

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 الدكتور الطاهر مولاي سيدة-

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Projet de recherche présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électronique

Spécialité : Instrumentation

Sujet

**Conception et optimisation d'antennes microruban pour
l'Internet des Objets (IoT) à l'aide du Machine Learning**

Présenté par : MADANI Fatima Zohra & SOUIAH Cherifa

Soutenue publiquement, Juin 2026, devant le jury composé de :

Pr. M. BOUKHALFA	MCB	Univ. Saida	Président
Dr. S. SEGHER	MCB	Univ. Saida	Encadrant
Dr. T. ABBES	MCB	Univ. Saida	Examineur

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, le courage et la volonté nécessaires pour accomplir ce travail.

*Nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadrant, Docteur **Seghier Salima**, pour ses orientations, ses remarques, ses conseils et son aide permanente tout au long de la réalisation de cette recherche scientifique. Merci infiniment.*

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation et à la révision de notre mémoire.

Un merci tout particulier au Dr Abbes Turkia pour son aide.

Nos remerciements s'adressent également à tous les enseignants du département d'électronique.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents qui nous ont soutenus tout au long de notre parcours ; si nous sommes arrivés jusqu'ici aujourd'hui, c'est grâce à eux.

Merci à vous tous.

Dédicaces

Grâce à Dieu et louange à Allah qui a rempli nos cœurs de gratitude et de reconnaissance par Sa grâce. Aujourd'hui, je vois enfin se réaliser un rêve longtemps attendu, et j'en suis fier(ère). À présent, avec l'aide d'Allah le Tout-Puissant, j'achève ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'études et de persévérance, exprimant ma gratitude et ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à cette réussite, ne serait-ce que par un mot.

En particulier, à mes chers parents, qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours grâce à leurs encouragements, leurs conseils, leur amour et leur soutien pour ma réussite. C'est une grande fierté pour moi. Merci pour votre présence à mes côtés et pour les valeurs nobles que vous m'avez transmises.

À mes frères et sœurs : Zineb, Maryamet Adnan, je vous aime.

À ma famille Madani et Laribi, et en particulier à mes tantes ainsi qu'à mes cousines :

Fatima, Halima, Ikram, Anfal, Safaa, Marwa et Israa. Merci pour vos prières et vos encouragements, je vous aime.

À ma partenaire et compagne de route, Souiah Cherifa, mon amie avec qui j'ai partagé mes années universitaires dans les bons comme dans les mauvais moments. Merci ma collègue, je t'aime.

À tous les amis avec qui j'ai partagé de beaux moments

MADANI Fatima Zohra

Dédicaces

À mes chers parents

Ma mère et mon père, en témoignage de ma profonde gratitude pour leur amour, leur soutien indéfectible et les nombreux sacrifices consentis tout au long de mon parcours universitaire.

À mes frères et sœurs Hanane, Djalil, Kacem et ma grande sœur F, et la femme de mon frère KH ainsi qu'à son époux et à leurs deux filles, Sofia et Sondes, en reconnaissance de leur affection sincère et de leur soutien permanent.

À ma fidèle amie Fatima véritable compagne de route et soutien précieux, ainsi qu'à mon amie Khadîdja, à qui je souhaite beaucoup de réussite et de succès dans son parcours académique.

À mes deux familles. La famille Souiah et la famille Mezari, pour leur encouragement, leur bienveillance et leur soutien tout au long de cette aventure.

À mon encadreur Mme Seghier. S, ainsi qu'à Mme Abbas, pour leurs précieux conseils, leur accompagnement et leur contribution à la réalisation de ce travail.

À mon compagnon de route Didi, pour son soutien constant, sa confiance, sa patience et ses encouragements qui m'ont aidée à surmonter les difficultés et à mener ce travail à son terme.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire, je dédie ce modeste travail avec toute ma gratitude et mon profond respect.

Souiah cherifa

RESUME:

Le développement rapide de l'Internet des Objets (IoT) et des réseaux de communication de cinquième génération (5G) a entraîné une demande croissante pour des antennes compactes, performantes et facilement intégrables dans les dispositifs connectés. Grâce à leur faible coût, leur légèreté et leur simplicité de fabrication, les antennes microruban constituent une solution particulièrement adaptée à ces applications. Cependant, l'amélioration de leurs performances, notamment en termes d'adaptation d'impédance, de gain et de bande passante, demeure un défi majeur pour répondre aux exigences des systèmes IoT modernes. Ce mémoire porte sur la conception et l'optimisation d'antennes microruban destinées aux applications IoT fonctionnant dans la bande 5G de 3,5 GHz. Dans un premier temps, une antenne microruban rectangulaire avec encoche (Inset Feed) a été conçue et simulée. Les paramètres de cette structure ont ensuite été optimisés à l'aide de techniques d'apprentissage automatique (Machine Learning) implémentées sous Python, dans le but d'améliorer le coefficient de réflexion (S_{11}) et le gain de l'antenne. Cette approche a permis d'automatiser le processus d'optimisation et d'identifier les dimensions géométriques offrant les meilleures performances. Dans un second temps, une nouvelle structure d'antenne microruban inspirée de la forme d'une feuille de plante a été proposée et étudiée afin d'explorer une géométrie innovante susceptible d'améliorer les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne. Les simulations électromagnétiques des différentes structures ont été réalisées à l'aide du logiciel Ansys HFSS. Les résultats obtenus montrent que l'optimisation par Machine Learning appliquée à l'antenne rectangulaire a permis d'améliorer significativement les performances en termes de coefficient de réflexion et de gain. Par ailleurs, la structure microruban proposée présente des caractéristiques prometteuses pour les applications IoT à 3,5 GHz. L'ensemble des résultats confirme l'intérêt de combiner les techniques de conception d'antennes microruban avec les méthodes d'intelligence artificielle afin de développer des solutions performantes pour les systèmes IoT de nouvelle génération.

MOTS CLES:

Antenne microruban, Internet des Objets (IoT), communication sans fil, 5G, optimisation, Machine Learning, Python, logiciel HFSS.

Abstract:

The rapid development of the Internet of Things (IoT) and fifth-generation (5G) communication networks has led to a growing demand for compact, high-performance antennas that are easily integrated into connected devices. Thanks to their low cost, lightweight design, and ease of fabrication, microstrip antennas are a particularly suitable solution for these applications. However, improving their performance, especially in terms of impedance matching, gain, and bandwidth, remains a major challenge in meeting the requirements of modern IoT systems. This thesis focuses on the design and optimization of microstrip antennas for IoT applications operating in the 3.5 GHz 5G band. Initially, a rectangular microstrip antenna with an inset feed was designed and simulated. The parameters of this structure were then optimized using machine learning techniques implemented in Python, with the aim of improving the reflection coefficient (S_{11}) and the antenna gain. This approach enabled the automation of the optimization process and the identification of geometric dimensions offering the best performance. Subsequently, a new microstrip antenna structure inspired by the shape of a plant leaf was proposed and studied to explore an innovative geometry capable of improving the antenna's electromagnetic characteristics. Electromagnetic simulations of the different structures were performed using Ansys HFSS software. The results obtained show that machine learning optimization applied to the rectangular antenna significantly improved performance in terms of reflection coefficient and gain. Furthermore, the proposed microstrip structure exhibits promising characteristics for 3.5 GHz IoT applications. All of these results confirm the value of combining microstrip antenna design techniques with artificial intelligence methods to develop high-performance solutions for next-generation IoT systems.

Keywords:

Microstrip antenna, Internet of Things (IoT), wireless communication, 5G, electromagnetic optimization, Machine Learning, Python, HFSS software.

ملخص:

أدى التطور السريع لإنترنت الأشياء (IoT) وشبكات الجيل الخامس (5G) إلى تزايد الطلب على هوائيات صغيرة الحجم وعالية الأداء، يسهل دمجها في الأجهزة المتصلة. وبفضل تكلفتها المنخفضة، وخفة وزنها، وسهولة تصنيعها، تُعد هوائيات الميكروستريب حلاً مناسباً لهذه التطبيقات. مع ذلك، لا يزال تحسين أدائها، وخاصةً فيما يتعلق بمطابقة المعاوقة، والكسب، وعرض النطاق الترددي، يُمثل تحدياً كبيراً في تلبية متطلبات أنظمة إنترنت الأشياء الحديثة. تركز هذه الأطروحة على تصميم هوائيات الميكروستريب وتحسينها لتطبيقات إنترنت الأشياء العاملة في نطاق تردد 3.5 جيجاهرتز لشبكات الجيل الخامس. في البداية، تم تصميم هوائي ميكروستريب مستطيل الشكل مزود بمُعْزٍ داخلي، ثم تمت محاكاته. بعد ذلك، تم تحسين معلمات هذا الهيكل باستخدام تقنيات التعلم الآلي المُطبقة بلغة بايثون، بهدف تحسين معامل الانعكاس (S11) وكسب الهوائي. وقد مكّن هذا النهج من أتمتة عملية التحسين وتحديد الأبعاد الهندسية التي تُوفر أفضل أداء. لاحقاً، تم اقتراح ودراسة بنية جديدة لهوائي الميكروستريب مستوحاة من شكل ورقة النبات، وذلك لاستكشاف هندسة مبتكرة قادرة على تحسين الخصائص الكهرومغناطيسية للهوائي. أُجريت محاكاة كهرومغناطيسية للبنية المختلفة باستخدام برنامج Ansys HFSS. تُظهر النتائج أن تحسين الأداء باستخدام تقنيات التعلم الآلي، المُطبقة على الهوائي المستطيل، قد حسّن الأداء بشكل ملحوظ من حيث معامل الانعكاس والكسب. علاوة على ذلك، تُظهر بنية الميكروستريب المقترحة خصائص واعدة لتطبيقات إنترنت الأشياء بتردد 3.5 جيجاهرتز. تؤكد هذه النتائج مجتمعة أهمية دمج تقنيات تصميم هوائيات الميكروستريب مع أساليب الذكاء الاصطناعي لتطوير حلول عالية الأداء لأنظمة إنترنت الأشياء من الجيل التالي.

الكلمات المفتاحية:

هوائي الميكروستريب، إنترنت الأشياء، الاتصالات اللاسلكية، الجيل الخامس، التحسين الكهرومغناطيسي، التعلم الآلي، بايثون، برنامج HFSS

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
Chapitre I	
Introduction à l'Internet des Objets	
I.1 Introduction	4
I.2 Historique de l'Internet des objets	5
I.3 Définition de l'IoT	6
I.4 Les différents processus de l'internet des objets	7
I.5 Composants de l'IoT	8
I.6 Caractéristiques d'un système d'internet des objets	9
I.6.1 Inter-connectivite	9
I.6.2 Hétérogénéité.....	9
I.6.3 Changements dynamiques	9
I.6.4 Énorme échelle	9
I.6.5 La connectivité	10
I.6.6 La sécurité	10
I.6.7 Les capteurs.....	10
I.7 Architecture de l'internet des objets	11
I.7.1 L'architecture trois couches.....	11
I.7.2 L'architecture à cinq couches	11
I.8 Les Bandes de fréquences de l'IoT	12
I.9 Domaines d'applications des IoT	12
I.9.1 Automobile connectée	13
I.9.2 Santé	14
I.9.3 Villes intelligentes.....	15
I.9.4 Industrie	16
I.9.5 Agriculture	16
I.9.6 Le Smart Grid	17
I.9.7 Les Maisons et Les Bâtiments Intelligents	18
I.10 Protocoles IoT fonctionnant dans la bande 2.2 – 6.6 GHz	19
I.11 Les solutions technologiques pour l'IoT	19
I.12 Les types des antennes qui sont utilisées dans IOT 5 G	22

I.12.1 Antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output).....	22
I.12.2 Antennes réseau (Array Antennas)	23
I.12.3 Antennes à ondes millimétriques (Millimeter -WaveAntennas).....	24
I.12.4 Antennes monopoles et dipôles	24
I.12.5 Antennes reconfigurables.....	25
I.12.6 Antennes imprimées flexibles	25
I.12.7 Antenne microruban (Microstrip Patch Antennas)	26
I.13 Avantages et inconvénients de système IOT	26
I.13.1 Les avantages de l'Internet des objets	26
I.13.2 Les inconvénients de l'IoT	27
I.14 Conclusion.....	28
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -CHAPITRE I-.....	29

Chapitre II

Généralités sur les antennes imprimées

II.1 Introduction	34
II.2 Définition d'une antenne.....	35
II.3 Les antennes imprimées.....	36
II.3.1 Historique des antennes imprimées	36
II.3.2 Structure d'une antenne imprimée	36
II.3.3 Les paramètres géométriques du l'antenne imprimée	37
II.3.3.1 Largeur du patch	37
II.3.3.2 Longueur du patch.....	38
II.3.4 Les différentes formes du patch	40
II.3.5 Les caractéristiques des antennes imprimées	40
II.3.5.1 Impédance d'entrée de l'antenne.....	41
II.3.5.2 Coefficient de réflexion	42
II.3.5.3 Rapport d'Ondes Stationnaires (ROS).....	43
II.3.5.4 Gain et directivité.....	43
II.3.5.5 Rendement de l'antenne.....	43
II.3.5.6 La Bande passante.....	44
II.3.5.7 Diagramme de rayonnement.....	45
II.3.6 Technique d'alimentation.....	46

II.3.6.1 Alimentation par ligne microruban.....	46
II.3.6.2 Alimentation par câble coaxial	48
I.3.6.3 Alimentation par proximité.....	49
II.3.7 Techniques d'adaptation des antennes imprimées	50
II.3.7.1 Adaptation par ligne quart d'onde.....	50
II.3.7.2 Adaptation par stub	51
II.3.7.3 Adaptation avec encoche.....	51
II.4 Les avantages et les inconvénients d'antenne patch	52
II.4.1 Les avantages	52
II.4.2 Inconvénient	53
II.5 Domaine d'application des antennes imprimées	54
II .6 Généralités sur la technologie 5G	56
II.6.1 Évolution des générations de réseaux mobiles (1G à 5G).....	56
II.6.2 La fréquences utilisées pour la 5G	57
II.6.3 La relation entre La 5G et l'internet des objets IOT	58
II.6.4 Nouvelles applications	59
II.7 Conclusion	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -CHAPITRE II-	61

Chapitre III

Conception, simulation et optimisation d'antennes imprimées IOT

III.1 Introduction.....	62
III.2 Présentation du logiciel HFSS.....	63
III.2.1 Projet en HFSS.....	63
III.2.2 Comment commencer HFSS.....	65
III.2.3 Comment ouvrir un nouveau projet.....	65
III.2.4 Sauvegarder le projet.....	65
III.2.5 Insérer une conception de HFSS.....	65
III.3 Conception d'antennes microruban pour des applications IoT dans la bande 5G.....	66
III. 3.1 Conception d'antennes patch rectangulaire.....	66

III. 3.2 Conception d'antennes patch rectangulaire avec encoches.....	70
III.3.2.1 Calcul des dimensions de l'encoche (Insetfeed).....	71
III.4 Optimisation de l'antenne par les techniques de Machine Learning.....	76
III.4.1 Présentation du Machine Learning.....	76
III.4.2 Principaux algorithmes utilisés pour l'optimisation des antennes.....	77
III.4.2.1 Régression Linéaire (Linear Regression).....	77
III.4.2.2 Arbres de Décision (Decision Trees).....	77
III.4.2.3 Forêts Aléatoires (Random Forest).....	77
III.4.2.4 Réseaux de Neurones Artificiels (Artificial Neural Networks).....	78
III.4.2.5 Machines à Vecteurs de Support (Support Vector Machines).....	78
III.4.2.6 Optimisation Bayésienne (Bayesian Optimization).....	78
III.4. 3 Utilisation de Python pour l'optimisation.....	78
III.4.4 Méthodologie proposée.....	79
III.4.4.1 Etude paramétrique.....	81
III.4.4.2 Méthodologie d'optimisation intelligente basée sur l'Apprentissage Automatique (Machine Learning sous Python).....	82
III.4.4.3 Validation de résultat sous HFSS.....	87
III.5 Conception d'antenne microruban proposé inspirée de la forme feuille de plante pour des applications IoT dans la bande 5G.....	90
III.5.1 Antenne patch en forme feuille sans fentes.....	90
III.5.2 Antenne patch en forme feuille avec des fentes.....	94
III.6 Conclusion.....	98
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -CHAPITRE III.....	99
Conclusion général.....	100

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : L'internet des objets	7
Figure I.2 : Les capteurs	10
Figure I.3: Architecture de l' IOT (A: Three Layers) (B: Five Layers).....	12
Figure I.4 : Différents domaines d'application d'IoT	13
Figure I .5 : Différentes utilisations de la voiture	14
Figure I.6 : Un système de santé électronique	15
Figure I.7 : Ville intelligente (smart home) grâce à l'IoT	16
Figure I.8 : Schéma conceptuel de l'IoT dans l'industrie	16
Figure I.9 : Application de l'IoT dans l'agriculture intelligente	17
Figure I.10 : Représentation des constituants d'une smart Grid.....	17
Figure I.11: Bâtiment intelligent (a) , Maison intelligente (b)	18
Figure I.12 : Les réseaux IoT.....	20
Figure I.13: Exemple Multiple-input multiple-output (MIMO) antenna structure; (a) Top view; (b) ground view; (c) 3D view	23
Figure I.14 : Exemple Structure du réseau d'antennes : (a) Architecture et (b) photo du prototype	23
Figure I.15: Exemple Beamformer à ondes millimétriques (mmWave) pour les terminaux mobiles dans les réseaux 5G mmWave	24
Figure I.16: Antennes monopoles et dipôles	24
Figure I.17:Exemple Antenne spirale carrée reconfigurable en diagramme par l'utilisation de court-circuit : (a) Géométrie de l'antenne ; (b) Diagrammes 2D, NS : configuration initiale ; GO : diodes activées	25
Figure I.19: Antennes microruban	26

Chapitre II

Figure II.1 : Principe de transmission par onde électromagnétique.	36
Figure II.2 : Structure d'une antenne imprimée.	37
Figure II.3 : Présentation d'une antenne imprimée	37
Figure II.4: Antenne patch et les deux fentes rayonnantes.....	38
Figure II.5: Répartition des champs sur les bords du patch	39

Figure II.6: (a) Ligne micro ruban, (b) Les lignes de champs, (c) Constante diélectrique équivalente .	39
Figure II.7 : Les différents types de patch .	40
Figure II.8 : Schéma équivalent du dispositif à l'émission .	41
Figure II.9 : Schéma d'une antenne connectée à une ligne de transmission et un générateur.....	42
Figure II.10: Exemple de S_{11} d'une antenne en dB en fonction de la fréquence et la bande passante a -10 dB.....	44
Figure II.11: Différents types de représentation des diagrammes de rayonnement a) 2D polaire b) 2D cartésien c) 3D .	46
Figure II.12: Alimentation par ligne microruban .	47
Figure II.13: Alimentation par une ligne microruban. a) axiale b) décalée et c) axiale avec encoche	47
Figure II.14: Alimentation par câble coaxial	48
Figure II.15: Alimentation par proximité par couplage à ouverture	49
Figure II.16: Alimentation par proximité par couplage électromagnétique	50
Figure II.17: Adaptation par quart à adaptation quart d'onde.....	51
Figure II.17: De la 1G à la 5G .	57
Figure II.18: La relation entre 5G et IOT	58
Figure II.19: Applications des réseaux 5G.	59

Chapitre III

Figure III.1: Fenêtre principale du logiciel HFSS.....	66
Figure III.2: Organigramme des différentes étapes d'un design HFSS.....	64
Figure III.3: Fenêtre de HFSS.....	66
Figure III.4: Géométrie de l'antenne patch rectangulaire alimentée par ligne microruban sur substrat FR4.....	67
Figure III.5 : L'antenne Patch rectangulaire sous le logiciel HFSS.....	68
Figure III.6: Tracé de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence de l'antenne patch rectangulaire.....	68
Figure III.7 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne Patch rectangulaire.....	69
Figure III.8 : Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne Patch rectangulaire dans les plans E ($\Phi=0^\circ$), H ($\Phi=90^\circ$) dans la fréquence 3.5GHz.....	70

Figure III.9 : Diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne Patch rectangulaire dans la fréquence 3.5GHz.....	70
Figure III.10 : Représente la structure d'antenne Patch rectangulaire.....	71
Figure III.11: Antenne Patch rectangulaire avec encoches sous HFSS.....	72
Figure III.12: Tracé du coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence 3.5GHz pour l'antenne avec encoches.....	73
Figure III.13 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne Patch rectangulaire avec encoche dans la fréquence 3.5GHz.....	73
Figure III.14 : Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne Patch rectangulaire avec encoche dans les plans E ($\Phi=0^\circ$), H ($\Phi=90^\circ$) dans la fréquence 3.5GHz...	74
Figure III.15 : Diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne Patch rectangulaire avec encoche.....	74
Figure III.16: Résultats du balayage paramétrique du paramètre S11 sous l'effet de la variation des dimensions.....	80
Figure III.17 : Diagramme de rayonnement bidimensionnel du champ total à 3.5 GHz pour différentes valeurs de paramètres géométriques.....	81
Figure III.18: Organigramme global du processus d'optimisation bayésienne (du Dataset au best Design).....	83
Figure III.19 : Algorithme détaillé de l'étape de création et de préparation du jeu de données (Dataset).....	84
Figure III.20 : Processus d'apprentissage et d'entraînement du modèle random Forest Régresse.r.....	85
Figure III.21: Algorithme d'optimisation bayésienne basé sur la minimisation de la fonction objectif.....	86
Figure III.22 : Courbe du coefficient de réflexion S11 obtenue sur HFSS avec les dimensions optimales.....	87
Figure III.23 : Diagramme de rayonnement 3D représentant le gain de l'antenne optimisée.....	89
Figure III.24 : La structure de l'antenne microruban proposée en forme feuille.....	90
Figure III.25 : l'antenne patch en forme feuille sous le logiciel HFSS.....	91
Figure III.26 : Tracé de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence 3.5 GHz de l'antenne en forme feuille sans encoches.....	92

Figure III.27: Taux d'onde stationnaire de l'antenne patch en forme feuille sans encoches.....	92
Figure III.28 : Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne feuille sans encoches dans les plans E ($\Phi=0^\circ$), H ($\Phi=90^\circ$) dans la fréquence 3.5GHz.....	93
Figure III.29 : Diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne de l'antenne en forme feuille sans encoches.....	93
Figure III.30 : Structure l'antenne proposée adapté avec stub.....	94
Figure III .31 : Trace de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence 3.5 GHz de l'antenne patch en forme feuille.....	95
Figure III.32: Tracé de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence 3.5 GHz de l'antenne feuille avec encoches.....	96
Figure III.33: Taux d'onde stationnaire de l'antenne feuille avec encoches.....	96
Figure III.34: Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne microruban en forme de feuille avec encoches dans les plans E ($\Phi=0^\circ$), H ($\Phi=90^\circ$) dans la fréquence 3.5GHz.....	97
Figure III. 35: Diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne microruban en forme de feuille avec encoches.....	97

LISTE DES TABLAUX

Chapitre III

Tableau III.1 : Paramètres géométriques de l'antenne de base	67
Tableau III.2 : Paramètres géométriques de l'antenne patch rectangulaire avec encoche.....	72
Tableau III.3 : Synthèse des dimensions optimales et des performances électromagnétiques associées.....	87
Tableau III.4 : Paramètres géométrique de l'antenne patch en forme feuille.....	90
Tableau III.5 : Le paramètre géométrique de l'antenne en forme feuille avec encoches.....	94

LISTE DES ABREVIATIONS

F

FPGA: Field –programmable Gate Array

FDMA: Fréquence Division Multiple Access

G

GHz : Gigahertz

1G : premier génération

2G : deuxième génération

3G :troisième génération

5G :cinquième génération

GPS: Global positioning System

I

IoT : L’Internet des Objets (Internet of Things)

IP: Internet Protocol

IHM : Interfaces Homme-machine

ISM: Industrial, Scientifique et Medical

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IPSo: internet Protocol for Smart Objects

B

BLE: Bluetooth Low Energy

R

RFID: Radio Frequency IDentificatio.

RGPD : Règlement Général de Protection des Données

S

SDN: Software-Defined Networking

Sigfox : Sigfox Wireless Network Technology

_____ **U** _____

USB: Universal Serial Bus

UIT: Union internationale des Télécommunications

_____ **V** _____

V2V: Vehicle-to-Vehicle

V2X: Vehicle-to-Everything

V2I: Vehicle-to-Infrastructure

_____ **W** _____

WIFI: Wireless Fidelity

WSN: Wireless Sensor Network

Wear Cam: Wearable Camera

_____ **L** _____

LAN: Réseau Local (Local Area Network)

LTE-M: Long-Team Evolution for Machines

6LoWPAN: IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks

LPWAN: Low Power Wide Area Network

LoRa : Long Range

_____ **N** _____

NFC: Near Field Communication

NoC : Network on Chip (Réseau sur puce)

NB-IoT: Narrowband Internet of things

_____ **E** _____

ecall: Emergency call System

ERDF: European Regional Development Fund

_____ **M** _____

MIMO: Multiple Input Multiple Output

Mm-Wave : Millimetre Wave Ondes millimétriques

_____ **T** _____

Thread: protocol IOT

TDMA: Time Division Multiple Access

_____ **Z** _____

ZigBee : Low-power wireless communication technology

Z-Wave : Wireless mesh communication protocol

_____ **C** _____

CDMA : Code Division Multiple Access

_____ **O** _____

OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplex

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières années, les technologies des communications sans fil ont connu une évolution considérable, portée notamment par le développement de l'Internet des Objets (IoT) et des réseaux mobiles de cinquième génération (5G). L'Internet des Objets permet l'interconnexion d'un grand nombre d'objets intelligents capables de collecter, traiter et échanger des données en temps réel dans divers domaines tels que la santé, l'industrie, l'agriculture, les villes intelligentes et les transports [1], [2]. Cette croissance rapide du nombre d'objets connectés nécessite des systèmes de communication performants capables d'assurer une transmission fiable des données avec une faible latence, une faible consommation énergétique et une connectivité massive [3].

Dans ce contexte, l'antenne représente un élément fondamental des systèmes de communication sans fil, car elle assure l'interface entre les circuits électroniques et le milieu de propagation des ondes électromagnétiques. Les performances globales des systèmes IoT dépendent fortement des caractéristiques de l'antenne utilisée, notamment l'adaptation d'impédance, la bande passante, le gain et l'efficacité de rayonnement [4]. Parmi les différentes technologies d'antennes, les antennes microruban sont largement utilisées grâce à leur faible coût, leur structure compacte, leur faible encombrement et leur facilité d'intégration dans les dispositifs électroniques modernes [5].

Cependant, la conception des antennes microruban performantes reste un défi important en raison des contraintes de miniaturisation et des exigences croissantes imposées par les applications IoT et 5G. Dans ce cadre, les techniques d'optimisation basées sur l'intelligence artificielle, et plus particulièrement le Machine Learning, offrent de nouvelles approches permettant d'améliorer efficacement les performances des antennes tout en réduisant le temps de conception et d'analyse.

L'objectif de ce mémoire est de concevoir des antennes microruban destinées aux applications de l'Internet des Objets fonctionnant dans la bande de fréquence 3,5 GHz, largement utilisée dans les réseaux 5G. Dans un premier temps, une antenne microruban rectangulaire avec encoche est conçue et simulée à l'aide du logiciel Ansys HFSS. Cette structure fait ensuite l'objet d'une optimisation basée sur le Machine Learning, implémentée sous Python, afin d'améliorer principalement le coefficient de réflexion (S_{11}) ainsi que le gain de l'antenne.

Dans un second temps, une nouvelle structure d'antenne imprimée inspirée de la forme d'une feuille de plante est proposée et étudiée afin d'explorer des géométries innovantes susceptibles d'améliorer les performances électromagnétiques des antennes microruban destinées aux applications IoT à 3,5 GHz.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré aux notions fondamentales relatives à l'Internet des Objets (IoT), en présentant ses concepts de base, ses architectures ainsi que ses principaux domaines d'application. Le deuxième chapitre traite des généralités sur les antennes microruban, en abordant leur structure, leurs caractéristiques électromagnétiques, leurs techniques d'alimentation et leur importance dans les applications modernes. Enfin, le troisième chapitre est dédié à la partie pratique du travail, qui porte sur la conception, la simulation et l'analyse des performances des antennes proposées à l'aide du logiciel Ansys HFSS. Dans un premier temps, une antenne microruban rectangulaire avec encoche est conçue et modélisée pour fonctionner dans la bande de fréquence 3,5 GHz destinée aux applications IoT et 5G. Ses performances sont ensuite étudiées en termes de coefficient de réflexion S_{11} , de gain et de caractéristiques de rayonnement. Par la suite, une méthode d'optimisation basée sur le Machine Learning, développée sous Python, est appliquée afin d'ajuster les paramètres géométriques de cette antenne et d'améliorer ses performances globales. Dans un second temps, une nouvelle structure d'antenne inspirée d'une forme de feuille est proposée, simulée et analysée afin d'évaluer son potentiel pour les mêmes applications à 3,5 GHz.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -INTRODUCTION-

- [1] **K. Ashton**, "That 'Internet of Things' Thing", RFID Journal, 2009.
- [2] **L. Atzori, A. Iera, G. Morabito**, "The Internet of Things: A Survey", Computer Networks, 2010.
- [3] **ITU-R**, "IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond", 2015.
- [4] **C. A. Balanis**, « *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th Edition, Wiley, 2016.
- [5] **K. F. Lee, W. Chen**, « *Advances in Microstrip and Printed Antennas*, Wiley, 1997.

Chapitre I
Introduction à
l'Internet des Objets
IoT

I.1 Introduction

L'Internet des Objets (Internet of Things – IoT) représente aujourd'hui l'une des technologies les plus innovantes et les plus prometteuses dans le domaine des communications et des systèmes intelligents. Il désigne un réseau d'objets physiques connectés à Internet capables de collecter, d'échanger et de traiter des données sans intervention humaine directe. Grâce au développement rapide des technologies sans fil, des capteurs intelligents, du cloud computing et des réseaux de nouvelle génération comme la 5G, l'IoT connaît une expansion considérable dans plusieurs domaines tels que la santé, l'industrie, l'agriculture, les transports et les maisons intelligentes.

L'évolution de l'IoT a permis la création d'environnements intelligents capables d'améliorer la qualité de vie, d'optimiser la consommation énergétique et de faciliter la gestion des ressources. Cette technologie repose principalement sur des systèmes de communication performants et sur des antennes adaptées assurant une transmission efficace des données entre les objets connectés.

Dans ce contexte, les antennes microruban jouent un rôle fondamental dans le développement des systèmes IoT modernes. Grâce à leur faible encombrement, leur légèreté, leur coût réduit de fabrication et leur facilité d'intégration dans les équipements électroniques, elles constituent une solution particulièrement adaptée aux objets connectés. Avec l'émergence des réseaux 5G, qui nécessitent des communications à haut débit, une faible latence et une connectivité massive, les antennes microruban offrent des performances répondant aux exigences des applications IoT de nouvelle génération. De plus, leur aptitude à fonctionner sur différentes bandes de fréquences, notamment celles utilisées par la 5G, contribue à améliorer la qualité de transmission, la couverture du réseau et l'efficacité énergétique des dispositifs connectés. Ainsi, elles représentent un élément clé dans la conception des infrastructures de communication destinées aux applications intelligentes et aux systèmes sans fil avancés.

Dans ce chapitre, nous présentons les concepts fondamentaux de l'Internet des Objets (IoT). Nous commençons par retracer son évolution historique et présenter les principales définitions associées à ce concept. Ensuite, nous décrivons

les différents processus, composants et caractéristiques qui constituent un système IoT. Nous abordons également les architectures de l'IoT, les bandes de fréquences utilisées ainsi que les protocoles de communication les plus répandus. Par ailleurs, nous mettons en évidence les principaux domaines d'application de cette technologie et les différentes solutions technologiques qui la soutiennent, notamment dans le contexte des réseaux 5G. Enfin, nous présentons les différents types d'antennes utilisées dans les systèmes IoT ainsi que les principaux avantages et inconvénients de cette technologie.

I.2 Historique de l'Internet des objets [I.1]

L'émergence de l'Internet des objets ce n'est qu'un résultat de convergence entre multiples technologies, à savoir l'Internet, la communication sans fil, les systèmes embarqués, systèmes microélectroniques et la nanotechnologie. Dans cette section, nous citons les événements les plus marquants sur le chemin de la concrétisation de l'IoT.

Le concept d'un réseau de dispositifs intelligents a été évoqué pour la première fois en 1982, avec le premier appareil connecté à Internet à l'Université Carnegie Mellon capable de signaler à son inventaire si les boissons nouvellement chargées sont bien froides. Ainsi, en 1991, Mark Weiser a introduit l'informatique omniprésente à travers son papier intitulé : «L'ordinateur du 21^{ème} siècle » et a présenté d'avance la vision contemporaine de l'Internet des objets. Un peu plus tard, en 1994, Steve Mann avait créé le Wear Cam qui était parmi les premières caméras à apparaître sur le web. Wear Cam comporte les parties suivantes : (1) un groupe de caméras (ou uniquement une) qui sont fixées au corps, d'une manière quelconque, à deux mains libres (2) des moyens d'enregistrement, de traitement et de transmission des images capturées par les caméras (3) un moyen d'affichage qui a la capacité de présenter une image ou un flux d'images de l'appareil photo. Les images capturées seront communiquées vers une entité (une station de base) à la disposition de l'utilisateur. Ensuite, en 1998, l'informatique ubiquitaire a commencé d'attirer l'attention par le fait qu'elle permettrait l'incorporation flexible et efficace de l'informatique dans la vie quotidienne. Mark Weiser disait : « là où la réalité

virtuelle met l'humain en dedans du monde des ordinateurs, l'informatique ubiquitaire force plutôt l'ordinateur à s'instaurer dans le monde réel».

En 1999, la désignation Internet des objets a été prononcée pour la toute première fois par Kevin Ashton. Après, en 2000 la société LG annonce son premier réfrigérateur intelligent connecté à Internet. De plus, la technologie RFID (Radio Frequency IDentification) qui est l'une des technologies constitutionnelles de l'IoT, a commencé à être massivement déployée vers les années 2003 et 2004. D'autre part, une initiative très intéressante a été prise en 2008 ; un groupe de recherche appelé IPSO Alliance s'est consacré à promouvoir l'utilisation du protocole IP (Internet Protocol) pour les réseaux d'objets miniatures intelligents.

De nombreux travaux de recherches ont été succédés et se sont tous concentrés autour de la réalisation, dans les meilleures conditions, de la vision de l'Internet des objets et la mener à sa maturité en dépit de tous les défis soulevés. Cela avec la considération des progrès technologiques continus dans le marché des dispositifs intelligents et dans le domaine de technologies de télécommunication (comme : le Cloud computing, le concept du SDN (Software - Defined Networking) etc...) [I.2], [I.1].

I.3 Définition de l'IoT [I.3]

L'Internet des objets (Internet of Things (IoT)) est « un réseau qui relie et combine les objets avec l'Internet, en suivant les protocoles qui assurent leurs communication et échange d'informations à travers une variété de dispositifs» [I.4].

L'IoT peut se définir aussi comme étant « un réseau de réseaux qui permet, via des systèmes d'identification électroniques normalisés et unifiés, et des dispositifs mobiles sans fil, d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques et ainsi, de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter les données sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels» [I.5].

Plusieurs définitions ont été proposées dans la littérature pour décrire le concept de l'Internet des Objets (IoT). Weill et Souissi définissent l'IoT comme « une extension de l'Internet actuel vers tout objet capable de communiquer,

directement ou indirectement, avec des équipements électroniques connectés au réseau Internet ». Cette évolution permet l'interconnexion d'un grand nombre de dispositifs physiques dotés de capacités de communication, de traitement et d'échange de données. Elle s'accompagne également d'importants enjeux technologiques, économiques et sociétaux, notamment en matière de standardisation des protocoles de communication, d'interopérabilité des systèmes, de sécurité des données et de protection de la vie privée. L'intégration de ces technologies ouvre ainsi la voie à de nombreuses applications innovantes dans divers domaines tels que l'industrie, la santé, les transports et les réseaux intelligents [I.6], [I.3].

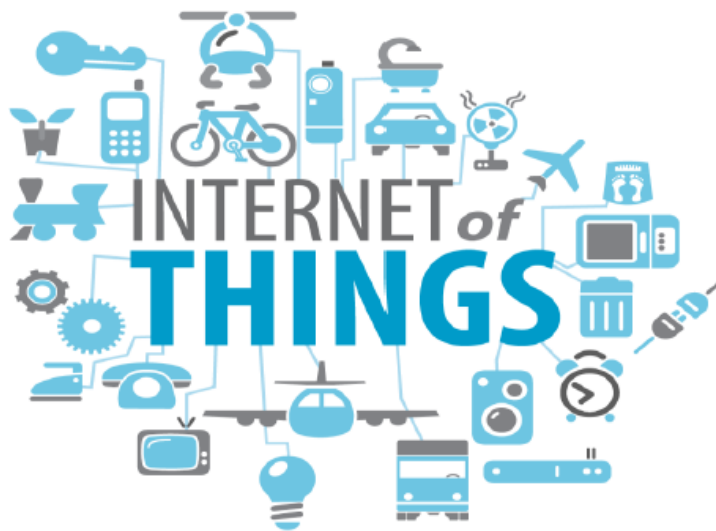


Figure I.1 : L'internet des objets [I.7].

I.4 Les différents processus de l'internet des objets [I.8]

L'Internet des Objets (IoT) repose sur plusieurs processus qui permettent aux objets connectés de collecter, transmettre, traiter et exploiter les données. Les principales étapes sont :

- **Capter** : désigne l'action de transformer une grandeur physique en un signal numérique.
- **Concentrer** : permet d'interfacer un réseau spécialisé d'objets à un réseau IP standard (exemple : wifi).

- **Stocker** : qualifie le fait d'agréger des données brutes, produites en temps réel, méta taguées, arrivant de façon non prédictible.
- **Présenter** : indique la capacité de restituer les informations de façon Compréhensible par l'homme, tout en lui offrant un moyen d'agir et/ou d'interagir [I.9], [I.8].

I.5 Composants de l'IoT [I.7]

Un système IoT réunit de nombreux acteurs et composants technologiques qui assure le bon fonctionnement d'un système IoT. Une solution d'IoT s'articule autour de 5 composants essentiels que sont : [I.10], [I.7]

Les objets (capteurs), Le réseau (connectivité), Les données, Les informations et Les applications d'exploitation.

- **Les objets** : pour capter des données de valeur. Ce sont les équipements actifs ou passifs pouvant générer de la donnée exploitable et créatrice de valeur pour les utilisateurs. Les objets sont composés d'éléments passifs : les capteurs, et pour certains d'éléments actifs les rendant capables de traitements d'enrichissement de la données et de transmission de celle-ci. Les données sont aussi diverses que les métiers. Nous pouvons aussi bien avoir des données de température, d'humidité, de positionnement, de temps de fonctionnement, de niveau, d'alerte...
- **Le réseau** : pour transmettre les données. Les réseaux sont le maillon prépondérant d'un projet d'IoT, ils doivent répondre à un critère d'usage : La couverture de la zone d'usage des objets : Sur un campus, Sur une ville, à l'ensemble de la planète.
- **Les données** : Dans un projet d'IoT, les données sont nos diamants bruts. Il s'agit surtout des éléments bruts que nous récoltons depuis les objets ou les outils de processus industriels pour l'IoT. Afin de créer de la valeur pour les utilisateurs de ces données, il est absolument nécessaire de les stocker, archiver et sauvegarder dans des bases de données et de correctement structurer cette dernière. En effet une base de données correctement structurée améliorera la performance des services IoT d'exploitation.

- **Les informations** : les informations sont les résultantes des données traitées, corrélées et analysées. Ces informations doivent elles-aussi être stockées, archivées et sauvegardées dans des bases de données.
- **Les applications d'exploitation** : Les applications d'exploitation sont en principe les interfaces Homme-machine (IHM) dans lesquelles nous pouvons visualiser les données sous forme de tableau de bord [I.10], [I.7].

I.6 Caractéristiques d'un système d'internet des objets [I.11]

Les caractéristiques fondamentales de l'IoT sont les suivantes :

I.6.1 Inter-connectivite

Tout peut être interconnecté à l'infrastructure mondiale d'information et de communication Services liés aux objets connectés.

L'IoT est capable de fournir des services liés aux objets tout en respectant certaines contraintes, telles que la protection de la vie privée et la cohérence sémantique entre les objets physiques et leurs représentations virtuelles.

Afin d'assurer ces services tout en tenant compte des contraintes liées aux objets, les technologies du monde physique et celles du monde de l'information devront évoluer.

I.6.2 Hétérogénéité

Les périphériques de l'IoT sont hétérogènes, que ce soit au niveau des plates-formes matérielles ou des réseaux. Ils peuvent interagir avec d'autres appareils ou plates-formes de services via différents types de réseaux [I.12], [I.11].

I.6.3 Changements dynamiques

L'état des dispositifs évolue de manière dynamique, par exemple lorsqu'ils passent en mode veille ou se réveillent, se connectent ou se déconnectent, ainsi qu'en fonction de leur contexte, notamment leur emplacement et leur vitesse. De plus, le nombre d'appareils peut également varier dynamiquement [I.13], [I.11].

I.6.4 Énorme échelle

Le nombre de périphériques à gérer et à faire communiquer entre eux sera au moins d'un ordre de grandeur supérieur à celui des périphériques actuellement connectés à Internet. Un enjeu encore plus critique concernera la gestion et

l'interprétation des données générées, en vue de leur utilisation dans diverses applications. Cela implique notamment la sémantique des données ainsi qu'une gestion efficace de celles-ci [I.14], [I.11].

I.6.5 La connectivité

La connectivité est la caractéristique principale de l'IoT car elle permet au système d'envoyer des données et de rester connecté à d'autres appareils. Il fournit l'accessibilité au réseau du système et fonctionne en collaboration [I.15], [I.7].

I.6.6 La sécurité

La sécurité est la caractéristique la plus importante de tout système. Si le système n'est pas sécurisé contre les cybers attaques et les interventions illégales, personne ne l'utilisera. Les systèmes IoT traitent des données personnelles, c'est pourquoi il est obligatoire que toutes les mesures de sécurité soient prises en compte dans ce système. Tous les systèmes IoT sont suffisamment sécurisés pour traiter les données personnelles [I.15], [I.7].

I.6.7 Les capteurs

Les capteurs sont un aspect important des appareils et des systèmes au sein de l'Internet des objets. Les capteurs surveillent, suivent et mesurent l'activité et les interactions d'un appareil, puis relaient ces informations via le Cloud. Certains exemples de tels capteurs incluent ceux qui surveillent la santé et la forme physique d'une personne ou des capteurs qui peuvent détecter si une porte a été ouverte dans votre maison ou même ceux qui surveillent les statistiques d'utilisation [I.16], [I.7].



Figure I.2 : Les capteurs [I.17]

I.7 Architecture de l'internet des objets [I.18]

I.7.1 L'architecture trois couches

L'architecture la plus basique est une architecture à trois couches. Il a été introduit dans les premiers stades de recherche dans ce domaine. Il comprend trois couches, à savoir la perception, le réseau et couches d'application :

- **La couche de perception** : est la couche physique, qui possède des capteurs pour détecter et collecter informations sur l'environnement. Il détecte certains paramètres physiques ou identifie d'autres objets intelligents dans l'environnement.
- **La couche réseau** : est responsable de la connexion à d'autres objets intelligents, réseau périphériques et serveurs. Ses fonctions sont également utilisées pour la transmission et le traitement de données du capteur.
- **La couche application** : est chargée de fournir des services spécifiques à l'application à l'utilisateur. Il définit différentes applications dans lesquelles l'Internet des objets peut être déployé, par exemple, les maisons intelligentes, les villes intelligentes et la santé intelligente.

I.7.2 L'architecture à cinq couches

Les cinq couches sont les couches de perception, de transport, de traitement, d'application et de gestion. Le rôle de la couche perception et application est le même dans couches de l'architecture de 3 couches, pour les autres couches :

- **La couche de transport** : transfère les données du capteur de la couche de perception à la couche de traitement et vice versa via des réseaux tels que sans fil, 3G, LAN, Bluetooth, RFID et NFC.
- **La couche de traitement** : est également appelée couche middleware. Il stocke, analyse et traite d'énormes quantités de données de la couche de transport. Il peut gérer et livrer un ensemble diversifié de services aux couches inférieures. Il utilise de nombreuses technologies telles que bases de données, Cloud computing et modules de traitement de données volumineuses.

- **La couche Business** : gère l'ensemble du système IoT, y compris les applications, et les modèles de profit et la confidentialité des utilisateurs.

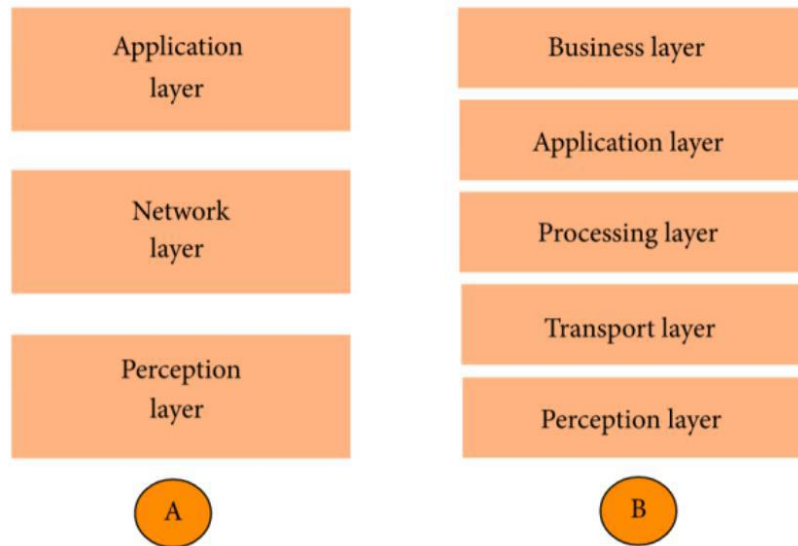


Figure I.3: Architecture de l' IOT (A: Three Layers) (B: Five Layers).

I.8 Les Bandes de fréquences de l'IoT [I.19]

La technologie IoT utilise aussi bien les bandes de fréquences à usage Industriel, Scientifique et Médical (ISM) dites « bandes libres », que les bandes de fréquences dont l'usage est soumis à une autorisation individuelle.

L'exploitation des bandes de fréquences ISM ne nécessite pas d'avoir une autorisation individuelle, mais elle est soumise à un certain nombre de contraintes liées au partage du spectre disponible entre plusieurs applications. Les applications IoT dans la bande ISM fonctionnent principalement autour des bandes de fréquences suivantes : 13,56 MHz, 169MHz, 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 2,45 GHz, 5,8 GHz ([5,150 GHz - 5,350 GHz] et [5,470 - 5,725]).

I.9 Domaines d'applications des IoT [I.11]

L'IoT couvrira un large éventail d'applications et concernera presque tous les domaines de notre vie quotidienne, ce qui favorisera l'émergence d'espaces intelligents. Parmi ces espaces intelligents, on peut citer :

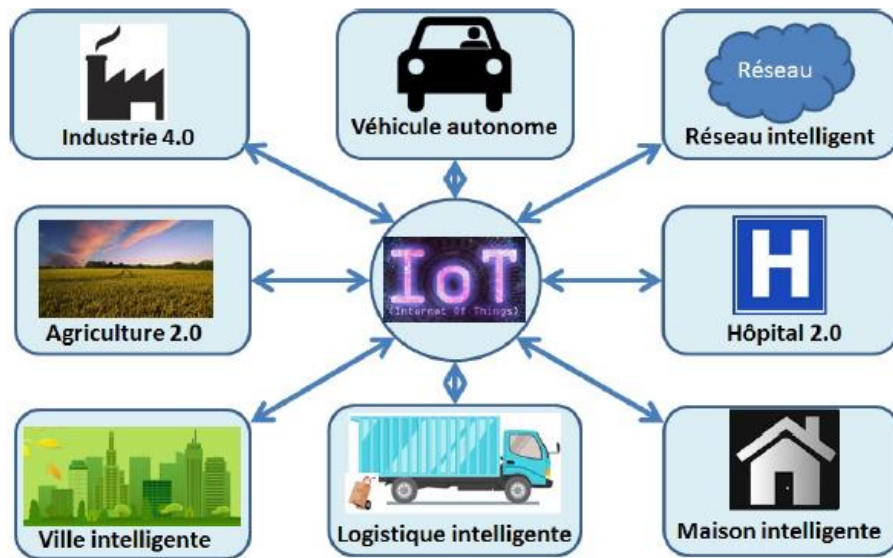


Figure I.4 : Différents domaines d'application d'IoT [I.20], [I.11].

I.9.1 Automobile connectée

Internet des objets (IoT) a aujourd'hui gagné le secteur automobile. Après savoir touché l'info-divertissement, il s'est étendu à la fusion de capteurs, à la géolocalisation ainsi qu'aux communications cellulaires et à courte portée qui sont au cœur des nouvelles architectures V2X qui vont améliorer l'expérience de conduite et accélérer le développement des véhicules autonomes. À un niveau élémentaire, le V2X pour Véhicule à Véhicule, V2V, et Véhicule Infrastructures routières V2I) permet aux automobiles de communiquer des informations critiques entre l'infrastructure et d'autres véhicules pour éviter les accidents aux intersections. Cette technologie peut aussi permettre l'envoi d'informations de localisation pour les services d'appel d'urgence (eCall) qui deviennent obligatoires dans un nombre croissant de pays. Toutefois, là où le potentiel des communications radio...

Dernier domaine qui sera fortement impacté par l'arrivée des objets connectés, l'automobile. Celle-ci existe bel et bien, c'est une réalité technologique. La plus connue, la Google Car, est développée depuis quelques années aux Etats-Unis. Cette automobile intègre ainsi un radar rotatif sur le toit, un radar GPS placé sur les roues, une caméra vidéo placée au niveau du rétroviseur central, et des

multiples radars sensoriels placés à différents espaces de la voiture. La voiture sans chauffeur est également une réalité chez les constructeurs traditionnels comme Renault, Volvo ou encore Audi.

De nombreux systèmes permettent dès à présent de rendre une voiture connectée à l'image du système Mirror Link. Comme l'indique son nom, il va reproduire, tel un miroir, l'interface du Smartphone directement sur un écran de la voiture. L'utilisateur pourra ainsi bénéficier du GPS et de la musique présente sur le Smartphone. Il existe également des interfaces adaptées aux voitures issues des constructeurs de Smartphones. Ici encore Apple avec son système Carplay et Google avec le logiciel Androïde Auto rentrent en concurrence pour proposer des offres incompatibles. Ces deux systèmes intégrés vont permettre une connexion par voie filaire, USB, ou sans-fil, Bluetooth [I.21], [I.11].



Figure I .5 : Différentes utilisations de la voiture [I.22], [I.11].

I.9.2 Santé

L'internet des objets a rapidement transformé la prestation des soins. Les équipements et les capteurs sont de plus en plus « intelligents » et génèrent toujours plus de données nécessaires aux équipements médicaux, aux professionnels et profitant ainsi aux patients, en réduisant les coûts et en améliorant leur satisfaction. Les données ainsi collectées facilitent, adaptent, améliorent, anticipent ou réorganisent les soins des patients.

Dans le contexte de généralisation du traitement médical électronique, l'Internet des objets est fondamental. En effet, la conception d'un système intelligent de prise de décision clinique, matérialisé par le stockage des données collectées sur les patients et leur accessibilité universelle, procurerait au médecin un excellent appui durant la phase de traitement [I.23], [I.11].

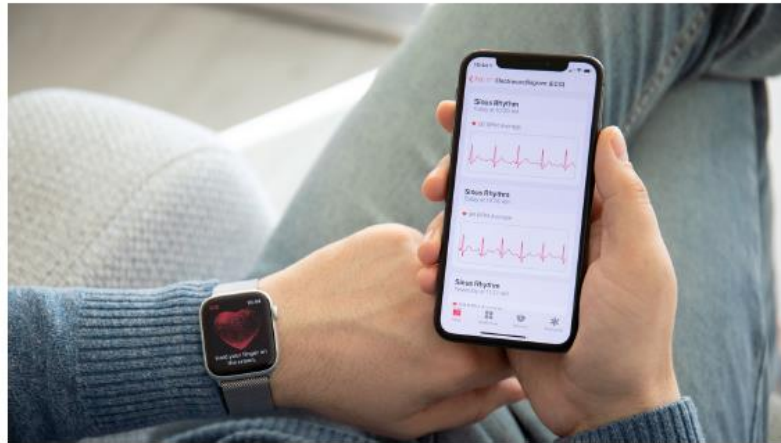


Figure I.6 : Un système de santé électronique [I.24], [I.11].

I.9.3 Villes intelligentes

Grace au développement technologique dans plusieurs domaines tels que l'électronique, l'informatique, internet des objets et autres, la domotique a pris une nouvelle orientation. Ce domaine d'application a vu le jour dans les années 80 avec la vague de la miniaturisation des composants électroniques.

Une maison intelligente est un ensemble d'objets connectés entre eux et contrôlés par un système de base: microcontrôleur, FPGA ou réseau sur puce «NoC» assurant diverses fonctions (éclairage, multimédia, chauffage et climatisation, volets, sécurité...). Ces nouvelles orientations permette non seulement d'accroître les services la personne ou le confort à domicile mais aussi de mieux gérer la consommation d'énergie et d'optimiser des ressources partagées [I.25], [I.11].



Figure I.7 : Ville intelligente (smart home) grâce à l'IoT [I.26], [I.11].

I.9.4 Industrie

L'industrie subit des mutations liées à l'IoT dans son fonctionnement. L'industrie l'IoT permettra un suivi total des produits, de la chaîne de production, jusqu'à la chaîne logistique et de distribution en supervisant les conditions d'approvisionnement. Cette traçabilité de bout en bout facilitera la lutte contre la contrefaçon, la fraude et les crimes économiques transfrontaliers [I.27], [I.11]

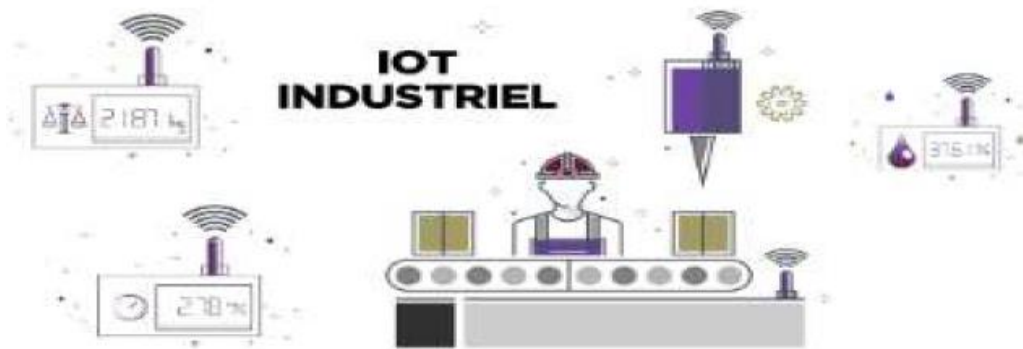


Figure I.8 : Schéma conceptuel de l'IoT dans l'industrie [I.28], [I.11].

I.9.5 Agriculture

Dans ce domaine, des réseaux de capteurs interconnectés à l'IoT peuvent être utilisés pour la supervision de l'environnement des cultures. Ceci permettra une meilleure aide à la décision en agriculture, notamment pour optimiser l'eau

d'irrigation, l'usage des intrants, et la planification de travaux agricoles. Ces réseaux peuvent être aussi utilisés pour lutter contre la pollution de l'air, du sol et des eaux et améliorer la qualité de l'environnement en général [I.29], [I.11].



Figure I.9 : Application de l'IoT dans l'agriculture intelligente [I.30], [I.11].

I.9.6 Le Smart Grid [I.31]

L'un des domaines d'application de l'IoT est le secteur de la distribution d'énergie intelligente, dit « Smart Grid » (voir figure I.10). En France, ERDF est très actif dans le développement de ce domaine, où un besoin clair en récupération d'information à différents points du réseau électrique est devenu nécessaire pour une meilleure intégration des différentes sources d'énergies et une meilleure gestion de la distribution jusqu'aux utilisateurs finaux.



Figure I.10 : Représentation des constituants d'une smart Grid.

I.9.7 Les Maisons et Les Bâtiments Intelligents

Les technologies Wi-Fi dans la domotique ont été principalement utilisées pour plusieurs raisons qui sont :

- Les appareils électroniques tels que les téléviseurs, les appareils mobiles, généralement pris en charge cette technologie.
- Le taux croissant d'adoption de dispositifs informatiques mobiles comme les Téléphones intelligents, les tablettes.
- Les appareils mobiles garantissent que les consommateurs peuvent accéder aux « contrôleurs » des appareils portables connectés à un réseau.

A l'aide du concept de l'internet des objets, les maisons et les bâtiments peuvent exploiter alors de nombreux appareils et objets intelligemment (voir figure I.11). Comme un exemple d'application intéressante de l'IoT dans les maisons intelligentes et les bâtiments on trouve : l'éclairage intelligent, le contrôle de l'air et de chauffage central, la gestion de l'énergie et la sécurité.

- Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) Avec intégration de la technologie de l'internet des objets fourniront une gestion intelligente de l'énergie dans les bâtiments. D'autre part, l'internet avec des systèmes de gestion de l'énergie aussi offre la possibilité d'accéder aux systèmes d'information et de contrôler l'énergie d'un bâtiment par un ordinateur portable ou un Smartphone placé n'importe où dans le monde.

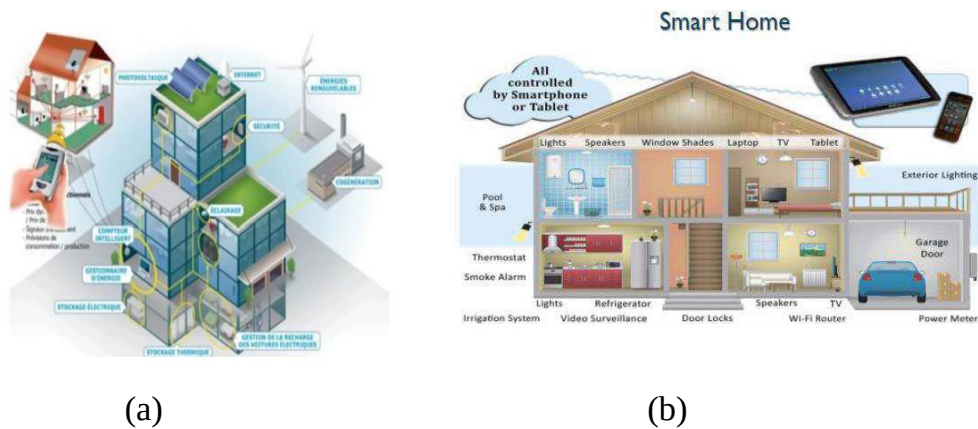


Figure I.11: Bâtiment intelligent (a) [I.31], Maison intelligente (b) [I.32].

I.10 Protocoles IoT fonctionnant dans la bande 2.2 – 6.6 GHz [I.11]

Les protocoles IoT assurent la communication entre les objets connectés via diverses technologies sans fil. La plage de fréquence [2.2 GHz – 6.6 GHz] couvre de nombreux protocoles essentiels utilisés dans les architectures IoT actuelles.

Voici les principaux protocoles fonctionnant dans cette bande :

- Wifi (IEEE 802.11 b/g/n/ac) : Utilisé pour les objets IoT domestiques et industriels, il fonctionne dans les bandes 2.4 GHz et 5 GHz. Il supporte les configurations MIMO et les hauts débits nécessaires à la vidéo, la télé surveillance ou la maison intelligente [I.33], [I.11].
- Bluetooth Low Energy (BLE) : Fonctionne sur 2.4 GHz, adapté aux capteurs, appareils portables intelligents, dispositifs médicaux. Il permet des connexions à très basse consommation [I.34], [I.11].
- Zig Bee (IEEE 802.15.4) : Protocole léger à faible débit sur 2.4 GHz, très utilisé dans la domotique et les réseaux maillés [I.35], [I.11].
- Thread : Variante sécurisée de 6LoWPAN fonctionnant en 2.4 GHz, idéale pour les réseaux résidentiels [I.36], [I.11].
- LTE-M & NB-IoT et 5G (bande 3.5 GHz à 6 GHz) : Protocoles cellulaires adaptés à l'IoT longue portée, utilisés dans les systèmes intelligents de ville et d'industrie [I.36], [I.11].

I.11 Les solutions technologiques pour l'IoT [I.37]

Afin de répondre aux besoins variés des applications de l'Internet des Objets (IoT), plusieurs technologies de communication sans fil ont été développées. Ces technologies utilisent généralement les bandes de fréquences à usage Industriel, Scientifique et Médical (ISM), communément appelées « bandes libres ». Selon leur portée de communication et leurs caractéristiques techniques, elles peuvent être classées en deux grandes catégories : les réseaux à courte portée et les réseaux à longue portée (figure I.12).

• Les réseaux à courte portée :

Les réseaux à courte portée sont utilisés pour connecter des objets situés à faible distance les uns des autres. Parmi les technologies les plus répandues figurent le Wifi, le Bluetooth Low Energy (BLE), Zig Bee et Z-Wave. Ces solutions sont particulièrement adaptées aux applications domotiques, aux réseaux de capteurs locaux ainsi qu'aux objets connectés destinés au grand public, tels que les montres intelligentes, les bracelets connectés et les systèmes de surveillance domestique.

• Les réseaux à longue portée :

Pour les applications nécessitant une couverture plus étendue, les objets connectés peuvent s'appuyer sur des réseaux LPWAN (Low Power Wide Area Network). Ces réseaux fonctionnent généralement dans des bandes de fréquences inférieures à 1 GHz et se caractérisent par une faible consommation énergétique, au prix d'un débit relativement limité. Ils se divisent principalement en deux catégories :

- Les réseaux dédiés à l'IoT utilisant des bandes de fréquences non licenciées, tels que LoRa et Sigfox.
- Les solutions basées sur les réseaux cellulaires, notamment LTE-M et NB-IoT, déployées par les opérateurs de télécommunications dans des bandes de fréquences sous licence.

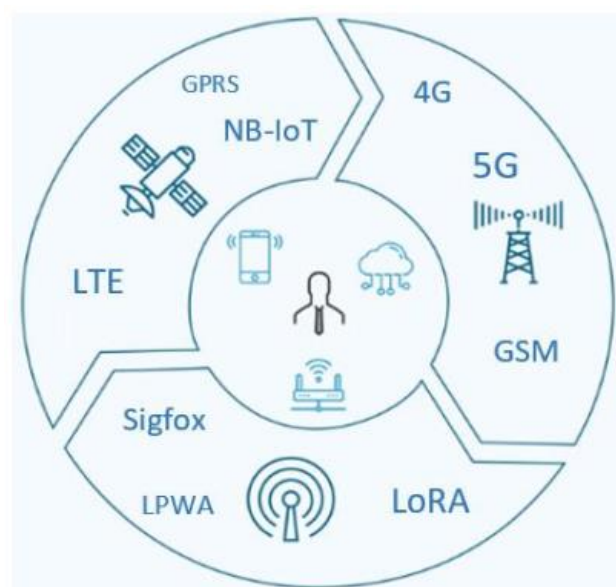


Figure I.12 : Les réseaux IoT.

Il convient également de noter que certaines entreprises industrielles peuvent mettre en place leurs propres infrastructures de communication afin de développer des réseaux IoT privés. Cette approche leur permet d'assurer un meilleur contrôle de la sécurité, de la qualité de service et de la gestion des données échangées entre les différents équipements connectés.

L'essor de l'Internet des Objets est aujourd'hui fortement soutenu par le déploiement des réseaux mobiles de cinquième génération (5G). Cette technologie a été conçue pour répondre aux exigences croissantes en matière de connectivité massive, de faible latence et de hauts débits de transmission. Grâce à ces caractéristiques, la 5G constitue une infrastructure essentielle pour connecter simultanément un très grand nombre d'objets intelligents tout en garantissant une communication fiable et efficace.

Parmi les bandes de fréquences attribuées à la 5G, la bande des 3,5 GHz est considérée comme l'une des plus importantes pour les applications IoT. En effet, elle offre un compromis intéressant entre couverture radioélectrique, capacité du réseau et débit de transmission. Cette bande permet ainsi de répondre aux besoins des systèmes connectés nécessitant des échanges rapides de données tout en conservant une portée de communication satisfaisante.

Dans les systèmes IoT, les informations collectées par les capteurs et les dispositifs connectés sont transmises via des réseaux de communication sans fil. Dans ce contexte, les antennes jouent un rôle fondamental puisqu'elles assurent l'interface entre les circuits électroniques et l'espace de propagation des ondes électromagnétiques. Les performances globales du système dépendent fortement des caractéristiques de l'antenne utilisée, notamment son adaptation d'impédance, sa bande passante, son gain et son efficacité de rayonnement.

Parmi les différentes technologies d'antennes, les antennes micro-ruban occupent une place importante grâce à leur faible coût de fabrication, leur structure compacte, leur légèreté et leur facilité d'intégration dans les équipements électroniques modernes. Ces avantages en font une solution particulièrement adaptée aux applications IoT basées sur les réseaux 5G.

Ainsi, la conception d'une antenne micro-ruban fonctionnant dans la bande 5G à 3,5 GHz représente un enjeu majeur pour le développement des objets connectés de nouvelle génération. L'objectif est de réaliser une antenne compacte offrant de bonnes performances en termes de bande passante, de gain et d'efficacité de rayonnement, tout en répondant aux contraintes de miniaturisation imposées par les systèmes IoT modernes.

I.12 Les types des antennes qui sont utilisées dans IOT 5 G

Dans les applications IoT basées sur la 5G, plusieurs types d'antennes sont utilisés selon les exigences de l'application, telles que la fréquence de fonctionnement, le débit, la portée, la miniaturisation et le coût. Les principaux types d'antennes utilisés sont les suivants :

I.12.1 Antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Les antennes MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) constituent une technologie clé dans les réseaux de cinquième génération (5G) dédiés aux applications de l'Internet des objets (IoT). Ce système repose sur l'utilisation de plusieurs antennes au sein d'un même dispositif (comme un objet connecté), lesquelles émettent et reçoivent simultanément des données via différents trajets spatiaux. Dans les environnements saturés d'appareils, cette conception permet d'augmenter considérablement le débit de transmission des données et de renforcer la fiabilité de la connexion, garantissant ainsi des performances stables même dans les conditions opérationnelles les plus difficiles [I.38].

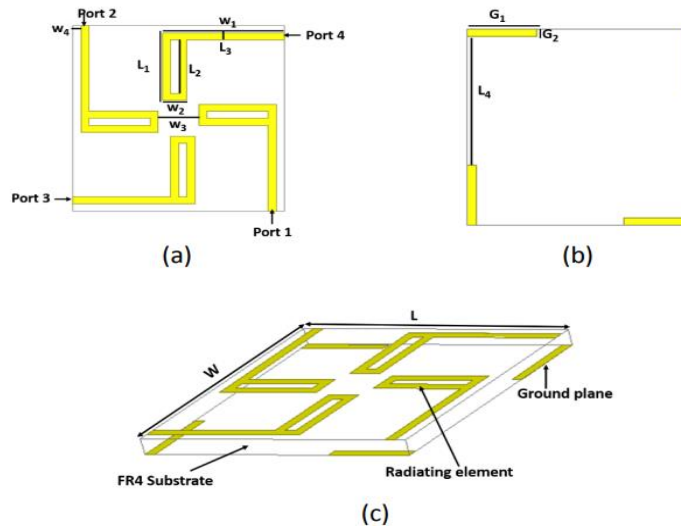


Figure I.13: Example Multiple-input multiple-output (MIMO) antenna structure;
(a) Top view; (b) ground view; (c) 3D view [I.39].

I.12.2 Antennes réseau (Array Antennas)

Les antennes réseau sont constituées de plusieurs éléments rayonnants disposés selon des configurations linéaires ou planaires dans le but principal d'augmenter le gain et d'améliorer la directivité par rapport à un seul élément isolé [I.40]. Ces antennes constituent l'épine dorsale des stations de base dans les réseaux 5G et sont largement utilisées dans les applications IoT nécessitant une couverture géographique étendue [I.41].

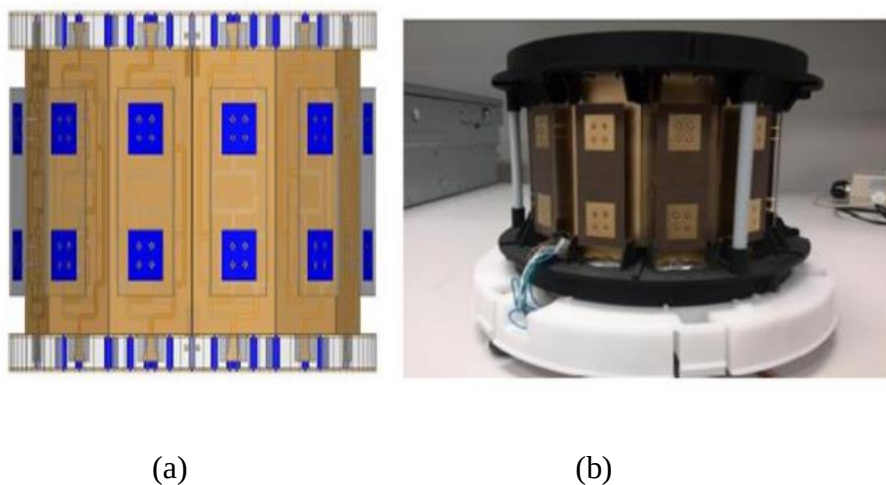


Figure I.14 : Exemple Structure du réseau d'antennes : (a) Architecture et (b) photo du prototype [I.42].

I.12.3 Antennes à ondes millimétriques (Millimeter -WaveAntennas)

Utilisées principalement dans les bandes de fréquences élevées de la 5G (au-delà de 24 GHz), ces antennes permettent d'atteindre des débits très élevés. Elles sont adaptées aux applications IoT nécessitant des communications ultra-rapides [I.43], [I.44].

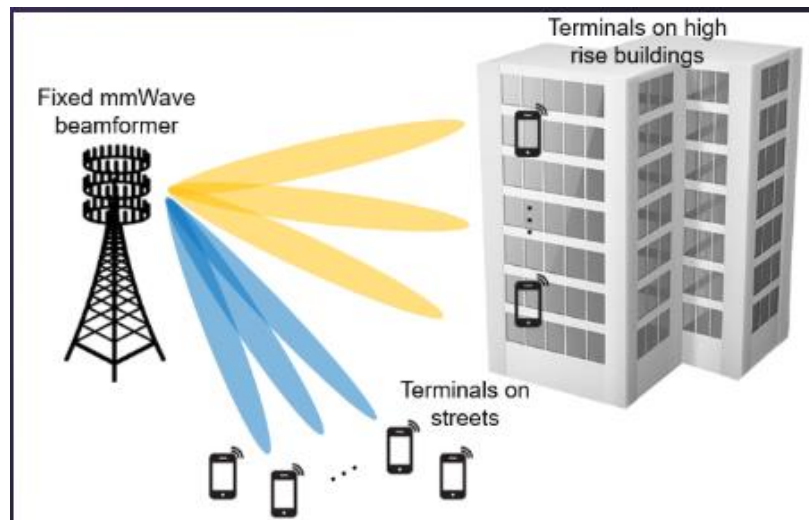


Figure I.15: Exemple Beamformer à ondes millimétriques (mmWave) pour les terminaux mobiles dans les réseaux 5G mmWave [I.45].

I.12.4 Antennes monopoles et dipôles

Ces antennes possèdent une structure simple et un coût réduit. Elles sont largement utilisées dans les objets connectés de petite taille et les systèmes de communication sans fil à courte et moyenne portée [I.46].

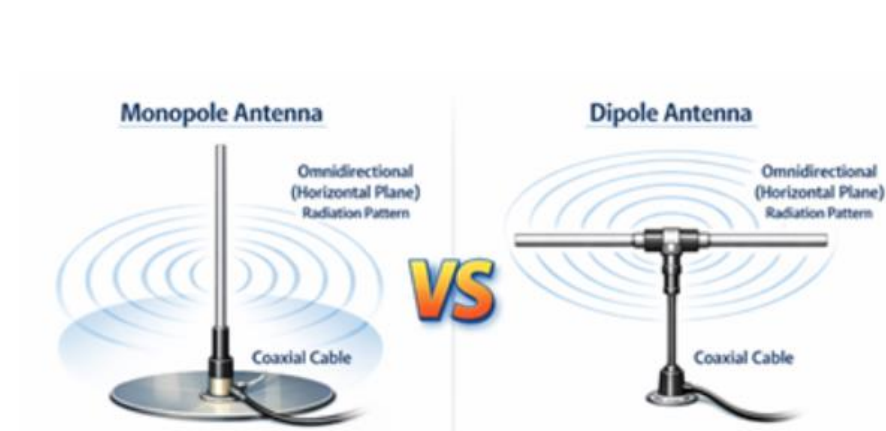


Figure I.16: Antennes monopoles et dipôles [I.47].

I.12.5 Antennes reconfigurables

Ces antennes peuvent modifier leurs caractéristiques de fonctionnement (fréquence, polarisation ou diagramme de rayonnement) selon les besoins du système. Elles sont prometteuses pour les applications IoT intelligentes et adaptatives [I.48].

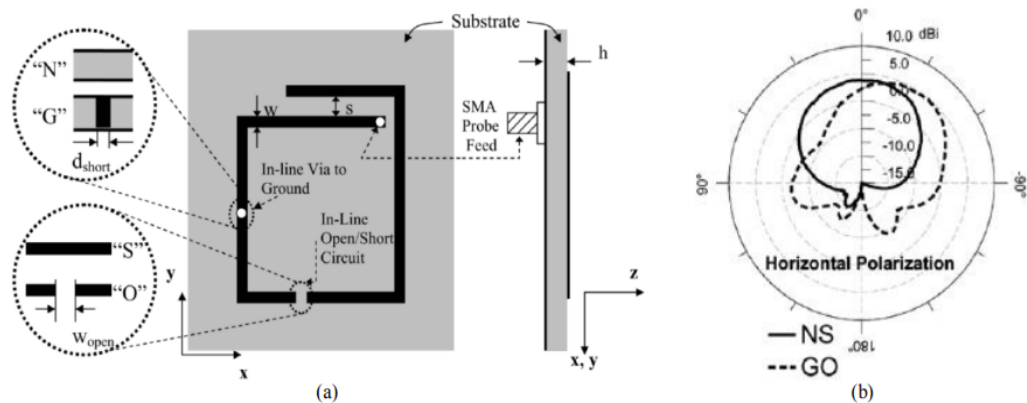


Figure I.17:Exemple Antenne spirale carrée reconfigurable en diagramme par l'utilisation de court-circuit : (a) Géométrie de l'antenne ; (b) Diagrammes 2D, NS : configuration initiale ; GO : diodes activées [I.49].

I.12.6 Antennes imprimées flexibles

Les antennes imprimées flexibles, ou "poly-flex", intègrent des substrats polymères dans leur conception. Elles sont légères, conformables (adaptables aux surfaces courbes) et peu coûteuses. Ces caractéristiques en font la solution idéale pour les appareils électroniques flexibles utilisés dans la santé, la défense, les sports ou la mode notamment pour l'IoT [I.50].

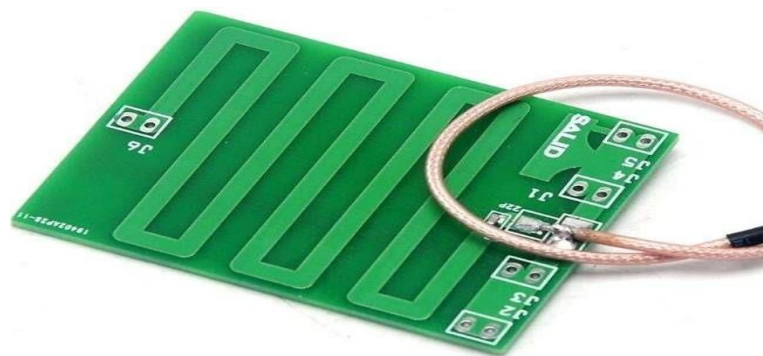


Figure I.18: Exemple Antennes imprimées flexibles [I.51].

I.12.7 Antenne microruban (Microstrip Patch Antennas)

Les antennes micro-ruban (microstrip patch antennas) constituent la technologie d'antenne la plus largement utilisée dans les systèmes IoT et 5G, en raison de leur faible épaisseur, leur légèreté, leur faible coût et leur facilité d'intégration dans les circuits électroniques [I.52]. Ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptées aux objets connectés et aux équipements compacts fonctionnant dans la bande de fréquence de 3,5 GHz - une bande clé allouée aux déploiements 5G en dessous de 6GHz [I.53], [I.54].

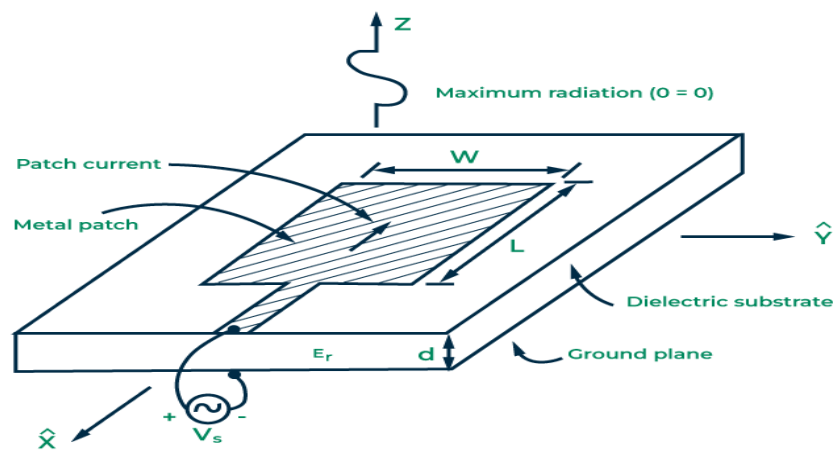


Figure I.19: Antennes microruban [I.55].

I.13 Avantages et inconvénients de système IOT

Les systèmes de l'Internet des Objets (IoT) jouent un rôle important dans l'amélioration des communications et des systèmes intelligents. Malgré les nombreux avantages qu'ils offrent, ces systèmes présentent également certaines limites et contraintes techniques :

I.13.1 Les avantages de l'Internet des objets [I.1]

Nous avons cité dispersément dans différentes parties du présent chapitre quelques avantages de l'Internet des objets. Dans cette section, nous résumons les principaux avantages de l'IoT.

- Accès ubiquitaire à l'information pour un monde plus intelligent et un mode vie sophistiqué et confortable.
- Amélioration de la qualité de service et de la télésurveillance dans différents domaines d'applications, à savoir le domaine industriel, médical, etc.
- Améliorer la productivité et l'expérience-client : les objets connectés envoient des rapports à leurs constructeurs indiquant les préférences et les habitudes des clients aidant davantage les entreprises à agir de manière proactive et adaptée qui satisfait la demande et les exigences de la clientèle.
- Le gain du temps est un autre avantage de l'IoT. Les déplacements inutiles sont dès lors remplacés par une simple navigation sur le web pour commander des produits, contrôler l'état des objets et/ou endroits connectés.
- Dans certaines applications, l'IoT nous permet même de rationaliser nos dépenses et faire des économies car on ne consomme qu'en cas de besoin, que ça soit pour les achats ou la consommation énergétique (nécessaire pour l'éclairage ou la climatisation) ou autre.
- Possibilité d'exploitation des ressources géantes de l'Internet pour Le stockage et le traitement des données écoulées de l'IoT.

I.13.2 Les inconvénients de l'IoT [I.56]

- Problèmes potentiels de sécurité et de confidentialité des données ;
- Interopérabilité entre les différents appareils et leur protocole de connexion à assurer ;
- Évolutivité du système et gestion d'un volume de données parfois très conséquent ;
- Dépendance à une connectivité Internet fiable ;
- Coût élevé de mise en œuvre et de maintenance dans certains secteurs.

L'IoT peut dans certains domaines poser des problèmes quant à la confidentialité des données collectées pour son fonctionnement. Les informations personnelles relatives à une autorisation d'accès doivent, par exemple, répondre aux exigences du Règlement Général de Protection des Données (RGPD). De même, si la collecte

d'informations relatives aux habitudes des occupants d'un smart building est utile à la gestion des réseaux d'énergie, elle peut porter atteinte à leur vie privée.

I.14 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales de l'Internet des Objets (IoT), en abordant son évolution historique, ses définitions, ses composants, ses caractéristiques ainsi que ses différentes architectures. Nous avons également étudié les principales technologies de communication, les bandes de fréquences utilisées, les domaines d'application de l'IoT et les solutions technologiques qui soutiennent son développement, notamment les réseaux 5G. Enfin, les différents types d'antennes employés dans les systèmes IoT ont été présentés, en mettant en évidence l'importance des antennes microruban grâce à leur compacité, leur faible coût et leur facilité d'intégration dans les dispositifs connectés.

Cette étude constitue une base essentielle pour la compréhension du sujet de ce mémoire. Ainsi, le chapitre suivant sera consacré aux généralités sur les antennes microruban, où seront présentés leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques, leurs paramètres de conception ainsi que leurs principales applications dans les systèmes de communication modernes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -CHAPITRE I-

- [I.1] **Somia SAHRAOUI**, « Mécanismes de sécurité pour l'intégration des RCSFs à l'IoT (Internet of Things) », thèse Doctorat en Informatique, université de Batna 2, 2016
- [I.2] **A. Hakin, A. Gokhale, P. Berthou, D. C. Schmidt, T. Gayraud**, «Software-Defined Networking: Challenges and research opportunities for Future Internet», Computer Networks 75 (part A) 453–471, 2014
- [I.3] **Rabeb Saad**, « Modèle collaboratif pour l'Internet of Things (IoT) », MÉMOIRE DE MAÎTRISE, L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI, 2016
- [I.4] **M. Han and H. Zhang**, «Business intelligence architecture based on internet of things » Journal of Theoretical & Applied Information Technology, vol. 50, no. 1, pp. 90-95, 2013.
- [I.5] **P.J. Benghozi, S. Bureau, F. Massit-Folléa, C. Waroquiers, and S. Davidson**, « L'internet des objets: quels enjeux pour l'Europe, Éd ».de la Maison des sciences de l'homme éd, 66 p, 2009.
- [I.6] **M. Weill and M. Souissi**, « L'Internet des objets: concept ou réalité?, » dans Réalités industrielles, ESKA, Éd., Les Annales des Mines. ESKA, pp. 90-96, 2010.
- [I.7] **BENCHOULA Rayane, HANACHI Nour Elhouda**, « Etude comparative de protocoles de communication dans l'IOT », Mémoire de master, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2019/2020.
- [I.8] **HANAFI Imane, YAHIA Samia**, « Conception d'un système IoT de bout en bout pour le suivi temps réel des processus de production, de géolocalisation et de surveillance », Mémoire De Master , UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2019/2020
- [I.9] **M.HANICHE Malika, m. TABRAIT Nabila**, « internet des objets dans le domaine de l'agriculture de demain », mémoire master II, 2019.
- [I.10] <https://www.digora.com/fr/blog/definition-iot-et-strategie-iot>(Consulté le09 mars 2020)
- [I.11] **RABTI Yacoub, SLIMANE Haroun**, « CONCEPTION ET SIMULATION D'UNE ANTENNE MIMO POUR LES APPLICATIONS IoT », Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2024/2025
- [I.12] **WEILL, M., &SOUISSI, M.** « L'internet des objets : concept ou réalités Industrielles », (8), 90–96, 2010, novembre.
- [I.13] **FARIDAH, SMITH, &LEE**, «A comprehensive review of IoT applications and future prospects ». IEEE Internet of Things Journal, 10(4), 1234–1267 , 2023.
- [I.14] **CHRISTIAN**. « Avec les objets connectés, le changement c'est Maintenant [Billet de blog] ». Fnac mars 2017.
- [I.15] <https://www.educba.com/introduction-to-iot/> (Consulté le15 Avril 2020)
- [I.16] <https://www.webchoiceonline.com.au/fundamental-characteristics-that-makes-the-internet-of-things-what-it-is/> (Consulté le15 Avril 2020)
- [I.17] <https://fr.scribd.com/document/619417069/Chapitre-1-architecture-IoT-22-23-1>

- [I.18] **Osman Chifa**, « Proposition d'un modèle de vérification pour un protocole de Communication IOT », Mémoire MASTER Informatique, Université de Ouargla,
- [I.19] **Mr BENKHIRA Abdelghafour**, « Conception d'une antenne UHF ISM pour l'IOT », Mémoire MASTER en Réseau et Télécommunication, Université–Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib, 2022/2023.
- [I.20] **GUBBI, J. BUYYA, R. MARUSIC, S. & PALANISWAMI, M.** «Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions ».Future Generation Computer Systems, 29(7), 1645–1660, 2013.
- [I.21] **DJOUADI. A**, « L'étude de l'Internet des objets et contrôle d'accès aux données » mémoire de licence, Université virtuelle de Tunis, 2019.
- [I.22] **HARTENSTEIN.H, & LABERTEAUX. K**, «A tutorial survey on vehicular adhoc networks ». IEEE Communications Magazine, 46(6), 164–171, 2008.
- [I.23] **HADJADJ. W**, « L'utilisation de N-Version de programmation pour la prise en charge des fautes dans un environnement IoT : Étude de cas sur un système médical domotique contrôlé par un SMA » Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi. pp. 13–19,2018.
- [I.24] **HOSSAIN.M, S, & MUHAMMAD. G**, « Cloud-assisted Industrial Internet ofThings (IIoT)–enabled framework for health monitoring».Computer Networks, 101, 192–202, 2016.
- [I.25] **GRABOWSKI. M, &DZIWOKI.G**, «The IEEE wireless standards as aninfra structure of smart home network ». In Communications in Computer and Information Science Vol. 39, pp. 302–309.Springer 2009.
- [I.26] **ALAA. S, & HAMOUDA.A**, « A comprehensive survey on smart home automation systems». Renewable and Sustainable Energy Reviews, 102, 234– 249 2019.
- [I.27] **ATZORI. L, IERA. A, & MORABITO. G**, « The Internet of Things: A survey». Computer Networks, 54(15), 2787–2805, 2010.
- [I.28] **XU.L,D. HE. W, & LI. S**,« Internet of Things in industries: A survey». IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10(4), 2233–2243 2014.
- [I.29] **TIZZAOUI. Y**, « Internet des Objets (IoT) – Application : Industrie 4.0 » Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, Algérie 2017.
- [I.30] **ZOUNIS.A, KATSOULAS. N, BARTZANAS. T,& KITTAS. C**,« Internet of Things in agriculture: Recent advances and future challenges ». Biosystems Engineering, 164, 31–48 2017.
- [I.31] **Mme ADJAOUT Karima**, « SIMULATION ET IMPLEMENTATION Du CONTROLE DES OBJETS (IoT) A TRAVERS UN ARDUINO WIFI »,Mémoire de Master Télécom,Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2020/2021
- [I.32] **BEN HADJI, Hend**, Les fondamentaux de l'IoT, PRIDA Track 1 (T1), ITU, 24 août 2020.
- [I.33] **MATHUR. P, KUMAR. P, GUPTA.R, & SINGH. V**, « Dual MIMO antenna system for 5G mobile phones, 5.2 GHz WLAN, 5.5 GHz WiMAX and 5.8/6GHz Wi-Fi applications», IEEE Access, 9, 104567–104575 2021.

- [I.34] **SHAREEDA. M. A, HABAEBI. M. H, & BASHIR. A. K**, «Bluetooth LowEnergy for IoT: A review ». International Journal of Electrical, Electronics and omputer Systems (IJECS), 28(1), 18–26, 2023.
- [I.35] **ZIGBEE ALLIANCE**, «ZigBee specification (Document No. 053474r17) ».ZigBee Alliance. Basé sur la norme IEEE 802.15.4, 2007.
- [I.36] **ADAMO. I. H, AYAD. M. Y, ALWAN. Z. S, & ISMAEL. B**, «Comparative study on LPWAN: NB-IoT and LTE-M». ITM Web of Conferences, 55, 03002, 2023.
- [I.37] **EL May Wissem**, «Développement d'antennes textiles pour des applications IoT», Thèse de doctorat en Électronique & Télécommunications, Université Côte d'Azur et Université Tunisie El Manar, 2021.
- [I.38] **N. Hussain and N. Kim**, «Integrated Microwave and mm-Wave MIMO Antenna Module with 360 Pattern Diversity For 5G Internet-of-Things», IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 24, pp. 25423-25434, 2022.
- [I.39] **Elfergani, A. Iqbal, C. Zebiri, A. Basir, J. Rodriguez, M. Sajedin, A. de Oliveira Pereira, W. Mshwat, R. Abd-Alhameed, and S. Ullah**, « Low-Profile and Closely Spaced Four-Element MIMO Antenna for Wireless Body Area Networks », Electronics (MDPI), published 4 February 2020.
- [I.40] **C. A. Balanis**, «Antenna Theory: Analysis and Design 4th ed. Hoboken», NJ. USA: Wiley. ch.6, 2016
- [I.41] **W. M. Abdulkawi, M. A. Algaisei, A. A. Sheta, and I. Elshafiey**, «New Compact Antenna Array for MIMO Internet of Things Applications, Micro machines», vol. 13. no. 9,p. 1481, doi: 10.3390/mi13091481. Sep. 2022,
- [I.42] **Assane , Ngom.** « Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou "Small Cells" pour le standard 5G ». Electronique. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019); Université Cheikh Anta Diop (Dakar, Sénégal ; 1957-..), Français. 2019.
- [I.43] **Y. Yang, M. Mao, J. Xu, H. Liu, J. Wang, and K. Song**, «Millimeter-Wave Antennas for 5G Wireless Communications: Technologies, Challenges, and Future Trends», Sensors, vol. 25, no. 17, p. 5424, DOI: 10.3390/ s25175424, Sep. 2022,
- [I.44] **M. Hussain and B. Ahn**, «High gain quasi-omnidirectional dipole array fed by radial power divider for millimetre-wave IoT sensing», Scientific Reports, vol. 14, p. 16279, DOI: 10.1038/ s41598-024-67032-7, Jul. 2024
- [I.45]<https://gsacom.com/paper/disruptive-beamforming-trends-improving-mmwave-5g/>
- [I.46] <https://www.digikey.com/> (Digi-Key Electronics, 2024)
- [I.47] <https://www.digi-electronics.fr/fr/blogs/monopole-vs-dipole-antennas-structure-performance-applications-guide/390.html>

[I.48] **Garcia, E., Anduiar, A., & Anguera, J.** «Overview of Reconfigurable Antenna Svstems for IoT Devices Electronics», *13*(20), 3988, 2024 <https://doi.org/10.3390/electronics13203988>

[I.49] **DAKHLI, Saber**, «Augmentation de la performance des antennes miniatures inspirées par méta matériaux ». Doctorat en Électronique, Université de Rennes 1, Physiques et Naturelles de Tunis, 2015.

[I.50] **Sharma, P.K. & Chung, J.Y.** « Express Polymer Letters», 18(4), 371-390. DOI: 10.3144/expres spolymlett.28, 2024

[I.51] <https://www.pcbmay.com/fr/carte-d%27antenne/p>

[I.52] **N. K. Basha, K. Umadevi, P. Swetha, S. Sivaranjani, P Yogeshwari et B. Sridevikala**, «Microstrip patch antenna arrays for 5G IoT and smart communication systems: A literature review » in Proc. 5th Int. Conf. Pervasive Comput. Social Netw. (ICPCSN), Salem, Inde, pp. 494-499, 2025

[I.53] **S. Hadi et A. Islam**, «Design of a small slotted partial grounded fifth-generation patch antenna at 3.5 GHz with improved performance », Cureus J. Eng., vol. 2, n° 1, pp. 1-12, janv. 2025

[I.54] **I. Özkese et C. Dögüsge Erbas**, « 5G uygulamasina vönelik mikroserit yama anten tasarimi ve üretimi » (Conception et fabrication d'une antenne microruban pour application 5G), Mühendislik Bilimleri ve Tasarim Dergisi vol. 13, n° 3, pp. 709-727, 2025.

[I.55] <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/microstrip-patch-antenna/>

[I.56] <https://blog.ubisolutions.net/iot-technologies-cas-dusages-avantages-et-limites-guide-complet>

Chapitre II

Généralités sur les antennes imprimées

II.1 Introduction

Les antennes constituent un élément fondamental dans tout système de communication sans fil. Elles assurent la transition entre les signaux électriques circulant dans les circuits électroniques et les ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace libre. Autrement dit, une antenne permet de transmettre ou de recevoir des informations à distance sans support physique.

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et les commandes à distance, ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique. Les systèmes micro-ondes à structure microruban ont été à l'origine du développement des antennes imprimées (antennes plaques ou antennes patch) qui sont le plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de fonctions très particulières [II.1], [II.2].

Avec le développement rapide des technologies modernes, notamment les télécommunications mobiles, les réseaux sans fil et l'Internet des objets (IoT), les antennes occupent une place centrale dans la conception des systèmes électroniques. Elles sont utilisées dans de nombreuses applications telles que la télévision, la radio, le radar, le GPS, les satellites et les systèmes de communication sans fil.

Le fonctionnement d'une antenne repose sur les lois de l'électromagnétisme. Lorsqu'un courant alternatif circule dans un conducteur, il génère un champ électromagnétique qui se propage sous forme d'onde. Inversement, une onde électromagnétique incidente peut induire un courant dans l'antenne, permettant ainsi la réception du signal.

En résumé, les antennes jouent un rôle indispensable dans les systèmes de communication modernes, en permettant la transmission efficace de l'information à travers l'espace, tout en répondant aux exigences croissantes en termes de performance et de miniaturisation.

Ce chapitre sera consacré à la présentation de la technologie imprimée de manière générale. On commence tout d'abord par une généralité sur les antennes ensuite nous présentons la structure de l'antenne imprimée, les techniques

d'alimentation déployées, les caractéristiques qui en font une technologie innovante et particulière, les méthodes d'analyse de ce type de structure des domaines d'application des antennes imprimées et on clôture le chapitre par un bref aperçu sur la technologie 5G.

II.2 Définition d'une antenne

Une antenne est habituellement un dispositif métallique utilisé pour la transmission ou la réception des ondes hertziennes. C'est un transducteur entre la ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu où l'onde rayonne. Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Ainsi on peut définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur [II.3], [II.4].

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée.

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité.

Il existe plusieurs types d'antennes qui diffèrent par leur fonctionnement, leur géométrie, et leur technologie. Il est possible d'identifier plusieurs familles à l'origine de l'ensemble des structures rayonnantes : les antennes filaires (comme le dipôle, le monopole, l'antenne yagi), les antennes à ouverture (comme le cornet), les antennes à réflecteurs (comme les paraboles) et les antennes patchs microruban (antennes à structure planaires).

Les antennes ont donc pour principales fonctions.

- La transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées.
- L'adaptation correcte entre les circuits électroniques terminaux et le milieu de propagation.

- La transmission la plus fidèle possible de l'information souhaitée [II.5].

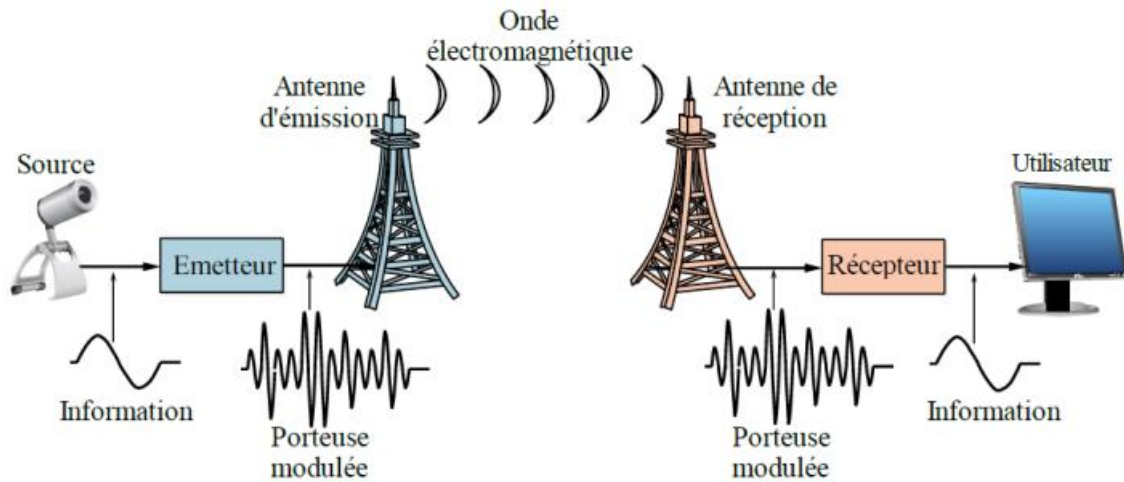


Figure II.1 : Principe de transmission par onde électromagnétique.

II.3 Les antennes imprimées

II.3.1 Historique des antennes imprimées

Le concept d'antennes imprimées est apparu dans les années 1950, mais il faudra attendre les années 1970 pour voir apparaître les premières réalisations. Deux atouts majeurs vont entraîner un développement très important de ce type d'antenne : leur faible coût de réalisation, et leur capacité d'intégration. Elles sont aujourd'hui implantées dans de nombreux dispositifs électroniques et constituent le type d'antenne privilégié aux fréquences microondes dans les systèmes de communication intégrés modernes [II.6].

II.3.2 Structure d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée est constituée d'une fine couche conductrice métallique de forme arbitraire, appelé élément rayonnant, déposée sur un substrat diélectrique dont la face inférieure est entièrement métallisée pour constituer un plan de masse. Même en haut de l'élément rayonnant on peut trouver un autre substrat (superstrat) [II.7], [II.8]. Ces éléments rayonnants présentent différentes formes : carrée, rectangulaire, triangulaire, circulaire, elliptique ou d'autres formes plus complexes.

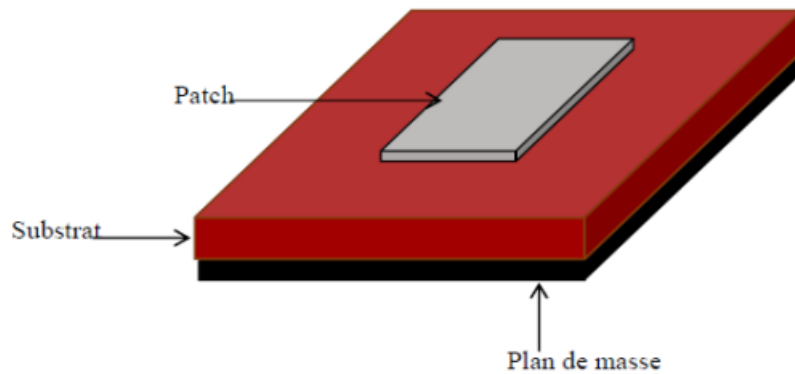


Figure II.2 : Structure d'une antenne imprimée.

II.3.3 Les paramètres géométriques de l'antenne imprimée

II.3.3.1 Largeur du patch

La largeur du patch a un effet mineur sur les fréquences de résonance et sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Par contre, elle joue un rôle pour l'impédance d'entrée (sur le bord) de l'antenne (équation II.1) et la bande passante à ses résonances [II.9].

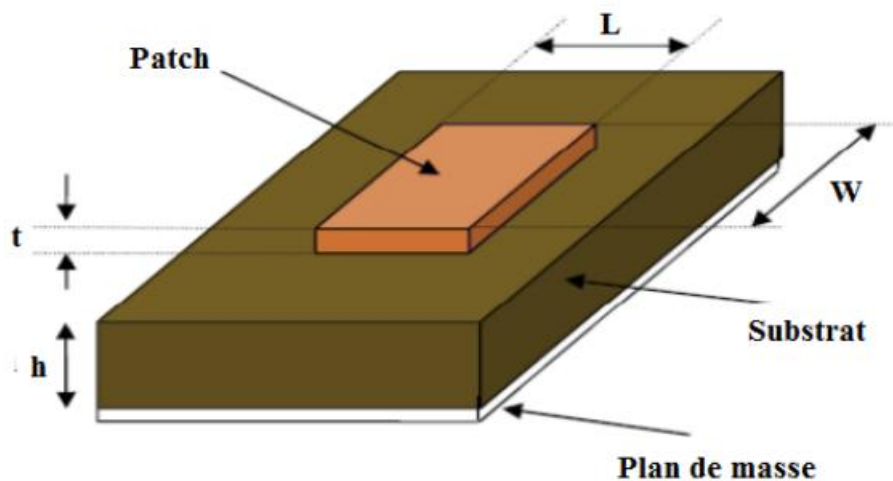


Figure II.3 : Présentation d'une antenne imprimée [II.10], [II.9].

L : Longueur du patch , t : épaisseur du patch.

W : Largeur du patch , h : épaisseur du substrat

$$R_{in} = 90 \times \frac{\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W}\right)^2 \quad (\text{II.1})$$

Pour permettre un bon rendement de l'antenne, une largeur W pratique est

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{II.2})$$

Avec f_r est la fréquence de résonance de l'antenne patch, ϵ_r la constante diélectrique du substrat et c la vitesse de la lumière dans l'espace libre. La constante diélectrique effective ($W/h > 1$) est donnée par :

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{II.3})$$

II.3.3.2 Longueur du patch

Il est déjà mis à la claire que les champs des bords font que les dimensions du patch se voient électriquement supérieures à ses dimensions physiques. Cela est bien montré dans la figure II.5 (ca du plan E) où la longueur du patch est allongée d'une quantité ΔL .

La structure de l'antenne en général se présente comme montrée à la figure II.4.

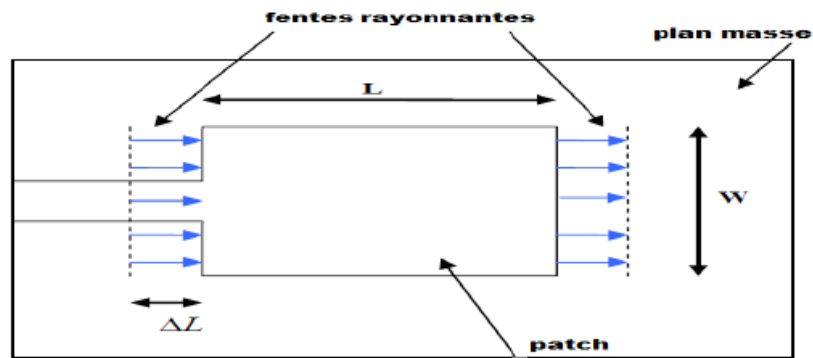


Figure II.4: Antenne patch et les deux fentes rayonnantes.

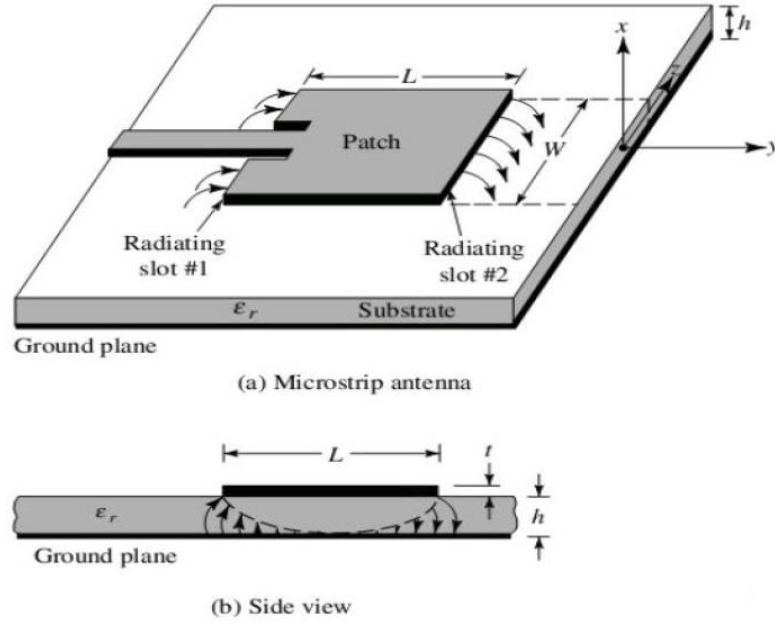


Figure II.5: Répartition des champs sur les bords du patch [II.11].

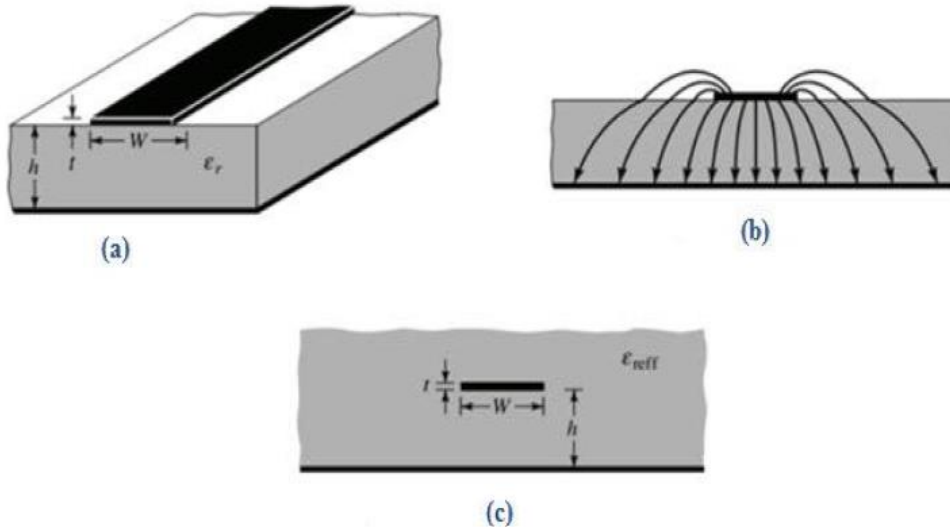


Figure II.6: (a) Ligne micro ruban, (b) Les lignes de champs, (c) Constante diélectrique équivalente [II.11].

La longueur du patch détermine les fréquences de résonance de l'antenne. Il ne faut surtout pas oublier de retrancher deux fois la longueur ΔL qui correspond au débordement des champs (équation II.5).

$$L = \frac{\lambda_g^{\text{dielectric}}}{2} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (\text{II.4})$$

La longueur L doit être légèrement inférieure que la longueur d'ondes dans le diélectrique. A cette fréquence d'opération, λ dépend de la constante diélectrique efficace (ϵ_{eff}). L'effet de débordement du champ fait électriquement, le patch semble plus grand que sa dimension physique. Il y a donc une augmentation de L de chaque côté de patch.

$$\Delta L = 0.421h \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \quad (II.5)$$

Donc la longueur effective L_{eff} sera donc :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (II.6)$$

II.3.4 Les différentes formes du patch

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes comme le montre sur la figure II.7 :

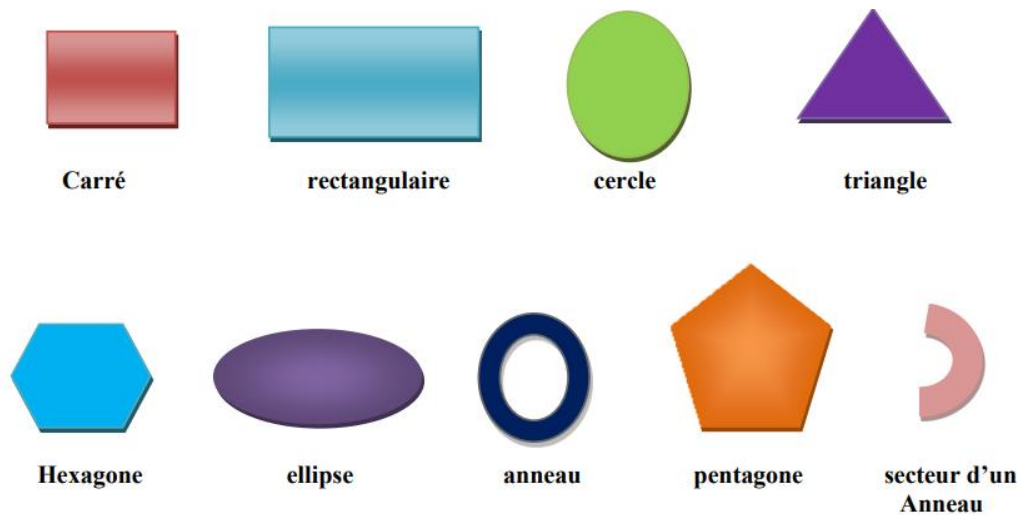


Figure II.7 : Les différents types de patch [II.8].

II.3.5 Les caractéristiques des antennes imprimées

Les paramètres électriques définissent l'antenne comme élément du circuit dans lequel elle est connectée. Ils permettent d'évaluer la charge apportée par l'antenne au circuit d'excitation et, ainsi, de caractériser l'efficacité du transfert de

puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent servir à cette caractérisation, nous définirons les principaux paramètres [II.12], [II.9].

II.3.5.1 Impédance d'entrée de l'antenne

En ce qui concerne l'émission et conformément à la théorie des circuits linéaires, l'antenne peut être représentée par un dipôle d'impédance d'entrée complexe $Z_e(f) = R_e(f) + jX_e(f)$ chargeant à la sortie du circuit émetteur, modélisé par une source d'impédance interne $Z_s(f) = R_s(f) + jX_s(f)$ (figure II.8). Précisons que f est la fréquence de résonance de l'antenne [II.9].

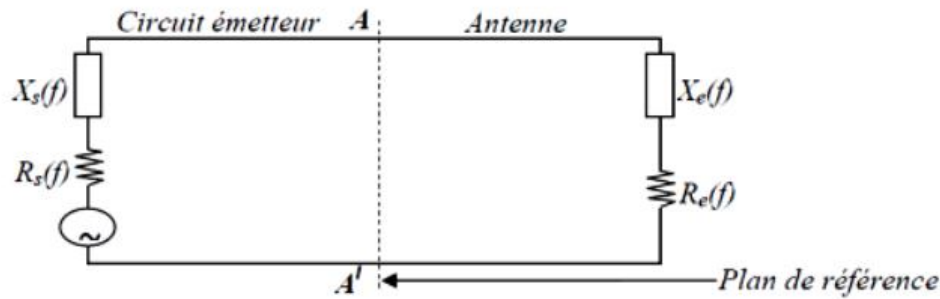


Figure II.8 : Schéma équivalent du dispositif à l'émission [II.13], [II.9].

D'une part, la partie réelle de l'impédance d'entrée $R_e(f)$ caractérise la puissance dissipée par l'antenne sous forme de rayonnement et de pertes diverses dans sa structure (effet Joule, onde de surface, etc.) et d'autre part, la partie imaginaire $X_e(f)$, d'interprétation plus délicate est liée à la puissance réactive concentrée au voisinage immédiat de l'antenne et au déphasage. L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par l'expression :

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (II.7)$$

Z_0 = impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

Où S_{11} est fonction de la fréquence, alors Z_{in} varie aussi avec la fréquence.

II.3.5.2 Coefficient de réflexion

On considère un système constituant un générateur, une ligne de transmission d'impédance caractéristique, Z_c , et une antenne d'impédance Z_{ant} [II.14].

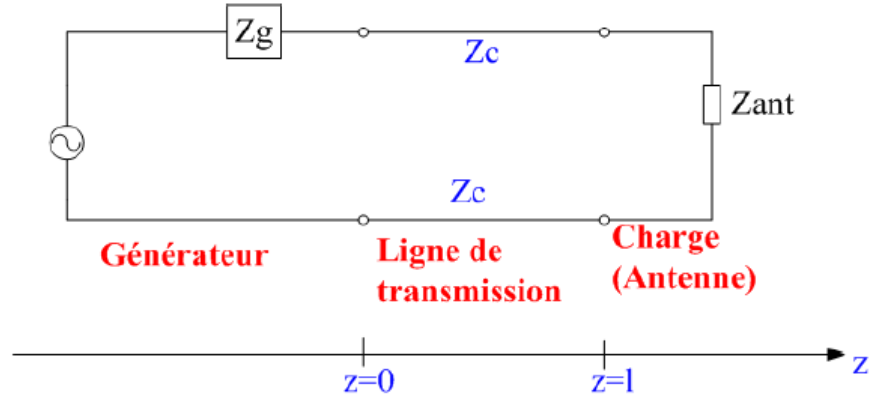


Figure II.9 : Schéma d'une antenne connectée à une ligne de transmission et un générateur.

Le coefficient de réflexion d'une antenne est un rapport entre l'onde incidence et l'onde réfléchie, est donné par :

$$\Gamma(z) = \frac{V_0^+}{V_0^-} e^{2jkz} = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c} e^{2jk(z-1)} \quad (\text{II.8})$$

Avec k : le nombre d'onde $k = \omega/c$

L'équation précédente permet de déterminer le paramètre de réflexion S_{11} ou Γ en $Z = 1$,

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c} \quad (\text{II.9})$$

Le coefficient de réflexion S_{11} en décibel (dB) est :

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log(S_{11}) \quad (\text{II.10})$$

II.3.5.3 Rapport d'Ondes Stationnaires (ROS)

Le rapport des valeurs maximales/ minimales de diagramme d'onde stationnaire le long d'une ligne de transmission à laquelle une charge est connectée. La valeur VSWR varie de 1 (charge adaptée) à l'infini pour une charge court-circuitée ou ouverte. Pour la plupart des antennes, la valeur maximale acceptable de VSWR est de 2. VSWR est lié au coefficient de réflexion Γ par : [II.16]

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (II.11)$$

II.3.5.4 Gain et directivité

Dans une certaine direction d'antenne (θ, ϕ) et celle d'une antenne isotrope le gain (G) est le rapport d'intensité de rayonnement ou en autre terme c'est la quantité descriptive de performance d'antenne, le gain est exprimé en dB [II.17], [II.16].

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (II.12)$$

II.3.5.5 Rendement de l'antenne

L'efficacité ou le rendement η d'une antenne définit la capacité de transformer la puissance transmise à l'antenne P_t en puissance rayonnée $Pray$ [II.18], [II.8]. Elle est définie par :

$$\eta = \frac{Pray}{P_t} \quad (II.13)$$

Avec $Pray$ et P_t sont données par :

$$Pray = \iint r^2 (\theta, \phi) d\phi \quad \text{et} \quad P_t = 4\pi r^2 S_{ri}$$

D'après les équations, l'efficacité peut être exprimée par le rapport entre le gain et la directivité :

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} \quad (\text{II.14})$$

II.3.5.6 La Bande passante

La bande passante est définie comme étant une plage de fréquences sur laquelle les performances d'un dispositif électronique sont conformes à certaines spécifications. Dans le domaine des antennes en applications terrestres, la bande passante correspond généralement à la plage de fréquences sur laquelle 90% de la puissance incidente est transmise, ce qui correspond à $S_{11} = -10\text{dB}$, et sous condition que le diagramme de rayonnement, ou la répartition de l'énergie rayonné, ne change pas sur cette bande [II.19]- [II.21].

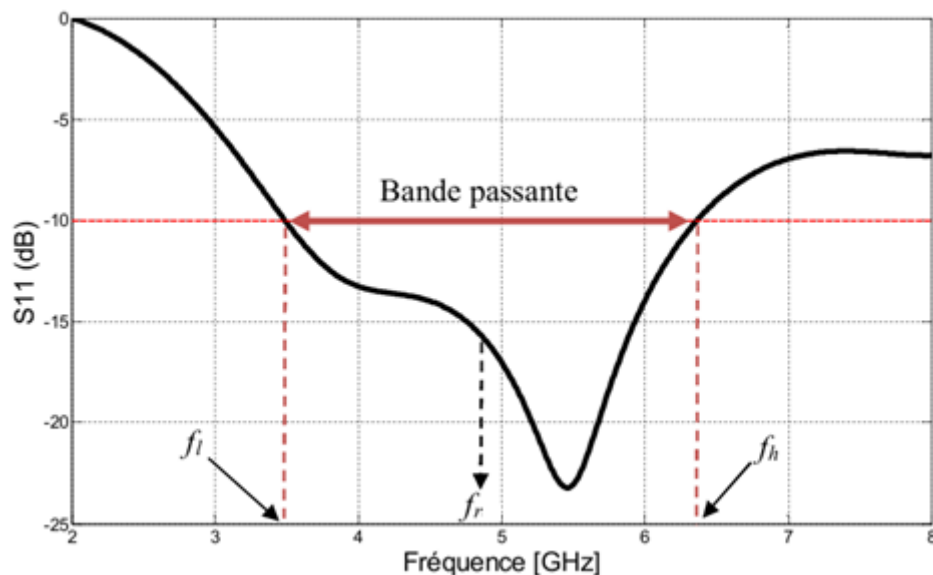


Figure II.10: Exemple de $|S_{11}|$ d'une antenne en dB en fonction de la fréquence et la bande passante a -10 dB.

Pour connaître la largeur de bande d'une antenne relativement au rayonnement, on trace le paramètre S_{11} de réflexion en fonction de la fréquence. On admet généralement que si ce paramètre est inférieur a -10 dB ou -15 dB, la puissance de rayonnement est suffisante. Il suffit alors de repérer sur la courbe les valeurs de la fréquence correspondant à cette valeur comme sur la figure II.10 [II.19]- [II.21].

La fréquence de résonance f_r correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible. Sur une bande passante donnée, il est possible d'observer plusieurs minimas, donc plusieurs fréquences de résonance. Afin de comparer des structures d'antennes, on exprime souvent la bande passante d'une antenne en termes de bande passante relative par rapport à la fréquence de résonance.

$$\text{BP (en \%)} = \frac{f_h - f_l}{f_r} * 100 = \frac{\Delta F}{f_r} * 100 \quad (\text{II.15})$$

II.3.5.7 Diagramme de rayonnement

La densité de puissance rayonnée par une antenne est répartie dans l'espace autour de celle-ci en fonction de sa géométrie et de son adaptation. Les diagrammes de rayonnement sont utilisés pour représenter graphiquement cette répartition. Ils sont donnés en zone lointaine et généralement dans un repère en coordonnées polaires.

Les diagrammes peuvent être représentés sur des figures en 2D (polaire ou cartésien) ou en 3D (figure II.11). Ou D est la dimension la plus grande de l'antenne et λ la longueur d'onde associé à la fréquence de fonctionnement de l'antenne [II.5].

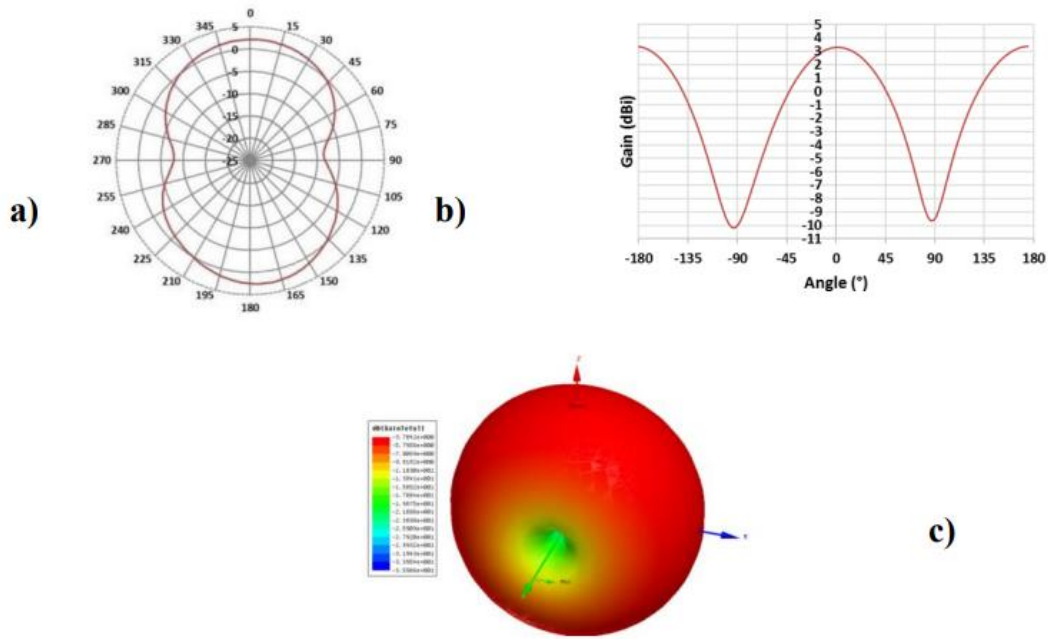


Figure II.11: Différents types de représentation des diagrammes de rayonnement a) 2D polaire b) 2D cartésien c) 3D [II.5].

II.3.6 Technique d'alimentation

II.3.6.1 Alimentation par ligne microruban

Une ligne microruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre la figure (II.12), le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance comme le montre la figure (II.13) [II.22], [II.6].

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5 [II.22], [II.6]. Elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées de différentes formes [II.6].

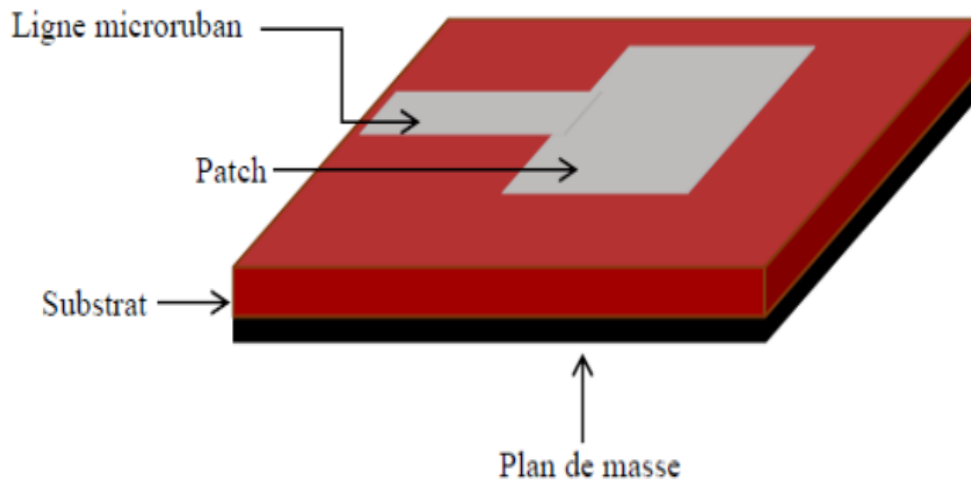


Figure II.12: Alimentation par ligne microruban [II.8].

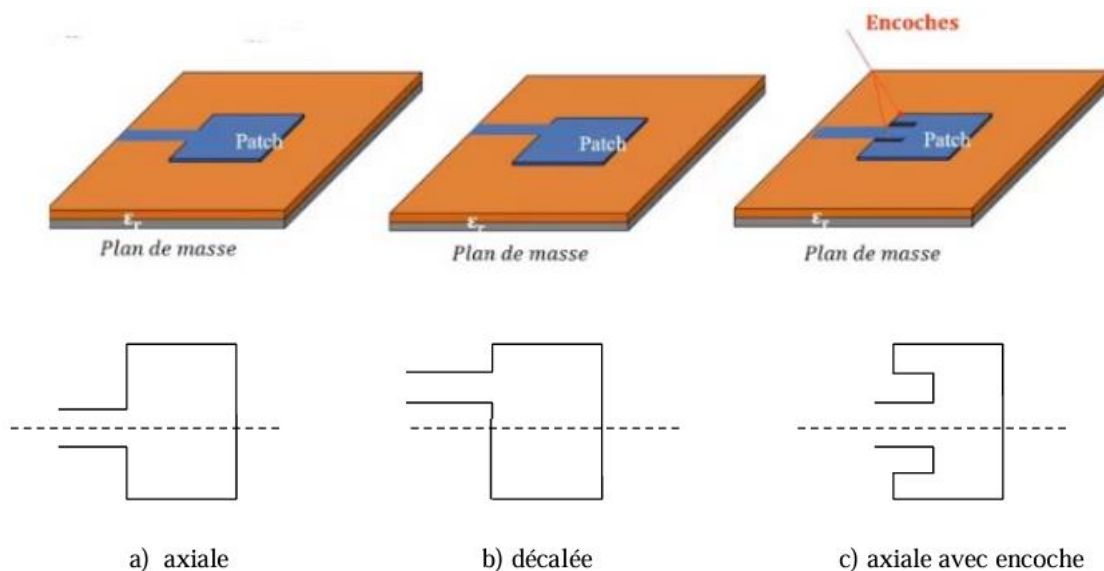


Figure II.13: Alimentation par une ligne microruban. a) axiale b) décalée et c) axiale avec encoche [II.6].

Le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie de l'élément rayonnant (figure II.13. a) ou décalé par rapport à cet axe de symétrie (figure II.13.b) pour avoir une meilleure adaptation d'impédance. L'alimentation axiale avec une encoche donne de bons résultats (figure II.13.c).

Cette technique d'alimentation est la plus utilisée dans les antennes imprimées grâce à sa facilité de réalisation et son faible coût.

Les antennes microruban ont une large implémentation dans de nombreuses applications où la taille, le poids, le coût, les performances et la facilité d'installation sont des contraintes. En tant qu'antennes à profil bas, elles représentent une solution durable pour les applications exigeantes, telles que les communications sans fil, la radio mobile, les applications aéronautiques et satellites, etc. Ces antennes sont simples à fabriquer et, selon les exigences de conception, elles peuvent fournir diverses solutions, en termes de fréquence de résonance, diagramme de rayonnement, polarisation, impédance [II.6].

II.3.6.2 Alimentation par câble coaxial

L'alimentation par câble coaxial ou s'appelle l'alimentation de sonde coaxiale est également largement utilisées. Dans ce type d'alimentation le conducteur intérieur du câble coaxial est attaché au patch de rayonnement tandis que le conducteur extérieur est connecté au plan de masse comme le montre dans la figure II.14 [II.23], [II.6].

Ce type d'alimentation caractérisé par la facilité de fabrication et à assortir, et elle a un faible rayonnement supérieur, cependant, il a également une bande passante étroite et il est plus difficile à la fois le microruban pour les substrats épais ($h > 0.02\lambda_0$)

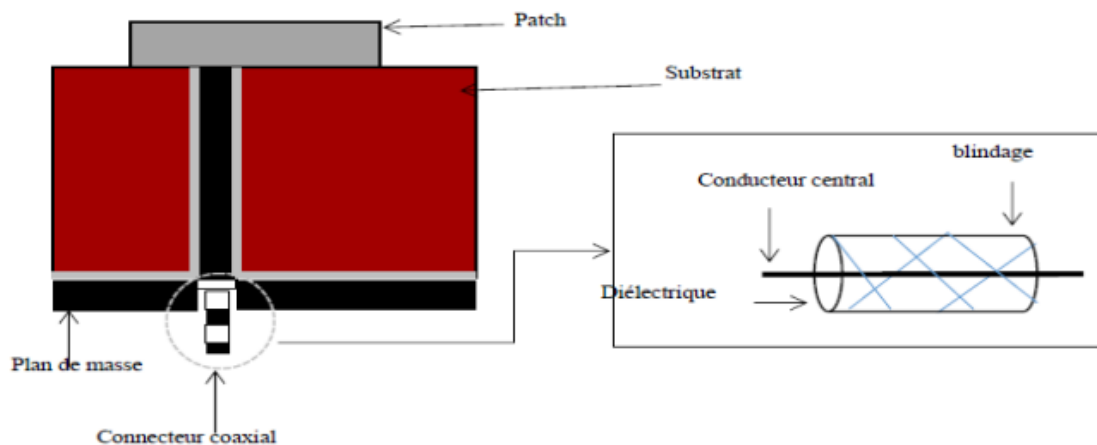


Figure II.14: Alimentation par câble coaxial [II.8].

I.3.6.3 Alimentation par proximité

La ligne d'alimentation microruban et la sonde possèdent des asymétries inhérentes qui génèrent des modes d'ordre supérieur qui produisent un rayonnement à polarisation croisée [II.23]. Pour surmonter certains de ces problèmes, l'alimentation sans contact a été proposée [II.1]. La source d'alimentation de proximité est divisée en deux type d'alimentation : alimentation à couplage EM (proximité) et alimentation à couplage ouvert.

II.3.6.3.1 L'alimentation par couplage à ouverture

Le couplage d'ouverture est le plus difficile à fabriquer de tous les quatre méthodes et il a également une bande passante étroite. Cependant, il est un peu plus facile à modéliser et a un rayonnement parasite modéré. Le couplage à travers la fente peut être modélisé en utilisant la théorie de Bethe [II.23], [II.6].

Dans ce type de technique d'alimentation, le patch rayonnant et la ligne d'alimentation microruban sont séparés par le plan de masse comme le montre la figure II.15. Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation se fait à travers une fente ou une ouverture dans le plan de masse [II.6].

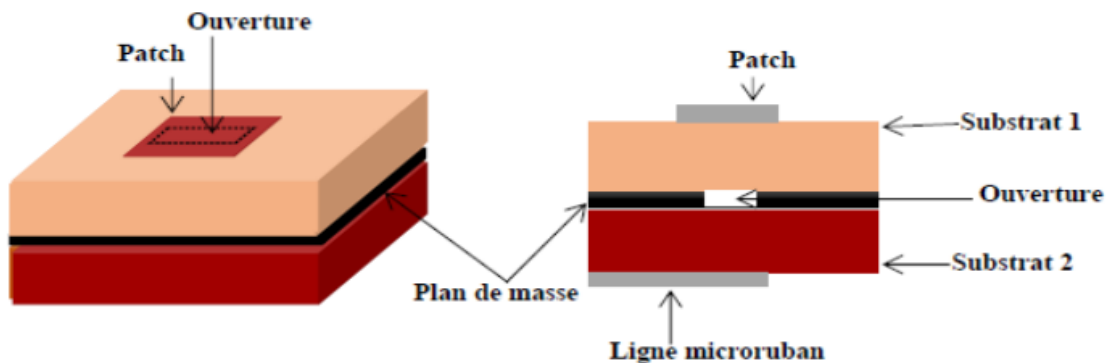


Figure II.15: Alimentation par proximité par couplage à ouverture [II.8].

Cette structure est constituée de deux substrats superposés et séparés par un plan de masse. Sur la face inférieure du substrat inférieur, une ligne microruban est percée qui sert de source d'alimentation, dont l'énergie est couplée au patch à travers une ouverture gravée dans le plan de masse séparant les deux substrats. Cette disposition permet une optimisation indépendante du mécanisme

d'alimentation et de l'élément rayonnant (voir figure II.15). Habituellement, le substrat inférieur utilise un matériau à haute constante diélectrique, tandis que le substrat supérieur utilise un matériel épais avec un faible constant diélectrique.

II.3.6.3.2 Alimentation par couplage électromagnétique

La source d'alimentation utilise un couplage électromagnétique (couplage de proximité), moins courant, couplage direct d'une ligne microruban située entre l'élément rayonnant et le plan de masse et placée entre deux couches de substrats diélectriques (voir figure II.16) [II.6].

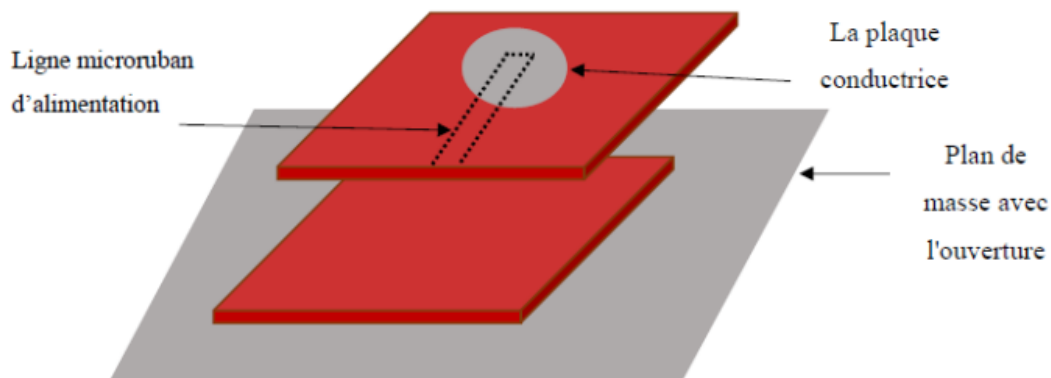


Figure II.16: Alimentation par proximité par couplage électromagnétique [II.8].

II.3.7 Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Chaque système qui transforme l'énergie sur une ligne de transmission a besoin d'adaptation ; la ligne transforme l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance au droit de la source. Ce que voit la source dépend donc de l'impédance de charge, de la longueur électrique de la ligne et de son impédance caractéristique.

II.3.7.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Dans la construction de circuits hyperfréquences, on recherche souvent l'adaptation, c'est à dire à se ramener à une impédance différente (qui est souvent l'impédance caractéristique) de celle obtenue en fin de circuit [II.8].

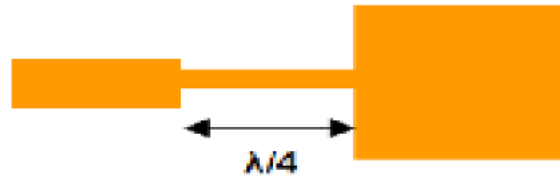


Figure II.17: Adaptation par quart à adaptation quart d'onde.

II.3.7.2 Adaptation par stub

Une autre façon de procéder pour arriver à l'adaptation d'une charge quelconque consiste à utiliser un stub. Grâce à un stub en un circuit ouvert (open stub) ou en court-circuit (short stub). La solution retenue est généralement celle présentant le plus faible encombrement. Le raisonnement peut se faire en impédance mais il est plus facile de travailler dès le départ en admittance pour faire la somme des impédances parallèles ramenées [II.8].

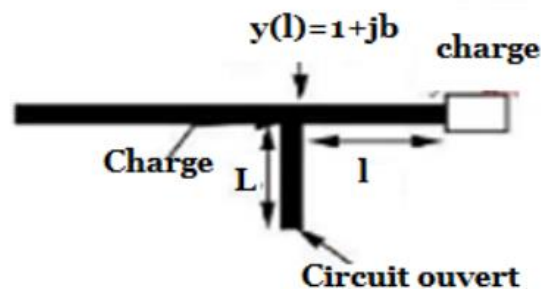


Figure II.18: Stub en circuit ouverte.

II.3.7.3 Adaptation avec encoche

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch.

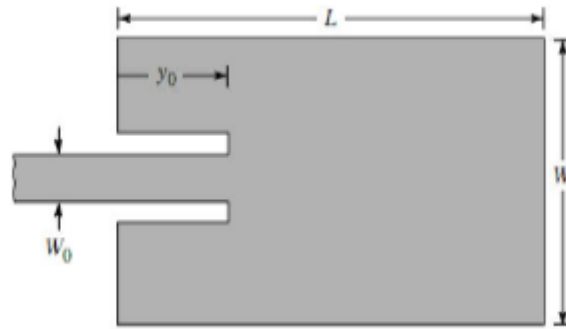


Figure II.16: Patch adapté par encoches.

II.4 Les avantages et les inconvénients d'antenne patch

II.4.1 Les avantages [II.24]

Les antennes patch présentent plusieurs avantages qui les rendent populaires dans de nombreuses applications. Voici quelques-uns de ces avantages :

- **Compacité** : Les antennes patch sont relativement petites et plates, ce qui les rend idéales pour les dispositifs compacts tels que les téléphones mobiles, les ordinateurs portables et les appareils électroniques portables. Leur conception plate permet également une intégration facile dans les circuits imprimés.
- **Coût abordable** : Les antennes patch sont généralement fabriquées à partir de matériaux peu coûteux tels que le cuivre ou l'aluminium, ce qui les rend économiques à produire en masse. Cela en fait un choix attrayant pour les applications grand public et industrielles.
- **Directivité contrôlée** : Les antennes patch peuvent être conçues pour avoir une directivité élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent concentrer le rayonnement dans une direction spécifique. Cela permet une meilleure couverture de la zone cible et une amélioration de la qualité du signal [II.10].
- **Faible profil en hauteur** : Les antennes patch ont un profil en hauteur bas, ce qui les rend discrètes et faciles à intégrer dans des environnements où la visibilité de l'antenne est importante, tels que les appareils électroniques portables et les véhicules [II.15].

- **Facilité de fabrication** : Les antennes patch sont relativement faciles à fabriquer grâce aux techniques de fabrication standard telle que la photolithographie et la gravure chimique. Cela permet une production rapide et efficace des antennes, ce qui est bénéfique pour les applications nécessitant une grande quantité d'antennes.
- **Bonne performance** : Les antennes patch peuvent offrir de bonnes performances en termes de gain, de directivité, de bande passante et de rendement. Leur conception permet de réaliser des performances optimales pour des fréquences spécifiques, ce qui les rend adaptées à diverses applications sans fil [II.15].
- **Flexibilité de conception** : Les antennes patch offrent une flexibilité de conception permettant de modifier la forme, la taille et les paramètres géométriques pour répondre à l'exigence es spécifiques de l'application. Cela permet d'optimiser les performances de l'antenne en fonction des besoins spécifiques.

Les antennes patch sont appréciées pour leur compacité, leur coût abordable, leur directivité contrôlée, leur faible profil en hauteur, leur facilité de fabrication, leurs bonnes performances et leur flexibilité de conception. Ces avantages en font un choix attrayant pour de nombreuses applications sans fil.

II.4.2 Inconvénient [II.24]

Bien que les antennes patch présentent de nombreux avantages, elles ont également quelques inconvénients à prendre en compte. Voici quelques-uns de ces inconvénients :

- **Bande passante limitée** : Les antennes patch ont souvent une bande passante limitée, ce qui signifie qu'elles peuvent fonctionner efficacement sur une plage de fréquences relativement étroite. Cela peut restreindre leur utilisation dans des applications nécessitant une large bande passante.
- **Sensibilité à l'environnement [II.25]**: Les performances des antennes patch peuvent être sensibles à l'environnement dans lequel elles sont utilisées. Des facteurs tels que la présence d'obstacles métalliques, les variations de la

permittivité du substrat et les interférences électromagnétiques peuvent affecter les performances de l'antenne.

- **Directivité fixe :** Bien que la directivité élevée puisse être un avantage, elle peut également être un inconvénient dans certaines situations. Les antennes patch ont généralement une directivité fixe, ce qui signifie qu'elles sont plus efficaces dans une direction spécifique, mais moins efficaces dans d'autres directions. Cela peut poser des défis dans les applications nécessitant une couverture omnidirectionnelle.
- **Sensibilité à la polarisation :** Les antennes patch sont souvent sensibles à la polarisation, ce qui signifie qu'elles doivent être alignées correctement avec la polarisation du signal pour obtenir des performances optimales. Cela peut être un inconvénient dans les situations où la polarisation du signal est variable ou mal alignée [II.26].
- **Limitations de puissance :** Les antennes patch peuvent avoir des limitations de puissance en raison de la petite taille et des matériaux utilisés. Des niveaux de puissance élevés peuvent entraîner des problèmes de surchauffe ou de distorsion du signal.
- **Difficulté de modification après fabrication :** Une fois qu'une antenne patch est fabriquée, il peut être difficile de la modifier ou de l'ajuster. Les modifications nécessitent souvent une nouvelle conception et une nouvelle fabrication de l'antenne.

Il est important de considérer ces inconvénients lors du choix et de l'utilisation des antennes patch, en tenant compte des exigences spécifiques de l'application. Dans certains cas, d'autres types d'antennes peuvent être plus adaptés pour répondre aux besoins particuliers.

II.5 Domaine d'application des antennes imprimées

Vu l'explosion technologique dans les télécommunications et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimées, ainsi que les exigences croissantes des systèmes de communication modernes, l'utilisation des antennes micro-ondes classiques devient insuffisante pour répondre à ces besoins. Pour cette

raison, les antennes microruban remplacent les antennes classiques dans de nombreuses applications [II.27], [II.28], [II.14]. Parmi ces applications, on peut citer :

- Les télécommunications par satellites ;
- La commande et le contrôle ;
- La télémessure par missile ;
- Les équipements portatifs ;
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes ;
- Les antennes d'émission utilisées en médecine ;
- Les récepteurs de navigation par satellite ;
- Les réseaux sans fil modernes (Wi-Fi, WLAN, Bluetooth) ;
- Les systèmes de communication de cinquième génération (5G) ;
- Les objets connectés (IoT) et les réseaux de capteurs intelligents, où les antennes microruban sont particulièrement appréciées grâce à leur faible coût, leur compacité, leur facilité d'intégration et leur capacité à fonctionner dans les bandes de fréquences 5G.

Les antennes microruban occupent aujourd'hui une place importante dans les systèmes de télécommunications modernes grâce à leurs nombreux avantages, tels que leur faible encombrement, leur coût de fabrication réduit, leur légèreté et leur facilité d'intégration dans les dispositifs électroniques. Ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptées aux applications sans fil de nouvelle génération nécessitant des équipements compacts et performants. Parmi ces applications figurent les réseaux mobiles de cinquième génération (5G) ainsi que les systèmes de l'Internet des Objets (IoT), qui exigent des antennes capables d'assurer des communications fiables, à haut débit et avec une faible consommation d'énergie.

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de présenter les principales caractéristiques de la technologie 5G, les bandes de fréquences utilisées ainsi que son rôle dans le développement de l'IoT, afin de mieux comprendre l'environnement d'applications des antennes étudiées dans notre travail.

II .6 Généralités sur la technologie 5G [II.10]

II.6.1 Évolution des générations de réseaux mobiles (1G à 5G)

Les précédentes générations de réseaux mobiles avaient toujours pour ambition d'améliorer la vitesse des données afin de répondre à une demande de ressources toujours plus forte, à des services de plus en plus exigeants en termes de débits. Et chaque génération a pu développer de nouvelles technologies pour anticiper les besoins des utilisateurs.

La première génération (1G) est un système à fonctionnement analogique avec un multiplexage de type fréquentiel (FDMA). Elle était utilisée pour le service vocal public avec une capacité en termes d'abonnés et de trafic faible.

La deuxième génération (2G) repose sur une technologie entièrement numérique avec implémentation des techniques de multiplexage fréquentiel (FDMA), et découpage temporel des canaux disponibles (TDMA), pour une vitesse améliorée autour de 64Kbps. En plus des services de la première génération, la 2G permet de prendre en charge la messagerie texte.

Par la technologie de commutation de paquets, le système sans fil de la troisième génération (3G) fournit des débits jusqu'à 2Mbps.

Concernant la 4G, les technologies OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) qui est un procédé de codage de signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous-porteuses et CDMA (Code Division Multiple Access) qui est un système de codage des transmissions, utilisant la technique d'étalement de spectre ont été introduites pour offrir aux consommateurs des débits allant jusqu'à 100 Mbps.

Mais vu la demande croissante de données pour les smartphones avec l'essor de nouvelles applications, et surtout l'arrivée de la réalité virtuelle, seul le nouveau standard 5G pourra assurer ce nouveau type de connectivité entre les personnes et les objets dans un environnement placé sous le signe de l'intelligence et des connexions. L'UIT abonde dans le même sens par la voie de son secrétaire général Houlin Zhao [II.29]: « L'attention est maintenant centrée sur la possibilité de créer une société connectée en continu à l'horizon 2020 et au-delà – une société dans laquelle les personnes aussi bien que les objets, les données, les applications, les

systèmes de transport et les villes seraient regroupés au sein d'un environnement placé sous le signe des communications intelligentes en réseau ».

Ce développement sera suivi en parallèle d'une croissance exponentielle du volume des données mobiles échangées. Par exemple, des millions de voitures connectées seront en circulation et le moindre problème de réseau pourrait avoir des incidences très graves. C'est la raison pour laquelle l'objectif de la 5G n'est pas seulement de répondre aux besoins d'aujourd'hui mais à ceux de demain afin d'être un réseau qui ne craint ni la surcharge, ni l'évolution et qui s'adapte à de nouveaux usages.

La 5G permettra aussi d'être plus rapide pour garantir que des données seront correctement transmises dans un intervalle de temps extrêmement faible mais également sans failles. La combinaison des deux permettra de traiter des applications jugées jusqu'alors trop sensibles pour la mobilité : voitures connectées, équipements de santé, applications industrielles.

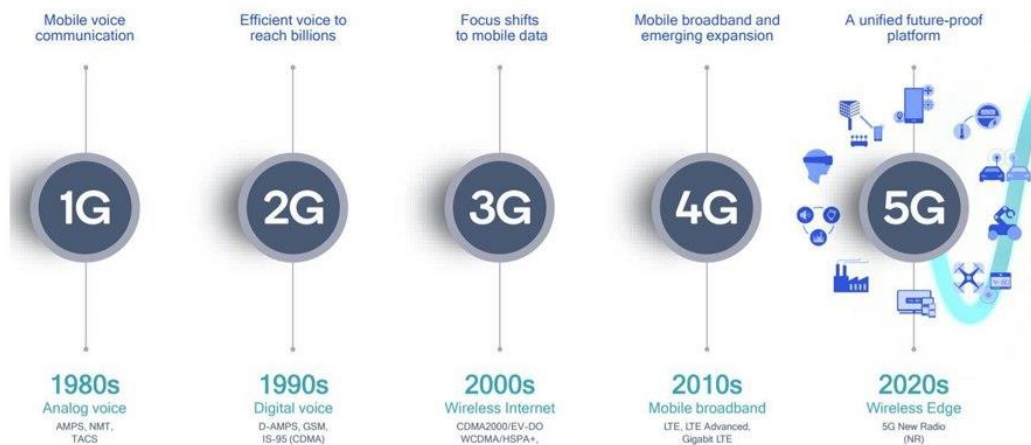


Figure II.17: De la 1G à la 5G [II.30].

II.6.2 La fréquences utilisées pour la 5G

La technologie 5G utilise plusieurs bandes de fréquences afin de répondre aux exigences des communications modernes. Parmi les fréquences les plus utilisées, on trouve les bandes basses comme 700 MHz qui assurent une large

couverture, les bandes moyennes telles que 2.6 GHz et surtout 3.5 GHz, ainsi que les bandes millimétriques comme 26 GHz et 28 GHz offrant des débits très élevés.

Dans notre travail, nous nous sommes particulièrement intéressés à la fréquence de 3.5 GHz, car elle représente la bande la plus exploitée dans les réseaux 5G grâce à son bon compromis entre couverture, capacité et vitesse de transmission. Cette fréquence est également adaptée aux applications de l'Internet des Objets (IoT) et aux systèmes de communications sans fil modernes.

II.6.3 La relation entre La 5G et l'internet des objets IOT

La technologie 5G constitue un élément clé pour le développement de l'Internet des Objets (IoT). Grâce à son débit élevé, sa faible latence et sa capacité à connecter un très grand nombre d'appareils simultanément, elle permet une communication rapide, fiable et efficace entre les objets connectés. Cette synergie favorise le développement de nombreuses applications telles que les villes intelligentes, l'industrie 4.0, la santé connectée et les systèmes de transport intelligents. Ainsi, la 5G représente l'infrastructure essentielle permettant à l'IoT d'atteindre son plein potentiel et d'accélérer la transformation numérique.



Figure II.18: La relation entre 5G et IOT [II.31].

II.6.4 Nouvelles applications

L'essor de la 5G permettra le déploiement massif de l'Internet des objets (IoT), et il peut être très bénéfique s'il est utilisé à des fins industrielles ou dans des applications liées à la santé. Les différentes applications de la 5G sont illustrées par la figure suivante.



Figure II.19: Applications des réseaux 5G.

II.7 Conclusion

Ce deuxième chapitre a été consacré à l'étude des antennes microruban, en présentant leurs principes fondamentaux, leur structure, leurs paramètres géométriques ainsi que leurs principales caractéristiques électromagnétiques. Les différentes techniques d'alimentation et d'adaptation ont également été abordées afin de mieux comprendre les facteurs influençant les performances de ces antennes. Par ailleurs, les avantages, les limites et les domaines d'application des antennes microruban ont été mis en évidence, notamment dans les systèmes de communication modernes.

Ce chapitre a également permis de présenter les concepts généraux de la technologie 5G, les bandes de fréquences utilisées ainsi que son rôle essentiel dans le développement de l'Internet des Objets (IoT). L'étude a montré que la bande de 3,5 GHz constitue l'une des fréquences les plus importantes pour les applications IoT basées sur la 5G, grâce à son compromis entre couverture, capacité et débit de transmission.

Les connaissances théoriques développées dans ce chapitre constituent ainsi une base indispensable pour la suite de ce travail. Dans le chapitre suivant, nous passerons à l'aspect pratique en réalisant la conception et la simulation d'une antenne microruban destinée aux applications IoT 5G à 3,5 GHz. Une phase d'optimisation basée sur les techniques d'apprentissage automatique (Machine Learning) sera ensuite mise en œuvre afin d'améliorer les performances de l'antenne et d'obtenir des caractéristiques répondant aux exigences des systèmes IoT de nouvelle génération.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -CHAPITRE II-

- [II.1] **Zema Mm Youssouf, Foukia Aimad Eddine**, « Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs », Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaid-telemcen ,2017
- [II.2] **LAIB Islam, CHIHAI Ayoub**, « Conception d'une antenne patch micro-ruban rectangulaire pour applications biomédicales », Projet de Fin de Cycle filière Electronique, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2021/2022
- [II.3] **O. Picon et col**, « Les antennes Théorie, conception et application », Dunod, Paris, 2009.
- [II.4] **Meriem HARBADJI**, « Contribution à l'étude d'antennes miniatures multi-bandes », Thèse Doctorat en Electronique, Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.
- [II.5] **MANSOURI Mohamed, EZZEROUG El Haithem**, «Conception et simulation d'antenne patch ultra large bande [1-8Ghz] », Mémoire de Master Aéronautique, L'Institut d'aéronautique et des études spatiales, 2018/2019
- [II.6] **CHOUHBANE Maroua**, «Etude et conception d'une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement », Mémoire de Master Académique Filière Télécommunications, Université 8 Mai 1945 Guelma, juillet 2021.
- [II.7] **ABDENOUR Yassine**, « Étude et conception des antennes miniatures pour les applications biomédicales », Master en télécommunication, Université Abou bakar Belkaïd–TLEMCEM, 28/06/ 2018.
- [II.8] **MOULFI Bouchra, KELIBEZ Imene**, «Antenne patch pentagone multi bandes reconfigurable en fréquence pour différentes applications de télécommunications », Projet de fin d'études de Master en Télécommunications, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019/2020.
- [II.9] **SOLTANE Samia**, «Etude et caractérisation d'antennes imprimées pour système Ultra Large Bande », Mémoire de Magister en Génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [II.10] **D.M. Pozar**, «Microstrip antennas», IEEE, Vol. 80, N° .1, pp. 79-91, January 1992.
- [II.11] **D. Orban, G.J.K. Moernaut**, "The Basics of Patch Antennas",Orban Microwave Products, 2010.
- [II.12] **O. Barkat**, « Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d'antennes imprimées supraconductrice dans la bande millimétrique », Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2009
- [II.13] **David M. Pozar& Daniel H**, «The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays»
- [II.14] **MAALOUL Elhadi, HAMADOU Akram**, « Etude et Simulation d'une Antenne Micro-ruban Ultra Large Bande », Mémoire Master Académique en télécommunications, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017/2018
- [II.15] **I. J. Bahl and P. E. Bhartia**, "Microstrip antenna". Dedham, MA : Artech House, 1980.
- [II.16] **DEBOUCHA Hicham, DJENDI Hamza**, « Contribution à l'amélioration des performances des antennes dédiées aux applications biomédicales », Mémoire

de master filière Télécommunications, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2021/2022

[II.17] A. Djellid, « Analyse rigoureuse des antennes F inversées par la méthode des éléments finie d'ordre supérieur », Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf M'sila. Algérie, 2019

[II.18] R. L. Yadava, « Antenna and Wave Propagation », PHI Learning Pvt. Ltd., 2011

[II.19] O. Picon et col, « Les antennes Théorie, conception et application », Dunod, Paris, 2009.

[II.20] Meriem HARBADJI, « Contribution à l'étude d'antennes miniatures multi-bandes », Thèse Doctorat en Electronique, Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.

[II.21] BEN MAHAMED Karim, TAGUINE Ilhem, « Conception des antennes ULB et antennes planaires compactes pour des applications RFID », Projet de recherche présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER en Télécommunications, Université Saïda Dr Tahar Moulay, 2021

[II.22] Hamza Nachouane, « Contribution à la conception et à la réalisation d'antennes reconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitive de la quatrième génération », Thèse Doctorat, Electronique. Institut National des Postes et Télécommunications, 2017

[II.23] Abdelhadi Amine, Haroun Imene, « Conception et réalisations d'une antenne multi bande pour les système GNSS », Mémoire de master, université Saad Dahlab de Blida, 2011-2012.

[II.24] Si Ali Habib, Benamara Imene, « Antenne Patch Pour La 5G Millimétrique, Mémoire de master en Réseau de Télécommunication, Université Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib, 2023.

[II.25] G. Kumar and K. P. Ray, "Broadband microstrip antennas," Artech House.

[II.26] J .R. James and P. S. Hall, "Broadband microstrip antennas," IEEE Electromagnetic.

[II.27] Ali CHAMI, « Miniaturisation et intégration d'antennes imprimées pour systèmes communicants ULB pulsés », thèse doctorat, Université de Nice-Sophia Antipoli, novembre, 2011.

[II.28] Ahmed BENOMAR, « Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. Application aux Réseaux de Télécommunications », thèse doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, juin 2015.

[II.29] A. N'Gom, Aliou Diallo, Jean-Marc Ribero, Aboubakar C. Beye, "Design of an Adaptive Subarray

Antenna for Multi-Beams Wireless Small Cell Backhaul in mmWave" Conference on antenna measurement and applications (CAMA2018), 03/09/2018, Vasteras».

[II.30] W. H. Chin, Z. Fan, R. Haines, "Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks", IEEE Wireless Commun, vol. 21, n° 2, p: 106-112, Apr. 2014.».

[II.31] Melle Sidi Yakoub Wafa, Melle Khatir Ben Meheimda Bochra, « Conception d'un réseau d'antennes patch pour les applications satellitaires en bande C », Mémoire de Master en Réseau de Télécommunications, Université Ain Temouchent-Belhadj bouchaib, 2021.

Chapitre III

*Conception, simulation et
optimisation d'antennes
imprimées IOT*

III.1 Introduction

L'évolution rapide des réseaux de télécommunications a conduit à l'apparition de la cinquième génération des réseaux mobiles (5G), une technologie offrant des débits de transmission très élevés, une faible latence et une capacité de connexion massive. Parmi les différentes bandes de fréquences utilisées par la 5G, la fréquence de 3,5 GHz est largement adoptée car elle représente un compromis optimal entre la couverture du réseau, la capacité de connexion et les performances de transmission des données.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la conception et à l'étude d'antennes microruban destinées aux applications IoT-5G fonctionnant à la fréquence de 3,5GHz. La conception et la simulation ont été réalisées à l'aide du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator), reconnu pour son efficacité dans l'analyse et la modélisation des structures électromagnétiques.

Dans un premier temps, une antenne patch rectangulaire a été conçue en utilisant la technique d'alimentation par encoche (Inset Feed) afin d'améliorer l'adaptation d'impédance et de réduire les pertes par réflexion. Après la phase de conception et de la simulation, une étape d'optimisation a été effectuée à l'aide des techniques de Machine Learning (ML) implémentées avec le langage de programmation Python. Cette approche a permis d'analyser l'impact des différents paramètres géométriques sur les performances de l'antenne et d'identifier les configurations optimales permettant d'améliorer des paramètres importants tels que le coefficient de réflexion (S_{11}), le gain et la bande passante. Dans un second temps, un modèle d'antenne microruban innovant en forme de feuille de plante a été développé afin d'étudier l'influence de la géométrie du patch sur les performances de l'antenne.

L'objectif principal de ce travail est de concevoir, analyser et optimiser des antennes microruban adaptées aux applications 5G à 3.5 GHz, en combinant les capacités de simulation du logiciel HFSS avec les méthodes intelligentes basées sur l'apprentissage automatique afin d'obtenir des performances optimales.

III.2 Présentation du logiciel HFSS

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un simulateur électromagnétique de haute performance qui calcule le comportement électromagnétique d'une structure tridimensionnels, tels que les paramètres S, les fréquences de résonance et les champs. Il effectue une modélisation électromagnétique par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis. Il intègre des simulations et des visualisations et permet d'obtenir des graphiques performants [III.1], [III.2].

Le logiciel HFSS aide le concepteur à observer et analyser les diverses propriétés électromagnétiques de la structure tels que les caractéristiques de rayonnement et l'adaptation.

III.2.1 Projet en HFSS

La fenêtre d'Ansoft HFSS a plusieurs panneaux facultatifs:

- **Le Project Manager:** contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
- **Le Message Manager:** permet d'afficher tous les erreurs avant de commencer la simulation.
- **La fenêtre de Propriétés:** pour les affichages et permet de changer les paramètres des attributs du modèle.
- **La fenêtre de Progress:** affiche les progressions de la solution.
- **La fenêtre de 3D Modeler:** contient le modèle et son arbre pour la conception active.

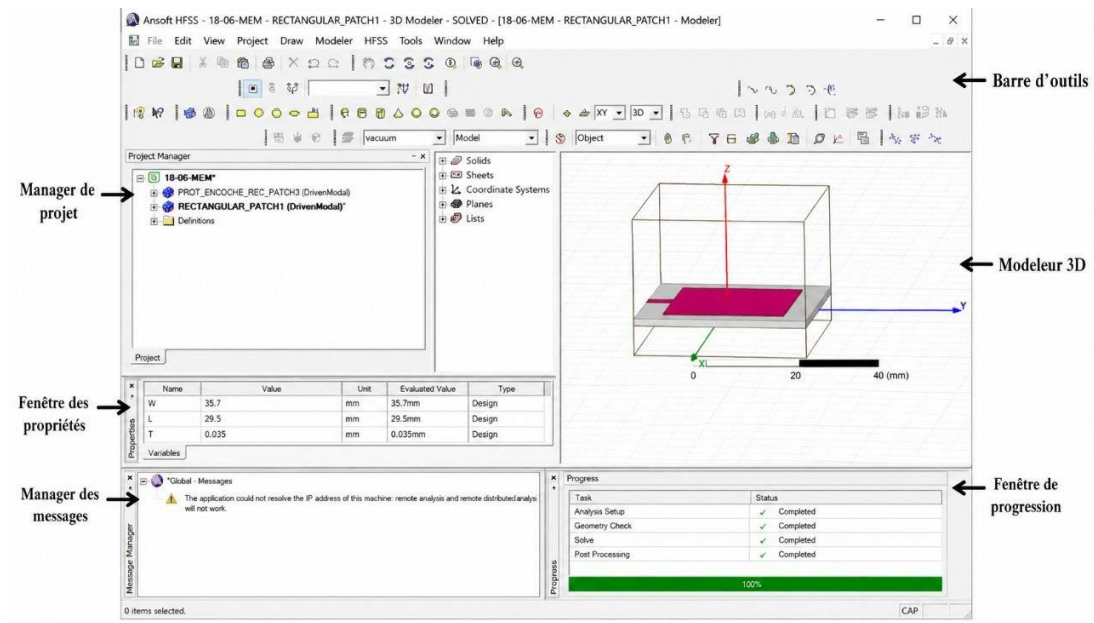


Figure III.1: Fenêtre principale du logiciel HFSS.

L'organigramme suivant résume les étapes à suivre:

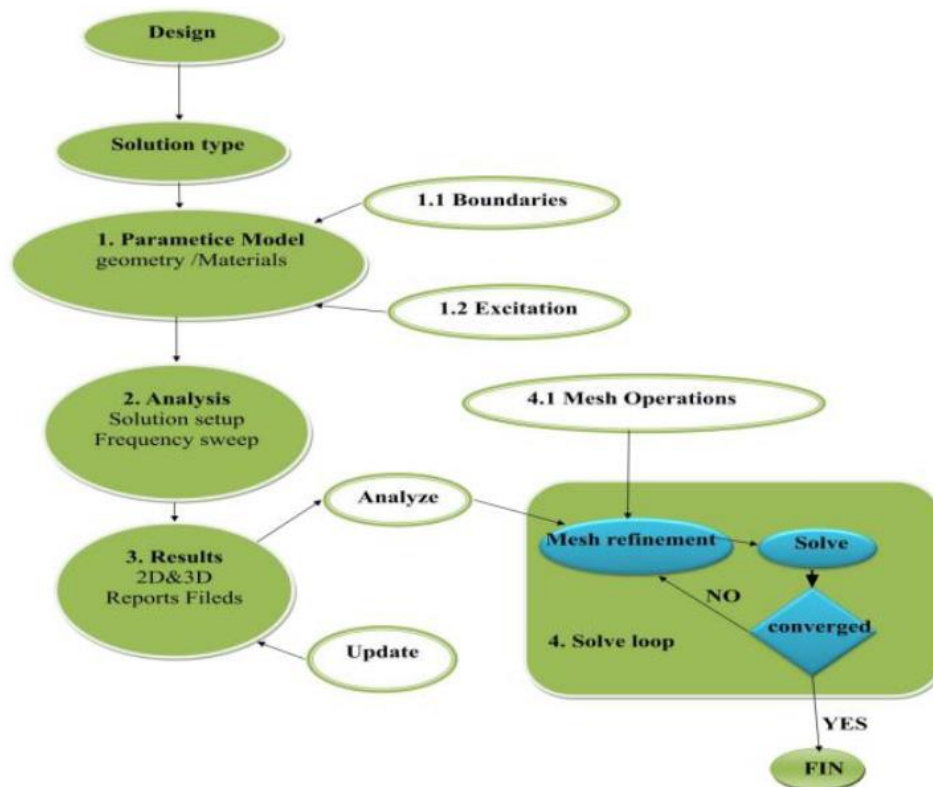


Figure III.2: Organigramme des différentes étapes d'un design HFSS.

III.2.2 Comment commencer HFSS

HFSS devrait être installé sur l'ordinateur que vous travaillez dessus. Il devrait y avoir une icône de HFSS  sur l'ordinateur de bureau que vous pouvez double-cliquer dessus pour lancer HFSS.

III.2.3 Comment ouvrir un nouveau projet

Quand vous commencez HFSS v 13, un projet est énuméré dans l'arbre de projet dans la fenêtre de Project Manager et est appelé project1 par défaut. Des définitions de projet, telles que la tâche matérielle, des états de frontière, et des ports d'excitation sont stockées sous le nom de projet.

III.2.4 Sauvegarder le projet

Sur le menu fichier, cliquer **Save As**, employer le navigateur de dossier pour localiser le dossier dans lequel vous voulez sauvegarder le projet comme **C:\Ansoft\HFSS13\Projects**, et double-cliquer le nom de dossier, puis cliquer **Save**.

III.2.5 Insérer une conception de HFSS

Sur le menu **Project** cliquer **Insert HFSS Design**. La nouvelle conception est énumérée dans l'arbre de projet, il est appelé **Model** par défaut. La fenêtre **3D Modeler** apparaît à la droite du **Project Manager**.

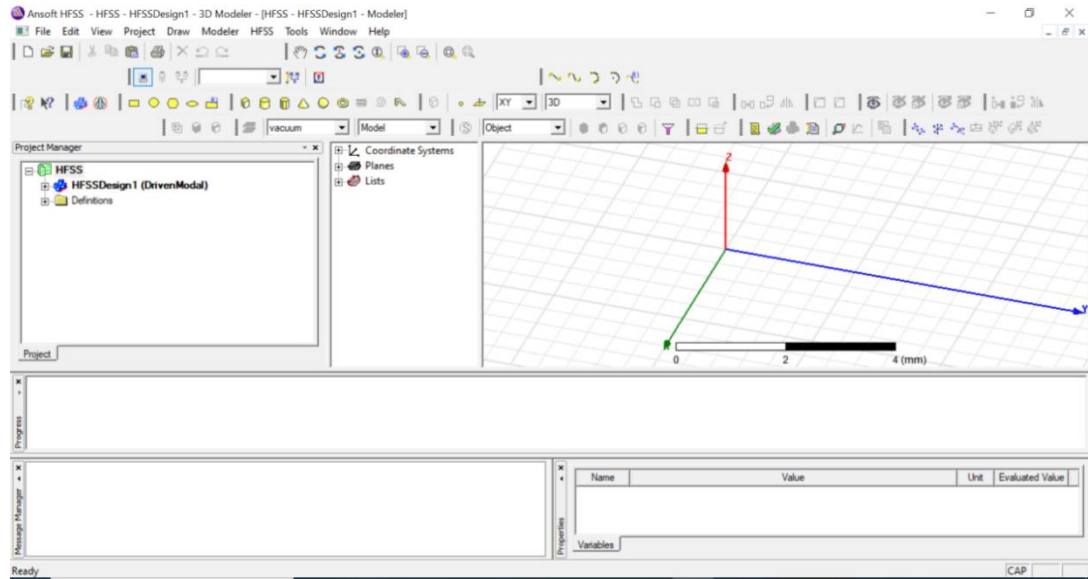


Figure III.3: Fenêtre de HFSS.

III.3 Conception d'antennes microruban pour des applications IoT dans la bande 5G

III. 3.1 Conception d'antennes patch rectangulaire

L'antenne patch conçue dans ce travail est une antenne microruban de forme rectangulaire fonctionnant à la fréquence de $f_r = 3,5$ GHz. Elle est réalisée sur un substrat de type FR4 caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 4.4$, une tangente de pertes $\tan \delta = 0.02$ et une épaisseur $h = 1.6$ mm. Le patch rectangulaire est imprimé sur la face supérieure du substrat, tandis que le plan de masse est placé sur la face inférieure. L'alimentation de l'antenne est assurée par une ligne microruban adaptée afin de garantir un bon transfert de puissance et de minimiser les pertes par réflexion. La géométrie de l'antenne est présentée à la figure III.4.

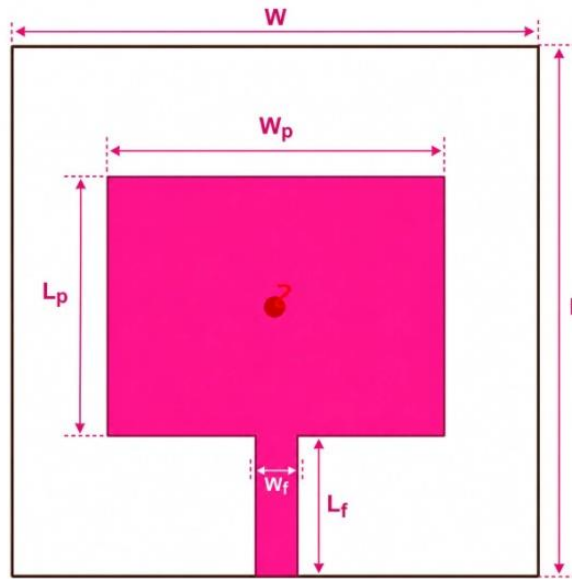


Figure III.4: Géométrie de l'antenne patch rectangulaire alimentée par ligne micro-ruban sur substrat FR4.

Les paramètres géométriques de l'antenne sont regroupés dans le tableau paramétrique de l'antenne de base.

Tableau III.1 : Paramètres géométriques de l'antenne de base.

Paramètres	W	L	W _p	L _p	L _f	W _f	h
Valeurs(mm)	35.7	29.5	26.1	19.9	15	3.05	1.6

La figure ci-dessous représente l'antenne Patch rectangulaire sous le logiciel HFSS.

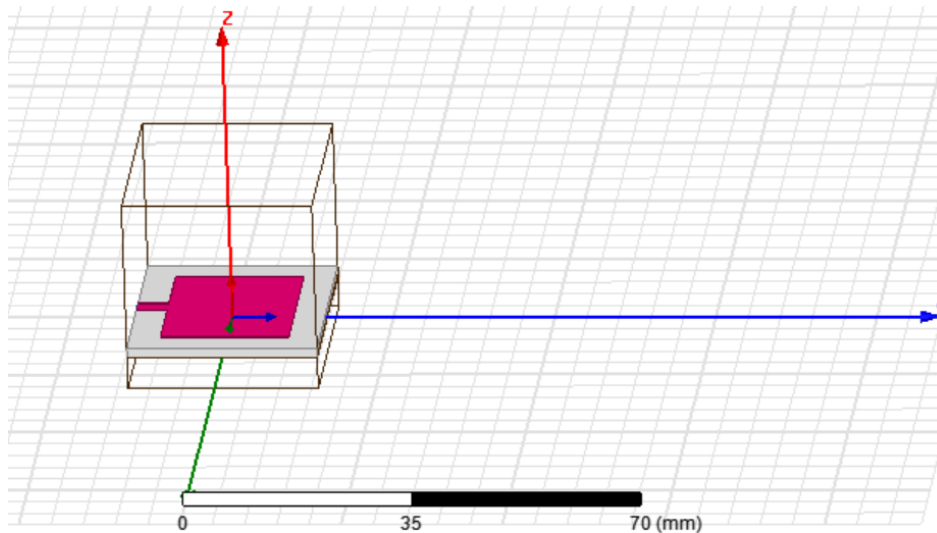


Figure III.5 : L'antenne Patch rectangulaire sous le logiciel HFSS.

Le résultat de simulation de coefficient de réflexion de l'antenne est représenté dans les figures III.6.

La courbe du coefficient de réflexion S11, montre que la valeur minimale obtenue est d'environ -3.57 dB à la fréquence de 3.494 GHz. Cette valeur reste supérieure à -10 dB, ce qui indique que l'antenne n'est pas correctement adaptée. Par conséquent, aucune bande passante valide n'est obtenue selon le critère $S_{11} \leq -10$ dB.

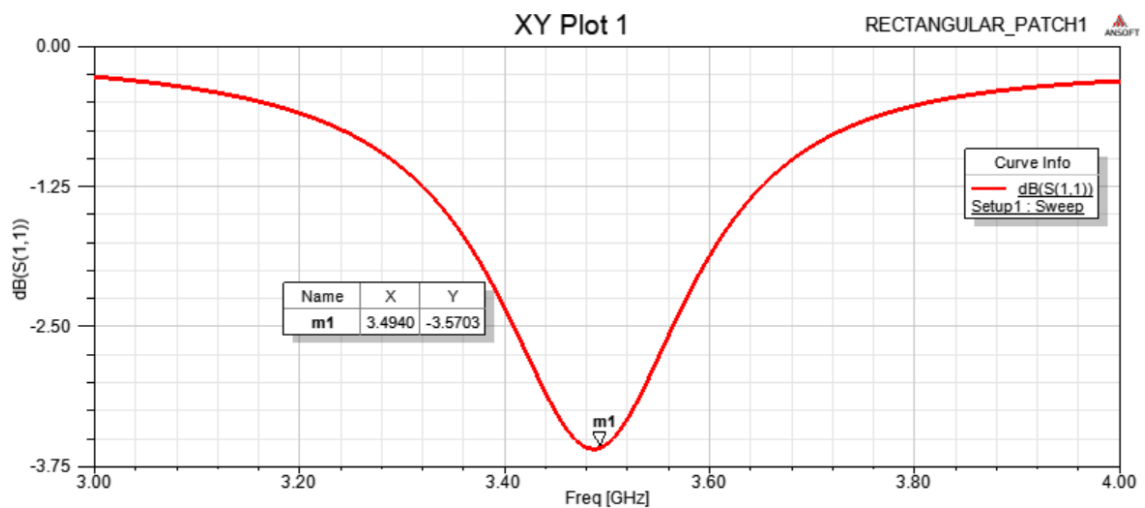


Figure III.6: Tracé de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence de l'antenne patch rectangulaire

Le taux d'onde stationnaire (VSWR) : (Voltage Standing Wave Ratio) c'est un quotient entre les champs électriques maximaux et minimaux dans une ligne de transmission. En d'autre manière, il caractérise la quantité du signal qui s'est réfléchi aux bornes d'une composante micro-onde. La norme acceptable dans un système de rayonnement électromagnétique est celle d'une valeur de VSWR inférieur à 2.

La figure III.7 représente le VSWR dans la gamme de fonctionnement de l'antenne, d'après la figure, on constate que le taux d'ondes stationnaires est égal à 5 dans toute la gamme de fréquence de l'antenne 3.5GHz.

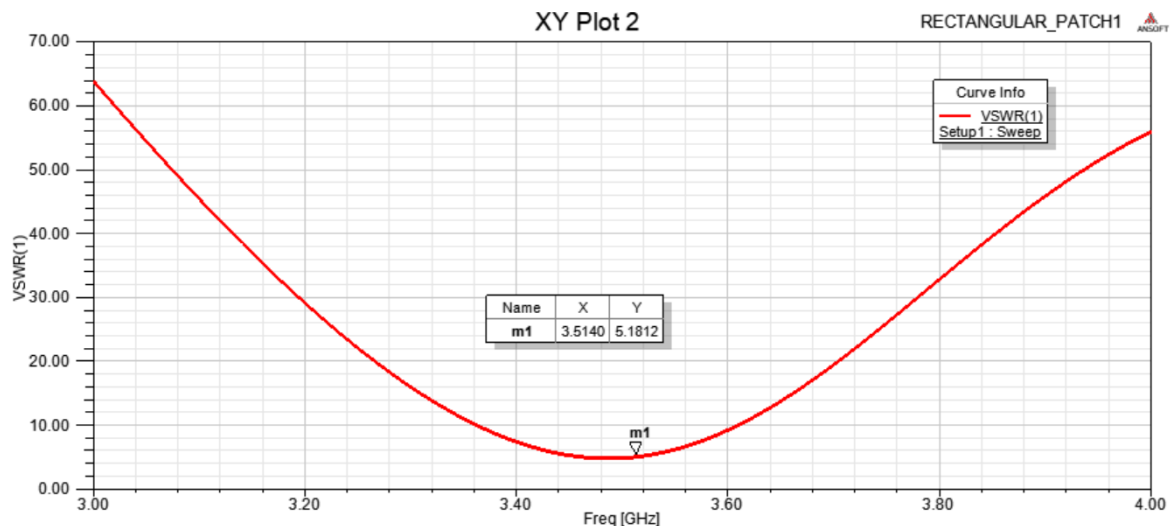


Figure III.7 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne Patch rectangulaire

Dans la figure III.8 représentent les diagrammes de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire dans les plans E et H à la fréquence de 3.5 GHz. On remarque que le rayonnement est principalement dirigé vers l'avant, ce qui montre le caractère directionnel de l'antenne.

Le diagramme du plan E présente un lobe principal plus prononcé avec une bonne concentration de l'énergie rayonnée, tandis que le diagramme du plan H montre une répartition du rayonnement plus large et relativement symétrique. Ces résultats indiquent que l'antenne possède un comportement de rayonnement stable.

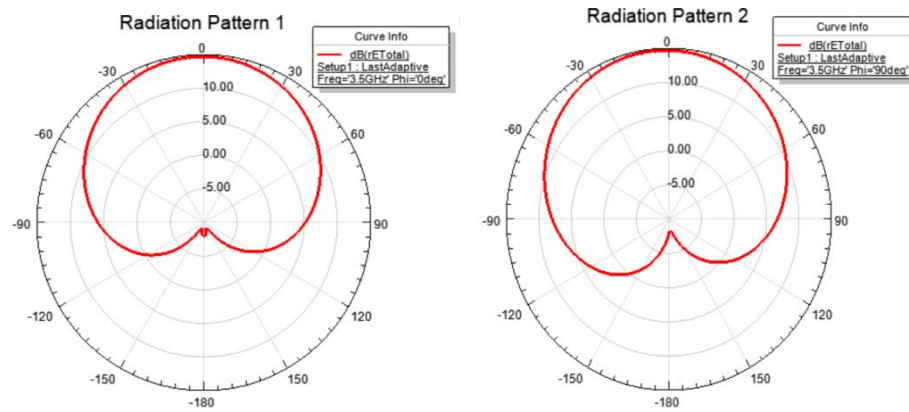


Figure III.8 : Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne Patch rectangulaire dans les plans E ($\Phi=0^\circ$), H ($\Phi=90^\circ$) dans la fréquence 3.5GHz

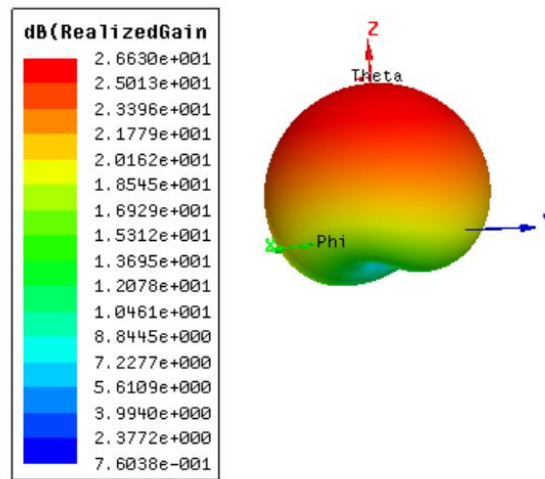


Figure III.9 : Diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne Patch rectangulaire dans la fréquence 3.5GHz

III. 3.2 Conception d'antennes patch rectangulaire avec encoches

Les résultats de simulation précédentes de l'antenne patch rectangulaire ont révélé une adaptation insuffisante au niveau de la fréquence de résonance. Pour remédier à cette limitation et améliorer le coefficient de réflexion S11, une encoche a été intégrée dans la structure de l'antenne. Cette technique a permis d'optimiser l'adaptation et d'obtenir de meilleures performances électromagnétiques.

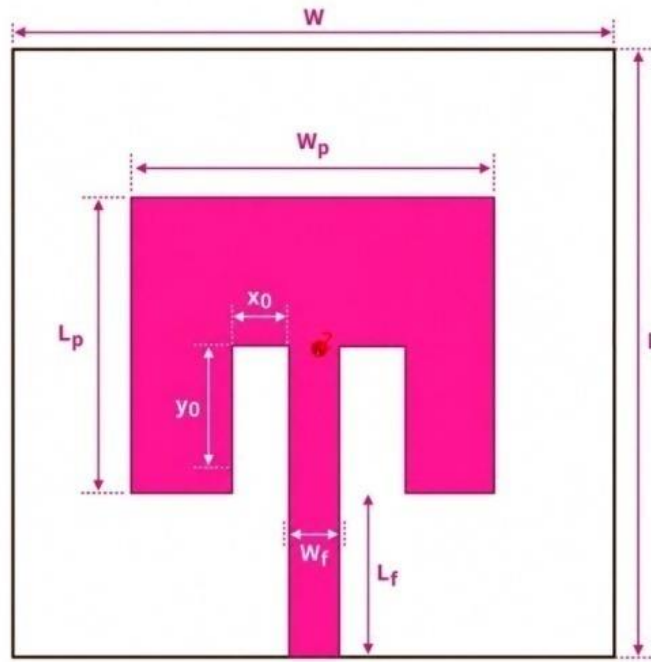


Figure III.10 : Représente la structure d'antenne Patch rectangulaire

III.3.2.1 Calcul des dimensions de l'encoche (Insetfeed)

Les dimensions géométriques de l'encoche (longueur et largeur) ont été obtenues à l'aide des relations de conception présentées ci-dessous :

$$X_0 \approx \frac{W}{3} \quad (\text{III.1})$$

$$Y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\frac{R_{in}(y=y_0)}{R_{in}(y=y_0)}} \quad (\text{III.2})$$

- X_0 : largeur de l'encoche
- Y_0 : longueur de l'encoche
- R_{in} : L'impédance d'entrée de l'élément rayonnant calculé par l'équation II.1.

Les paramètres géométriques de l'antenne sont regroupés dans le tableau paramétrique de l'antenne patch rectangulaire avec encoche.

Tableau III.2 : Paramètres géométriques de l'antenne patch rectangulaire avec encoche.

Paramètres	W	L	W_p	L_p	W_f	L_f	Y_0	X_0
Valeurs mm	35.7	29.5	26.1	19.9	3.05	15	11.8	3.05

La figure ci-dessous représente l'antenne Patch rectangulaire avec encoches sous le logiciel HFSS.

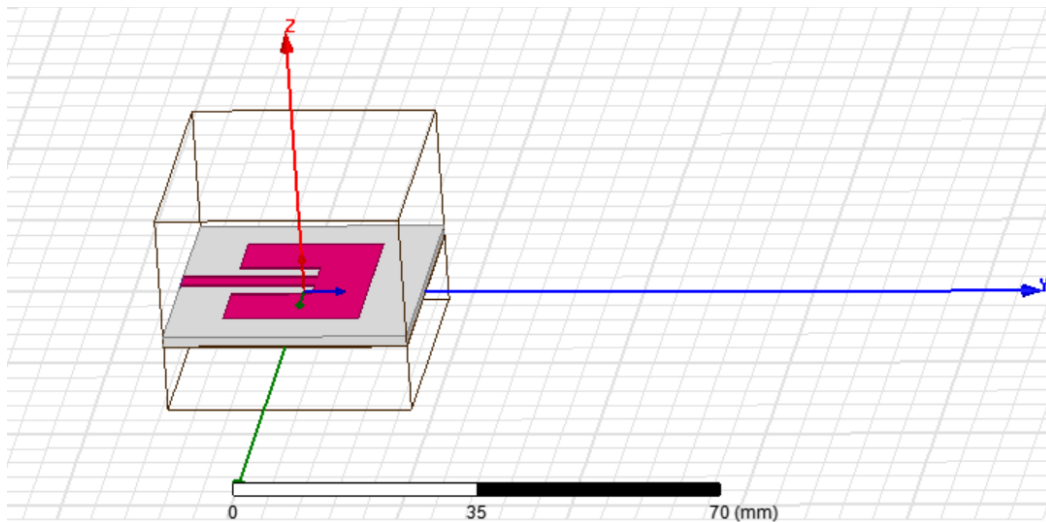


Figure III.11: Antenne Patch rectangulaire avec encoches sous HFSS.

Le résultat de simulation de coefficient de réflexion de l'antenne est représenté dans les figures III.12. Ces résultats montrent que l'antenne présente une bonne adaptation dans la bande [3.45, 3.55 GHz], avec un coefficient de réflexion inférieur à -10dB. Ainsi l'antenne présente une bande passante relative de 2.909 %. Un coefficient de réflexion minimal de -17.03 dB est obtenu à la fréquence de 3.5 GHz.

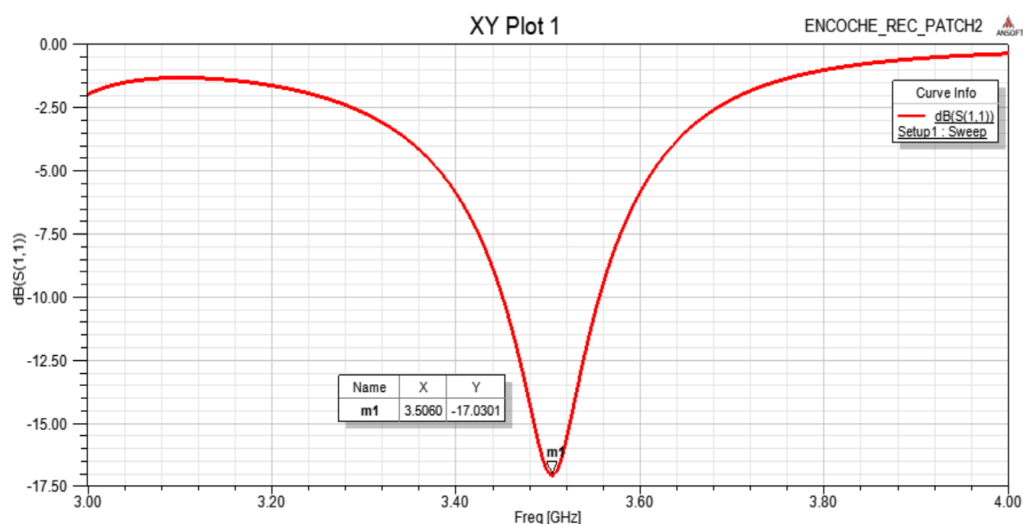


Figure III.12: Tracé du coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence 3.5GHz pour l'antenne avec encoches

La figure III.13 Représente le VSWR dans la gamme de fonctionnement de l'antenne étudiée. D'après la figure, on constate que le taux d'ondes stationnaires est inférieur à 2 avec une valeur de 1.32 à la fréquence de l'antenne étudiée 3.5GHz.

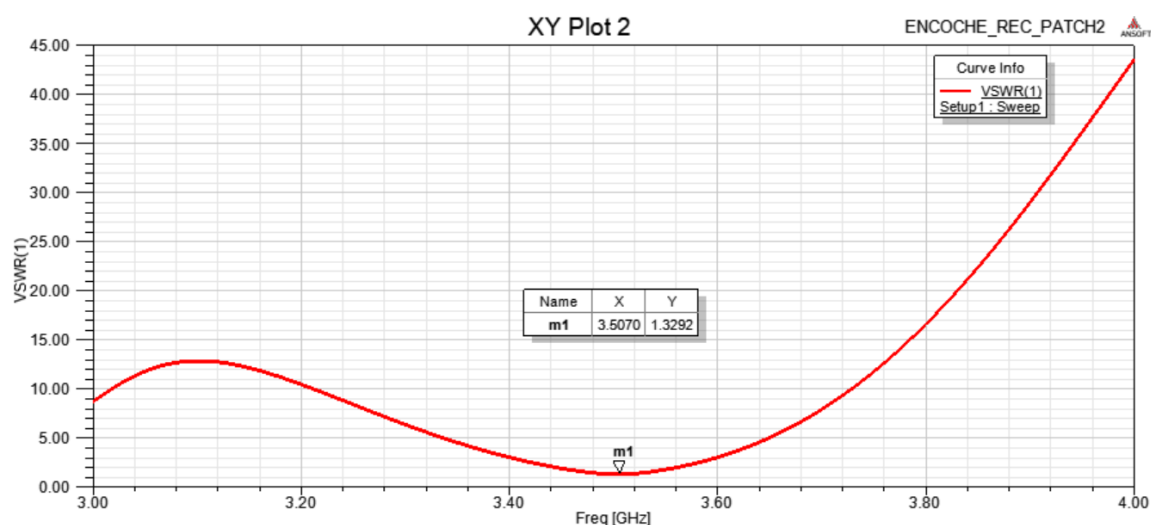


Figure III.13 : Taux d'onde stationnaire de l'antenne Patch rectangulaire avec encoche dans la fréquence 3.5GHz

Dans la figure III.14 représentent les diagrammes de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire avec encoche dans les plans E et H à la fréquence de 3.5 GHz

Les diagrammes de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire avec encoche à 3.5 GHz montrent un rayonnement principalement dirigé vers l'avant dans les plans E et H. Le lobe principal est bien défini et l'énergie rayonnée est concentrée dans la direction souhaitée. Ces résultats confirment une bonne directivité et un comportement stable de l'antenne

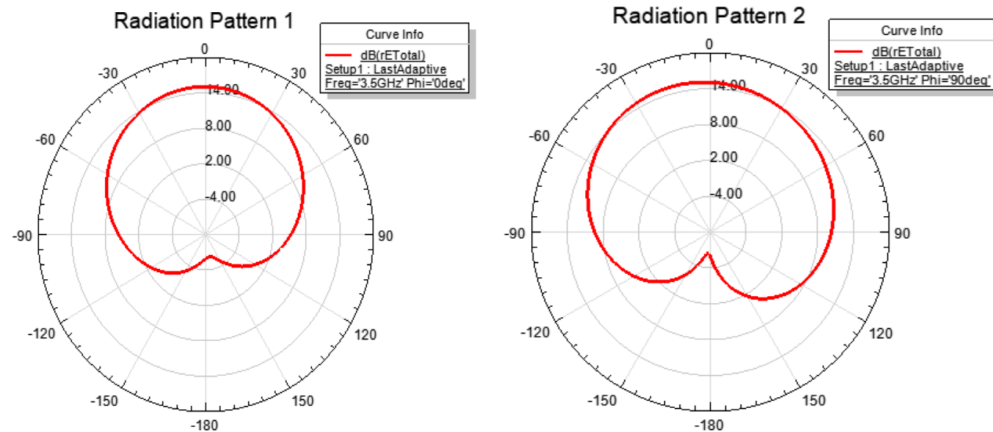


Figure III.14 : Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne Patch rectangulaire avec encoche dans les plans E ($\Phi=0^\circ$), H ($\Phi=90^\circ$) dans la fréquence 3.5GHz

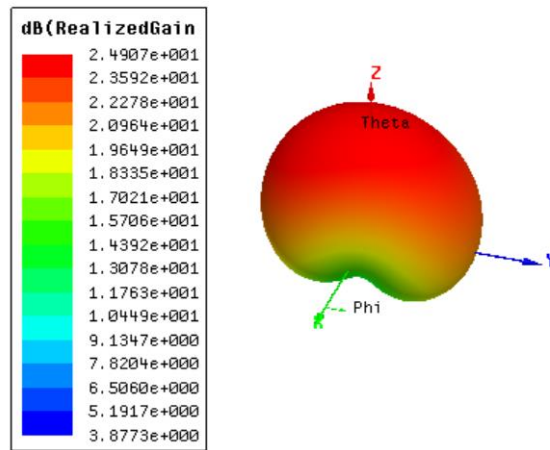


Figure III.15 : Diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne Patch rectangulaire avec encoche.

D'après les résultats obtenus, il apparaît que l'adaptation par encoche a permis d'améliorer les performances de l'antenne en réduisant le coefficient de réflexion à une valeur de $S_{11} = -17,03$ dB. Bien que ce résultat soit satisfaisant et confirme l'efficacité de cette technique d'adaptation, il reste perfectible pour les applications IoT-5G fonctionnant dans la bande de fréquence de 3,5 GHz. En effet, ces applications exigent des antennes présentant une excellente adaptation d'impédance, un faible niveau de réflexion et un gain suffisamment élevé afin d'assurer une transmission fiable des données, une meilleure couverture radio et une utilisation efficace de la puissance disponible.

Dans cette partie, une étape d'optimisation s'avère nécessaire afin de déterminer les dimensions géométriques les plus adaptées pour améliorer davantage les performances de l'antenne. Les méthodes conventionnelles d'optimisation basées sur des simulations répétitives sous HFSS permettent d'atteindre des résultats satisfaisants, mais elles nécessitent généralement un grand nombre d'itérations, ce qui augmente considérablement le temps de calcul et la charge de traitement. Afin de remédier à cette contrainte, une approche basée sur le Machine Learning a été adoptée dans ce travail. Cette méthode exploite les données générées par les simulations électromagnétiques pour apprendre la relation entre les paramètres géométriques de l'antenne et ses performances, notamment le coefficient de réflexion S_{11} et le gain. Le modèle développé sous Python permet ainsi de prédire rapidement les configurations optimales sans recourir systématiquement à de nouvelles simulations complètes sous HFSS. Cette approche contribue à accélérer le processus de conception, à réduire le coût de calcul et à obtenir une antenne mieux adaptée aux exigences des applications IoT-5G dans la bande des 3.5 GHz.

III.4 Optimisation de l'antenne par les techniques de Machine Learning

L'optimisation des antennes microruban constitue une étape essentielle dans le processus de conception des systèmes de communication modernes. Les performances électromagnétiques d'une antenne, notamment la fréquence de résonance, la bande passante, le gain, l'efficacité de rayonnement et le coefficient de réflexion (S_{11}), dépendent fortement des paramètres géométriques de la structure ainsi que des propriétés du substrat utilisé.

Les méthodes conventionnelles d'optimisation reposent généralement sur des études paramétriques ou des algorithmes numériques intégrés aux logiciels de simulation électromagnétique tels que HFSS. Bien que ces méthodes permettent d'obtenir des résultats précis, elles nécessitent souvent un grand nombre d'itérations de simulation, ce qui entraîne un coût computationnel élevé et des temps de calcul importants.

Afin de surmonter ces limitations, les techniques d'intelligence artificielle et de Machine Learning sont aujourd'hui largement utilisées dans le domaine des antennes. Ces approches permettent d'exploiter les données générées par simulation afin d'établir des modèles prédictifs capables d'accélérer la recherche des paramètres optimaux tout en réduisant le nombre de simulations nécessaires.

III.4.1 Présentation du Machine Learning

Le Machine Learning, ou apprentissage automatique, est une branche de l'intelligence artificielle qui permet aux systèmes informatiques d'apprendre à partir de données et d'améliorer leurs performances sans programmation explicite. Son principe consiste à construire un modèle mathématique capable d'identifier les relations entre les variables d'entrée et les résultats observés.

Dans le domaine des antennes microruban, le Machine Learning peut être utilisé pour prédire les performances électromagnétiques d'une antenne à partir de ses dimensions géométriques ou pour déterminer les paramètres de conception répondant à des spécifications prédéfinies.

L'utilisation du Machine Learning dans la conception des antennes présente plusieurs avantages :

- Réduction du temps de calcul.
- Diminution du nombre de simulations HFSS.
- Amélioration de la précision de l'optimisation.
- Exploration rapide de l'espace des paramètres.
- Automatisation du processus de conception.

III.4.2 Principaux algorithmes utilisés pour l'optimisation des antennes

Plusieurs algorithmes de Machine Learning peuvent être utilisés pour la modélisation et l'optimisation des antennes microruban.

III.4.2.1 Régression Linéaire (Linear Regression)

La régression linéaire est l'une des méthodes les plus simples de modélisation. Elle établit une relation mathématique entre les paramètres géométriques de l'antenne et ses performances électromagnétiques. Cette approche est particulièrement utile pour les problèmes présentant des relations approximativement linéaires.

III.4.2.2 Arbres de Décision (Decision Trees)

Les arbres de décision construisent un ensemble de règles permettant de prédire les performances de l'antenne à partir de ses dimensions. Ils offrent une interprétation simple des résultats et permettent d'identifier les paramètres les plus influents.

III.4.2.3 Forêts Aléatoires (Random Forest)

Les forêts aléatoires reposent sur plusieurs arbres de décision combinés afin d'améliorer la précision des prédictions. Cette méthode est robuste face au bruit et aux données complexes générées par les simulations électromagnétiques.

III.4.2.4 Réseaux de Neurones Artificiels (Artificial Neural Networks)

Les réseaux de neurones sont capables d'apprendre des relations non linéaires complexes entre les paramètres de conception et les performances de l'antenne. Ils sont largement utilisés dans le domaine de l'électromagnétisme pour la prédiction rapide des caractéristiques des antennes.

III.4.2.5 Machines à Vecteurs de Support (Support Vector Machines)

Les SVM sont utilisées pour la classification et la régression. Elles offrent généralement de bonnes performances pour les ensembles de données de taille moyenne et les problèmes présentant des relations non linéaires.

III.4.2.6 Optimisation Bayésienne (Bayesian Optimization)

L'optimisation bayésienne est une méthode d'optimisation avancée particulièrement adaptée aux problèmes où l'évaluation de la fonction objective est coûteuse en temps de calcul, comme les simulations HFSS.

Cette méthode construit un modèle probabiliste de la fonction objectif à partir des résultats précédemment obtenus. À chaque itération, le modèle estime les zones les plus prometteuses de l'espace de recherche et sélectionne les nouveaux paramètres à évaluer.

Les principaux avantages de l'optimisation bayésienne sont :

- Réduction significative du nombre de simulations HFSS.
- Recherche efficace du meilleur compromis entre exploration et exploitation.
- Adaptation aux problèmes multi-paramètres.
- Amélioration de la convergence vers la solution optimale.

Pour ces raisons, l'optimisation bayésienne est aujourd'hui considérée comme l'une des méthodes les plus performantes pour l'optimisation des antennes imprimées.

III.4.3 Utilisation de Python pour l'optimisation

Python est un langage de programmation largement utilisé dans les domaines scientifiques et de l'intelligence artificielle grâce à sa simplicité et à la richesse de ses bibliothèques.

Dans ce travail, Python est utilisé pour :

- Traiter les données issues des simulations HFSS.
- Construire les ensembles d'apprentissage.
- Entraîner les modèles de Machine Learning.
- Réaliser l'optimisation automatique des paramètres géométriques.
- Visualiser les résultats obtenus.

Les principales bibliothèques utilisées sont :

- **NumPy** pour le calcul numérique.
- **Pandas** pour la gestion des données.
- **Matplotlib** pour la visualisation graphique.
- **Scikit-learn** pour les algorithmes de Machine Learning.
- **Scikit-Optimize (skopt)** pour l'optimisation bayésienne.
- **PyAEDT** pour l'interaction avec HFSS.

L'association de Python et HFSS permet de mettre en œuvre une procédure automatisée d'optimisation capable de réduire considérablement le temps de conception de l'antenne.

III.4.4 Méthodologie proposée

La méthodologie adoptée dans cette étude est résumée par les étapes suivantes :

1. Conception initiale de l'antenne microruban (rectangulaire) sous HFSS.
2. Réalisation d'une étude paramétrique sur les dimensions principales.
3. Génération d'une base de données contenant les paramètres géométriques et les performances associées.
4. Importation et traitement des données sous Python.
5. Entraînement d'un modèle de Machine Learning.
6. Application de l'optimisation bayésienne pour rechercher les dimensions optimales.
7. Validation des résultats obtenus par de nouvelles simulations HFSS.
8. Comparaison entre la conception initiale et la conception optimisée.

Cette approche permet de combiner la précision des simulations électromagnétiques de HFSS avec la rapidité et l'efficacité des techniques modernes de Machine Learning afin d'obtenir une antenne micro-ruban optimisée pour les applications IoT et 5G.

III.4.4.1 Etude paramétrique

Après avoir validé le fonctionnement initial de notre antenne rectangulaire avec encoches, nous visons à optimiser ses performances électromagnétiques et géométriques. Pour ce faire, nous avons développé un script sous Python permettant d'automatiser et de piloter les simulations de l'étude paramétrique. L'objectif est d'explorer efficacement l'impact des variations des dimensions clés (L_p , W_p , X_0 , Y_0) afin d'identifier la configuration optimale.

La figure III.16 présente les résultats de simulation numérique du coefficient de réflexion S_{11} (dB) en fonction de la fréquence (GHz) obtenus suite à cette phase d'optimisation sous HFSS. Ces courbes permettent d'analyser l'impact direct de chaque paramètre sur la réponse fréquentielle de l'antenne afin de déterminer la combinaison idéale assurant la meilleure adaptation d'impédance.

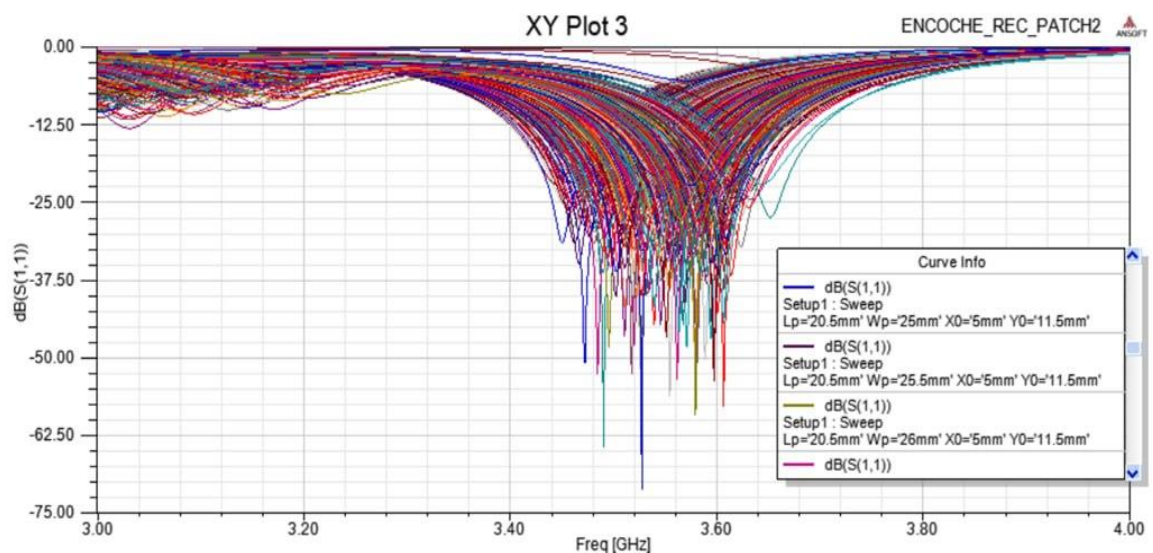


Figure III.16: Résultats du balayage paramétrique du paramètre S_{11} sous l'effet de la variation des dimensions

La Figure III.17 montre l'impact de la variation des mêmes paramètres géométriques sur le diagramme de rayonnement à 3.5 GHz. On constate qu'une valeur optimale de ce paramètre maximise le gain dans la direction principale ($\theta = 0^\circ$) et améliore la directivité de l'antenne.

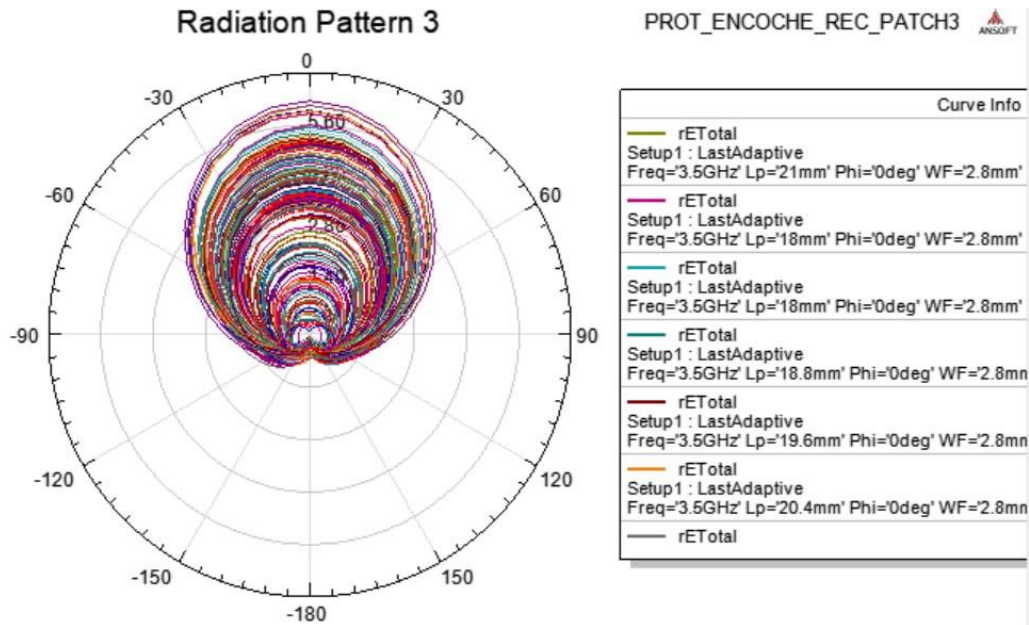


Figure III.17 : Diagramme de rayonnement bidimensionnel du champ total à 3.5 GHz pour différentes valeurs de paramètres géométriques.

Après avoir réalisé l'étude paramétrique de l'antenne à l'aide du module Optimetrics de HFSS, les résultats des différentes simulations ont été exportés sous forme de fichiers **CSV** (Comma-Separated Values) (Valeurs Séparées par des Virgules). Ces fichiers contiennent les différentes configurations géométriques de l'antenne ainsi que les performances électromagnétiques associées, notamment le coefficient de réflexion S11 et le gain. Ils constituent la base de données utilisée pour l'apprentissage et l'optimisation par Machine Learning sous Python.

Dans cette étape, le langage Python a été utilisé pour le traitement et l'analyse des données issues des simulations électromagnétiques. L'objectif est d'établir un modèle capable d'apprendre la relation entre les dimensions géométriques de l'antenne et ses performances électromagnétiques, puis de prédire

les configurations offrant les meilleures valeurs de S11 et de gain à la fréquence de 3,5 GHz. Cette approche permet d'accélérer le processus d'optimisation par rapport aux méthodes classiques basées sur des simulations successives sous HFSS, tout en réduisant le temps de calcul nécessaire à la recherche de la solution optimale pour les applications IoT-5G.

III.4.4.2 Méthodologie d'optimisation intelligente basée sur l'Apprentissage Automatique (Machine Learning sous Python)

L'organigramme de la figure III.18 présente les trois étapes principales du projet. D'abord, le **Stage 1** nettoie les données brutes d'HFSS pour créer le fichier **dataset_final.csv** contenant la fréquence de résonance (fr) et le Gain. Ensuite, le **Stage 2** utilise ces données pour entraîner le modèle Random Forest Regressor afin de prédire les performances de l'antenne, puis la sauvegarde dans **model.pkl**. Le fichier **.pkl** (extension de **Pickle**) est un fichier utilisé en Python pour sauvegarder un objet Python déjà entraîné, afin de pouvoir le réutiliser ultérieurement sans avoir à refaire tout le processus d'entraînement. Enfin, le **Stage 3** exploite ce modèle entraîné avec l'optimisation bayésienne (**gp_minimize**) pour calculer la fonction objectif, appliquer les pénalités nécessaires, et trouver les dimensions géométriques optimales appelées Best Design.

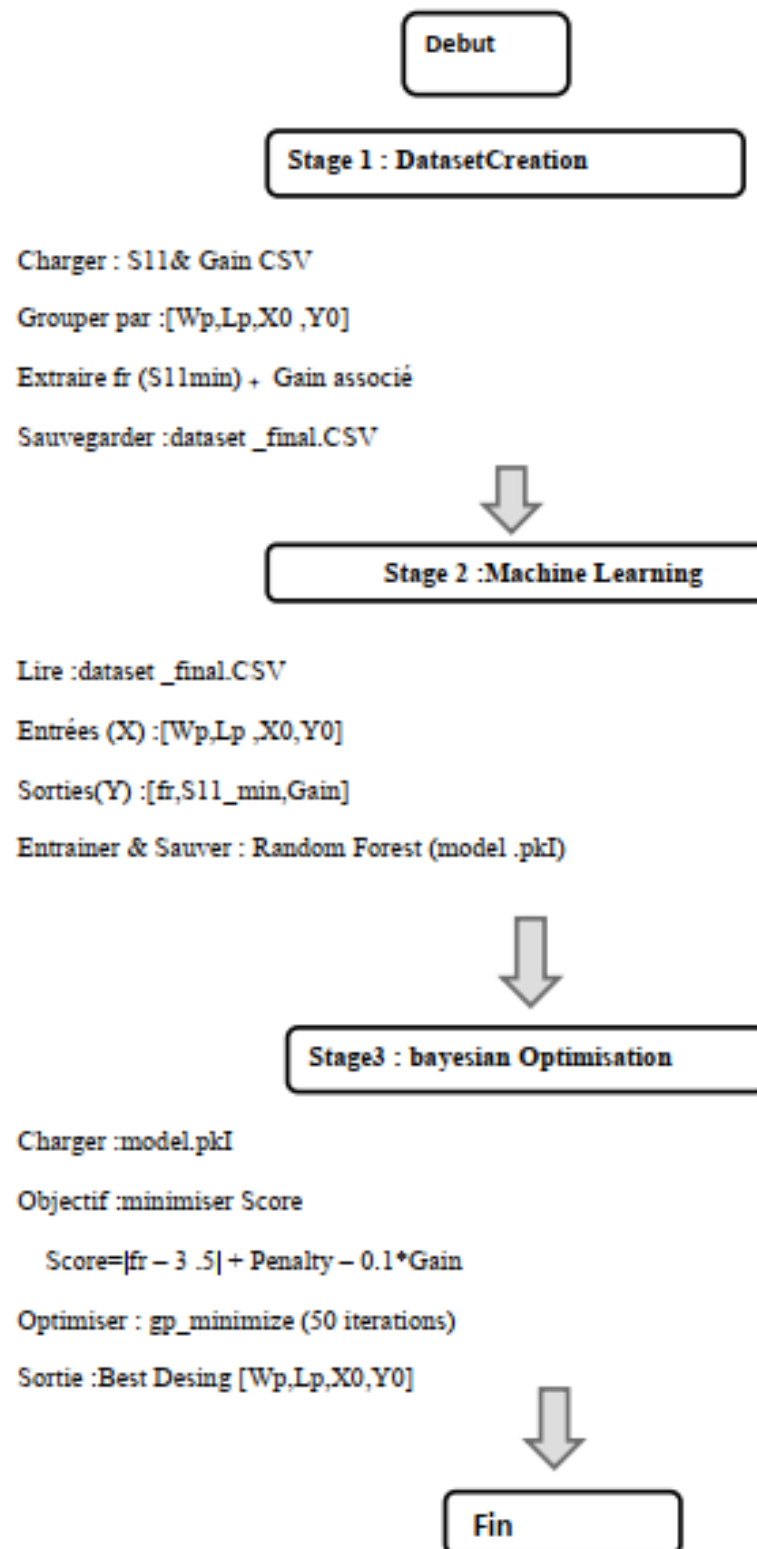


Figure III.18: Organigramme global du processus d'optimisation bayésienne (du Dataset au best Design)

Algorithme : Stage 1 :

Charge et nettoie les données brutes de S_{11} et Gain issues d'HFSS. Associe chaque géométrie à sa fréquence de résonance f_r et son Gain dans `dataset_final.csv`.

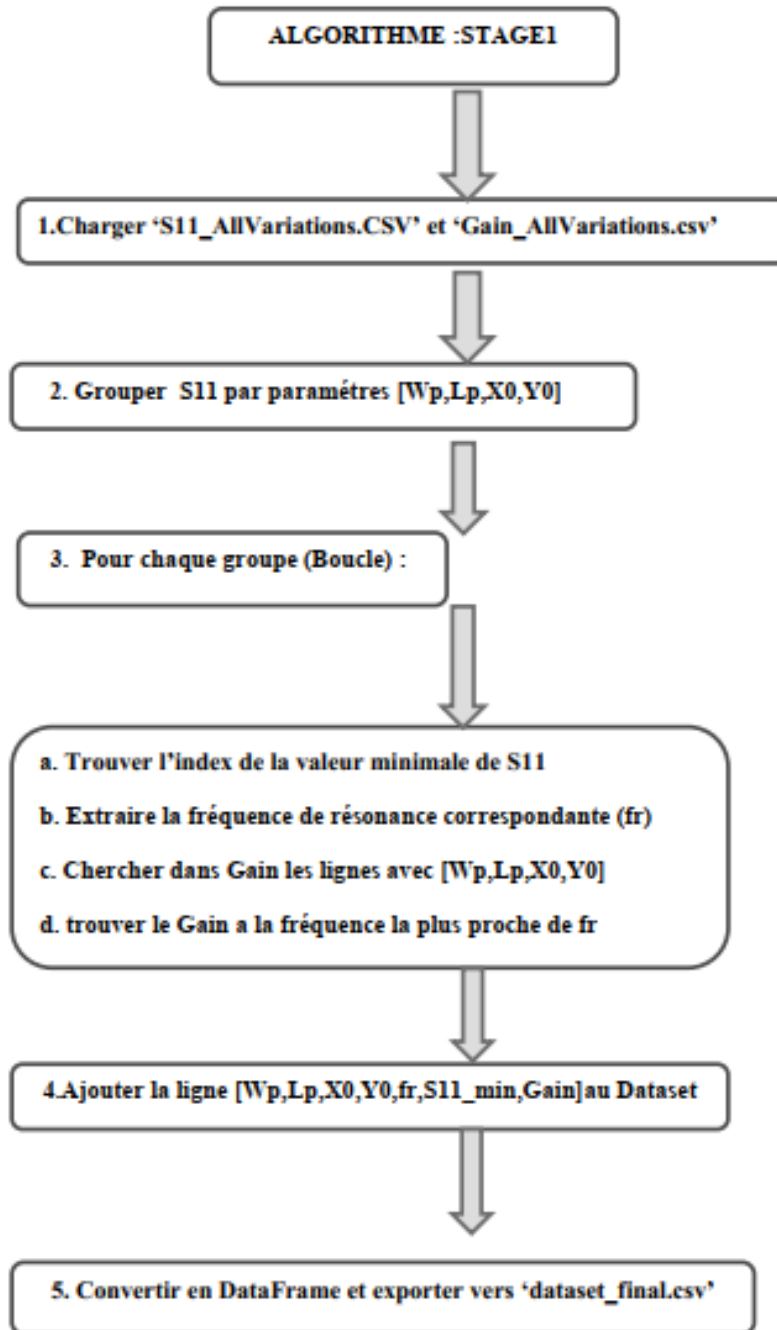


Figure III.19 : Algorithme détaillé de l'étape de création et de préparation du jeu de données (Dataset)

Algorithme : Stage 2 :

Divise les données en dimensions géométriques d'entrée (x) et performances de sortie (y). Entraîne le modèle Random Forest Regressor et le sauvegarde dans le fichier model.pkl.

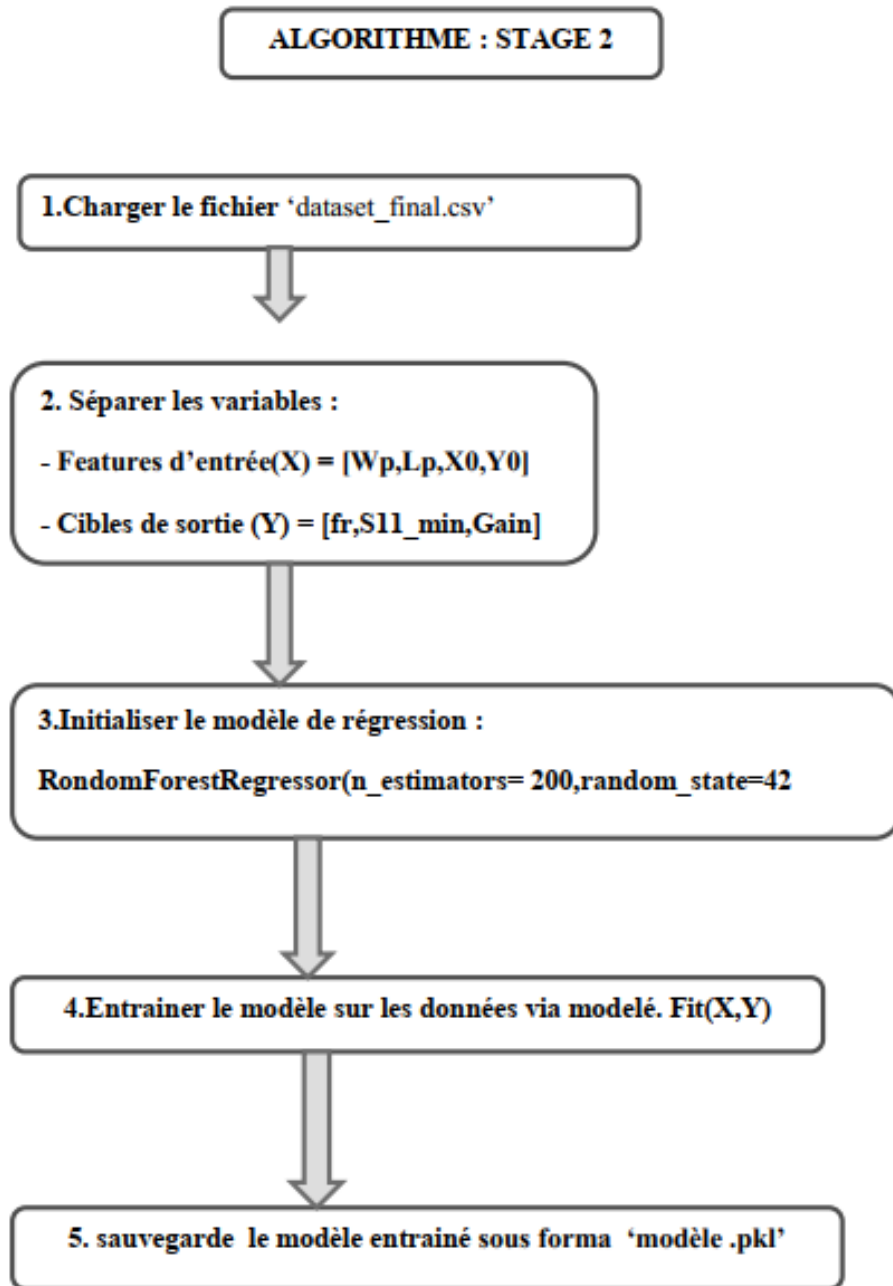


Figure III.20 : Processus d'apprentissage et d'entraînement du modèle random Forest Régresse.r

Algorithme : Stage 3

Évalue la fonction objectif pour minimiser l'erreur de fréquence autour de 3.5 GHz. Applique une pénalité si $S_{11} > -10$ dB et utilise gp_minimize pour trouver le design optimal.

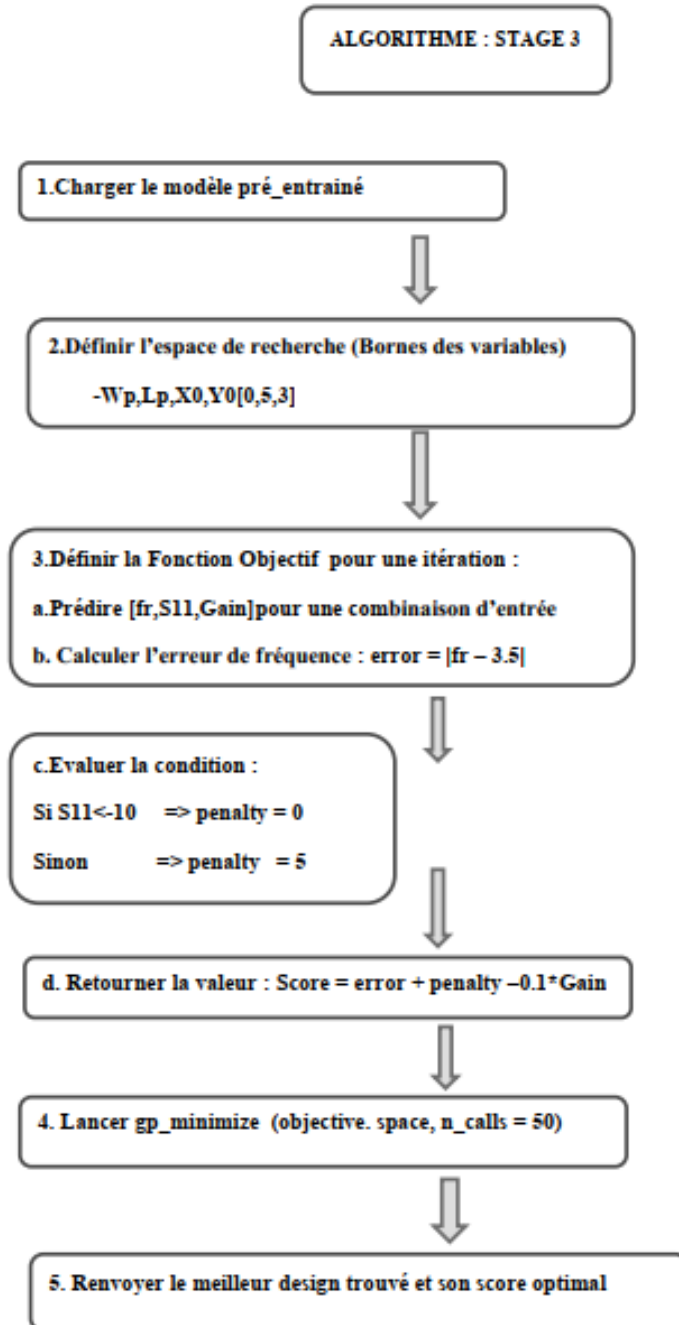


Figure III.21: Algorithme d'optimisation bayésienne basé sur la minimisation de la fonction objectif

Suite à la mise en œuvre et à l'exécution de notre code sous l'environnement Python, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau III.3 : Synthèse des dimensions optimales et des performances électromagnétiques associées

Paramètres	Valeurs (mm)	Paramètres	Valeurs (mm)
W	35.7	Wf	3.05
L	29.5	Lf	15
Wp	25.5	Y0	4.5
Lp	20.5	X0	12

III.4.4.3 Validation de résultat sous HFSS

Afin de valider les résultats de l'optimisation bayésienne, nous avons injecté les dimensions géométriques optimales fournies par Python dans le logiciel HFSS.

La simulation électromagnétique a permis d'obtenir la courbe du coefficient de réflexion S11 suivante :

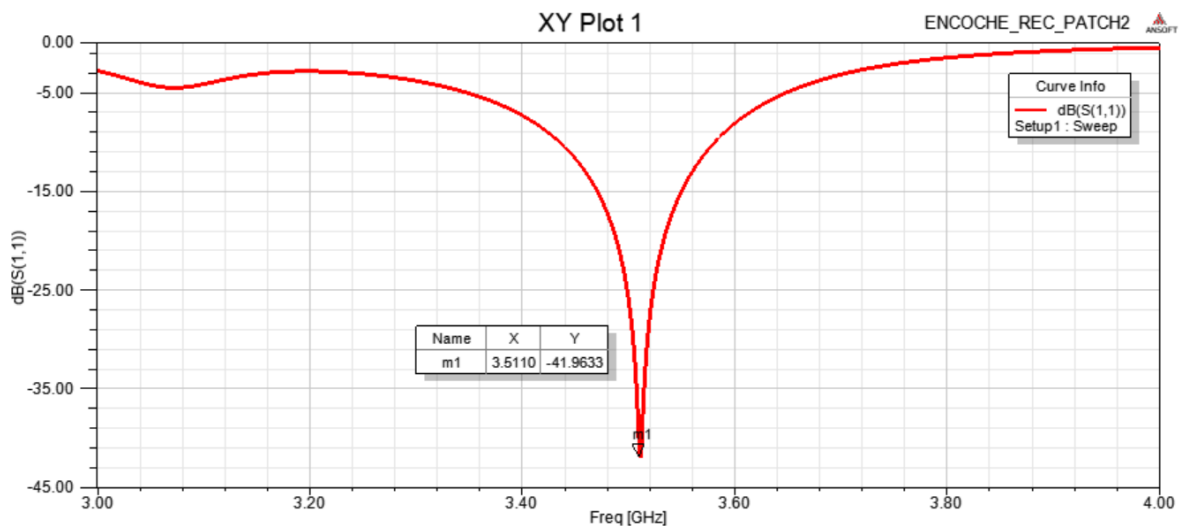


Figure III.22 : Courbe du coefficient de réflexion S11 obtenue sur HFSS avec les dimensions optimales

La figure représentant le coefficient de réflexion S_{11} après l'optimisation par Machine Learning montre une amélioration significative des performances de l'antenne microruban rectangulaire avec encoche. On observe que la fréquence de résonance est parfaitement centrée autour de **3,5 GHz**, correspondant à la bande ciblée pour les applications **IoT-5G**. La valeur minimale du coefficient de réflexion atteint **-41,96 dB**, ce qui traduit une excellente adaptation d'impédance entre la ligne d'alimentation et l'antenne. Cette valeur est largement inférieure au seuil de -10 dB généralement admis pour assurer un fonctionnement satisfaisant des antennes, indiquant ainsi que plus de 99 % de la puissance incidente est transférée vers l'antenne avec des pertes par réflexion très faibles.

En comparaison avec la structure initiale par encoche avant l'optimisation, dont la valeur de S_{11} était de **-17,03 dB**, l'approche basée sur le Machine Learning a permis d'améliorer considérablement l'adaptation de l'antenne. Cette amélioration confirme la capacité des techniques d'apprentissage automatique à identifier efficacement les dimensions optimales de la structure à partir des données générées par HFSS.

Par ailleurs, les résultats montrent également une augmentation de la bande passante relative à **4,01 %**, ce qui permet à l'antenne de fonctionner sur une plage de fréquences plus large autour de 3,5 GHz. Cette amélioration est particulièrement importante pour les applications IoT-5G, où la stabilité du fonctionnement, la fiabilité des communications et la résistance aux variations fréquentielles sont des critères essentiels.

Ces résultats démontrent que l'intégration du Machine Learning dans le processus de conception constitue une approche performante pour l'optimisation des antennes microruban. Elle permet non seulement d'améliorer les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne, notamment le coefficient de réflexion et la bande passante, mais aussi de réduire le nombre d'itérations de simulation nécessaires sous HFSS, ce qui contribue à diminuer le temps et le coût de conception.

En plus du paramètre S11, nous avons extrait le gain de l'antenne simulée sur HFSS afin de vérifier ses propriétés de rayonnement. Le résultat de la simulation électromagnétique pour le gain est présenté ci-dessous :

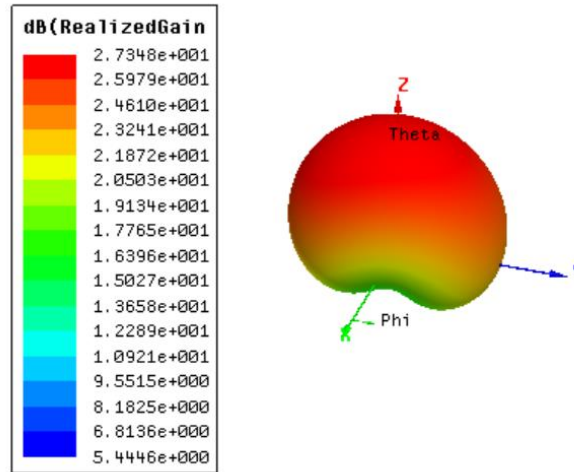


Figure III.23 : Diagramme de rayonnement 3D représentant le gain de l'antenne optimisée

La figure représentant le gain de l'antenne montre une amélioration notable des performances de rayonnement après l'application de la méthode d'optimisation basée sur le Machine Learning. En effet, le gain maximal est passé de **2,49 dBi** avant optimisation à **2,73 dBi** après optimisation à la fréquence de **3,5 GHz**, soit une augmentation d'environ **9,6 %**.

Cette amélioration indique que l'antenne optimisée est capable de rayonner l'énergie électromagnétique de manière plus efficace dans la direction principale de rayonnement. L'augmentation du gain est directement liée à une meilleure adaptation des paramètres géométriques de l'antenne obtenue grâce au modèle de Machine Learning, qui a permis d'identifier une configuration plus performante que celle obtenue par les méthodes classiques de conception.

Bien que l'amélioration du gain soit relativement modérée comparativement à celle observée pour le coefficient de réflexion S11, elle reste significative pour les applications **IoT-5G à 3.5 GHz**, où l'optimisation simultanée de l'adaptation

d'impédance et du rayonnement contribue à améliorer la qualité de transmission, la portée de communication et la fiabilité du lien radio.

Les résultats obtenus confirment ainsi l'efficacité de l'approche proposée, combinant les simulations électromagnétiques sous HFSS et les techniques de Machine Learning développées sous Python, pour améliorer les performances globales de l'antenne microruban rectangulaire avec encoche destinée aux applications IoT-5G.

III.5 Conception d'antenne microruban proposé inspirée de la forme feuille de plante pour des applications IoT dans la bande 5G

III.5.1 Antenne patch en forme feuille sans fentes

L'antenne patch conçue dans cette partie de notre travail est une antenne microruban de forme feuille fonctionnant à la fréquence de 3.5 GHz. Elle est réalisée sur un substrat de type FR4 caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 4.4$, une tangente de pertes $\tan \delta = 0.02$ et une épaisseur $h = 1.6\text{mm}$. Le patch feuille est imprimé sur la face supérieure du substrat, tandis que le plan de masse est placé sur la face inférieure. L'alimentation de l'antenne est assurée par une ligne microruban adaptée afin de garantir un bon transfert de puissance et de minimiser les pertes par réflexion. La géométrie de l'antenne est présentée à la figure III.24.

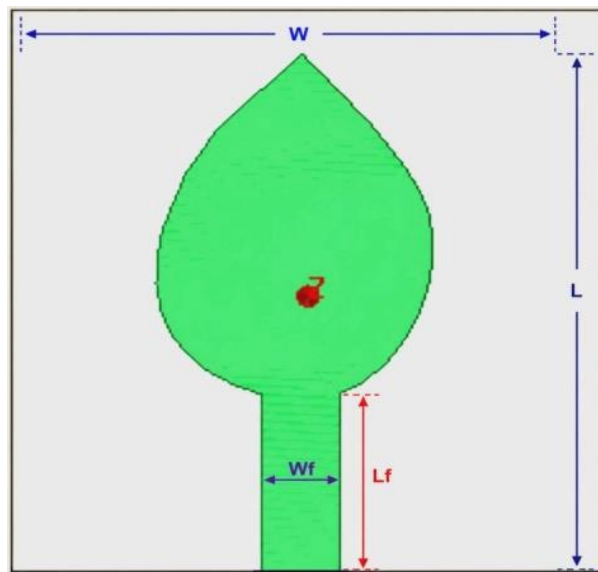


Figure III.24 : La structure de l'antenne microruban proposée en forme feuille.

Les paramètres géométrique de l'antenne en forme feuille sont regroupé dans le tableau paramétrique suivant :

Tableau III.4 : Paramètres géométrique de l'antenne patch en forme feuille

Paramétré	W	L	W _f	L _f
Valeur (mm)	36.4	38.2	4.8	20

La figure ci-dessous représente l'antenne patch en forme feuille sous le logiciel HFSS.

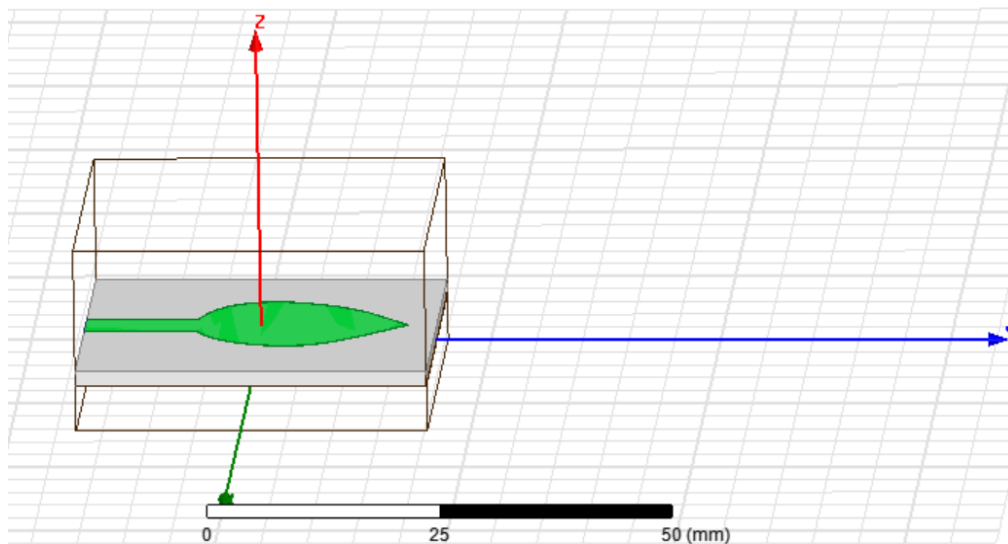


Figure III.25 : l'antenne patch en forme feuille sous le logiciel HFSS

Les résultats de S_{11} obtenus montrent que l'antenne résonne à 3.491 GHz avec une valeur de $S_{11} = -30.48$ dB, ce qui témoigne d'une excellente adaptation d'impédance et d'un très bon transfert de puissance.

Cette performance confirme la validité de la géométrie proposée et son aptitude à fonctionner efficacement autour de la fréquence visée.

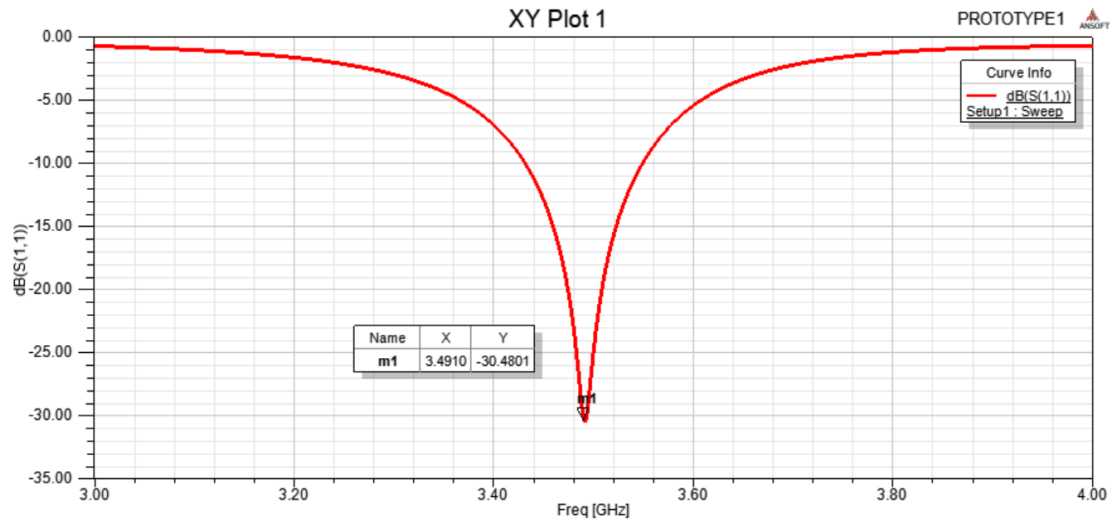


Figure III.26 : Tracé de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence 3.5 GHz de l'antenne en forme feuille sans encoches.

Les résultats de la figure suivante montrent que l'antenne présente un VSWR minimal de 1.1479 à 3.502 GHz, ce qui confirme une excellente adaptation d'impédance et valide les performances de conception de l'antenne.

Cette valeur est largement inférieure à la limite généralement admise de 2, garantissant ainsi un fonctionnement efficace dans la bande de fréquence considérée

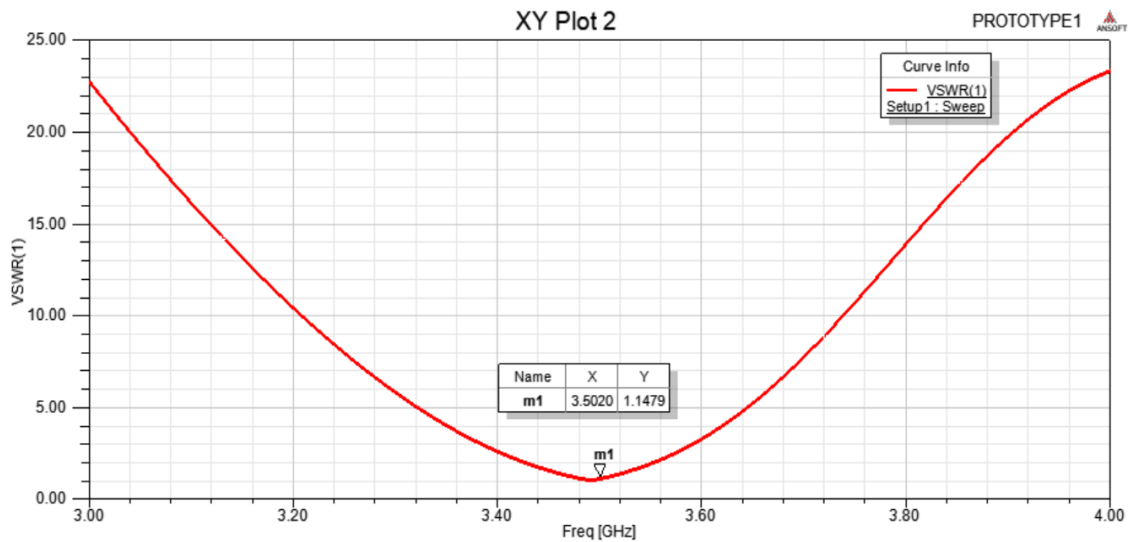


Figure III.27: Taux d'onde stationnaire de l'antenne patch en forme feuille sans encoches.

Dans la figure III.28 nous avons présenté le diagramme de rayonnement à 3.5 GHz montrant que l'antenne possède un rayonnement stable et bien dirigé. Ces résultats confirment ses bonnes performances.

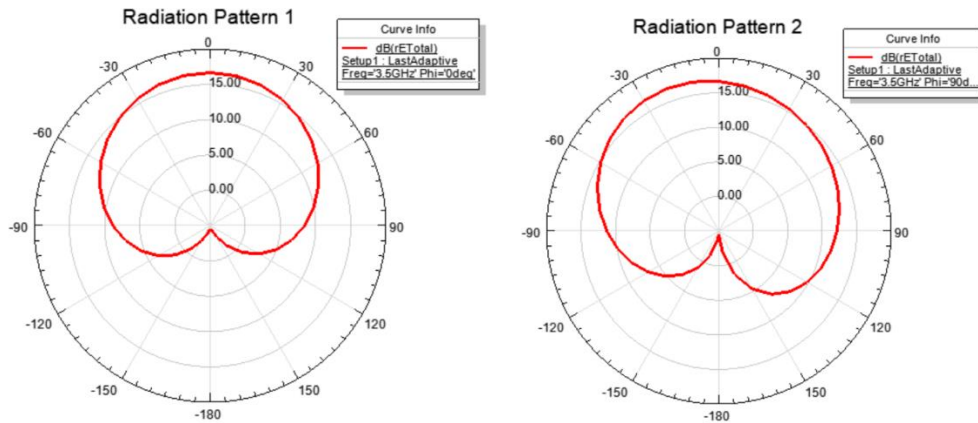


Figure III.28 : Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne feuille sans encoches dans les plans E ($\Phi=0^\circ$), H ($\Phi=90^\circ$) dans la fréquence 3.5GHz.

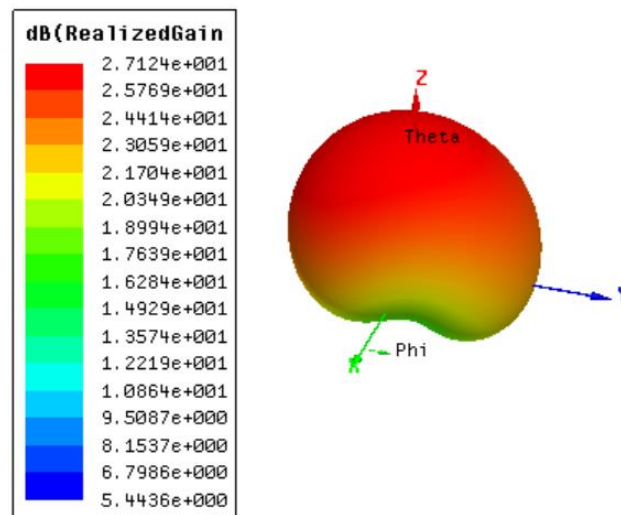


Figure III.29 : Diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne de l'antenne en forme feuille sans encoches.

III.5.2 Antenne patch en forme feuille avec des fentes

À l'issue des trois étapes d'adaptation et d'optimisation, la configuration finale de l'antenne proposée a été obtenue. La géométrie retenue est illustrée ci-après. Les étapes de conception, de simulation et d'évaluation des performances seront présentées dans les sections suivantes.

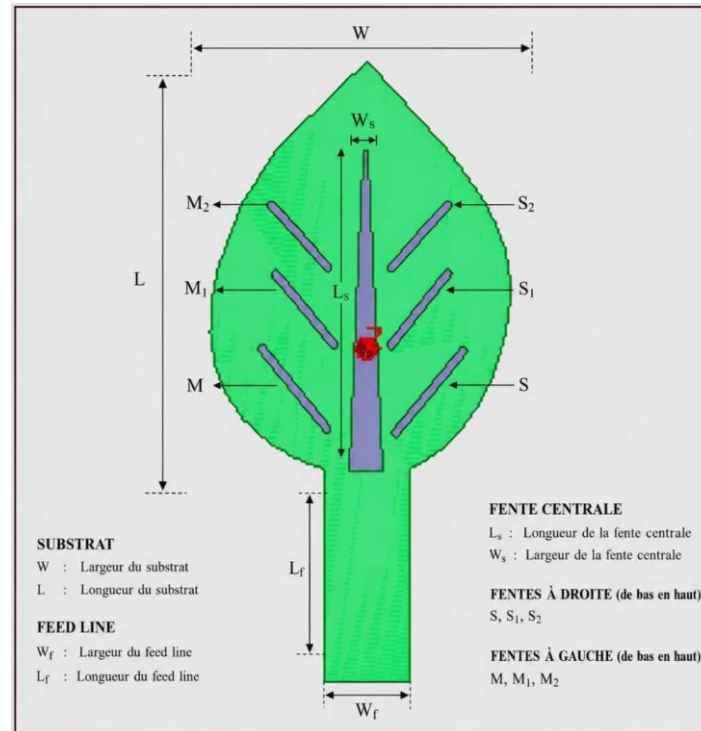


Figure III.30 : Structure l'antenne proposée adapté avec stub.

Les paramètres géométriques de l'antenne en forme de feuille:

Tableau III.5 : Le paramètre géométrique de l'antenne en forme feuille avec encoches.

Valeurs	mm	Valeurs	mm
W	36.4	W_{s1}	0.48
L	38.2	W_{s2}	0.2
W_f	4.8	L_{s2}	4.8
L_f	20	M_2	1.2
W_s	0.5	S_2	3.4
L_s	5.8	M_1	1.2
M	1.42	S_1	-0.3
S	-5.2	L_s	6.8

La figure ci-dessous représente l'antenne notre antenne feuille sous le logiciel HFSS.

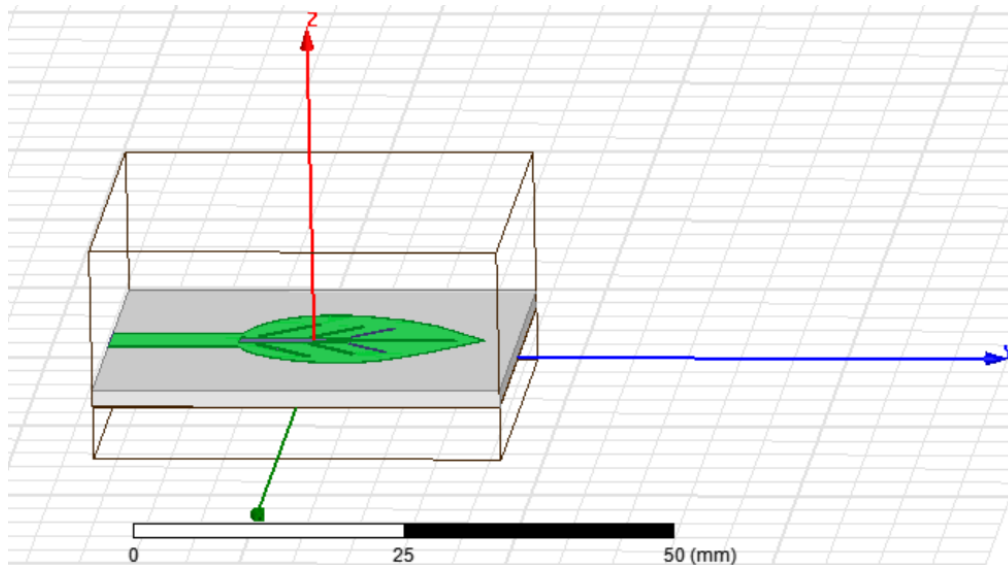


Figure III .31 : Trace de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence 3.5 GHz de l'antenne patch en forme feuille

Après la simulation de cette antenne avec le logiciel HFSS, nous avons obtenu le résultat sur le coefficient de réflexion S11. La figure ci-dessous représente le tracé du coefficient de réflexion S11.

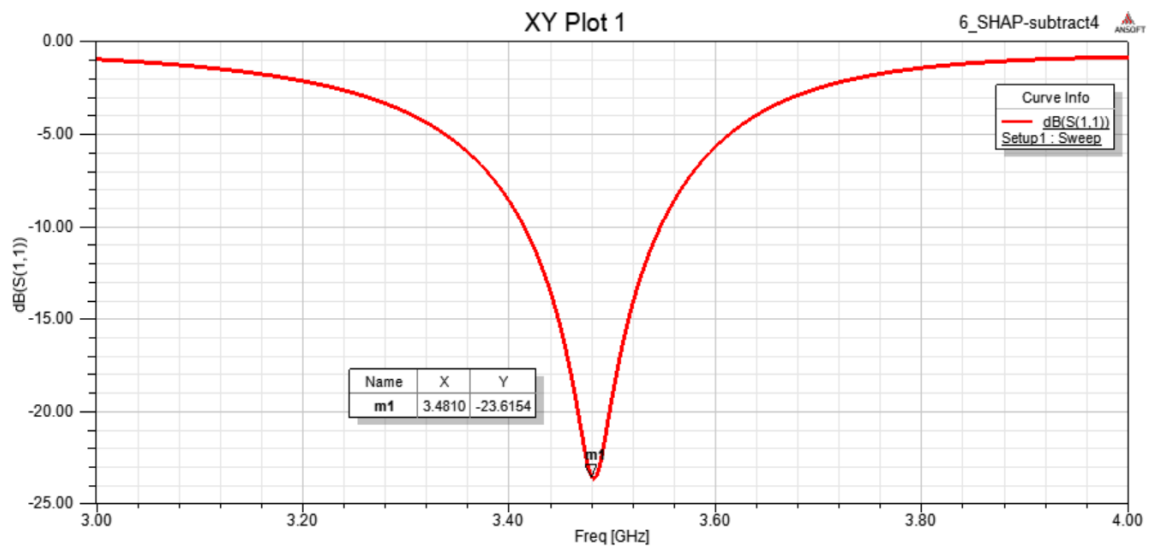


Figure III.32: Tracé de coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence 3.5 GHz de l'antenne feuille avec encoches.

La figure ci-dessous représente taux d'onde stationnaire.

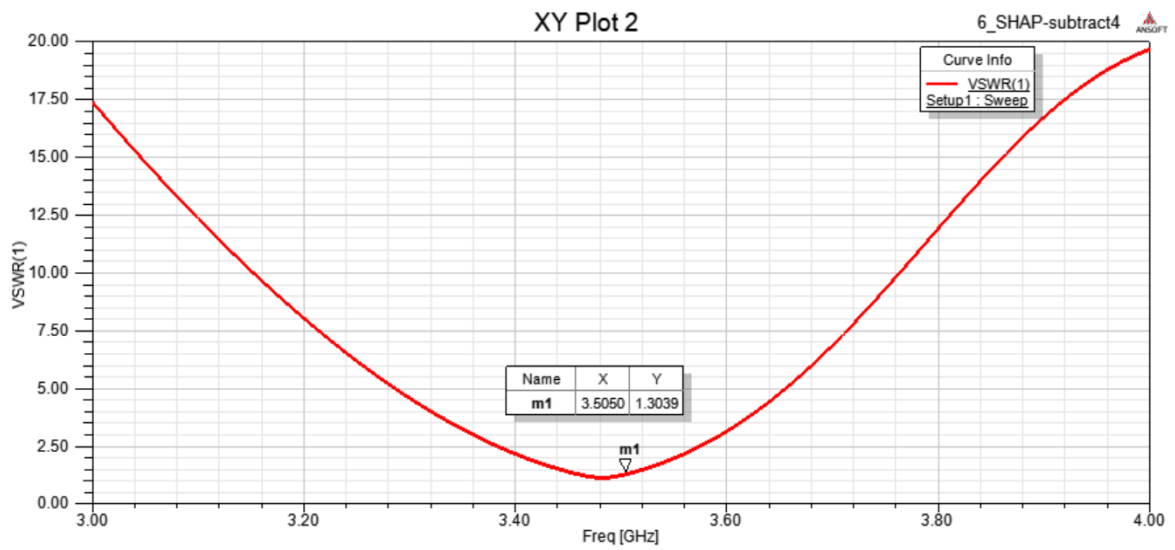


Figure III.33: Taux d'onde stationnaire de l'antenne feuille avec encoches

Figure III. 34 représente les diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne microruban en forme de feuille.

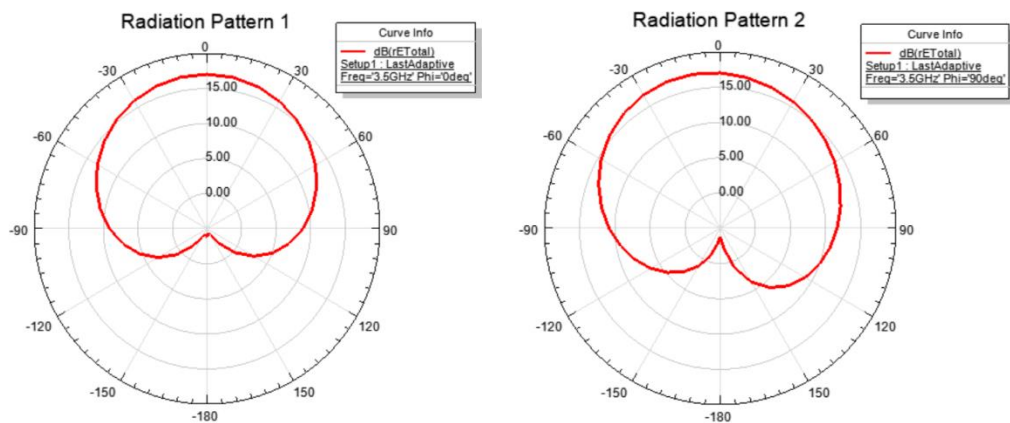


Figure III.34: Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne microruban en forme de feuille avec encoches dans les plans E ($\Phi=0^\circ$), H ($\Phi=90^\circ$) dans la fréquence 3.5GHz

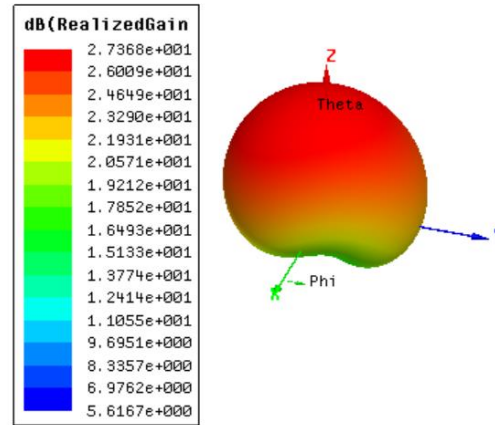


Figure III.35: Diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne microruban en forme de feuille avec encoches

Afin d'évaluer l'influence des fentes sur les performances de l'antenne en forme de feuille, une comparaison a été réalisée entre la structure initiale sans fentes et la structure modifiée comportant des fentes. Les résultats de simulation montrent que l'ajout des fentes a permis d'améliorer les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne. En effet, la structure avec fentes présente un gain plus élevé ainsi qu'une bande passante plus large que la structure sans fentes.

Cette amélioration s'explique par le fait que les fentes modifient la distribution des courants de surface sur le patch, augmentant ainsi la longueur électrique du trajet du courant et favorisant un meilleur rayonnement de l'énergie électromagnétique. De plus, les fentes introduisent des résonances supplémentaires ou améliorent le couplage électromagnétique, ce qui contribue à l'élargissement de la bande passante.

Par conséquent, la structure en forme de feuille avec fentes offre de meilleures performances en termes de rayonnement et de couverture fréquentielle, ce qui la rend plus adaptée aux applications IoT-5G à 3.5 GHz, où une bande passante suffisante et un gain élevé sont des critères importants pour garantir des communications fiables et efficaces.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la conception, la simulation et l'optimisation d'antennes microruban destinées aux applications IoT–5G à la fréquence de 3,5 GHz. Dans un premier temps, une antenne microruban rectangulaire alimentée par ligne microruban avec encoche d'adaptation a été conçue et simulée sous Ansys HFSS. Les résultats obtenus ont montré un fonctionnement satisfaisant à la fréquence visée, tout en mettant en évidence la nécessité d'une amélioration supplémentaire des performances, notamment en termes d'adaptation d'impédance et de gain.

Afin d'améliorer ces caractéristiques, une approche d'optimisation basée sur le Machine Learning a été mise en œuvre sous Python. Les données générées à l'aide de l'outil Optimetrics de HFSS ont été exploitées pour entraîner un modèle capable de prédire les performances de l'antenne en fonction de ses paramètres géométriques. Cette méthode a permis d'identifier rapidement une configuration optimisée, conduisant à une amélioration significative du coefficient de réflexion, dont la valeur est passée à $-41,96$ dB à 3.5 GHz, ainsi qu'à un élargissement de la bande passante atteignant 4,01 %. Le gain a également été amélioré, passant de 2,49 dBi à 2,73 dBi, confirmant l'efficacité de l'approche proposée.

Dans un second temps, une nouvelle structure d'antenne microruban inspirée de la forme d'une feuille de plante a été conçue et étudiée. Les résultats de simulation ont montré que cette géométrie proposée présente également des performances intéressantes à la fréquence de 3.5 GHz, démontrant ainsi le potentiel des formes innovantes dans la conception d'antennes compactes et performantes.

L'ensemble des résultats obtenus confirme que l'association des outils de simulation électromagnétique et des techniques de Machine Learning constitue une approche efficace pour la conception et l'optimisation des antennes microruban. Cette démarche permet non seulement d'améliorer les performances électromagnétiques des structures étudiées, mais également de réduire le temps et le coût liés aux procédures d'optimisation conventionnelles, ce qui en fait une solution

prometteuse pour le développement des antennes destinées aux futures applications IoT et 5G.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -CHAPITRE III-

- [III.1] **Daouia Belguellaoul**, « Analyse et conception des antennes microrubans alimentées par guide d'onde coplanaire », Mémoire de Master en systèmes de télécommunications numériques, Université Mohamed Boudiaf – m'sila, Juin 2016.
- [III.2] **C. Huang, B. Jeng, J , SenKuo** « Grating Monopole Antenna for DVB-T Applications », IEEE Transactions on antenna sand propagation ,vol. 56, NO. 6, 06/2008.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, nous avons étudié la conception et l'optimisation d'antennes microruban destinées aux applications de l'Internet des Objets (IoT) fonctionnant dans la bande de fréquence 3,5 GHz utilisée par les réseaux 5G.

L'objectif principal était de développer des structures compactes et performantes capables de répondre aux exigences croissantes des systèmes de communication sans fil modernes.

Dans un premier temps, nous avons présenté les concepts fondamentaux de l'Internet des Objets, ses architectures, ses technologies de communication ainsi que les principaux domaines d'application. Cette étude a permis de mettre en évidence le rôle essentiel des antennes dans les systèmes IoT et l'importance de la bande 3,5 GHz pour des applications 5G.

Ensuite, nous avons abordé les généralités relatives aux antennes microruban, en détaillant leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques électromagnétiques, leurs techniques d'alimentation ainsi que leurs avantages et leurs limitations. Cette analyse a montré que les antennes microruban constituent une solution particulièrement adaptée aux dispositifs IoT grâce à leur faible coût, leur légèreté et leur facilité d'intégration.

La partie pratique de ce mémoire a été consacrée à la conception et à la simulation de deux structures d'antennes microruban sous Ansys HFSS. Une première antenne rectangulaire avec encoche a été conçue puis optimisée à l'aide de techniques de Machine Learning implémentées sous Python afin d'améliorer le coefficient de réflexion (S11) et le gain. Cette approche a permis d'exploiter les données issues des simulations électromagnétiques pour prédire et sélectionner les paramètres géométriques optimaux de l'antenne. Par ailleurs, une nouvelle structure micro inspirée de la forme d'une feuille de plante a été proposée et étudiée afin d'explorer des géométries innovantes adaptées aux applications IoT.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation conjointe de la simulation électromagnétique sous HFSS et des techniques de Machine Learning sous Python constitue une approche efficace pour l'optimisation des antennes microruban. L'optimisation par Machine Learning a permis d'améliorer les performances de l'antenne rectangulaire tout en réduisant le temps nécessaire à la recherche des paramètres optimaux. De plus, la structure proposée inspirée d'une feuille de plante a présenté des caractéristiques prometteuses pour les applications IoT fonctionnant à 3,5 GHz.

Enfin, ce travail ouvre plusieurs perspectives de recherche. Il serait intéressant d'étendre l'utilisation des techniques de Machine Learning à l'optimisation de structures plus complexes, notamment l'antenne proposée, ainsi que d'étudier des configurations multi-bandes, MIMO ou reconfigurables adaptées aux futures générations de réseaux sans fil et aux applications IoT avancées et aux systèmes de communication 6G.