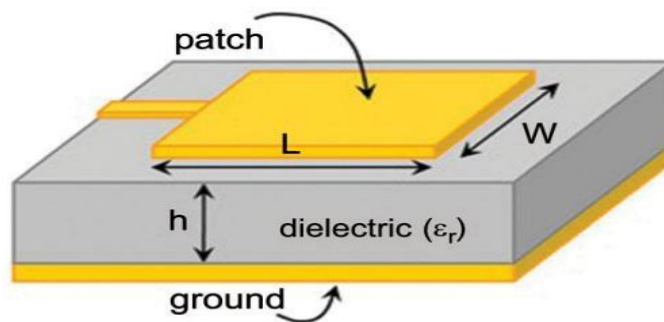


Figure I.5 : Alimentation par ligne microbande. [I.1]

I.5.2 Alimentation coaxiale direct

Elle consiste à connecter directement une ligne coaxiale au point situé sur l'axe de symétrie de l'élément de l'antenne, avec une distance spécifique par rapport au bord de l'antenne pour adapter les impédances. Cette méthode présente l'avantage de permettre une alimentation à n'importe quel point choisi à l'intérieur du patch, ce qui facilite sa fabrication. [I.1].

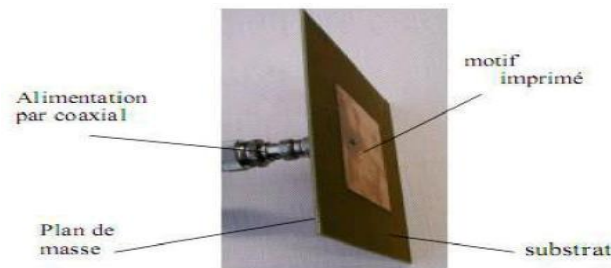


Figure I.6 : Alimentation coaxiale direct. [I.1]

Comme inconvénient de cette technique c'est que la connexion entre le connecteur et le patch génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant, pouvant entraîner une asymétrie dans le diagramme de rayonnement.

I.5.3 Alimentation par couplage électromagnétique

Dans cette technique, l'antenne est composée de deux substrats diélectriques, entre lesquels se trouve la ligne d'alimentation. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur (figure I.7). L'excitation se produit par couplage électromagnétique.

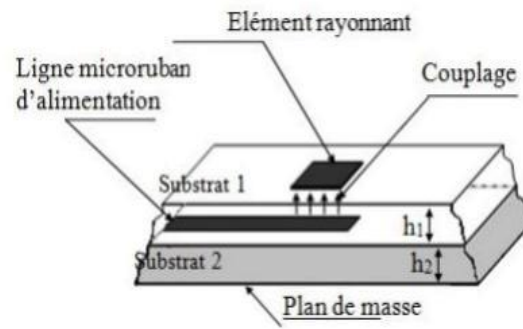


Figure I.7 : Alimentation par proximité. [I.11]

L'avantage de cette méthode est qu'elle améliore la bande passante, mais sa mise en œuvre est difficile [I.11].

I.5.4 Alimentation couplée par ouverture dans le plan de masse

Cette technique rassemble à la précédente, l'alimentation par couplage électromagnétique dans la multicouche ou double substrat. L'élément rayonnant et la ligne micro-ruban d'alimentation sont disposés de part et d'autre du plan de masse, avec une fente de couplage intégrée dans ce dernier pour permettre le transfert d'énergie entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant (figure I.8). Ses avantages incluent une isolation efficace du circuit d'alimentation grâce au plan de masse, réduisant ainsi les rayonnements parasites, qui se situent en dessous du plan de masse et ne perturbent pas la direction de propagation. Toutefois, elle présente quelques inconvénients, notamment une bande passante limitée. En outre, sa mise en œuvre est considérée comme complexe [I.12].

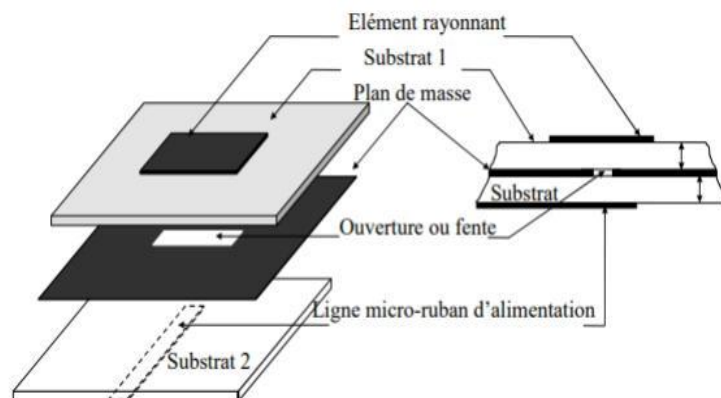


Figure I.8 : Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse. [I.12]

I.6 Réseau d'antennes imprimées

Afin obtenir des caractéristiques spécifiques telles qu'un gain élevé et la forme de lobe principal, il est généralement nécessaire de regrouper plusieurs sources rayonnantes pour former un système multi-antennaire. Ce réseau, composé d'antennes patch élémentaires réparties dans un espace planes ou courbes généralement, est contrôlé par un ou plusieurs dispositifs d'alimentation qui ajuste les amplitudes et les phases relatives des différentes sources. Au cours des dernières décennies, l'utilisation des réseaux d'antennes imprimées a considérablement évolué en raison de plusieurs avantages. Les éléments imprimés se prêtent bien à la création de réseaux comprenant plusieurs dizaines voire centaines d'éléments, pour diverses raisons [I.1] :

- ❖ Leur taille compatible et leur simplicité de fabrication facilitent leur intégration.
- ❖ Un poids léger et un profil fin.
- ❖ La possibilité de créer des antennes à double bande.
- ❖ Multi-bandes et à double polarisation (circulaire et linéaire).
- ❖ Ils peuvent être imprimés sur des surfaces planes ou courbes.
- ❖ Il est possible de placer les éléments rayonnants et le connecteur d'alimentation de chaque côté d'un plan de masse commun, ce qui permet de concevoir une structure compacte, légère et économique.

Cependant, elles présentent également des limites telles que :

- Bande passante relativement étroite (de 5 % à 10 %).
- Un gain légèrement inférieur (de 6 dB).
- Une puissance réduite.
- Des difficultés à obtenir une pureté de polarisation élevée.
- Des pertes dues au diélectrique, au conducteur et à l'onde de surface.

II. Système MIMO (Multi Input Multi Output)

La technologie MIMO, issue des domaines des communications sans fil et des antennes intelligentes, combine les concepts de MISO (Multiple Input Single Output) et SIMO (Single Input Multiple Output). En intégrant les avantages des deux approches, le système MIMO utilise plusieurs antennes en émission et en réception pour améliorer la qualité de la

communication sans fil et augmenter considérablement le débit d'informations, sans nécessiter une augmentation de la bande passante ou de l'énergie de transmission. Les multiples antennes sont un élément clé de cette technologie, influençant non seulement les caractéristiques du canal de communication sans fil, mais aussi la conception et la disposition du système pour une performance optimale [I.14].

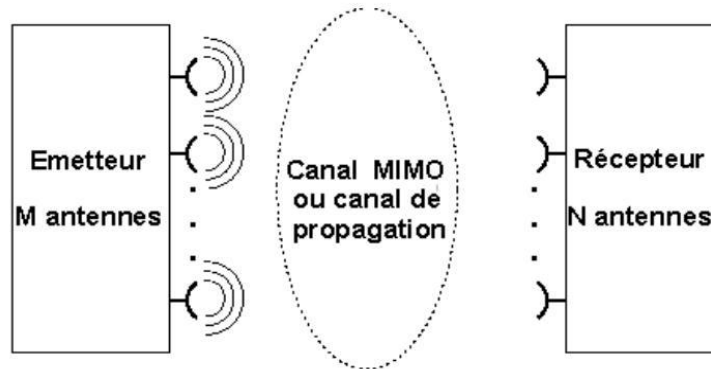


Figure I.9 : Principe de MIMO. [I.1]

II.1 Architecture MIMO

II.1.1 Système SISO (Single Input Single Output)

Une seule antenne est utilisée dans cette architecture pour l'émission et une autre pour la réception [I.15].

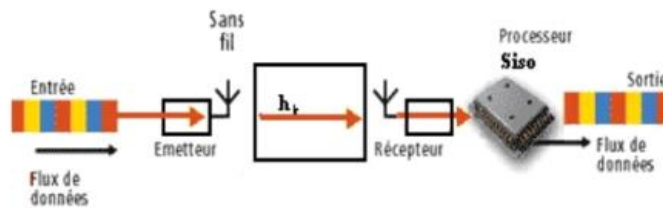


Figure I.10 : Système SISO. [I.15]

La capacité du canal SISO :

$$c = w \log_2 \left(1 + \frac{p}{N_0} w \right) \quad (I.10)$$

P : La puissance du signal utile, exprimée en (watt).

N₀ : La densité spectrale en puissance du bruit (w/Hz).

W : La bande passante données en (Hz).

En normalisant la capacité par la largeur de bande utile (w), on obtient :

$$C = \log_2 (1 + \rho). \quad (I.11)$$

II.1.2 Système MISO (Multi Input Single Output)

Système MISO, implique la transmission redondante des mêmes informations transmis à partir de deux antennes émettrices. Cela permet au récepteur de recevoir le signal optimal pour extraire les données nécessaires. L'avantage de MISO réside dans le déplacement des multiples antennes et du traitement de redondance de récepteur vers l'émetteur, ce qui peut être bénéfique en termes d'espace pour les antennes et de réduction de la charge de traitement du récepteur pour le codage de redondance, notamment dans les appareils mobiles comme les téléphones cellulaires, ce qui peut avoir un impact positif sur la taille. [I.16].

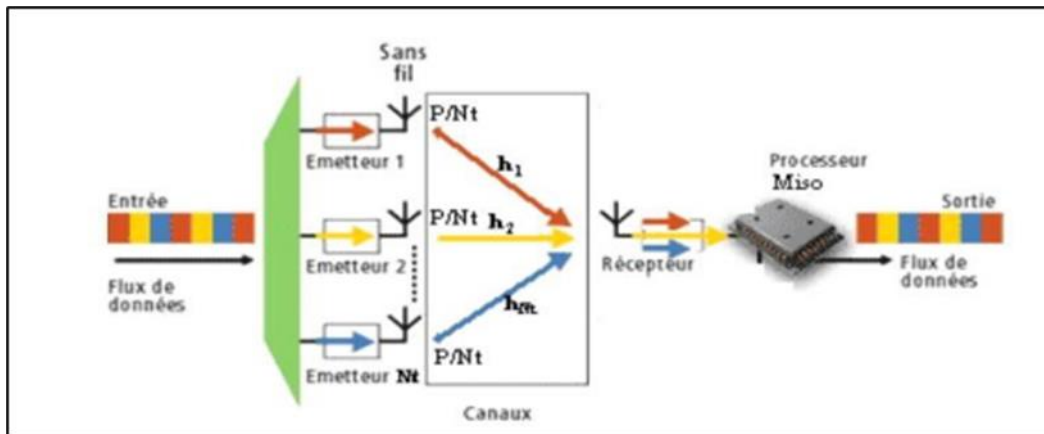


Figure I.11 : Dispositif MISO. [I.1]

Dans ce type de transmission, le signal simultanément émis par les N_t antennes est superposé et reçu. Chaque antenne émet un symbole d'énergie E_s/N_t , ce qui signifie que la puissance émise est répartie également entre les antennes selon la formule : $p = \sum p_i$.

Si P_i représente la puissance émise par chaque antenne, lorsque cette puissance est uniforme sur toutes les antennes, on peut dire que $P = N_t * P_i$ [I.15].

Tel que : N_t : Nombre total d'antennes.

P_i : Puissance émise par chaque antenne.

E_s : Energie par symbole transmis.

La capacité du canal MISO :

$$C = W \log_2 \left(1 + N_t \frac{p_i}{N_0 W} \right) = W \log_2 \left(1 + \frac{p}{N_0 W} \right) \quad (I.12)$$

En exprimant la capacité normalisée par la largeur de bande utile W , nous avons :

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (I.13)$$

II.1.3 Système SIMO (Single Input Multi Output)

Comme son nom indique, cette technique implique l'utilisation de plusieurs antennes en réception pour minimiser les effets de l'évanouissement causé par le canal. Les signaux reçus sont combinés, et le rapport signal sur bruit total est la somme des rapports signal sur bruit de chaque antenne de réception [I.16].

La capacité du canal SIMO :

$$C = w \log_2 \left(1 + N_r^2 \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (I.14)$$

N_r représente le nombre d'antennes de réception. En normalisant la capacité par la largeur de bande utile W , nous obtenons

$$C = \log_2(1 + N_r^2 \rho) \quad (I.15)$$

ρ est le rapport signal sur bruit.

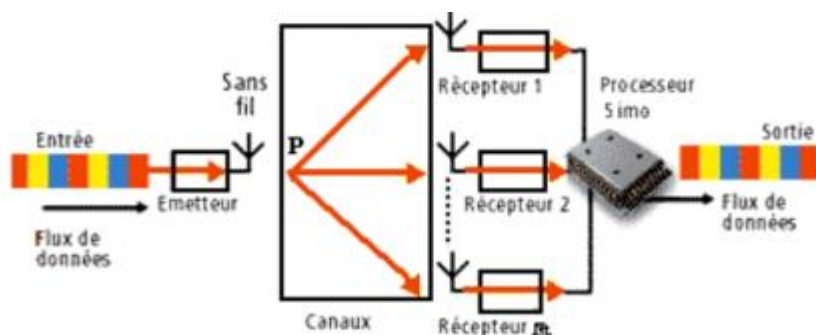


Figure I.12 : Système SIMO. [I.1]

II.1.4 Système MIMO

La technologie MIMO, en augmentant le nombre d'antennes à la réception, permet d'accroître le débit de manière proportionnelle et de compenser les variations du canal de

communication. En conséquence, elle réduit la probabilité de perte de signal et d'affaiblissement.

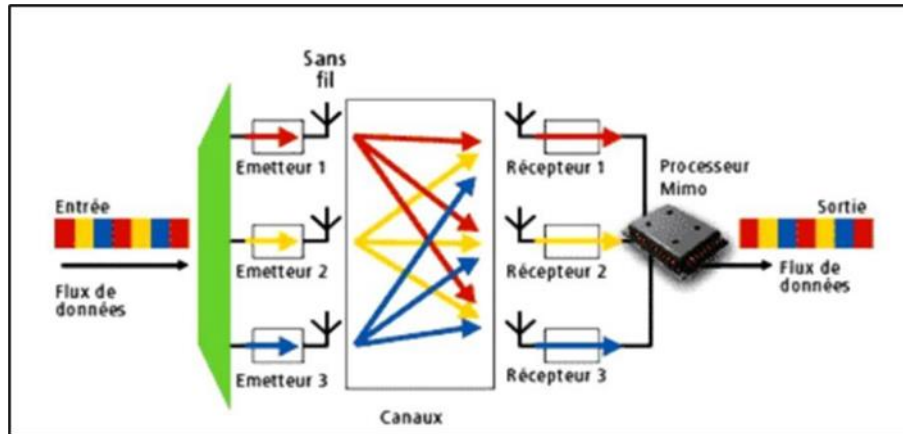


Figure I.13 : Dispositif MIMO. [I.1]

Comparativement au système MISO, où les mêmes paquets sont envoyés à toutes les antennes émettant à la même fréquence, le MIMO transmet des paquets distincts à chaque antenne opérant sur la même fréquence [I.1].

II.2 Principe de la diversité

Pour combattre les pertes de signal et pour améliorer le rapport signal sur bruit (SNR) du au multi-trajets, deux approches sont utilisées dans les travaux en littérature :

- Augmenter la puissance d'émission : ce qui peut être prédéfinie par la réglementation de UIT (Union International of Telecommunication).
- Utiliser des techniques de diversité : reposent sur l'idée que plusieurs versions du signal émis indépendamment, parviennent au récepteur, contenant la même information. Ces versions sont ensuite combinées de manière appropriée pour réduire les effets de l'affaiblissement du signal. Bien que ces systèmes offrent de la diversité, ils ne résolvent pas les problèmes d'interférences.

Il y a deux types de diversité : la micro diversité et la macro diversité [I.1].

II.2.1 La micro diversité

Pour combattre les perturbations des multi-trajets, diverses techniques de diversité sont envisagées, notamment [I.1] :

- La diversité de polarisation (voir chapitre 3, section : polarisation de l'antenne).
- La diversité spatiale.
- La diversité de diagramme de rayonnement.
- La diversité angulaire.
- La diversité temporelle.
- La diversité fréquentielle.

II.2.2 La macro diversité

Cette technique est la plus efficace pour combattre les formes d'affaiblissement. Elle implique la transmission et/ou la réception du même signal par différentes périphérie réseau (voir chapitre 3, section topologie infrastructure), ce qui permet d'atteindre la continuation de transmission en mouvement de l'appareil connecté (Téléphone portable, PC...Etc.) [I.1].

Conclusion

Ce chapitre a abordé de manière succincte les principes généraux et l'essentiel de la théorie des antennes imprimées, en détaillant les diverses techniques d'alimentation et les méthodes d'analyse associées. Nous avons également présenté les technologies SISO, SIMO et MIMO ainsi que ses différentes architectures. Enfin, nous avons conclu par les caractéristiques et critères de performances d'un système multi-antennaire. Le prochain chapitre se concentrera sur les différentes conceptions d'antennes reconfigurables.

Bibliographies

- [I.1]. LAHEG Cherifa, "Etude Et Conception D'une Antenne MIMO Reconfigurable", Mémoire De Master, Université De 8 MAI 1945 Guelma, 2022.
- [I.2]. M. Braham Chaouche Youcef, "Conception d'Antennes Planaires Reconfigurables Pour Opération Large Bande Et Multi-Bande ", Thèse Doctorat, Université De Mohamed El-Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2019.
- [I.3]. Salima Azzaz-Rahmani Et Noureddine Boukli-Hacene, "Analyse Des Antennes Imprimées En Anneaux Concentriques ", Universitaires Européennes, Sarrebruck, Allemagne, 2012.
- [I.4]. Mohamed Mansouri Et Haithem Ezzeroug, "Conception Et Simulation D'une Antenne Patch Ultra Large Bande [1-8 GHZ] ", Mémoire De Master, Institut D'aéronautique Et Des Etudes Spatiales, 2019.
- [I.5]. Rabia AKSAS, "Telecommunications - Antennes - Théorie Et Applications », Ellipses, Paris, France, 2013.
- [I.6]. Lotfi MERAD, "Modélisation Et Optimisation De Réseaux D'antennes Imprimées Par Les Réseaux De Neurones Et L'algorithme Génétique ", Mémoire De Master, Université De Aboubakr Belkaïd, 2001.
- [I.7]. CHAIMA Amel, "Etude Et Conception D'une Antenne Reconfigurable Pour Les Applications WLAN ", Mémoire De Master, Université De MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018.
- [I.8]. BAGHLI Nabil, "Conception D'antennes En Technologie Imprimée Avec Et Sans Boîtier ", Mémoire De Master, Université De Aboubakr Belkaïd, 2022.
- [I.9]. Toukali Samira Et Yaalaoui Khadra, "Conception Et Simulation D'un Réseau Linéaire D'antennes Imprimées ", Mémoire De Master, Université De Mohamed El-Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2021.
- [I.10]. Odile Picon, "LES ANTENNES ", livre ; Edition Dunod, France, 2009.
- [I.11]. Melati Nadia Et Adjila Fatima, "Etude Et Conception D'une Antenne Fractale Reconfigurable En Frequence ", Mémoire De Master, Université De 8 Mai 1945 Guelma, 2019.

- [I.12]. GHANEMI Zakaria, "Etude Et Conception D'antennes Reconfigurables En Fréquence Pour Le Standard 5G ", Mémoire De Master, Université De Aboubakr Belkaïd, 2021.
- [I.13]. Gherbi Djihene, "Etude Et Conception D'une Antenne Reconfigurable En Utilisant Des Composants Actifs v, Mémoire De Master, Université De 8 MAI 1945 Guelma, 2023.
- [I.14]. HADJI Abdallah Et HABACI Imadeddine, "Etude Et Conception D'une Antenne MIMO Avec Des Structures EBG Pour Les Applications Mobiles Modernes ", Mémoire De Master, Université De MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2023.
- [I.15]. ALDHAHERI Ali Salem Ahmed, "Conception Et Simulation D'une Antenne Mimo ", Mémoire De Master, Université De Mohamed Khider Biskra, 2019.
- [I.16]. ALLEL MONCEF Et AMRAOUI ZAKARIA, "Conception De Nouveau Système D'antennes MIMO Pour Le Standard 5G ", Mémoire De Master, Université De 8 MAI 1945 Guelma, 2021.

Chapitre II :

Les Antennes patch reconfigurables

I. Introduction

Les antennes reconfigurables provoquent récemment un fort intérêt en raison de leurs diverses applications dans les domaines des transmissions sans fil. Les antennes reconfigurables offrent des avantages supérieurs et des perspectives plus prometteuses que les antennes classiques, grâce à leurs caractéristiques qui leur permettent d'assurer diverses fonctions. Elles peuvent être ajustées en termes de fréquence, de diagrammes de rayonnement et même de polarisation. Ces caractéristiques peuvent être ajustées en utilisant des dispositifs de commutation tels que les RF MEMS ou les diodes PIN par exemple. [II.1].

Ce chapitre aborde la définition, caractéristiques et l'utilisation des antennes reconfigurables, ainsi que les techniques des antennes reconfigurables, Classification des antennes reconfigurables (en fréquence, en diagramme de rayonnement, en polarisation).

I.1 Définition

Une antenne reconfigurable est un dispositif capable de modifier dynamiquement ses caractéristiques de fonctionnement, telles que sa fréquence opérationnelle, sa bande passante, sa polarisation et son diagramme de rayonnement. Cette modification peut être réalisée en ajustant l'un de ses paramètres électriques, optiques, physiques (par exemple, via une modification mécanique), ou en intégrant des matériaux commandables tels que des ferrites ou des cristaux liquides. Ces ajustements permettent à l'antenne de s'adapter en temps réel aux changements de son environnement et aux exigences des systèmes de communication [II.2].

Les antennes patch reconfigurables, basées sur la technologie micro-strip, sont capables d'ajuster leurs caractéristiques de rayonnement en altérant des variables telles que la fréquence, la polarisation ou la direction du faisceau. Cette adaptation est rendue possible grâce à l'utilisation de techniques variées, telles que l'intégration de matériaux à commutation, de dispositifs électromécaniques ou de structures à diélectrique modifiable. Cette capacité de modification confère à ces antennes une polyvalence accrue, adaptée à une large gamme d'applications, notamment dans les domaines des communications sans fil, des radars et de la navigation.

I.2 Utilisation des antennes reconfigurables

Les antennes reconfigurables sont polyvalentes et sont exploités dans divers domaines :

- * **Transmission sans fil** : Elles s'adaptent aux variations de propagation dans les réseaux mobiles (2G,3G,4G...etc.), satellites et Wi-Fi pour améliorer les performances.
- * **La télédétection** : Elles ajustent leurs caractéristiques pour détecter des objets en mouvement (Radar par exemple).
- * **La sécurité** : Intégrées dans les systèmes de sécurité et de surveillances.
- * **Navigation spatiales** : Elles optimisent la transmission des données entre les satellites et les stations terrestres.
- * **La télémédecine** : Utilisées pour surveiller les signaux physiologiques et transmettre les données sans fil de manière fiable dans les dispositifs médicaux.

Généralement, leur flexibilité dans la conception et l'optimisation des systèmes de communication et de surveillance les rend précieuses dans de nombreux domaines.

II. Techniques des antennes reconfigurables

Une antenne reconfigurable est caractérisée par la capacité de modifier au moins l'un de ses paramètres, citant sa fréquence, son diagramme de rayonnement ou sa polarisation. Plusieurs approches sont exploitées pour mettre en œuvre cette reconfiguration. La reconfiguration peut être réalisée de manière électrique, optique, physique ou en modifiant le diélectrique de l'antenne, comme illustré dans la figure II.1.

Pour une reconfiguration électrique, des composants actifs tels que les diodes PIN, les Varactors, et le RF-MEMS sont utilisés. Des composants de commutation optiques sont nécessaires pour une reconfiguration optique. La reconfiguration physique implique une modification mécanique de la structure de l'antenne (l'élément rayonnant dans la plus pas des cas). D'autre technique utilise des matériaux intelligents tels que les ferrites [II.1].

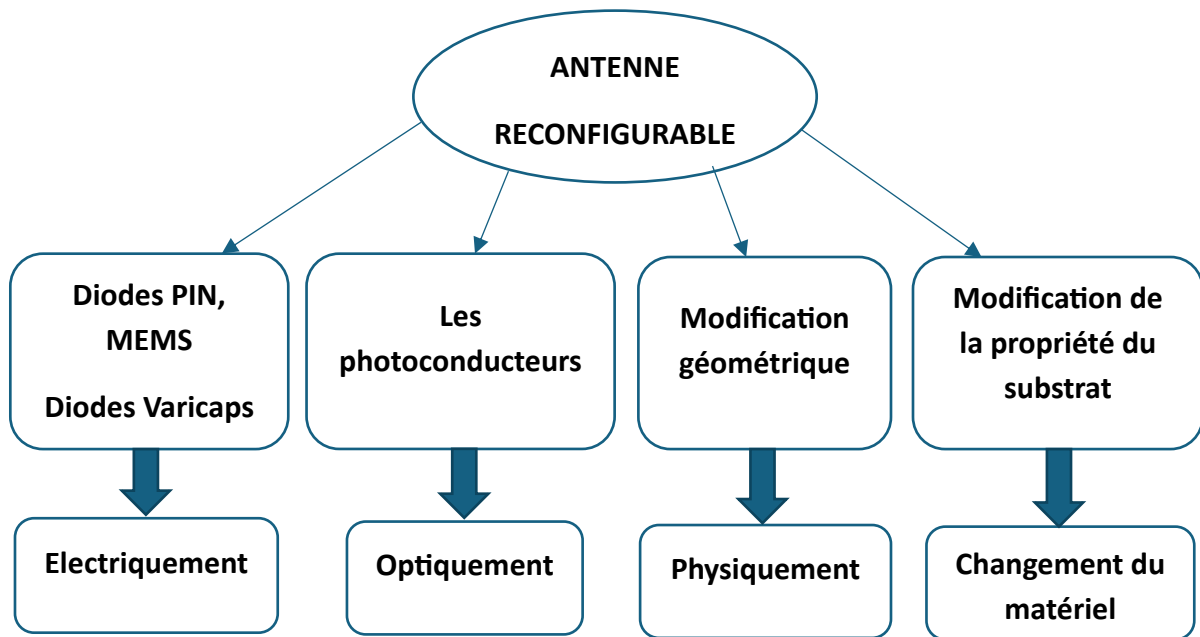


Figure II.1 : Les techniques des antennes reconfigurables.

II.1 Diode varicap

La diode de type varicap est une diode avec une capacité parasite ajustable en fonction du courant qui la traverse. Son symbole électronique est représenté par un "croisement" entre un condensateur et une diode. Elle est employée dans le domaine de la radio pour son potentiel d'ajustement électronique de la capacité.

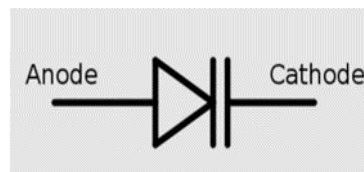


Figure II.2 : Diode varicap. [II.3]

Elle est couramment employée dans les circuits oscillants :

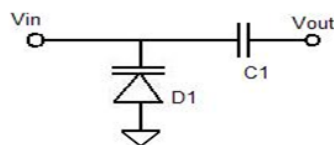


Figure II.3 : Circuit équivalent d'une diode varicap. [II.3]

En appliquant une tension continue sur V_{in} , la diode est polarisée en inverse, ce qui modifie la valeur de sa capacité, laquelle se retrouve en V_{out} . Le condensateur $C1$ assure le couplage entre V_{in} et V_{out} . Sa valeur élevée, par rapport à la capacité de la diode, garantit qu'il ne perturbe pas son fonctionnement [II.3].

II.2 Diode PIN

Les diodes PIN sont une catégorie particulière de diodes semi-conductrices, largement utilisés dans divers secteurs de l'électronique. Leur configuration spécifique leur confère des propriétés uniques et permet une grande variété d'applications.

La diode PIN est constituée de trois couches principales : P (positive), I (intrinsèque ou non dopée) et N (négative). Cette structure à trois couches se distingue de celle des diodes PN conventionnelles. La couche intrinsèque, non dopée, localisée entre les zones P et N, joue un rôle important dans les performances de la diode PIN [II.4].

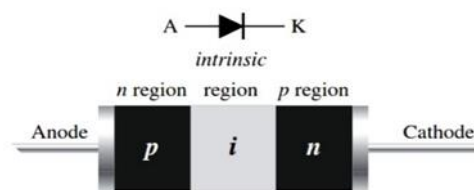


Figure II.4 : Diode PIN. [II.5]

La diode PIN est couramment employés pour réaliser les trois formes de reconfiguration : polarisation, diagramme de rayonnement et fréquence. La figure II.5 représente, le modèle de la diode sous cst [II.1].

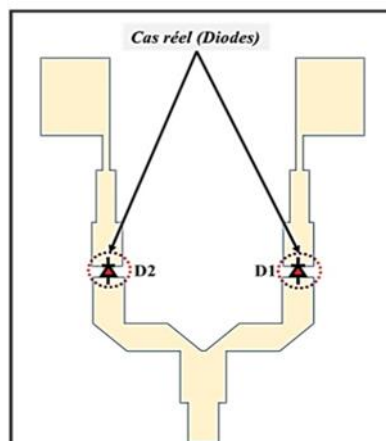


Figure II.5 : Modèle de la diode en cst. [II.6]

II.3 MEMS (Système Micro électromécanique)

Le système micro-électromécanique (MEMS), est un composant combinant des éléments mécaniques et électroniques. Ses dimensions miniaturisées peuvent varier entre plusieurs millimètres.

Le terme MEMS est employé pour décrire à la fois une catégorie de dispositifs micromécaniques et les techniques de fabrication associées. Certains MEMS ne contiennent même pas de composants mécaniques, mais sont néanmoins classés en tant que tels car ils reproduisent à petite échelle des structures présentes dans les machines traditionnelles, telles que des ressorts, des canaux, des cavités, des trous et des membranes. Étant donné que certains de ces composants convertissent des signaux mécaniques en signaux électriques ou optiques, ils sont également qualifiés de transducteurs [II.7].

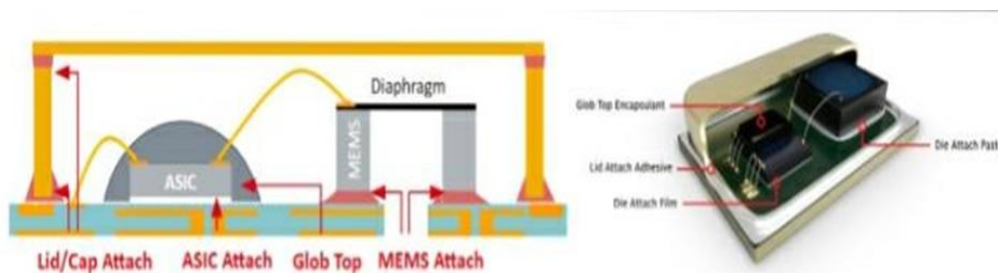


Figure II.6 : MEMS (Système Micro électromécanique). [II.8]

II.4 Matériaux agiles

Les matériaux dits "agiles" ou "intelligents" sont principalement utilisés comme substrat, offrant la possibilité de modifier leurs propriétés électromagnétiques (permittivité et/ou perméabilité) via une commande externe, généralement par l'application d'un champ électrique et/ou magnétique. Cette capacité permet d'assurer la flexibilité des antennes. Diverses contributions ont été menées en utilisant différentes propriétés de matériaux, notamment des matériaux ferroélectriques, ferromagnétiques et des cristaux liquides. Ces matériaux présentent l'avantage d'être peu encombrants et de plus en plus faciles à intégrer [II.9].

II.5 Classification des antennes reconfigurables

Nous pouvons classer les antennes reconfigurables en trois catégories principales : la

reconfigurabilité en fréquence, en diagramme de rayonnement, en polarisation.

II.5.1 Antennes reconfigurables en fréquence

En raison de l'évolution constante des normes et des besoins en qualité et en capacité des systèmes de télécommunications, la reconfiguration des fréquences est devenue une tâche essentielle, suscitant un intérêt croissant dans les milieux de recherches et industriels. La capacité d'une antenne à changer sa fréquence de fonctionnement pour plusieurs standards tels que GSM, UMTS, ISM, LTE, Bluetooth, Wifi et Wi MAX représente un véritable défi.

La reconfiguration des fréquences peut être réalisée à l'aide de diodes PIN ou varactors, des matériaux agiles avec des structure complexe a réalisé ou à l'aide des modifications de la structure avec une optimisation lors de la conception [II.1].

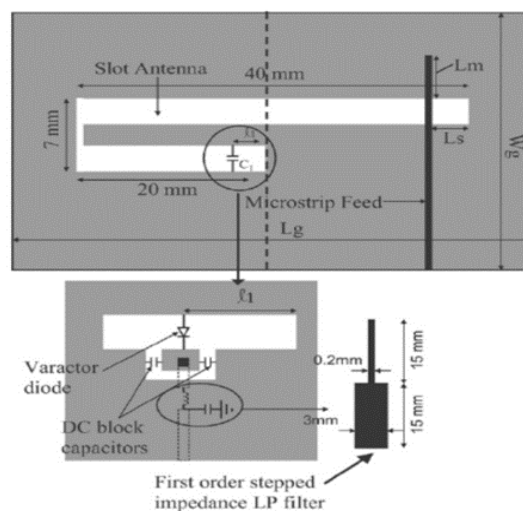


Figure II.7 : Antenne bi-bande reconfigurable en fréquence à l'aide d'un varactor. [II.10]

II.5.1.1 La modification géométrique

Plusieurs antennes reconfigurables recourent à des modifications de la structure pour changer leurs performances pour des standards prédéfini. Ce concept base sur la variation de la longueur électrique de l'élément rayonnant, ce qui entraîne un changement de la fréquence de résonance.

L'illustration (figure II.8) montre une antenne utilisant des MEMS et basée sur une antenne planaire fractale de type "Sierpinski" composée de triangles isocèles. L'alimentation est située au centre de symétrie de l'antenne, la rendant reconfigurable grâce à l'ajout d'interrupteurs

aux jointures entre les triangles. Ces interrupteurs contrôlent la connexion des différentes parties conductrices de l'antenne. Cette antenne a été spécifiquement conçue pour opérer sur trois bandes de fréquence autour de 8, 14 et 24 GHz [II.11].

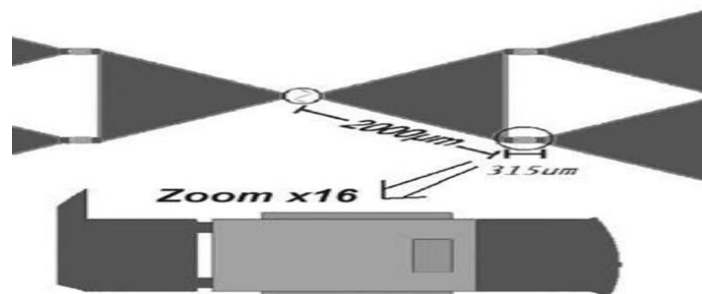


Figure II.8 : Antenne fractale reconfigurable en fréquence des commutateurs RF MEMS. [II.12]

II.5.1.2 Court-circuit commutable

Une méthode fréquemment employée avec les antennes reconfigurables consiste à utiliser des courts-circuits commutables. En activant ou désactivant ces courts-circuits, il est possible de modifier le flux des courants électromagnétiques dans l'antenne, ce qui entraîne un changement de sa ou de ses fréquences de fonctionnement. Un exemple d'une telle antenne patch équipée de courts-circuits reconfigurables est présenté dans la figure II.9, où la commutation de ces interrupteurs permet d'obtenir deux fréquences de résonance distinctes [II.13].

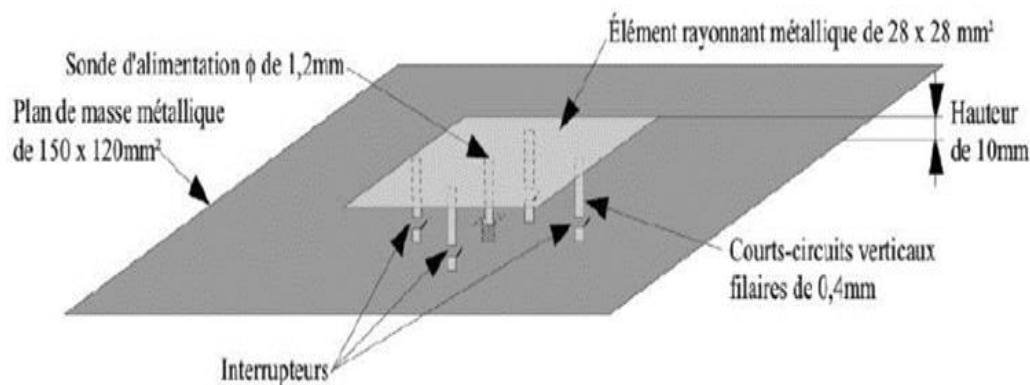


Figure II.9 : Exemple d'antenne patch à courts-circuits commutables. [II.13]

II.5.2 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

Une antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement est une antenne dont la configuration du diagramme de rayonnement peut être ajustée de manière dynamique. Cette modification peut concerner la forme, la direction ou le gain du diagramme. Diverses

techniques de reconfiguration du diagramme sont utilisées, telles que l'exploitation de diodes PIN, de MEMS et de photoconducteurs [II.14].

II.5.2.1 Utilisation des diodes PIN

Une méthode envisageable pour la conception d'une antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement consiste à utiliser des antennes filaires. La modification du diagramme s'accompagne d'un ajustement de la fréquence de résonance qui doit être minimisé. Un exemple d'antenne reconfigurable en diagramme, créée à partir de fentes sur l'élément rayonnant. Sa géométrie et la disposition des diodes sont illustrées dans la Figure II.10.

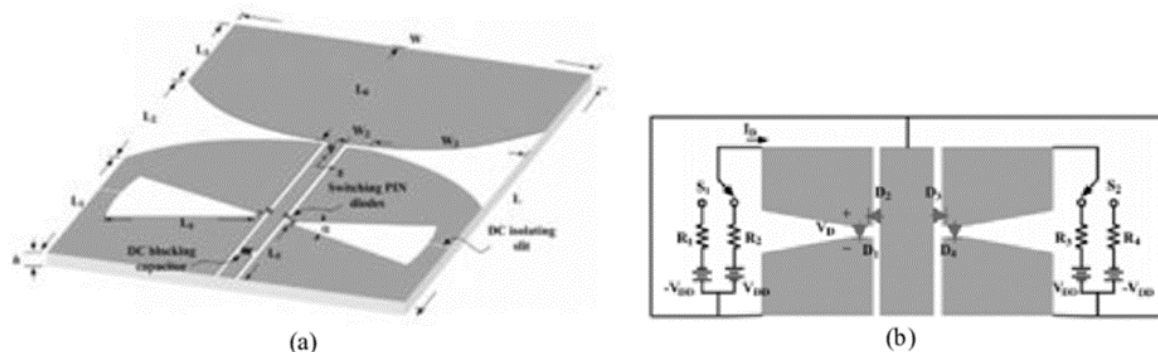


Figure II.10 : Antenne reconfigurable en diagramme de rayonnement par l'utilisation d'une fente sur la ligne d'alimentation RF. [II.15]

En fonction de l'état des diodes PIN, l'antenne est alimentée selon trois configurations différentes : le mode coplanaire, le mode droit et le mode gauche, en fonction de la fente (droite ou gauche) qui est court-circuitée. La Figure II.11 illustre le diagramme de rayonnement de l'antenne pour ces trois configurations à la fréquence de 3,5 GHz. L'antenne est construite sur un substrat Roger RO4003 d'une épaisseur de 1,524 mm et avec des constantes diélectriques de 3,38 [II.14]

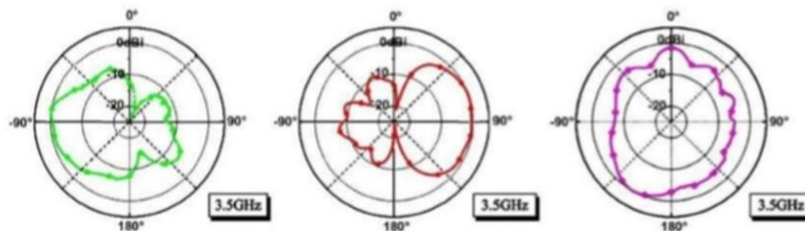


Figure II.11 : Diagrammes de rayonnement à 3.5GHz selon les trois modes de configuration. [II.14]

II.5.2.2 Utilisation de MEMS

Les MEMS (Système Micro électromécanique) sont utilisés pour ajuster le diagramme de rayonnement des antennes en modifiant leur forme, direction ou gain. Cette technique offre une flexibilité pour s'adapter aux variations environnementales et aux exigences des systèmes de communication, permettant ainsi des ajustements précis et dynamiques des paramètres de l'antenne [II.16] [II.14].

II.5.2.3 Utilisation de photoconducteurs

L'antenne reconfigurable en fréquence permet non seulement la reconfiguration du diagramme en fonction de l'état des photoconducteurs, mais également la variation des diagrammes de rayonnement. Lorsqu'une seule diode est activée, la fréquence de résonance est de 2,7 GHz. Lorsque le commutateur de gauche est activé, le diagramme de rayonnement subit une rotation vers la gauche dans le plan du champ électrique, tandis que lorsqu'il est activé sur la droite, la rotation est inverse [II.14].

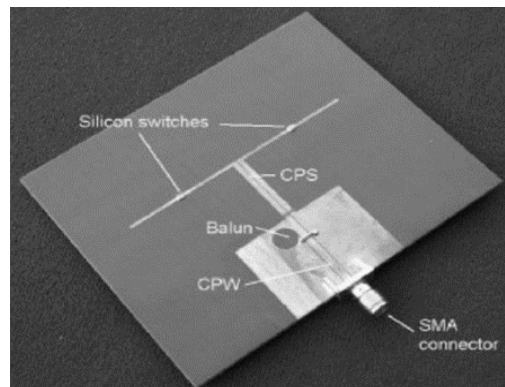


Figure II.12 : Photographie de l'antenne dipôle commutée. [II.14]

Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons défini les antennes reconfigurables, puis expliqué leur utilisation dans différents domaines, ensuite les techniques de reconfigurabilité, et classification (en fréquence, en diagramme de rayonnement, en polarisation). Dans le chapitre qui suit, nous avons montées dans une première partie, notre model d'antenne unitaire conçu, après nous avons présentés le model en MIMO de type 1X2 avec leurs critères de performances. Et comme deuxième partie nous avons testés notre model dans un environnement virtuel à l'aide de logiciel OMNET++.

Bibliographies

- [II.1]. Chouder Sabrina Et Benziane Amel, "Etude Et Conception D'une Antenne Reconfigurable Pour Application Wifi", Mémoire De Master, Université De Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [II.2]. Chaima Amel, "Etude Et Conception D'une Antenne Reconfigurable Pour Les Applications Wlan", Mémoire De Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2018.
- [II.3]. <https://www.electronique-radioamateur.fr/>, Visité Le 13 Mars 2024.
- [II.4]. <https://www.electricity-magnetism.org/fr/diodes-pin/>, Visité Le 13 Mars 2024.
- [II.5]. <https://instrumentationtools.com/pin-diode-working-principle/amp/>, Visité Le 14 Mars 2024.
- [II.6]. Zaoui Dhiaeddine Et Morsly Amine, "Étude Et Conception Des Antennes Reconfigurables En Diagramme De Rayonnement Pour Les Communications De 5g", Mémoire De Master, Université De Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [II.7]. <https://actualiteinformatique.fr/internet-of-things-iot/definition-mems-systemes-micro-electromecaniques>, Visité Le 14 Mars 2024.
- [II.8]. <https://www.caplinq.com/passive-components/sensors/mems-sensors/>, Visité Le 14 Mars 2024.
- [II.9]. Imen Ben Trad, "Antennes Agiles Pour Les Télécommunications Multistandards", Thèse De Doctorat, Université De Tunis El Manar, 2014.
- [II.10]. Nader Behdad Et K.Sarabandi, "A Varactor-Tuned Dual-Band Slot Antenna", IEEE Transactions On Antennas And Propagation :pp.401 – 408, Mars 2006.
- [II.11]. Chouhbane Maroua, "Etude Et Conception D'une Antenne Reconfigurable En Fréquence Et En Diagramme De Rayonnement", Mémoire De Master, Université De 8 Mai 1945 Guelma, 2021.
- [II.12]. Dimitris E.Anagnostou, Guizhen Zheng, Michael T.Chryssomallis, James C. Lyke, "Design, Fabrication, And Measurements Of An Rf-Mems-Based Self-Similar Reconfigurable Antenna", Ieee Transactions On Antennas And Propagation:pp.422 – 432, Mars 2006.

- [II.13]. Sylvain Loizeau, "Conception Et Optimisation D'antennes Reconfigurables Multifonctionnelles Et Ultra Large Bande", Thèse De Doctorat, Université De Paris-Sud Xi, 2009.
- [II.14]. Laheg Cherifa, "Etude Et Conception D'une Antenne Mimo Reconfigurable", Mémoire De Master, Université De 8 Mai 1945 Guelma, 2022.
- [II.15]. Saber Dakhli, "Design of Printed Microstrip Antennas Inspired from Metamaterials ", International Journal of Antennas and Propagation, Juin 2015.
- [II.16]. Benoit Poussot Et Jean-Marc Laheurte, "Antennes Reconfigurables Pour La Radio Cognitive Et Les Systèmes MIMO", Journées Scientifiques, D'ursi-France, 2013.

Chapitre III :

Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

Partie 1 : Conception et simulation

I. Introduction

Une antenne reconfigurable peut ajuster son diagramme de rayonnement, sa polarisation ou sa fréquence pour s'adapter à son environnement. Des recherches ont justifié des avantages majeurs lors de l'utilisation de telles antennes. Ainsi, ce chapitre se focalise sur la conception et la mise en œuvre d'une structure MIMO reconfigurable en fréquence et en polarisation, en exploitant la technique de la modification de structure d'élément rayonnant [III.1].

Dans ce chapitre, nous avons utilisés le logiciel MicroWave Studio de CST (Computer Simulation Technology) version 2019 pour concevoir nos modèle antenne reconfigurable. Cet outil de simulation électromagnétique de CST facilite la conception et la simulation de divers types d'antennes [III.2].

I.1 Antenne de base

La figure III.1 montre une antenne publiée dans la ref. [III.4] dont nous avons inspirés notre antenne unitaire.

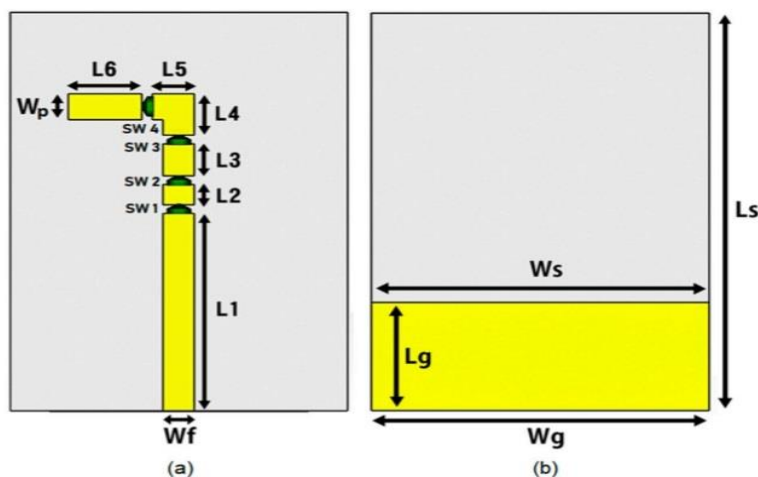


Figure III.1 : Le modèle d'antenne de base publié dans réf. [III.4]

L'antenne ci-dessous est conçue avec un substrat de type FR4 avec une permittivité de 4.3, une épaisseur de 1.6 mm. Ce modèle d'antenne est basé sur les diodes PIN pour avoir leur changement de fréquence ce qui le rendre plus complexe pour leur intégration dans les petits circuits pour applications sans fil dont c'est l'objectif de l'antenne.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

Paramètres	Valeurs (mm)	Paramètres	Valeurs (mm)
Ws	32	L2	2.3
Ls	40	L3	3.7
Wg	32	L4	4.8
Lg	12.5	L5	4
Wf	3	L6	7
L1	22.8	Wp	3

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne de ref. [III.4].

Le tableau III.1 montre les dimensions de l'antenne de la figure III.1.

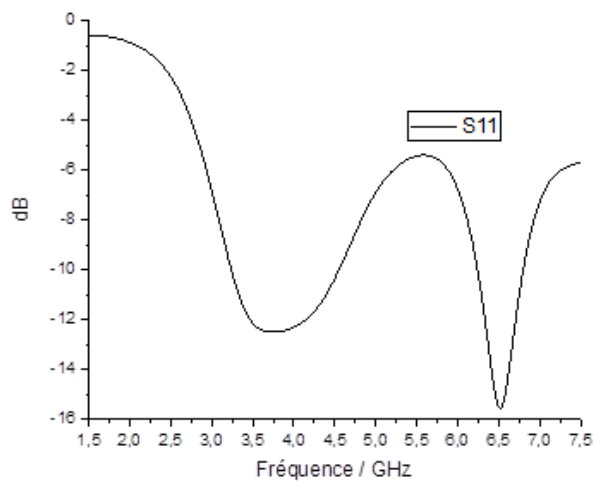


Figure III.2 : Le coefficient de réflexion de l'antenne de réf. [III.4]

La figure III.2 présente le coefficient de réflexion de l'antenne de réf. [III.4] simulé avec le logiciel CST MicroWave studio. L'antenne fonctionne en deux bandes de fréquences tel que le 3.4 GHz et 6.5 GHz.

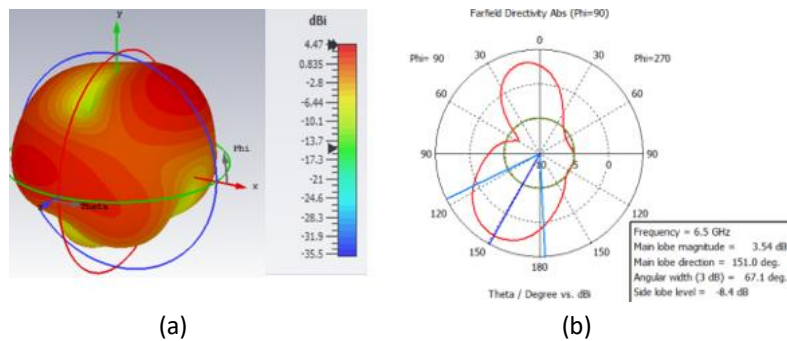


Figure III.3 : Le diagramme de rayonnement de l'antenne de ref. [III.4]

La figure III.3 montre le diagramme de rayonnement 3D et polaire de l'antenne publié dans ref.[III.4].

I.2 Conception de l'antenne unitaire

Dans cette partie, nous avons présentés notre conception de l'antenne reconfigurable unitaire. La présentation de notre modèle d'antenne est faite sur trois configuration tel que chaque configuration nous donne une nouvelle bande de fréquence.

I.2.1 Première configuration

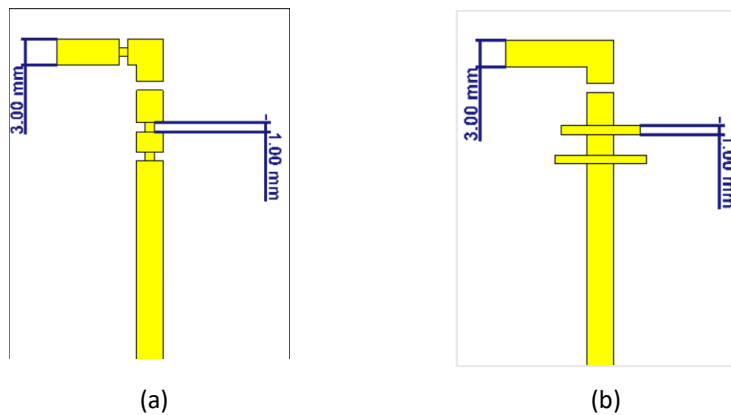


Figure III.4 : L'antenne unitaire conçu pour la bande 2.6 GHz sous CST MicroWave ;(a) modèle primaire (b) modèle finale de première configuration.

La figure III.4 illustre notre premier antenne conçue, l'antenne prend la forme de la lettre L inversée avec une encoche est deux courts circuits optimisés par logiciel.

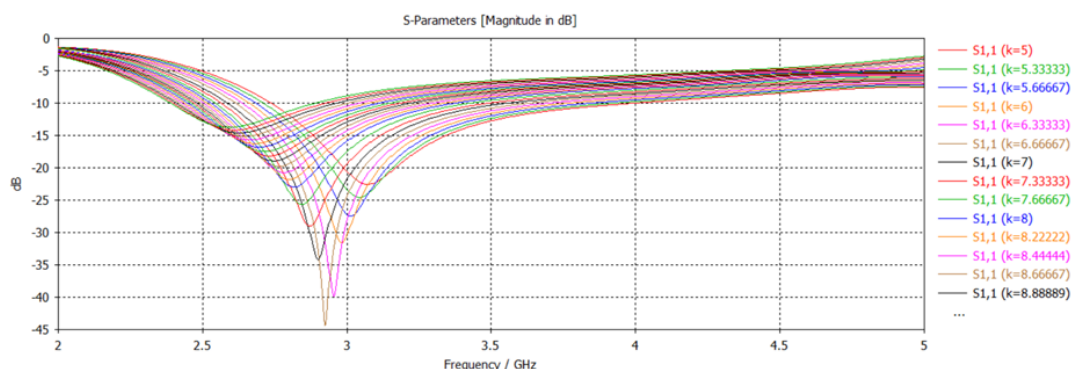


Figure III.5 : Le coefficients de réflexion S11 d'antenne unitaire de la première configuration.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

La figure III.5 montre l'optimisation de paramètre S11 en fonction des dimensions des deux courts circuits de notre première configuration de l'antenne conçue, l'antenne opère pour une bande de fréquence allant de 2.4 GHz jusqu'à 4 GHz.

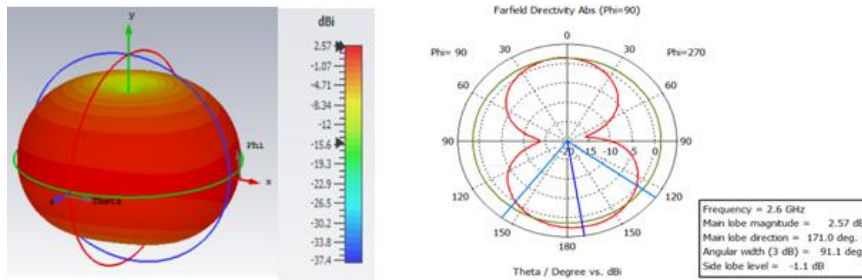


Figure III.6 : Le diagramme de rayonnement ; 3D et polaire pour la fréquence 2.6 GHz.

La figure ci-dessous montre le diagramme de rayonnement de l'antenne conçue pour cette configuration pour la fréquence 2.6 GHz tel que la valeur maximum de gain est de 2.57 dBi.

I.2.2 Deuxième configuration

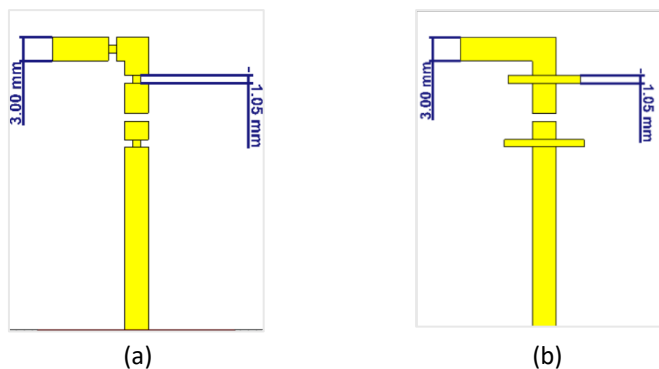


Figure III.7 : L'antenne unitaire conçu pour la bande 2.4 GHz sous CST MicroWave ;(a) modèle primaire (b) modèle finale de la deuxième configuration.

La figure III.7 montre la deuxième configuration de l'antenne. Dans cette configuration l'un des courts circuits de patch est déplacé vers la deuxième fente et l'optimisation est faite selon les dimensions de ces courts circuits.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

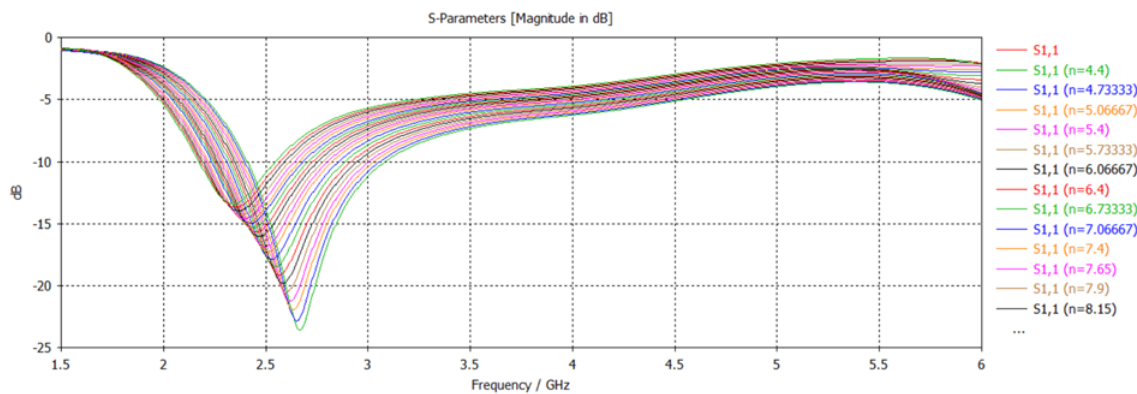


Figure III.8 : Le coefficients de réflexion S11 d'antenne unitaire de la deuxième configuration.

La figure III.8 montre le paramètre S11 de l'antenne en deuxième configuration dont il montre une seule bande de fonctionnement varie de 2.3 GHz jusqu'à 3.2 GHz.

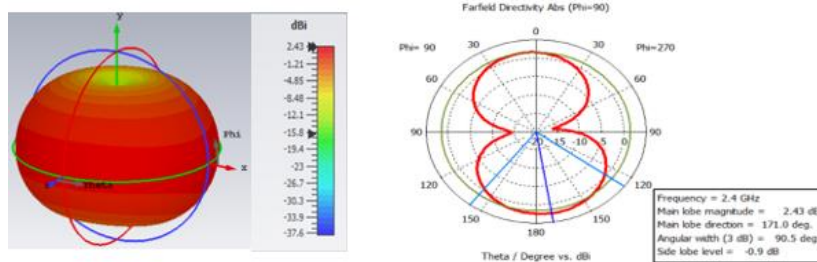


Figure III.9 : Le diagramme de rayonnement ; 3D et polaire pour la fréquence 2.4 GHz.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne optimisée dans la troisième configuration est illustré dans la figure III.9 pour la fréquence 2.4 GHz avec un gain maximum 2.43 dBi.

I.2.3 Troisième configuration

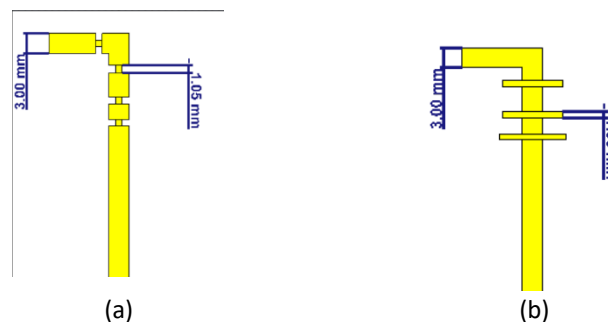


Figure III.10 : L'antenne unitaire conçu pour la bande 5.8 GHz sous CST MicroWave ;(a) modèle primaire (b) modèle finale de troisième configuration.

L'antenne conçue en troisième configuration est illustrée dans la figure III.10, ce modèle d'antenne est configuré avec un court-circuit pour chaque encoche.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

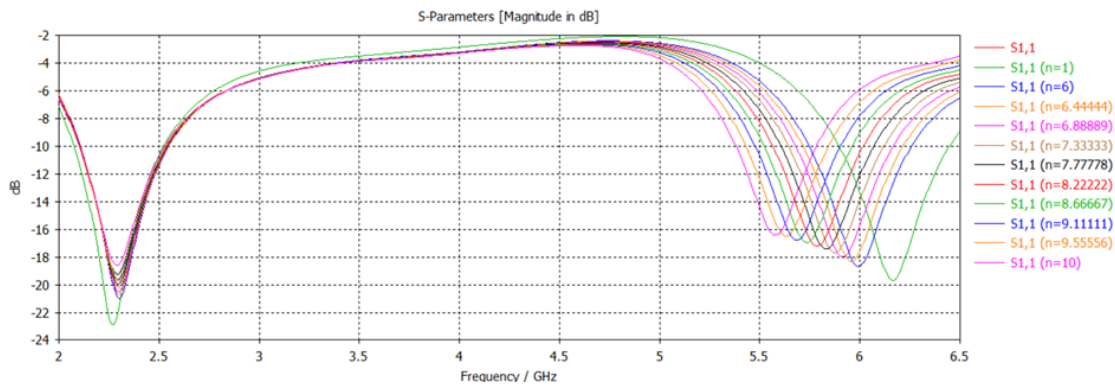


Figure III.11 : Le coefficients de réflexion S11 d'antenne unitaire de la troisième configuration.

La figure III.11 illustre le coefficient de réflexion de l'antenne conçu en troisième configuration. Avec optimisation par CST MicroWave Studio, l'antenne montre deux bandes de fréquences de résonances comme suite : La première bande varie de 2.2 GHz jusqu'à 2.5 GHz et la deuxième bande de fréquence varie de 5.4 GHz jusqu'à 6.5 GHz.

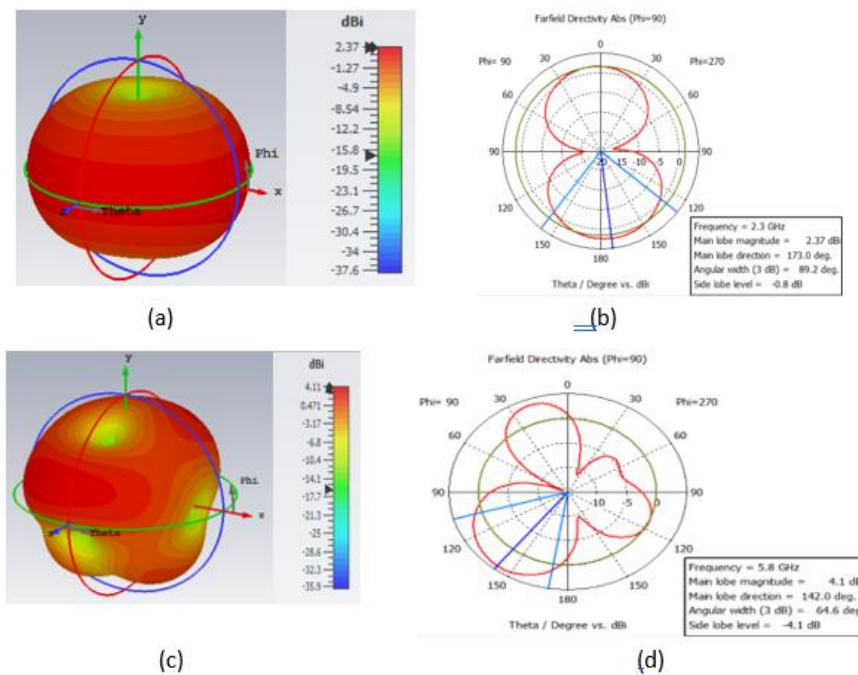


Figure III.12 : (a), (b), (c) et (d) Le diagramme de rayonnement 3D et polaire ; pour la fréquence 2.3 GHz et 5.8 GHz, respectivement.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

La figure III.12 montre le diagramme de rayonnement de l'antenne conçue en troisième configuration pour les fréquences de résonances 2.3 GHz et 5.8 GHz avec un gain maximum de 2.37 dBi et 4.11dBi, respectivement.

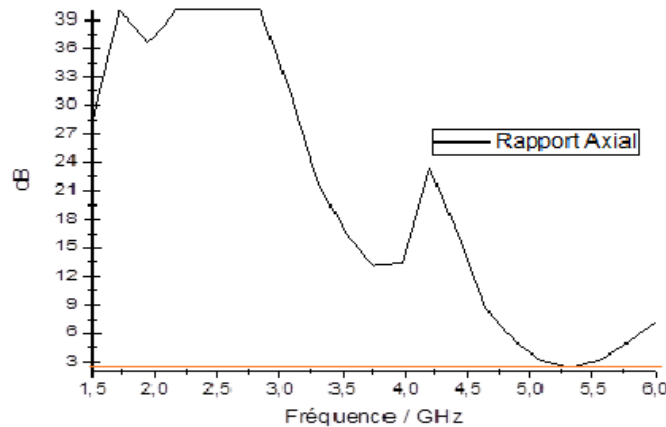


Figure III.13 : Le rapport axial de modèle finale.

La figure III.13 illustre le rapport axial de l'antenne conçue en troisième configuration, dans cette figure nous pouvons voir que l'antenne présente une valeur inférieure à 3 dB qui explique que la troisième configuration présente une polarisation circulaire et ce qui rend l'antenne conçue reconfigurable en polarisation.

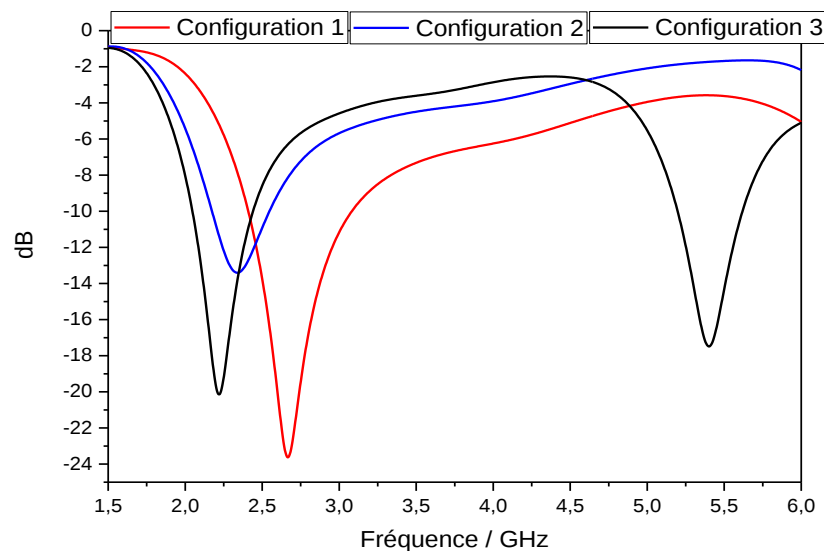


Figure III.14 : Le coefficient de réflexion S11 des modèles d'antenne 1 ,2 et modèle finale.

La figure III.14 montre une comparaison des trois configurations proposées. Nous concluons que la troisième configuration est la plus optimisée qui permet de couvrir deux bandes de fréquences différentes, tel que la bande de wifi à 2.4 GHz et la 5.8 GHz pour les applications mobiles sans fil.

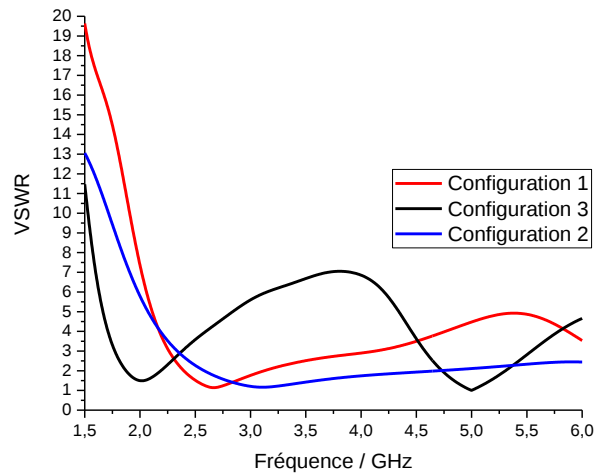


Figure III.15 : Le VSWR les trois configurations conçus sous CST MicroWave.

Le paramètre VSWR illustré dans la figure III.15 des trois configurations conçues, donne des bons résultats pour les fréquences de résonances de l'antenne.

I.2.4 Distribution de courant

La répartition du courant sur l'antenne finale à différentes bandes de fréquences sont illustrées à la figure III.16.

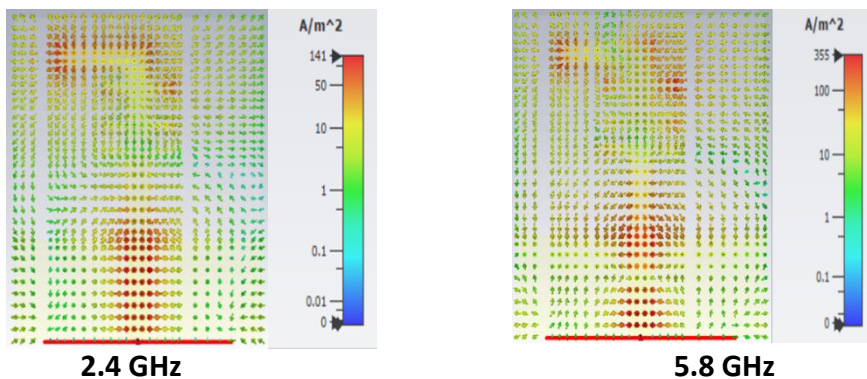


Figure III.16 : La distribution de courant de l'antenne finale dans différentes bandes.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

La figure III.16 montre la distribution de courant sur le côté face de l'antenne de la troisième configuration pour les deux fréquences de résonnances 2.4 GHz et 5.8 GHz. Nous pouvons remarquer que la distribution de courant est équilibrée sur toute l'interface de patch pour les deux fréquences de résonnance.

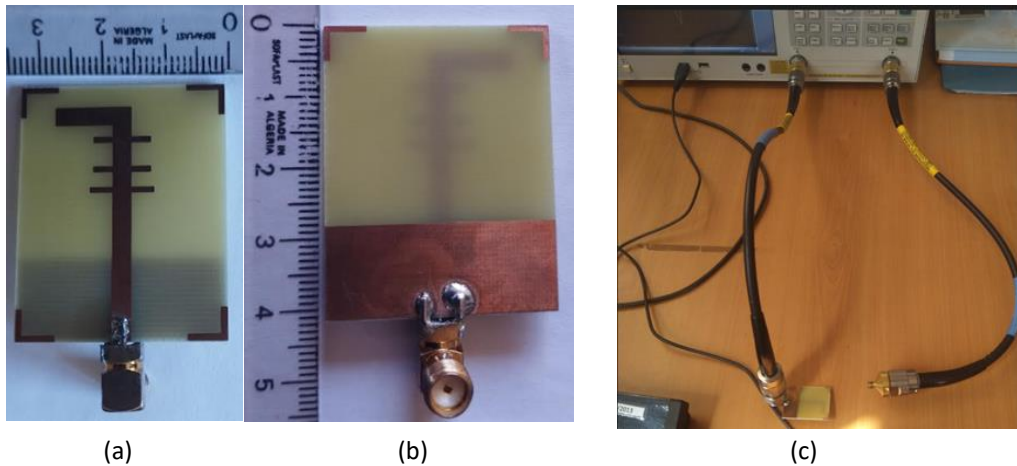
I.3 Performances des trois configurations de l'antenne

	Bandes de Fréquence (GHz)	S11 (dB)	VSWR	Max Gain (dBi)
Première configuration	2.4-3.1	-23.6	<1.11	2.57
Deuxième configuration	2.3-2.7	-16	<1.16	2.43
Troisième configuration	2.1-2.5	-20	<1	2.37
	5.6-6.1	-17.5		4.11

Tableau III.2 : Performances des trois configurations.

II. Réalisation et mesure

Dans cette phase, nous allons présenter les validations expérimentales de nos modèles d'antenne conçus.



Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel



(d)

Figure III.17 : Photographie de l'antenne unitaire réalisée ; (a) vue de face (b) vue de dessous (c) l'antenne en mesure (d) le coefficient de réflexion S11 mesuré.

La figure III.17 présente des photos de l'antenne unitaire réalisé et mesuré, (a), (b) vue de face et dessus de l'antenne, (c) l'antenne durant l'étape de mesure tel que nous avons utilisés un analyseur de réseau de type Agilent fonctionne jusqu'à la fréquence 20 GHz et (d) capture d'écran de résultat de mesure.

Nous remarquons qu'il soit quasiment identique au graphe simulé, tel que la différence entre elles est : 0,1 GHz.

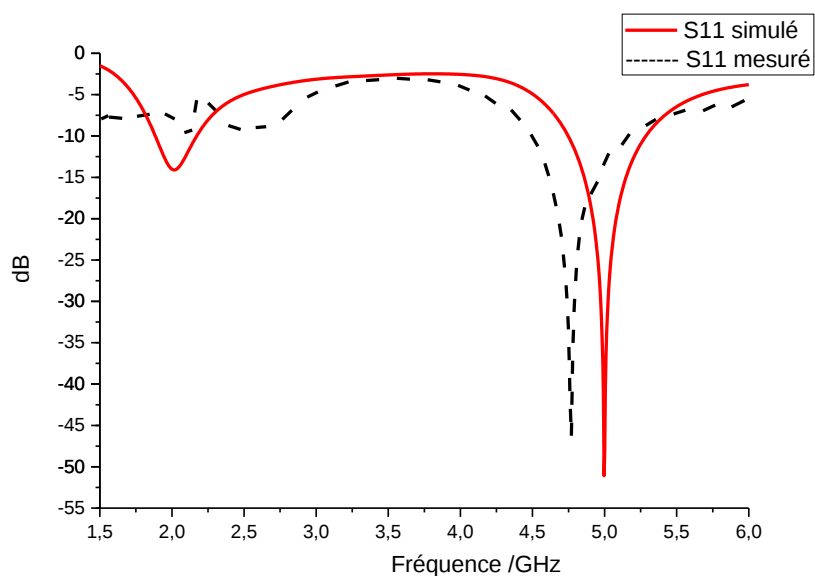
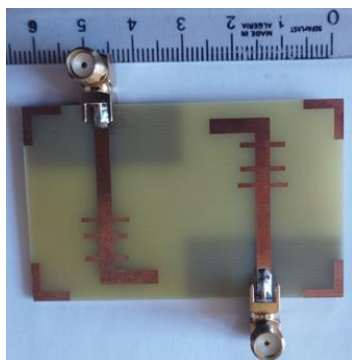
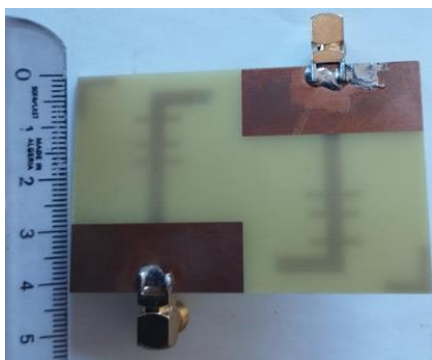


Figure III.18 : Comparaison de coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne unitaire.

La comparaison entre les résultats de simulation et l'autre de mesure de paramètre S11 de l'antenne unitaire est illustré dans la figure III.18. Les deux graphes sont cohérents à part un petit décalage approximer de 200 MHz due à la mauvaise soudure de connecteur SMA.



(a)

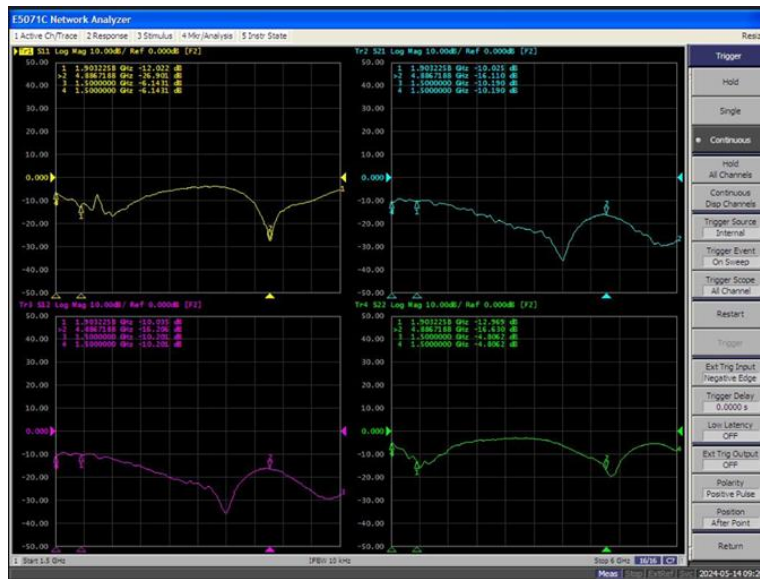


(b)



(c)

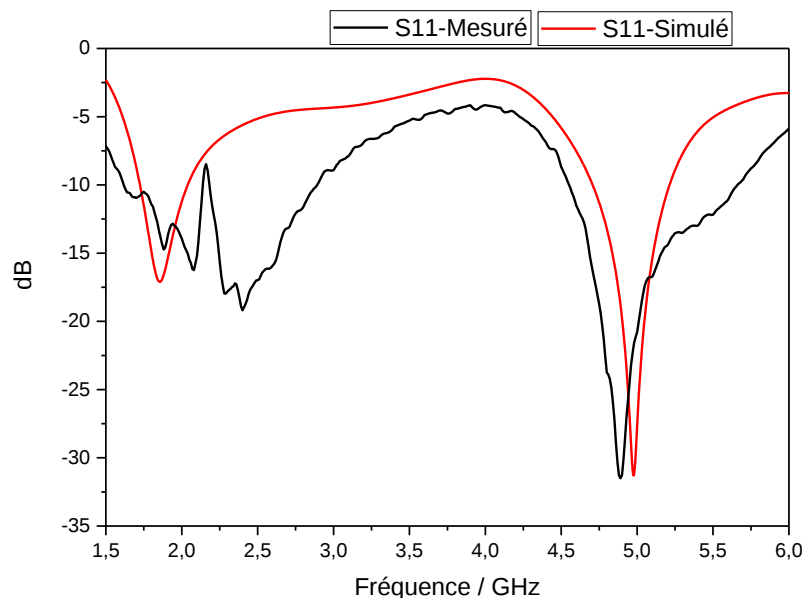
Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel



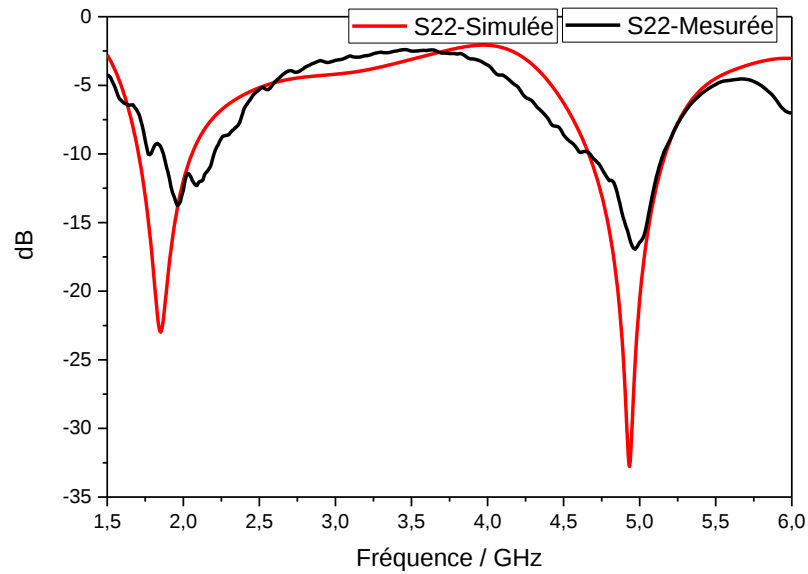
(d)

Figure III.19 : Photographie de l'antenne MIMO 1X2 réalisée ; (a) vue de face ; (b) vue de dessous (c) l'antenne sous mesure ; (d) les paramètres S mesurés.

La figure III.19 illustre des photos de l'antenne MIMO 1X2 réalisé et mesuré, (a), (b) vue de face et dessus de l'antenne, (c) l'antenne durant la phase de mesure avec le même analyseur de réseau utilisé avec l'antenne unitaire de type Agilent et (d) capture d'écran des paramètres S en mesure (S11, S12, S21 et S22).



(a)



(b)

Figure III.20 : Les paramètres S11 et S22 de l'antenne MIMO 1X2, simulation et mesure.

La figure III.20 (a) et (b) montre la comparaison du coefficient de réflexion S11 et S22 de l'antenne MIMO 1X2 simulé et mesuré. Les résultats présentent un bon accord entre la simulation et la mesure pour les bandes de fréquences souhaitées.

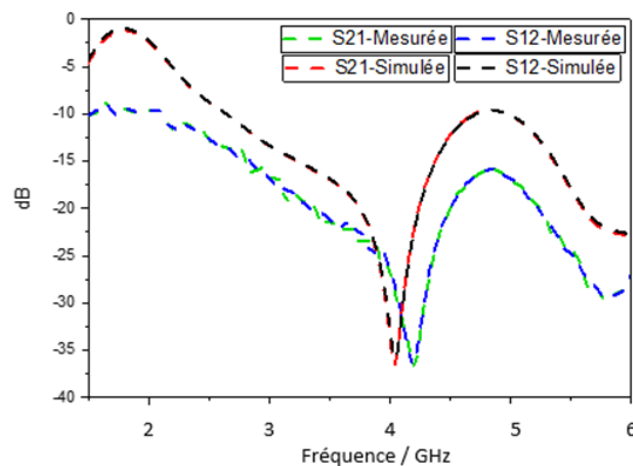


Figure III.21 : Les paramètres S12 et S21 de l'antenne MIMO simulé et mesuré.

La comparaison mesure et simulation de paramètres S12 et S21 sont montrés à la figure III.21 avec un grand accord entre la simulation et la mesure.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

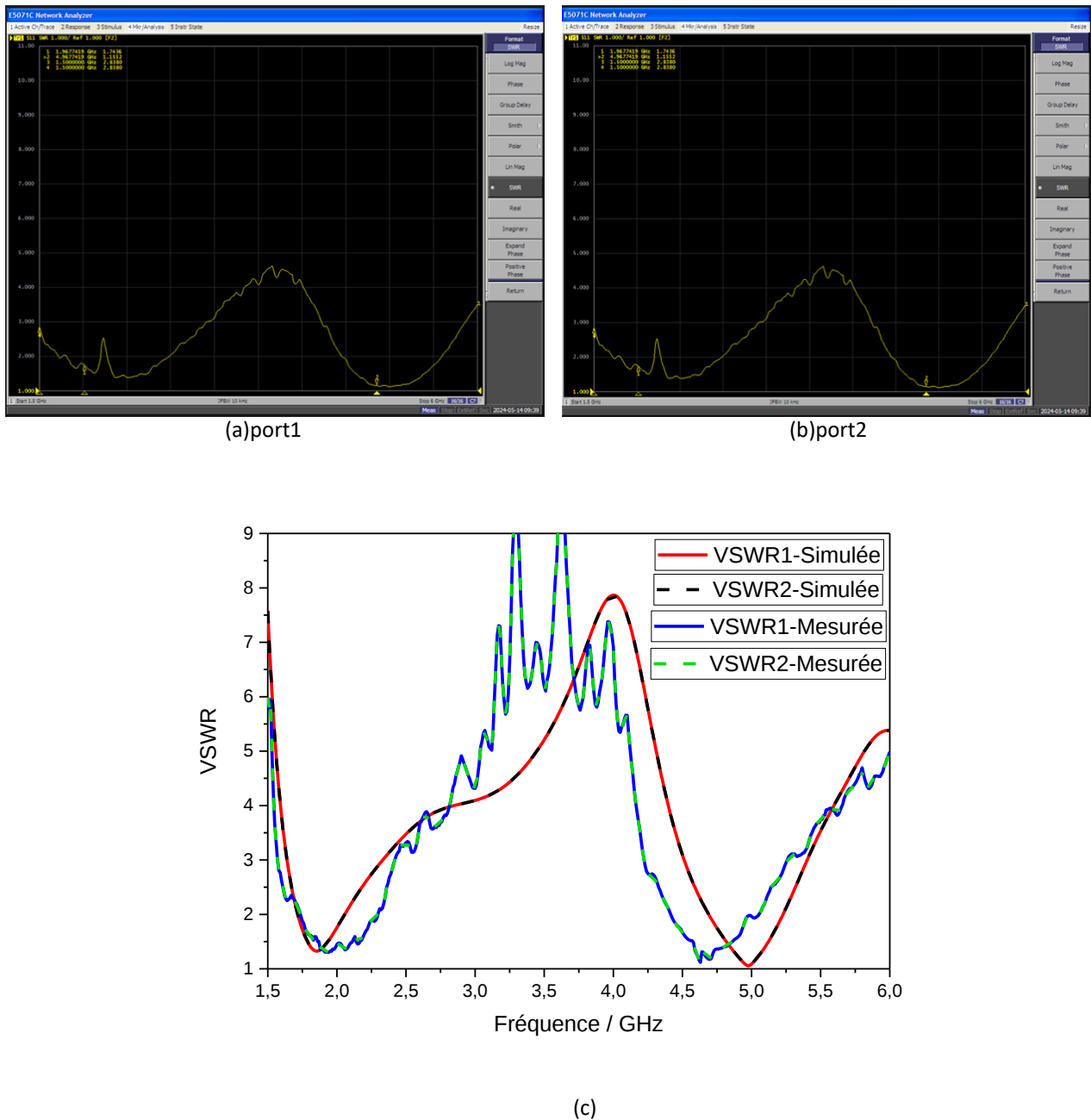


Figure III.22 : Le VSWR de l'antenne MIMO simulé et mesuré ; (a), (b) capture d'écran des résultats de mesure et (c) comparaison entre les résultats de simulation et l'autre de mesure.

Les résultats de VSWR de l'antenne MIMO 1X2 simulé et mesuré sont montrés dans la figures III.22. Les valeurs de VSWR sont inferieur a 2 pour les deux ports d'alimentation de l'antenne.

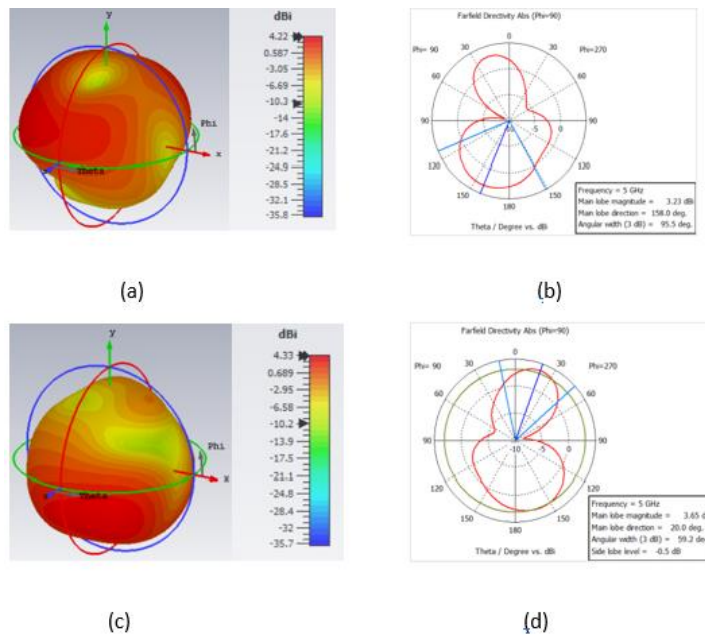


Figure III.23 : (a), (b), (c) et (d) Le diagramme de rayonnement de l'antenne MIMO 1x2 ; 3D et polaire pour la fréquence 5 GHz.

La figure III.23 montre le diagramme de rayonnement de l'antenne MIMO 1x2 pour la fréquence de résonance 5 GHz avec un gain maximum de 4.22 dBi pour le 1^{er} antenne et 4.33 dBi pour le 2^{ème} antenne.

II.1 ECC (Envelope Correlation Coefficient)

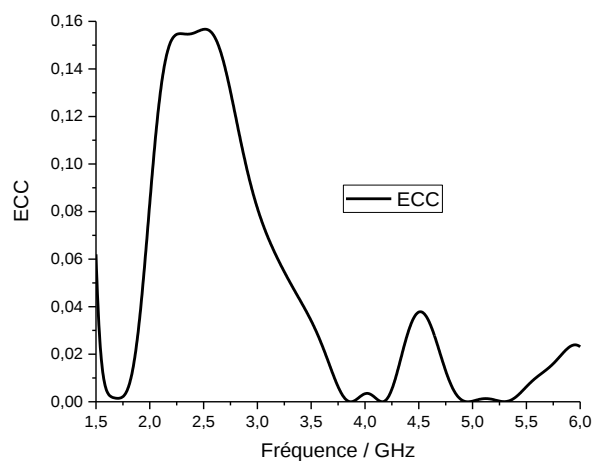


Figure III.24 : Le rapport d'enveloppe corrélation coefficient (ECC).

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

Le coefficient d'enveloppe de corrélation est montré dans la figure III.24 qui donne une valeur inférieure à 0.16 pour la première bande de fréquence et presque la valeur zéro à la deuxième bande de fréquence.

Travaux (année)		Bande de fréquence (GHZ)	S11 (dB)	VSWR	Gain (dB/dBi)	ECC	Complexité	Polarisation
[III.5] (2018)		1.3-2.6	-25	<2	2.48	<0.2	Diode varactor	/
[III.6] (2018)		2-5 2-3.7 1.8-3.4 1-3.7	-30	<2	2.7	/	Diode PIN	/
[III.7] (2018)		2.45-3.55	-38	<2	4.25	/	Diode varactor	/
[III.8] (2017)		2.2-6	-33	<2	3	<0.4	Diode PIN	/
[III.4] (2020)		3.2-4.4, 6.2-6.8	-12.5 -15.5	<1.5	4.47	/	Conçue avec 4 diodes	/
Notre travail	Antenne unitaire	4.5-5.2	-47	1	4.11	/	Faible couts, facile a fabriqué	Circulaire
	Antenne MIMO	1.6-2.8 4.6-5.6	-19 -32	1.04		<0.001		Circulaire

Tableau III.3 : Comparaison des performances de l'antenne conçu avec d'autre travaux publiés dans la littérature.

Afin de montrer les avantages et les points forts de notre antenne conçu et réalisé, nous avons proposé le tableau III.3 comme comparaison entre notre travail et d'autre travaux publiés récemment dans les littératures. Ref.[III.5], ref.[III.7] et ref.[III.8] donnent des antennes reconfigurables avec une seule bande de fréquence et des valeurs de gain égal à 2.48 dBi, 3 et 4.25 dBi, respectivement. Dans ref. [III.6] l'antenne est multi bande ce qui est comme avantage dans ce modèle d'antenne avec un gain maximum de 2.7 dBi mais tous ces modèles en référence présentent une complexité dans la structure lors de la réalisation tel qu'ils utilisent les diodes et en revanche ils les rendent difficiles à l'intégration dans les petits circuits dont ils ont dédié. Comparant avec notre modèle final reconfigurable en fréquence et en polarisation,

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

l'antenne fonctionne en deux bandes de fréquence destinés aux applications mobiles et un rapport de ECC très faibles qui montre l'isolation entre les deux ports d'alimentation sans ajout d'autre court-circuit dans la structure de l'antenne. Le port fort aussi de notre antenne réside dans leur faible cout sans aucune ajout (comme diode par exemple) et leur fabrication facile.

Partie 2 : Test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

IV.1 Introduction

L'utilité de l'antenne est basée généralement sur leur performance citant par exemple la fréquence de résonance, la directivité de champs rayonné, le gain ...etc. Sachant que, ces derniers sont influençables par les caractéristiques de l'environnement choisie pour exploiter l'antenne. Dans cette partie, nous avons proposés deux environnement virtuel Indoor, le premier avec une topologie Adhoc et le deuxième avec une topologie infrastructure.

IV.2 Topologie Adhoc

Dans cette topologie, nous avons proposé un réseau composé de 05 périphériques réseau (host) de type téléphone portable nommé : host A, host B, host R1, host R2, host R3. Chaque périphérique réseau est configuré suite aux caractéristiques de nos antennes réalisés ; dans cette topologie nous avons utilisé la première bande de fréquences [1.8GHz-2.1GHz] comme montre la figure III.35 avec un gain de 1.5 dB, un espace de communication Indoor de 500mètres, une puissance de transmission de 1.2 mW, un niveau de bruit maximum égal à -90 dBm et un débit de transmission de 1Mbits/s. (voir annexe 2).

La figure montre le coefficient de réflexion de l'antenne sous test.

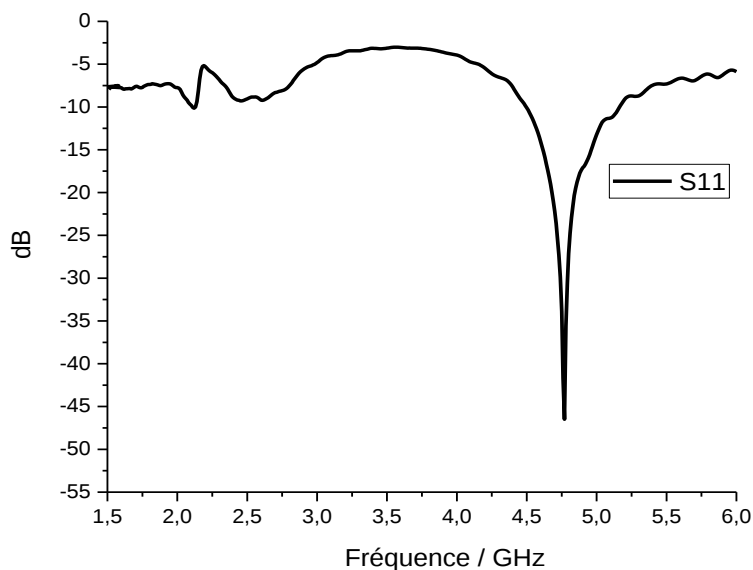
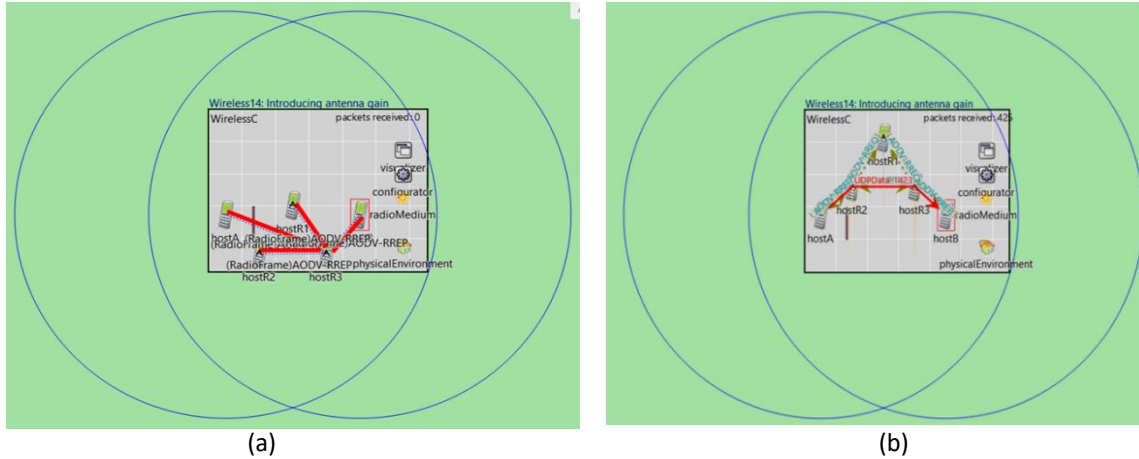


Figure III.25 : Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne sous test.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

Figure (III.26) a, b et c montre la topologie Adhoc de réseau en mouvement, dans cette topologie nous avons utilisés aussi un obstacle pour voir les effets de réflexions des signaux émis sur les performances de l'antenne figure III.29,30,31 et 32.



Le code source en C++ montré dans ce paragraphe montre la configuration de la topologie Adhoc proposé avec les principales caractéristiques suivante : bande de fréquences [1.8GHz-2.1GHz] comme montre la figure III.35 avec un gain de 1.5 dB, un espace de communication Indoor de 500mètres, une puissance de transmission de 1.4 mW, un niveau de bruit maximum égal à -90 dBm et un débit de transmission de 1Mbps/s.

```

[Config Wireless01]
description = Two hosts communicating wirelessly
network = WirelessA
sim-time-limit = 25s

*.host*.networkLayer.arpType = "GlobalARP"

*.hostA.numUdpApps = 1
*.hostA.udpApp[0].typename = "UDPBASICApp"
*.hostA.udpApp[0].destAddresses = "hostB"
*.hostA.udpApp[0].destPort = 5000
*.hostA.udpApp[0].messageLength = 1000B
*.hostA.udpApp[0].sendInterval = exponential(12ms)
*.hostA.udpApp[0].packetName = "UDPData"

*.hostB.numUdpApps = 1
*.hostB.udpApp[0].typename = "UDPSink"
*.hostB.udpApp[0].localPort = 5000

*.host*.wlan[0].typename = "IdealWirelessNic"
*.host*.wlan[0].mac.useAck = false
*.host*.wlan[0].mac.fullDuplex = false
*.host*.wlan[0].radio.transmitter.communicationRange = 500m
*.host*.wlan[0].radio.receiver.ignoreInterference = true

*.host*.**.bitrate = 1Mbps

```

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

```
[Config Wireless12]
description = Changing to a more realistic radio model
extends = Wireless11

*.mediumType = "APSKScalarRadioMedium"
*.radioMedium.backgroundNoise.power = -90dBm
*.radioMedium.mediumLimitCache.carrierFrequency = 2GHz

*.host*.wlan[0].radioType = "APSKScalarRadio"
*.host*.wlan[0].radio.carrierFrequency = 1.8GHz
*.host*.wlan[0].radio.bandwidth = 300MHz
*.host*.wlan[0].radio.transmitter.power = 1.4mW
*.host*.wlan[0].radio.transmitter.preambleDuration = 10us
*.host*.wlan[0].radio.transmitter.headerBitLength = 0b
*.host*.wlan[0].radio.receiver.sensitivity = -85dBm
*.host*.wlan[0].radio.receiver.energyDetection = -85dBm
*.host*.wlan[0].radio.receiver.snirThreshold = 4dB

..

[Config Wireless13]
description = Configuring a more accurate pathloss model
extends = Wireless12

*.physicalEnvironment.groundType = "FlatGround"
*.physicalEnvironment.ground.elevation = 0m

*.radioMedium.pathLossType = "TwoRayGroundReflection"

#-----
[Config Wireless14]
description = Introducing antenna gain
extends = Wireless13

*.host*.wlan[0].radio.antennaType = "ConstantGainAntenna"
*.host*.wlan[0].radio.antenna.gain = 1.5dB
```

Figure III.27 : Code source de la topologie Adhoc.

La figure III.28 montre le scénario de communication entre les hosts, le type de message utilisé sont de type UDP (User Datagram Protocol), le paquet de chaque message il est de 1 Mbits. Le protocole CSMA (Carrier-Sense Multiple Access) de gestion des collisions est aussi utilisé avec une taille de 8 octets de durée égal 0.074 ms. L'adressage IP est de classe A.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

Event#	Time	Relevant Hops	Name	ID	Kind	Length			
#567	0.395366450688	hostA --> hostB	UDPData-2	inet::ApplicationPacket:1000 bytes	UDP: 10.0.0.1.1025 > 10.0.0.2.5000: (1008)	IPv4: 10.0.0.1 >			
#567	0.395366450688	hostA --> hostR1	UDPData-2	inet::ApplicationPacket:1000 bytes	UDP: 10.0.0.1.1025 > 10.0.0.2.5000: (1008)	IPv4: 10.0.0.1 >			
#567	0.395366450688	hostA --> hostR2	UDPData-2	inet::ApplicationPacket:1000 bytes	UDP: 10.0.0.1.1025 > 10.0.0.2.5000: (1008)	IPv4: 10.0.0.1 >			
#567	0.395366450688	hostA --> hostR3	UDPData-2	inet::ApplicationPacket:1000 bytes	UDP: 10.0.0.1.1025 > 10.0.0.2.5000: (1008)	IPv4: 10.0.0.1 >			
#589	0.403539204529	hostB --> hostA	CsmaAck	inet::CsmaCaMacAckFrame:8 bytes	duration=0.074ms				
#589	0.403539204529	hostB --> hostR1	CsmaAck	inet::CsmaCaMacAckFrame:8 bytes	duration=0.074ms				
#589	0.403539204529	hostB --> hostR2	CsmaAck	inet::CsmaCaMacAckFrame:8 bytes	duration=0.074ms				
#589	0.403539204529	hostB --> hostR3	CsmaAck	inet::CsmaCaMacAckFrame:8 bytes	duration=0.074ms				
#613	0.404868450688	hostA --> hostB	UDPData-2	inet::ApplicationPacket:1000 bytes	UDP: 10.0.0.1.1025 > 10.0.0.2.5000: (1008)	IPv4: 10.0.0.1 >			
#613	0.404868450688	hostA --> hostR1	UDPData-2	inet::ApplicationPacket:1000 bytes	UDP: 10.0.0.1.1025 > 10.0.0.2.5000: (1008)	IPv4: 10.0.0.1 >			
#613	0.404868450688	hostA --> hostR2	UDPData-2	inet::ApplicationPacket:1000 bytes	UDP: 10.0.0.1.1025 > 10.0.0.2.5000: (1008)	IPv4: 10.0.0.1 >			
#613	0.404868450688	hostA --> hostR3	UDPData-2	inet::ApplicationPacket:1000 bytes	UDP: 10.0.0.1.1025 > 10.0.0.2.5000: (1008)	IPv4: 10.0.0.1 >			

Figure III.28 : Scenario de communication de hosts avec une topologie Adhoc.

La figure III.29 montre le débit reçu en envoyer d'host B (Throughput en anglais) en fonctions de la durée d'exécution qui est définie par 25 s.

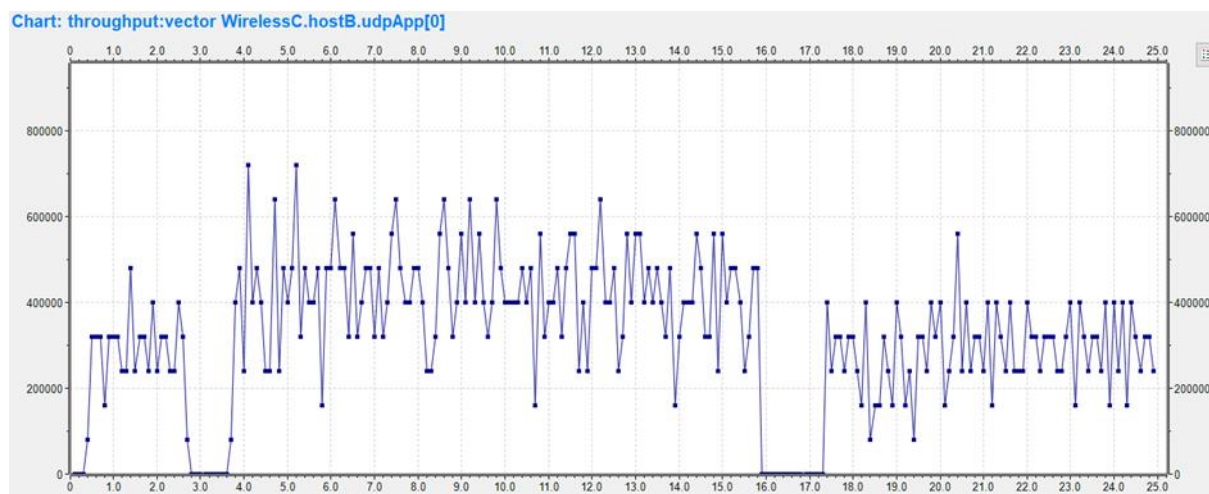


Figure III.29 : Débit reçue et envoyer par le périphérique réseau B.

La figure III.30 montre le niveau d'énergie lors de la transmission d'host B définie au maximum par 1.4mW en fonction de la durée d'exécution 25s.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

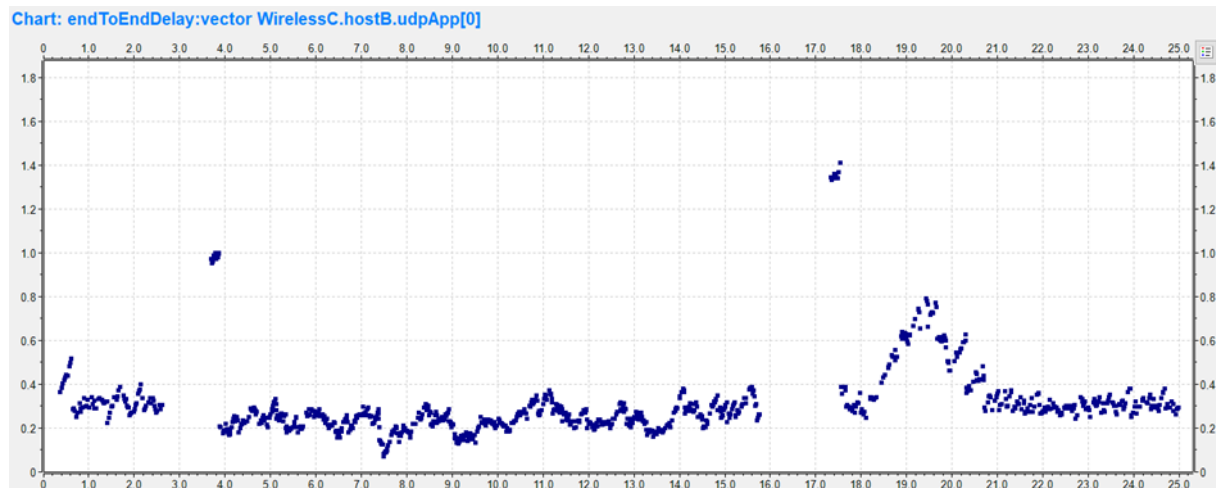


Figure III.30 : Puissance de transmission d'host B.

La figure III.31 illustre l'énergie consommée par l'Host R2 en fonction de la durée d'exécution, nous pouvons remarquer qu'il y a une grande consommation après le 0 s et 2.8 s qui montre que l'host R2 a une visibilité directe de périphérie émetteur des données après 0 consommation entre 2.9s et 3.8 s suite à l'obstacle dans la topologie, et nous observons que la forte consommation recommence à partir de la 17ème s jusqu'à la fin du scénario.

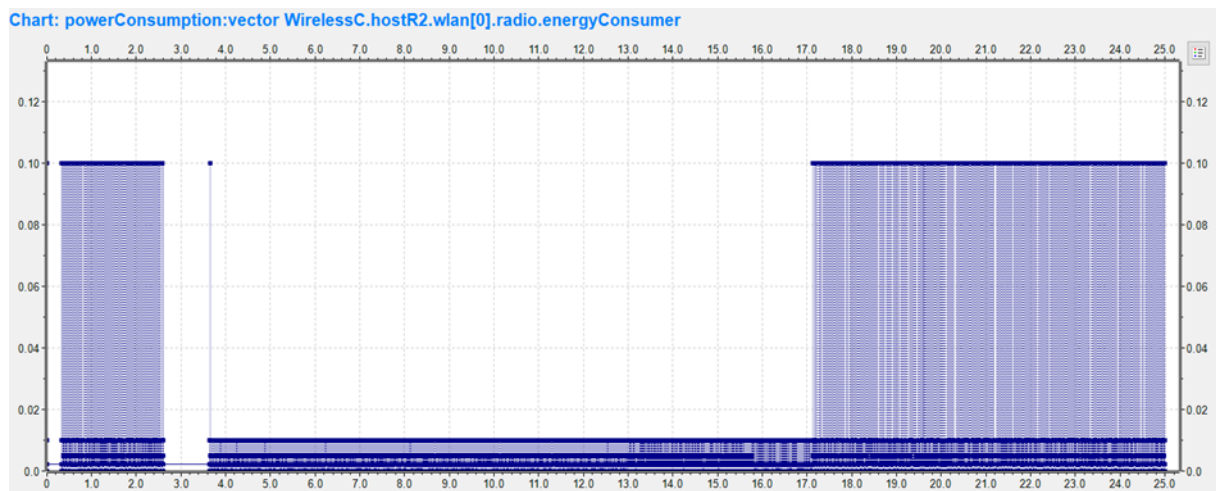


Figure III.31 : Consommation d'Énergie en fonction de la durée d'exécution.

Dans cette figure III.32, nous avons le niveau des données retransmis par l'host R3 (voir figure topologie), à cause de ce dernier nous observons que la transmission de R3 commence à 17ème seconds. c.à.d. la période de 1 s jusqu' à 17 s c'est le temps de récupération des données à partir de Host A.

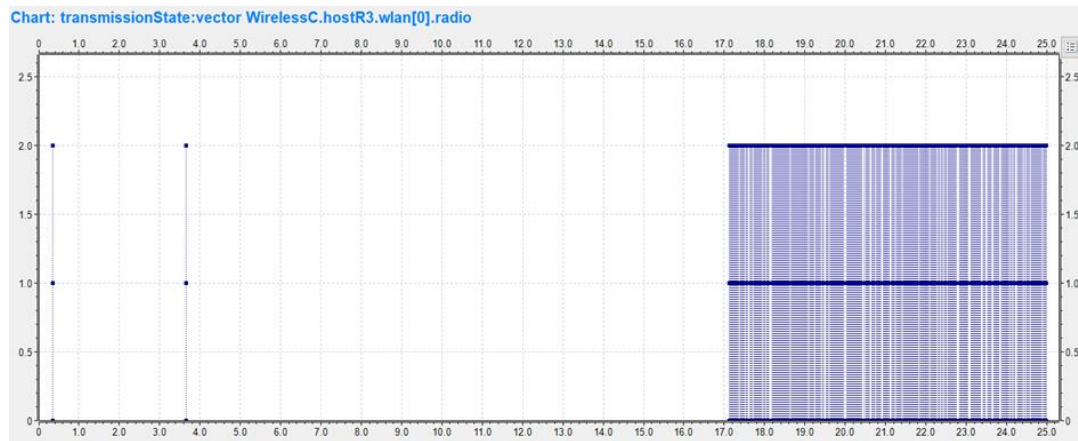


Figure III.32 : Retransmission des données à $t=17s$.

IV.3 Topologie Infrastructure

La topologie infrastructure montrée dans la figure III.33 composée de deux modems nommés ap1 et ap2 (ap pour Access Point), et un périphérique réseau nommé host.

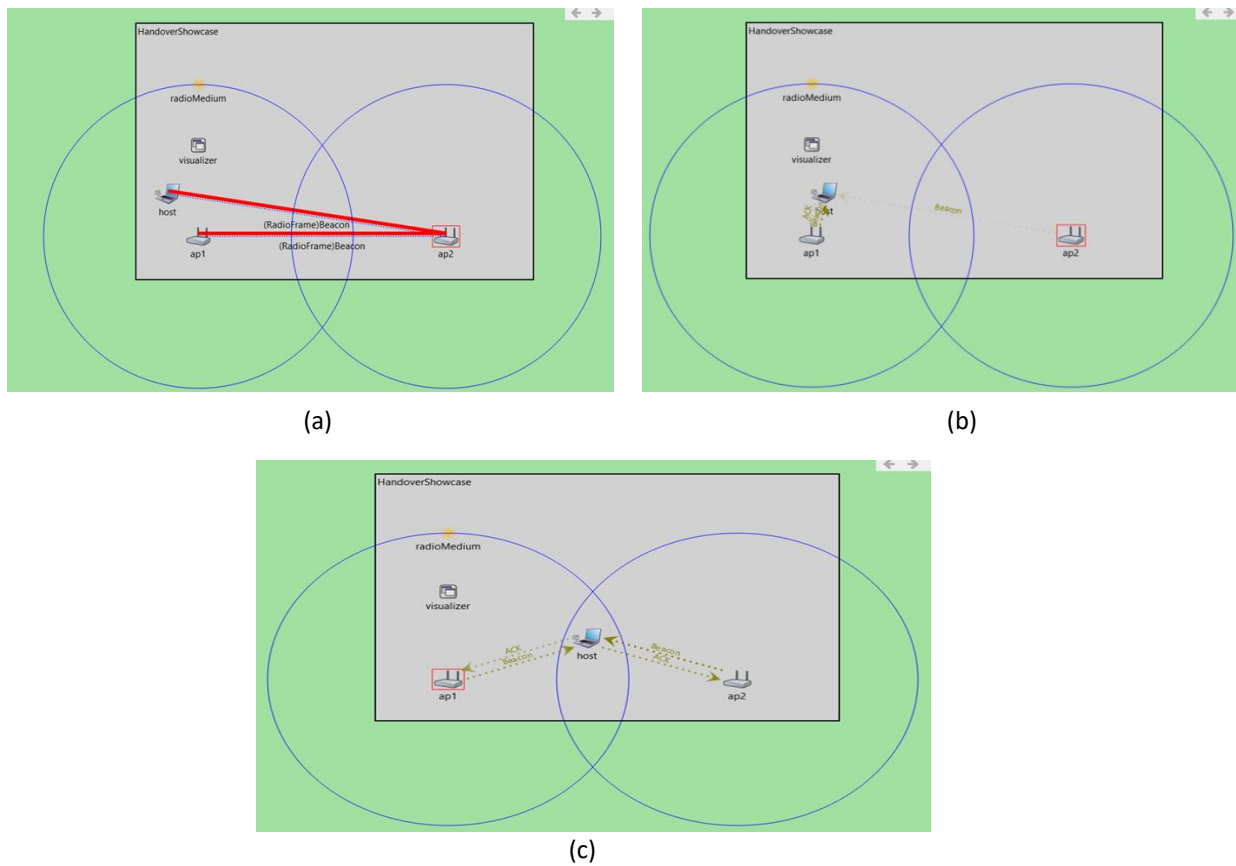


Figure III.33 (a) (b) (c) : Topologies Infrastructure.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

Le code source en C++ montré dans la figure III.34 illustre la configuration de la topologie infrastructure proposé avec les principales caractéristiques suivante : fréquence de résonance 2.2 GHz avec un gain de 1.67 dB pour ap1 et 5Ghz avec un gain de 3.11 GHz pour ap2 comme montre la figure III.35. Le mouvement d'host se faite sur une superficie de 800mx40m. la puissance d'émission des deux antennes égales à 2 mW.

```
# management submodule parameters
**.mgmt.numChannels = 5

# access point
**.ap1.wlan[*].mgmt.ssid = "AP1"
**.ap2.wlan[*].mgmt.ssid = "AP2"
**.ap*.wlan[*].mgmt.beaconInterval = 100ms
**.ap1.wlan[*].radio.carrierFrequency = 2.2GHz
***.ap1.wlan[*].radio.bandwidth = 300MHz
**.ap1.wlan[*].transmitter.power = 1.4mW
***.ap1.wlan[*].radio.receiver.sensitivity = -85dBm
**.ap1.wlan[*].radio.antenna.gain=1.67dB

**.ap2.wlan[*].radio.carrierFrequency = 5GHz
***.ap2.wlan[*].radio.bandwidth = 500MHz
**.ap2.wlan[*].transmitter.power = 1.4mW
***.ap2.wlan[*].radio.receiver.sensitivity = -85dBm
**.ap2.wlan[*].radio.antenna.gain=3.11dB

*.host*.mobilityType = "LinearMobility"
*.host*.mobility.speed = 10mps
*.host*.mobility.angle = 0deg
*.host*.mobility.updateInterval = 100ms
*.host.mobility.constraintAreaMinX = 40m
*.host.mobility.constraintAreaMaxX = 800m

# wireless channels
**.ap1.wlan[*].radio.channelNumber = 2
**.ap2.wlan[*].radio.channelNumber = 3
**.host.wlan[*].radio.channelNumber = 0 #

# wireless configuration
**.radio.transmitter.power = 2.0mW #

**.networkConfiguratorModule = "" #

**.wlan[*].agent.activeScan = true
**.wlan[*].agent.default_ssid = ""
**.wlan[*].agent.channelsToScan = "" #
**.wlan[*].agent.probeDelay = 0.1s
**.wlan[*].agent.minChannelTime = 0.15s
**.wlan[*].agent.maxChannelTime = 0.3s
#-----
@ [Config Wireless14]
description = Introducing antenna gain
extends = Wireless01

*.host*.wlan[*].radio.antenna.typeName = "CosineAntenna"
*.host.wlan[*].radio.antenna.beamWidth=30deg
*.host*.wlan[*].radio.antenna.gain = 4dB
#-----

# visualization
*.visualizer.physicalLinkVisualizer.displayLinks = true
*.ap*.wlan[*].radio.displayCommunicationRange = true
```

Figure III.34 : Code source de la topologie infrastructure.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

La figure III.35 montre le scenario de transmission des données entre l'host et les deux modems. Le type de réseau est LAN (Local Area Network) et la duration de chaque message est de 0.046ms.

Event#	Time	Relevant Hops	Name	ID	Kind	Length
#2502175	7835.664589411509	ap1 --> ap2	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502175	7835.664589411509	ap1 --> ap2	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502190	7835.738438170822	ap2 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502190	7835.738438170822	ap2 --> ap1	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502206	7835.764589411509	ap1 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502206	7835.764589411509	ap1 --> ap2	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502221	7835.838438170822	ap2 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502221	7835.838438170822	ap2 --> ap1	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502237	7835.864589411509	ap1 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502237	7835.864589411509	ap1 --> ap2	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502252	7835.938438170822	ap2 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502252	7835.938438170822	ap2 --> ap1	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502268	7835.964589411509	ap1 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502268	7835.964589411509	ap1 --> ap2	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502283	7836.038438170822	ap2 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502283	7836.038438170822	ap2 --> ap1	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502299	7836.064589411509	ap1 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502299	7836.064589411509	ap1 --> ap2	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502314	7836.138438170822	ap2 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502314	7836.138438170822	ap2 --> ap1	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502330	7836.164589411509	ap1 --> host	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	
#2502330	7836.164589411509	ap1 --> ap2	Beacon	WLAN beacon	duration=0.046ms	

Figure III.35 : Scenario de communication de hosts avec la topologie infrastructure.

La figure III.36 montre les coupures des communication (drop call) entre l'host et chaque modem en fonction de mouvement de l'host.

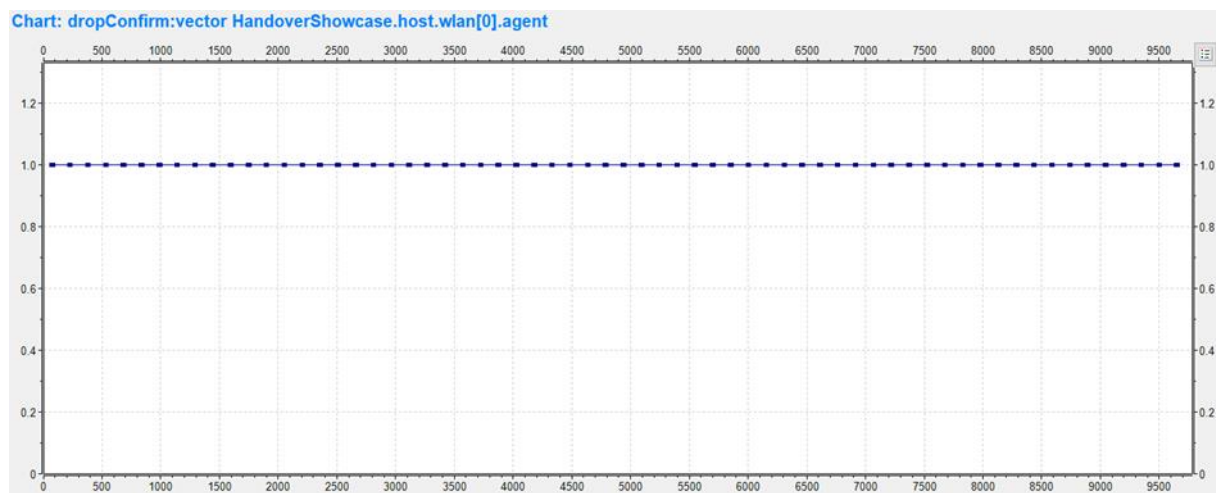


Figure III.36 : Coupure des communications lors de mouvement d'host.

La figure III.37 montre l'attachement de l'host et les deux modems, l'host doit attacher avec le modem qui as une grande puissance d'émission.

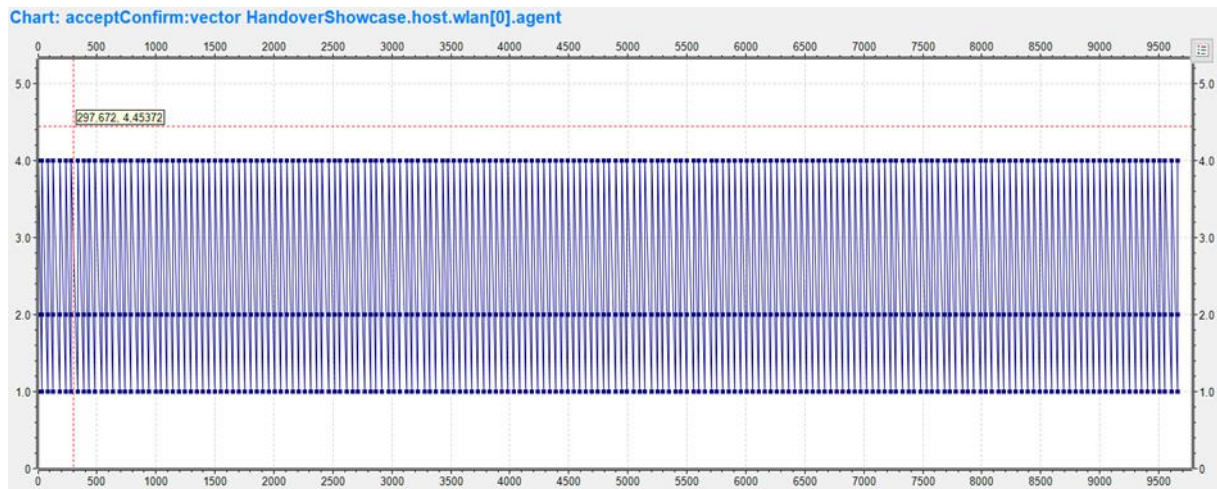


Figure III.37 : Attachement d'host avec les modems ap1 et ap2.

Pour les deux figure III.36 et figure III.37, nous remarquons que n'a pas une influence pertinente des performances des antennes utilisés sur la transmission des modems et ça à cause de la superficie limitée, manque des obstacles car un environnement idéal sans réflexion des signaux et sans multi trajet n'existe pas et aussi le sens de mouvement de l'host qui est juste horizontale.

IV.4 Conclusion et perspectives

Dans cette partie de mémoire, nous avons exploités les performances de nos antennes conçues et réalisés pour un environnement virtuel indoor à travers le logiciel Omnet++. La première proposition été avec une topologie AdHoc tel que nous avons utilisé la bande de fréquence inférieur de notre antenne de 2 GHz et dans la deuxième proposition nous avons utilisées les deux bandes de fréquence 2 GHz et 5 GHz avec une topologie infrastructure.

- Cette dernière contribution nous a orienté a proposé des perspectives de cette phase de travail :

- Etudier le cas de mouvement aléatoire de l'host deux les deux modems.
- Configurer pour chaque modem deux antennes (MIMO) ont la place d'une antenne pour chacun.
- Ajouter les performances de la polarisation des antennes a la configuration.

Chapitre III : Conception d'une antenne MIMO reconfigurable et test des performances de l'antenne dans un environnement virtuel

- Ajouté des obstacles à la topologie pour approcher à un environnement qui assure la multi trajet des signaux transmis ce qui est dans la réalité.
- Proposer la topologie infrastructure pour une réel architecture d'un campus ou entreprise par exemple comme celui montré sur la figure III.38.

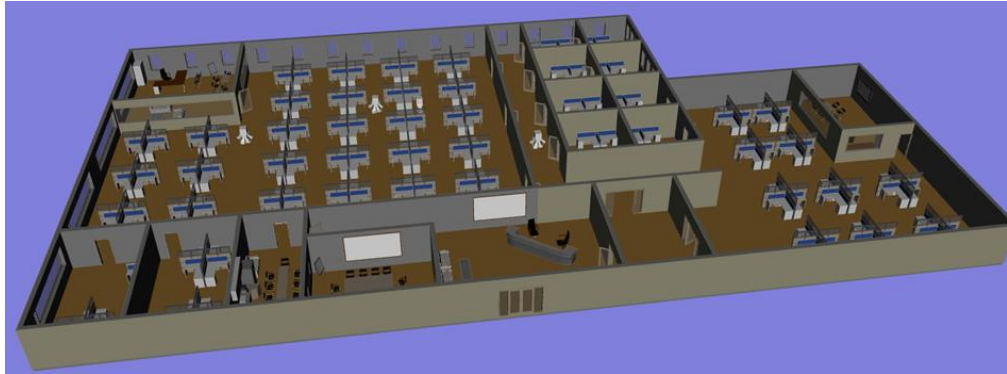


Figure III.38 : Architecture Indoor d'une entreprise.

- Concevoir des modèles d'antennes a d'autre bande de fréquences et étudier l'environnement virtuel outdoor (le cas de : 3G,4G,5G et WiMax).
- Etudier le cas de bascule d'un host d'un réseau a un autre (par exemple de connexion ADSL vers connexion 4G Mobile).

Bibliographies

- [III.1]. Laheg Cherifa, "Etude Et Conception D'une Antenne Mimo Reconfigurable", Mémoire De Master, Université De 8 Mai 1945 Guelma, 2022.
- [III.2]. Zemam Youssouf Et Foukia Aimad Eddine, "Étude Et Conception D'antennes Reconfigurables Par Association D'éléments Actifs", Mémoire De Master, Université De Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2017.
- [III.4]. Dildar, H. Althobiani, F. Ahmad, I. Khan, W.U.R. Ullah, S. Mufti, N.Ullah, S. Muhammad, F. Irfan, M. Glowacz, "A. Design and Experimental Analysis of Multiband Frequency Reconfigurable Antenna for 5G and Sub-6 GHz Wireless Communication", Micromachines Journal, 2021.
- [III.5]. X. Zhao Et S. Riaz,"A Dual-Band Frequency Reconfigurable Mimo Patch-Slot Antenna Based On Reconfigurable Microstrip Feedline", IEEE Access, Vol. 6, pp. 41450-41457, 2018.
- [III.6]. V. Arun,and L.R. Karl Marx," Internet of Things Controlled Reconfigurable Antenna for RF Harvesting", Defence Science Journal, Vol. 68, No. 6, November 2018.
- [III.7]. Y. -M. Cai, K. Li, Y. Yin, S. Gao, W. Hu and L. Zhao, "A Low-Profile Frequency Reconfigurable Grid-Slotted Patch Antenna", IEEE Access, vol. 6, 2018.
- [III.8]. Yasir I. A, George Oguntala Et Abdulkareem S.Abdullah, «Design Of Frequency Reconfigurable Multiband Compact Antenna Using Two Pin Diodes For Wlan/Wimax Applications", IET Microwaves, Antennas & Propagation 11.8: 1098-1105, 2017.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire de fin d'études, notre objectif atteint est de concevoir et de réaliser une antenne MIMO qui peut être reconfigurée en fréquence et en polarisation à faible coût et facile à intégrer dans les petits appareils de communication. Dans cette vision, une présentation détaillée a été réalisée sur les méthodes de reconfigurabilité des antennes. L'utilisation de la souplesse de reconfiguration des antennes patch est destinée à maximiser les performances de l'antenne dans des situations changeantes ou à satisfaire des exigences logistiques.

Dans le premier chapitre, nous avons principalement exposés une vue d'ensemble sur les antennes imprimées, les techniques d'alimentation des antennes et de la technologie MIMO. Dans le deuxième chapitre, nous avons présentés les antennes reconfigurables, les techniques de reconfigurabilité et leur classification.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties. La première partie se concentre sur la conception et la réalisation d'une antenne patch unitaire destinée pour les applications sans fil afin de l'exploiter dans un système antenne de type MIMO reconfigurable en termes de fréquence et de polarisation. Les résultats des mesures sont similaires à ceux des simulations, avec de légères différences pouvant être expliquées par les incertitudes de dimensionnement ou la mauvaise soudure des connecteurs lors de la réalisation. Tandis que la deuxième partie de ce chapitre se focalise sur le test des performances de l'antenne conçue et réalisée dans un environnement virtuel à travers le logiciel Omnet++ dans deux topologies différentes : topologie AdHoc et la topologie infrastructure.

Comme perspective de ce travail, nous souhaitons de concevoir des patches avec d'autre type de diélectrique comme les matériaux ferroélectriques, ferromagnétiques sachant qu'on a été obligé dans ce mémoire de choisir le FR4 comme substrat à cause de leur disponibilité sur le marché.

Nous pouvons aussi dans les futurs travaux d'améliorer la même structure antenne afin d'avoir une antenne reconfigurable dans un réseau de formation des faisceaux.

Pour l'environnement virtuel de test, nous avons proposés dans ce mémoire un environnement parfait (sans obstacles réel), nous voulons dans nos prochains travaux de proposer un environnement quasiment réel avec obstacles afin d'utiliser les effets de réflexion, l'absorption, et d'autres phénomènes sur la performance de l'antenne.

Annexe

Annexe de CST

I. Présentation du logiciel CST Microwave Studio

La société allemande CST (Computer Simulation Technology) a été établie en 1992, avec la première version de CST Microwave Studio lancée en 1998. Ce logiciel est conçu pour résoudre les équations décrivant les champs électromagnétiques. Le logiciel que nous utilisons repose sur la méthode des intégrales finies (FIT, Finite Integration Technique) développée par Tomas Weiland en 1977 dans le cadre de sa thèse universitaire à Darmstadt.

La méthode FIT consiste à reformuler les équations intégrales de Maxwell de manière discrète, rendant ainsi possible leur résolution informatique pour des problèmes impliquant des géométries complexes. La FIT consiste à décrire les équations de Maxwell sur une grille spatiale tout en conservant les propriétés de conservation de l'énergie et en formulant des équations différentielles spécifiques telles que l'équation de Poisson ou l'équation d'onde [IV.1].

Microwave Studio est inclus dans la suite CST DESIGN STUDIO, offrant ainsi plusieurs solveurs adaptés à différents types d'applications et de problèmes rencontrés [IV.2].

Pour créer un nouveau projet, Nous appliquons les étapes suivantes décrites dans la documentation suivante :

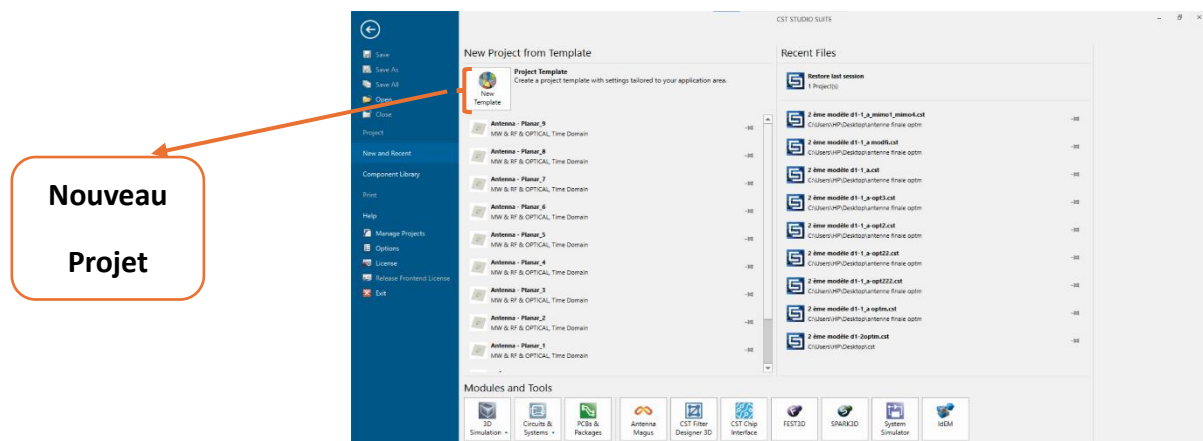


Figure IV.1 : Création d'un nouveau projet.

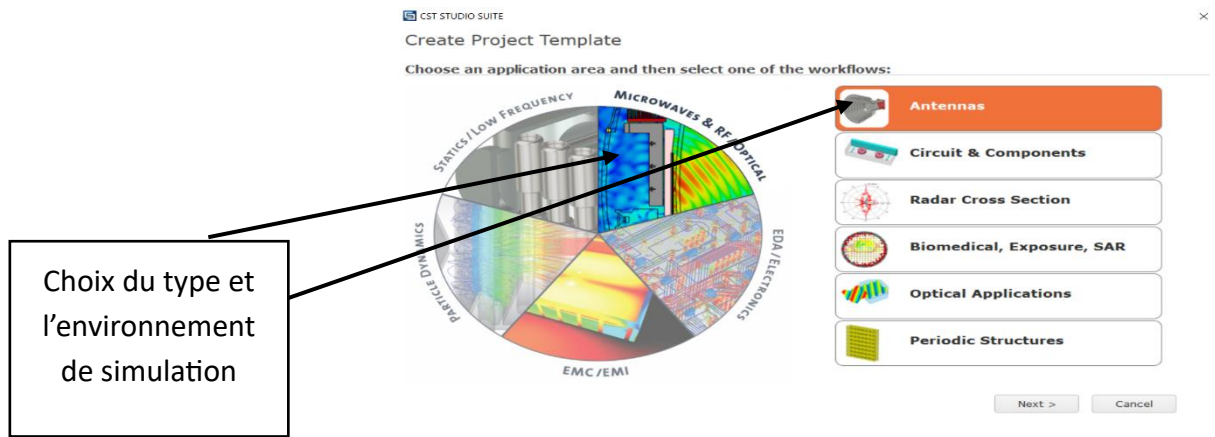


Figure IV.2 : Choix du type et l'environnement de simulation.

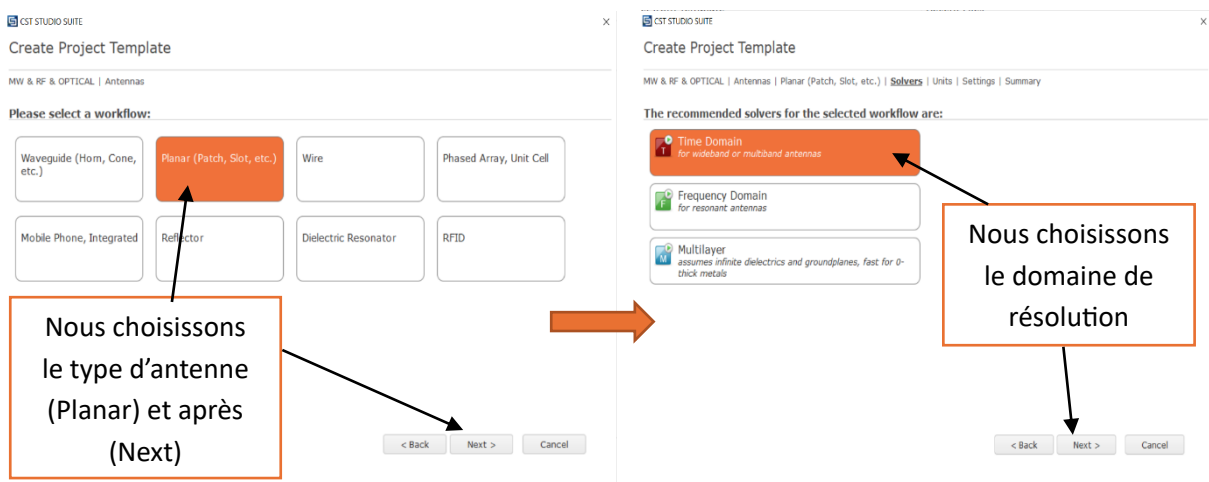


Figure IV.3 : Le choix du type d'antenne et le domaine de résolution.

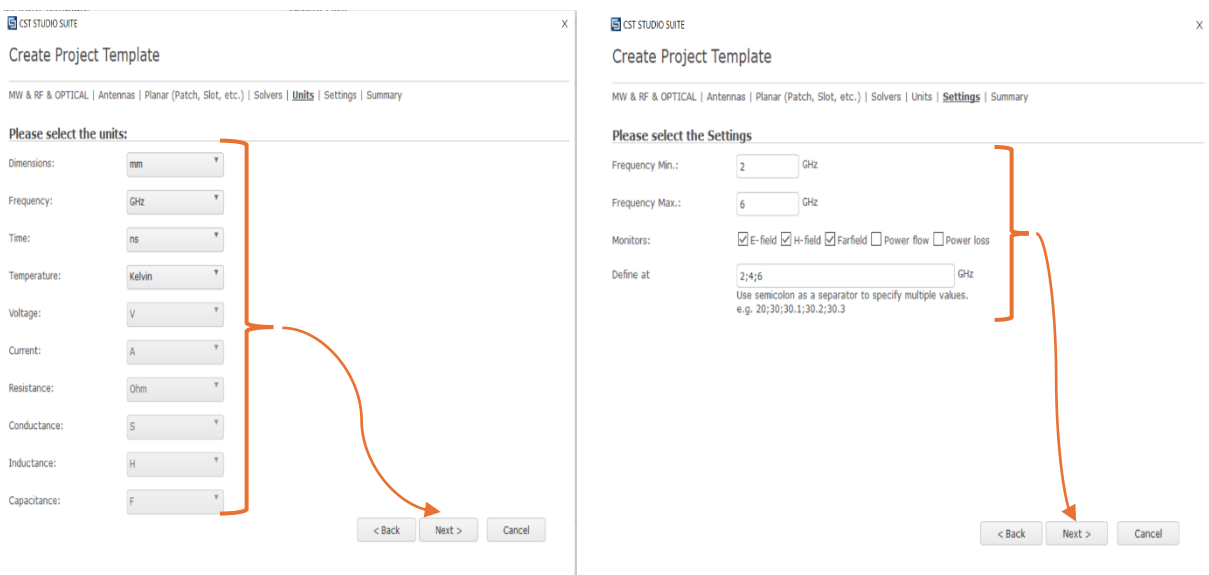


Figure IV.4 : Le choix des unités et la gamme de fréquence d'étude.

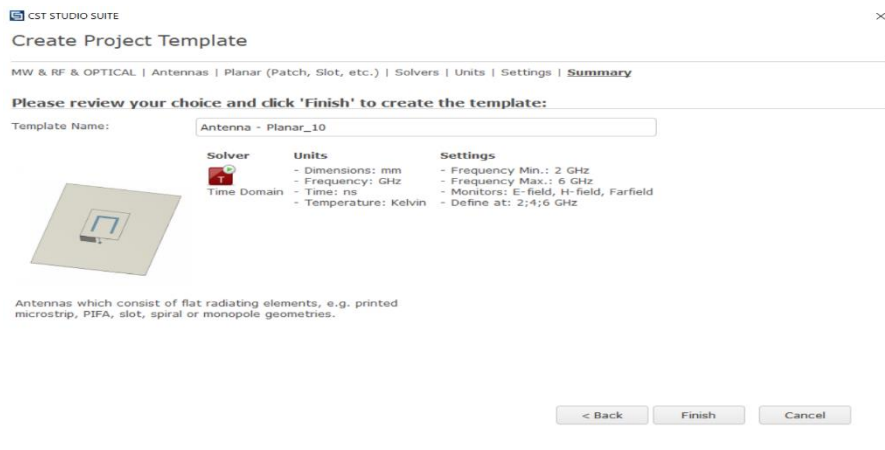


Figure IV.5 : Fin de la création de nouveau projet.

II. Description générale des outils CST

Après avoir sélectionné le modèle de structure, nous accédons à l'interface utilisateur du CST.

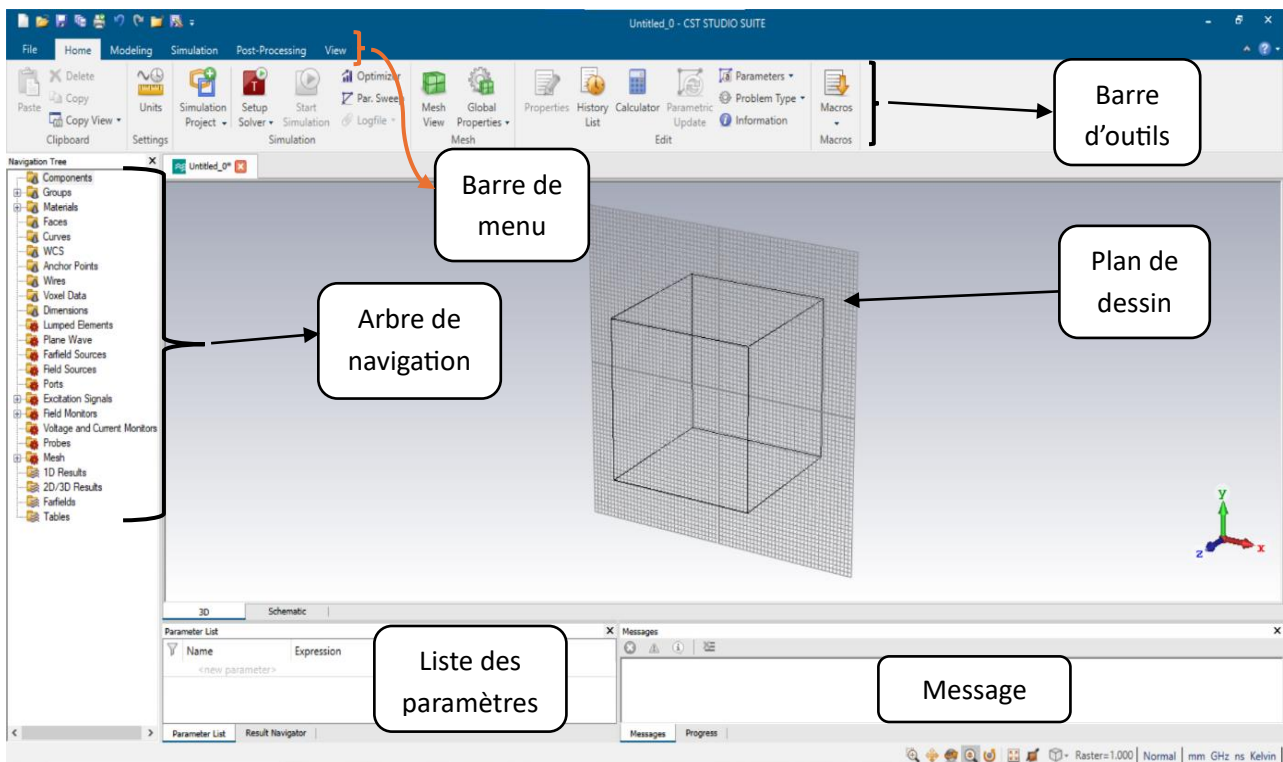


Figure IV.6 : L'interface du logiciel CST MWS.

- La liste des paramètres contient toutes les variables utilisées pendant la simulation, avec leurs valeurs, descriptions et types.
- Le plan de dessin est l'espace de travail où la structure en trois dimensions (3D) est élaborée.
- La barre d'outils propose des raccourcis pour les fonctions de la barre de menu.

- **L'arbre de navigation** constitue une partie cruciale de l'interface utilisateur, permettant d'accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation.
- **Le module Message** fournit un résumé de la simulation, signalant chaque étape réussie ou, le cas échéant, les erreurs rencontrées [IV.1].

Annexe d'OMNET++

I. Présentation d'OMNET++ (Objective Modular Network Testbed in C++)

OMNET++ est un logiciel open source de simulation à événements discrets, développé en langage C++, et disponible sous licence GNU.

Grâce à sa structure modulaire, OMNET++ est très utilisé dans différents secteurs d'applications tels que :

- La modélisation des protocoles de communications,
- La modélisation des réseaux filaires et sans fils,
- La modélisation des systèmes répartis,
- Les architectures Hardware,
- En règle générale, il est adapté à n'importe quel système à événements discrets qui peut être modélisé en fonction des entités communiquant par l'envoi de messages.

OMNET++ est basé sur la plateforme Eclipse. Il offre des ressources pour concevoir et configurer des modèles de réseaux (les fichiers NED et INI), ainsi que des outils pour exécuter un ensemble de programmes et analyser les résultats de simulation [IV.3].

II. Structure d'OMNET++

L'organisation d'OMNET est composée de divers modules classés de manière hiérarchique.

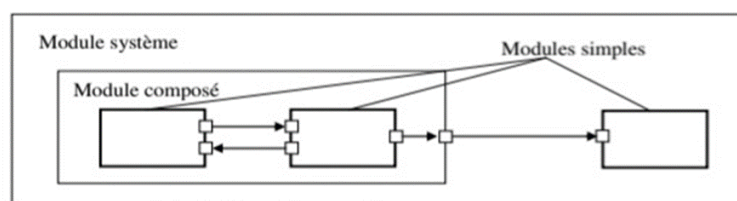


Figure IV.7 : Architecture modulaire d'OMNET++.

* Nous qualifions les modules de base de "modules simples ». Ces fichiers sont des classes C++, comme chaque module simple est accompagné d'un fichier.cc et d'un fichier.h.

* Un "module composé » se compose d'un ou de plusieurs modules simples. De plus, il est possible de regrouper des modules composés pour créer un module composé. Il convient de souligner que la hiérarchie n'est pas restreinte en nombre de niveaux.

* Un "module système » correspond à la couche supérieure de la hiérarchie. C'est l'utilisateur qui le crée (module Network).

- L'interconnexion des divers modules s'opère par le biais d'échanges de messages, pouvant prendre la forme de paquets, de trames sur un réseau informatique, de clients en attente dans une file, et autres.

- L'architecture est conçue de manière à ce que les modules simples assument à la fois le rôle d'émetteurs et de récepteurs de ces messages. Quant aux modules complexes, leur fonction se limite à relayer les messages de manière transparente vers les modules simples.

- Ces messages sont acheminés à travers des ports, désignés sous le nom de "gates" dans le contexte d'OMNET++. Ces "gates" servent d'interfaces d'entrée et de sortie pour chaque module, où une connexion peut être établie entre un port d'entrée et un port de sortie.

III. Les principaux fichiers d'OMNET++

a. Fichier (.Ned) : utilise le langage de description de réseau NED. Il offre deux modes : le Mode Graphique et le Mode Texte pour décrire les paramètres et les ports du module. Les erreurs sont signalées en temps réel par un point rouge à gauche du code.

Un exemple de fichier Ned en mode "Graphique" & "Texte" sont présentés dans la (Figure IV.8) et (Figure IV.9).

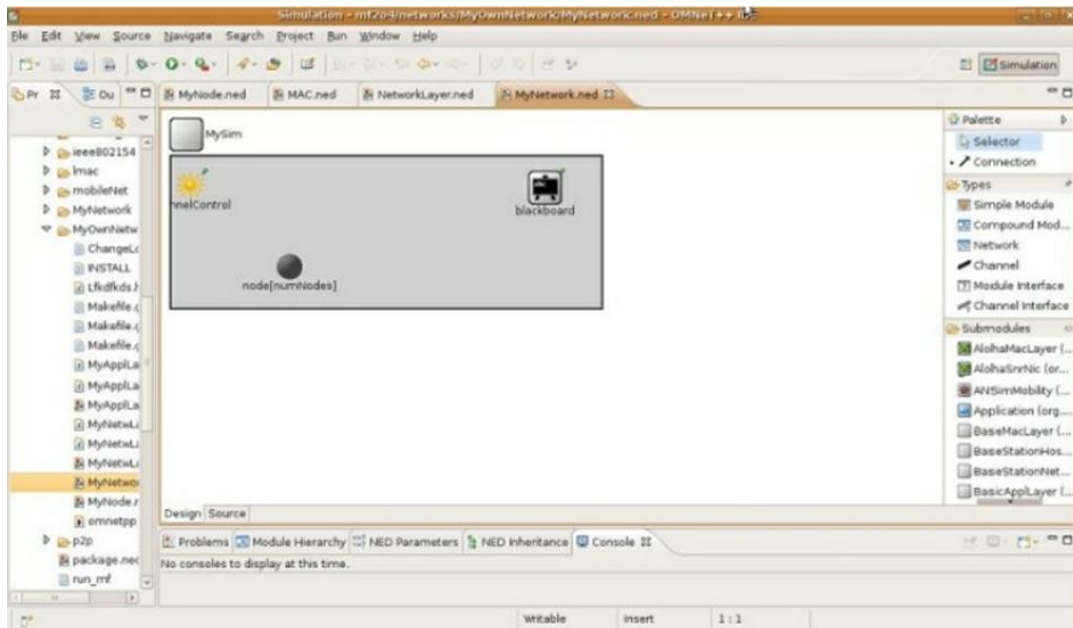


Figure IV.8 : Fichier NED en mode graphique. [IV.3]

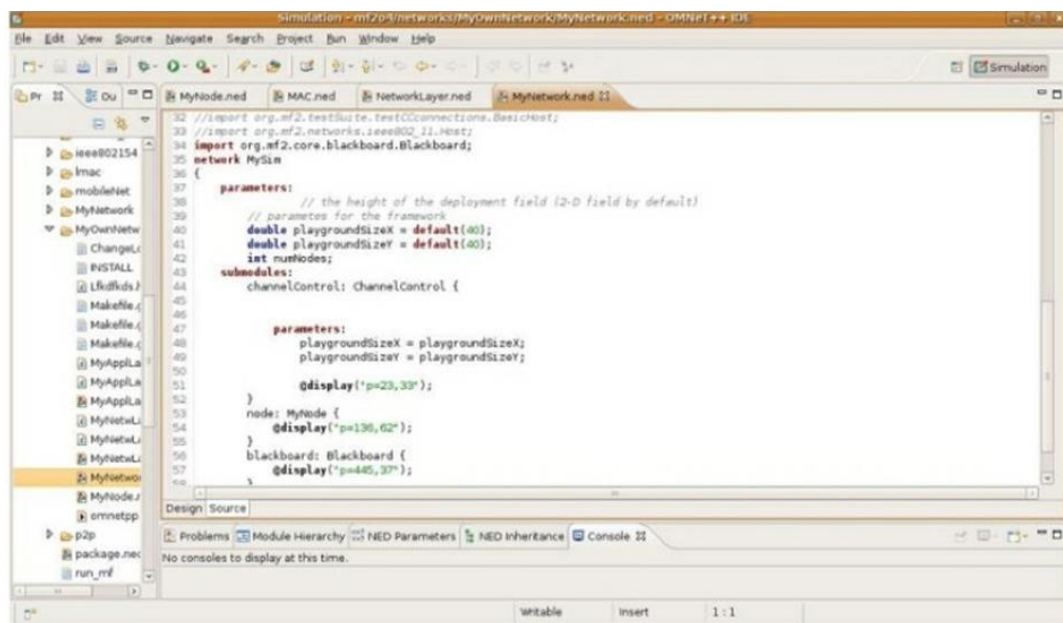


Figure IV.9 : Fichier NED en mode texte. [IV.3]

b. Fichier (.ini) : Il permet à l'utilisateur d'initialiser les paramètres des différents modules ainsi que la topologie du réseau.

c. Fichier (.msg) : est utilisé pour la communication entre les modules par l'échange de messages. Ces messages peuvent être déclarés dans un fichier avec l'extension (.msg), où des champs de données peuvent être ajoutés. OMNET++ traduira les définitions de messages en classes C++ [IV.4].

Bibliographies

- [IV.1]. Berroua Nora Et Cheris Akila, "Etude Paramétrique Et Simulation De L'antenne Patch Sous Cst ", Mémoire De Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2017.
- [IV.2]. LAHEG Cherifa, "Etude Et Conception D'une Antenne MIMO Reconfigurable", Mémoire De Master, Université De 8 Mai 1945 Guelma, 2022.
- [IV.3]. Leila Imane Niar, "Analyse Graphique Pour La Surveillance Dans Un Réseau De Capteurs Sans Fil (Rcsf) ", Mémoire De Master, Université D'oran, 2012.
- [IV.4]. Bourane Abir Et Hessen Meriem, "Contribution A L'étude D'une Solution Pour Handoff Sur Les Réseaux Sans Fil Avec Omnet++ ", Mémoire De Master, Université Djillali Liabès De Sidi Bel Abbès, 2022.