

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université 8 Mai 1945 – Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electronique et Télécommunications



Mémoire de Fin d'Etude

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Conception et adaptation d'antennes fractales pour des Tags
RFID UHF

Présenté par :

Amirouche Safa & Guerfa Basma

Sous la direction de :

Dr. MAHRI Omar

Année Universitaire : 2024-2025

Remerciement

*Tout d'abord, nous adressons nos louanges et notre gratitude à **ALLAH**, Le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé, la patience, la volonté et la force nécessaires à l'aboutissement de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à **Monsieur Mahri.Omar .**, notre encadrant, pour avoir accepté de diriger ce travail. Sa disponibilité, sa patience, ses conseils précieux ainsi que le partage généreux de ses connaissances et de son expérience ont été d'une aide inestimable tout au long de ce projet.*

*Nous remercions sincèrement les **membres du jury** pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail, ainsi que pour le temps qu'ils ont bien voulu lui consacrer.*

*Nos remerciements s'adressent également à **l'ensemble du corps professoral du Département d'Électronique et Télécommunications de l'Université 8 Mai 1945 – Guelma**, et plus particulièrement à la **Faculté des Sciences et de la Technologie**, pour la qualité de l'enseignement dispensé durant nos années de formation. Leur engagement, leur passion pour la recherche et leur rigueur académique nous ont grandement inspirés.*

Nous exprimons aussi notre gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont aidés, guidés ou soutenus durant la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes celles et ceux qui ont contribué, de quelque manière que ce soit, à l'aboutissement de ce travail.





Dédicace

Si je devais dédier ce travail aux personnes qui m'ont soutenue dans les pires moments,

*vous seriez les premiers à apparaître sur ma page : **mes chers parents.***

À vous, la source de mes efforts, ceux qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager tout au long de mes années d'études.

À toi, maman, toujours présente à mes côtés, prête à me consoler quand il le fallait... Tous les mots du monde ne suffiraient pas pour te remercier.

À toi, papa, l'homme de ma vie, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir... Rien que pour toi, avec tout mon amour.

*À mes frères, ceux qui tiennent une place si spéciale dans mon cœur :
En premier, **Mohamed**, mon grand frère, loin des yeux mais si proche du cœur.*

*À **Hakim** et à sa famille, pour leur présence constante et leur bienveillance.*

À mes sœurs chéries :

***Hanine**, toujours là avec douceur et écoute,*

***Maroua**, ma jumelle, mon autre moi, ma confidente*

Sans oublier mes amies, ainsi que toutes les personnes chères à mon cœur,

qui ont su être présentes aussi bien dans les moments de joie que dans les épreuves..

*À mes collègues du **Master 2 Télécommunication – Promo 2024-2025**,
merci pour les souvenirs, l'entraide et les moments partagés.*

Merci à vous tous d'être toujours là pour moi.





Dédicace

Avant tout je dis el hAmdoullAh qui m'A Aidé à terminer ce travail. Je dédie ce modeste travail à tous les gens que je connais et à tous ceux qui me sont très chers:

À mes chers parents,

Pour leur amour immense, leur soutien constant, leur patience et leurs encouragements depuis le début de mes études. Votre présence à mes côtés a été ma force et ma source d'inspiration.

toi, maman, toujours présente, prête à m'écouter et à me reconforter quand j'en avais besoin... Aucun mot ne suffirait pour te dire ma gratitude.

À toi, papa, l'homme qui a tout donné pour que je puisse avancer et m'accomplir... Ce travail, je te le dédie avec tout mon amour.

Merci de croire en moi, même dans les moments les plus difficiles.

À mes frères :

Seifeddine ,takjeddine , abderaouf. pour m'avoir toujours soutenu, partagé mes joies et mes défis, et célébré cette réussite avec moi.

Sachez que ce travail est aussi le vôtre.

À mon mari,

pour ta présence rassurante, ton écoute attentive et ton soutien sans faille. Mon confident et ma source de motivation. Merci d'avoir cru en moi à chaque instant.

À mon petit trésor à venir,

Source de ma ténacité et de mon espoir.

Ta présence invisible a été une lumière dans mes moments de perplexité. Sans oublier mes amies et mes collègues du Master 2 Télécommunication –

Promo 2024-2025,

merci pour les souvenirs, l'entraide et les moments partagés.

Merci d'être toujours là pour moi.



Résumé

La technologie RFID (Radio Frequency Identification) connaît une croissance rapide grâce à ses capacités de communication sans contact, sa fiabilité et sa flexibilité d'intégration dans divers domaines tels que la logistique, la santé, le transport ou encore l'agriculture intelligente. Au cœur de cette technologie, l'antenne joue un rôle crucial puisqu'elle conditionne l'efficacité du lien entre le lecteur et l'étiquette RFID. Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des performances et de la miniaturisation des antennes RFID UHF, en exploitant les propriétés géométriques des structures fractales.

L'objectif principal a été de concevoir, simuler et optimiser deux antennes dipôles imprimées basées sur une géométrie fractale de Hilbert d'ordre deux, en vue d'améliorer leur adaptation d'impédance et leur compacité. La première antenne a été adaptée à une impédance standard de 50 ohms, facilitant son utilisation dans des systèmes de mesure. La seconde a été spécifiquement conçue pour s'adapter à une puce RFID Alien Higgs-3, présentant une impédance complexe de $27 - j200 \Omega$, fonctionnant dans la bande UHF (860–960 MHz).

Une étude paramétrique approfondie a été menée pour optimiser plusieurs paramètres géométriques de la structure : la longueur et la largeur du dipôle, l'espace vide entre segments, ainsi que les dimensions internes du motif fractal. L'analyse de l'impédance d'entrée, des coefficients S11 et des diagrammes de rayonnement a permis de sélectionner les configurations optimales assurant une adaptation fine et un rayonnement satisfaisant.

Les résultats obtenus à l'aide du logiciel CST Microwave Studio ont validé la pertinence de l'approche fractale. Ils montrent une miniaturisation significative de la structure avec une baisse notable de la fréquence de résonance, tout en maintenant une bonne performance de rayonnement (directivité de 4,01 dBi) et un bon appariement avec la puce RFID ciblée.

Mots-clés : Identification par radiofréquence (RFID), RFID UHF passive, tag RFID, fractale de Hilbert, antennes dipôle, adaptation, puce électronique.

Abstract

Radio Frequency Identification (RFID) technology has seen significant growth due to its ability to enable contactless communication, high reliability, and ease of integration in various fields such as logistics, healthcare, transportation, and smart agriculture. At the core of this technology lies the antenna, which plays a critical role in ensuring efficient communication between the reader and the tag. This research focuses on enhancing the performance and miniaturization of UHF RFID antennas using fractal geometries.

The main objective was to design, simulate, and optimize two printed dipole antennas based on a second-order Hilbert fractal geometry, aiming to improve impedance matching and achieve compactness. The first antenna is matched to a standard 50-ohm impedance, suitable for measurement and testing environments. The second antenna is specifically tailored for the Alien Higgs-3 RFID chip, which has a complex input impedance of $27 - j200 \Omega$, operating in the UHF band (860–960 MHz).

A detailed parametric study was conducted to optimize key geometric parameters, including dipole length and width, fractal gap spacing, and internal segment lengths. The analysis of input impedance, S11 parameters, and radiation patterns allowed for the identification of optimal configurations that ensure effective impedance matching and radiation performance.

Simulation results using CST Microwave Studio validated the effectiveness of the fractal approach. The antenna design demonstrated significant miniaturization with a notable frequency shift from 2.45 GHz to 0.86 GHz, while maintaining good impedance matching and a radiation directivity of 4.01 dBi.

Keywords: Radio Frequency Identification (RFID), passive UHF RFID, RFID tag, Hilbert fractal, dipole antennas, matching, electronic chip.

الملخص:

تعرف تقنية التعريف باستخدام الترددات الراديوية (RFID) بنمو سريع بفضل قدرتها على الاتصال اللاسلكي دون تلامس. وموثوقيتها، ومرونتها في الاندماج ضمن مجالات متعددة مثل اللوجستيك، الصحة، النقل، والزراعة الذكية. وتعد الهوائي عنصراً أساسياً في صميم هذه التقنية، إذ يلعب دوراً محورياً في فعالية الربط بين القارئ والعلامة (الإبتكيت) RFID يندرج هذا العمل البحثي في إطار تحسين أداء الهوائيات RFID العاملة في النطاق فائق التردد (UHF) وتصغير حجمها، من خلال استغلال الخصائص الهندسية للهيكل الفراكتالية. تمثل الهدف الأساسي في تصميم ومحاكاة وتحسين هوائيين من نوع ثنائي القطب مطبوع يعتمدان على بنية فراكتالية من نوع هيلبرت من الرتبة الثانية، وذلك بهدف تحسين توافق المعاوقة وتقليل الحجم. تم تكييف الهوائي الأول مع معاوقة قياسية تبلغ 50 أوم، لتسهيل استخدامه في أنظمة القياس. أما الهوائي الثاني فقد صمم خصيصاً ليتوافق مع شريحة RFID من نوع Alien Higgs-3، والتي تمتلك معاوقة مركبة تساوي 27 ناقص 200 أوم وتعمل في نطاق التردد UHF بين 860 و 960 ميغاهرتز.

تم إجراء دراسة بارامترية معمقة من أجل تحسين عدة معلمات هندسية ضمن البنية، مثل طول وعرض ثنائي القطب المسافة الفارغة بين الأجزاء، وأبعاد النمط الفراكتالي الداخلية. وقد سمحت دراسة معاوقة الدخول، ومعاملات الانعكاس 11، ومخططات الإشعاع باختيار التكوينات المثلى التي توفر توافقاً جيداً وإشعاعاً مرضياً.

أكدت النتائج المحصل عليها باستخدام برنامج CST Microwave Studio نجاعة النهج القائم على الهندسة الفراكتالية، حيث أظهرت تصغيراً ملحوظاً في البنية وانخفاضاً معتبراً في تردد الرنين، مع الحفاظ على أداء إشعاعي جيد بتوجيه قدره 4.01 ديسيبل) وتوافق جيد مع شريحة RFID المستهدفة

الكلمات المفتاحية: تحديد الترددات الراديوية (RFID) ، UHF RFID السلبي، علامة RFID ، كسورية هيلبرت، هوائيات ثنائية القطب، المطابقة، الشريحة الإلكترونية.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Technologie RFID

I.1 PRESENTATION DU CHAPITRE	4
I.2 INTRODUCTION	4
I.2.2 IDENTIFICATION SANS CONTACT.....	5
I.3 HISTORIQUE ET EVOLUTION DE LA RFID.....	6
I.3.1 LES GRANDES ETAPES D'EVOLUTION DE LA RFID :	7
I.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	8
I.5 LES COMPOSANTS D'UN SYSTEME RFID	9
I.5.1 L'ETIQUETTE RFID (TAG)	9
I.5.1.1 Tag Sans Puce.....	10
I.5.1.2 Tag avec puce	10
I.5.2 Lecteur RFID.....	13
I.6 PUCE DE TAG.....	14
I.6.1 PUCE DE TAG RFID	14
I.6.2 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	14
I.6.3 APPLICATIONS DES PUCES RFID	15
I.7 ANTENNE DE TAG RFID	15
I.7.1 TYPES D'ANTENNES DE TAGS RFID	15
I.8 FREQUENCE DE FONCTIONNEMENT DANS UN SYSTEME RFID.....	15
I.8.1 CHOIX DE LA FREQUENCE EN FONCTION DES APPLICATIONS	17
I.9 LES APPLICATIONS DE LA TECHNOLOGIE RFID	18
I.9.1 L'INDUSTRIE AUTOMOBILE	18
I.9.2 AEROPORT ET SUIVI DES BAGAGES.....	19
I.9.3 LES CHARIOTS DE MANUTENTION EN LOGISTIQUE.....	19
I.9.4 IDENTIFICATION ANIMALE	20

I.9.5 BIBLIOTHEQUE.....	21
I.9.6 PASSEPORT BIOMETRIQUE	22
I.10 AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE RFID	22
I.11 DEFIS ET LIMITATIONS DE LA TECHNOLOGIE RFID	23
I.12 CONCLUSION.....	24

Chapitre II : Techniques d'adaptation et de miniaturisation d'antennes de tag RFID

II.1 PRESENTATION DU CHAPITRE	26
II.2 INTRODUCTION	26
II.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	27
II.4 PARAMETRES FONDAMENTAUX D'UNE ANTENNE.....	27
II.4.1 PARAMETRE DE RAYONNEMENT	27
II.4.1.1 Déférentes zone de Rayonnement	27
II.4.1.2 Diagramme de Rayonnement	29
II.4.1.3 Directivité.....	30
II.4.1.4 Le gain.....	30
II.4.1.5 Polarisation.....	30
II.4.1.6 Efficacité De Rayonnement.....	32
II.4.2 PARAMETRE DE CIRCUIT	32
II.4.2.1 Impédance d'entrée	32
II.4.2.2 Coefficient de Transmission.....	33
II.4.2.3 Coefficient de Réflexion	34
II.4.2.4 facteur de qualité d'antenne	34
II.4.2.5 Bande passante	34
II.4.2.6 Taux d'Onde Stationnaire (TOS)	35
II.4.2.7 Distance de lecture	35
II.5 ANTENNES DE TAG RFID	36
II.5.1 Les Antennes IFA	36

II.5.2 Antenne Patch	38
II.5.3 Antenne Dipôles.....	39
II.5.4 Les antennes à fentes (imprimées)	40
II.6 MODELISATION ELECTRIQUE DES PUCES RFID	41
II.7 CLASSIFICATION DES ANTENNES	42
II.7.1 ANTENNES OMNIDIRECTIONNELLES	42
II.7.2 ANTENNES SECTORIELLES	43
II.7.3 ANTENNES DIRECTIONNELLES (DIRECTIVES)	44
II.8 TECHNIQUES D'ADAPTATION D'IMPEDANCE DES ANTENNES DE TAGS RFID UHF PASSIFS.....	44
II.8.1 T-MATCH	44
II.8.2 BOUCLE A COUPLAGE INDUCTIF	46
II.8.3 ADAPTATION PAR INSERTION DE FENTES	47
II.8.4 ADAPTATION PAR CHARGES CAPACITIVES AUX EXTREMITES	47
II.8.5 ADAPTATION D'UNE ANTENNE DIPOLE PAR UNE INDUCTANCE SERIE (UTILISATION DES MEANDRES).....	48
II.9 TECHNIQUES DE MINIATURISATION DES ANTENNES	49
II.9.1 DIPOLE MEANDRE.....	49
II.9.2 CONFIGURATION F-INVERTED	50
II.9.3 METHODE A GEOMETRIE FRACTALE	52
II.10 CONCLUSION	53

Chapitre III : Conception et résultats de simulation

III.1 INTRODUCTION ET PRESENTATION DU CHAPITRE.....	55
III.2 LA METHODOLOGIE DE CONCEPTION D'ANTENNE DES TAGS RFID UHF PASSIF.....	55
III.2.1 CONTRAINTES POUR LA CONCEPTION DU TAG RFID	56
III.2.1.1 La fréquence et la bande passante.....	56
III.3 PRESENTATION DU LOGICIEL CST.....	57

III.4 FRACTALE DE HILBERT A L'ITERATIONS DEUX.....	57
III.5 ANTENNE DIPOLE FRACTALE DE HILBERT RFID ADAPTEE A 50Ω.....	58
III.6 ANTENNE DIPOLE FRACTALE RFID ADAPTEE PAR UN 3 ^{EME} FRACTALE A 50Ω	59
III.6.1 LA GEOMETRIE D'ANTENNE.....	59
III.6.2 COEFFICIENT DE REFLEXION	60
III.6.3 DIAGRAMME DE RAYONNEMENT	62
III.6.4 IMPEDANCE D'ENTREE DE L'ANTENNE	63
III.7 ANTENNE DIPOLE FRACTALE ADAPTEE A UNE PUCES RFID	64
III.7.1 ANTENNE DIPOLE DE BASE.....	64
III.7.1.1 Géométrie de l'antenne	65
III.7.1.2 Coefficient de réflexion	66
III.7.2 ANTENNE DIPOLE FRACTALE ADAPTE A 50 Ω.....	66
III.7.2.1 Géométrie de l'antenne	66
III.7.2.2 Coefficient de réflexion	67
III.7.3 ÉVOLUTION DES PUCES RFID UHF ET CHOIX TECHNOLOGIQUE	68
III.7.4 ETUDE PARAMETRIQUE.....	69
III.7.4.1 Diagramme de Rayonnement.....	80
III.7.4.2 Impédance d'entrée de l'antenne	82
III.9 CONCLUSION	83
REFERONCE BIBLIOGRAPHIQUE	87

Liste des Figures

Chapitre I : Technologie RFID

Figure I. 1: La technologie RFID.....	6
Figure I. 2: Première Utilisations de l'RFID.....	7
Figure I. 3: Principe de fonctionnement.....	9
Figure I. 4: Un exemple d'un tag	10
Figure I. 5: Tag RFID Active.....	11
Figure I. 6: Tag passive.....	12
Figure I. 7: Tag passive.....	12
Figure I. 8: Tag semi passive	13
Figure I. 9: (a) Lecteur portable, (b) Lecteur-poignée fixe pour un contrôled'accès.	14
Figure I. 10: Les Fréquence de la RFID.	16
Figure I. 11: L'industrie automobile.....	18
Figure I. 12: Aéroport et suivi des bagages.	19
Figure I. 13: Les chariots de manutention en logistique.	20
Figure I. 14: Animal portant un tag RFID accroché à son oreille.....	21
Figure I. 15: système RFID pour une bibliothèque.....	21
Figure I. 16: Passeport biométrique	22

Chapitre II : Techniques d'adaptation et de miniaturisation d'antennes de tag RFID

Figure II. 1: Rôle d'une antenne	27
Figure II. 2: Déférénts zones de rayonnement.....	29
Figure II. 3: Représentation de diagramme de rayonnement d'une antenne.	29
Figure II. 4: Polarisation linéaire.	31
Figure II. 5: Polarisation circulaire.	32
Figure II. 6: Antenne émission et son impédance équivalent.	33
Figure II. 7: Mesure de la bande passante à partir du tracé du coefficient de réflexion.....	35
Figure II. 8: représentation d'antenne IFA.	37
Figure II. 9: Différentes configurations d'antennes IFA.	37
Figure II. 10: Géométrie d'antenne patch.	38
Figure II. 11: Antenne dipôles.	39
Figure II. 12: Géométrie de base d'une antenne dipôle.....	40
Figure II. 13: Géométrie de base d'une antenne à fente.	41

Figure II. 14: Modèle équivalent de l'impédance d'entrée des puces RFID UHF. (a) Circuit parallèle. (b) Circuit série.....	42
Figure II. 15: Diagramme de rayonnement d'une antenne omnidirectionnelle Isotrope.....	43
Figure II. 16: Diagramme de rayonnement d'une antenne sectoriel.	43
Figure II. 17: Diagramme de rayonnement d'une antenne Directionnelle.	44
Figure II. 18: Exemple T-match pour un dipôle planaire et leur circuit équivalent.	45
Figure II. 19: Exemple d'une boucle proche au corps rayonnant et leur circuit équivalent. ..	46
Figure II. 20: Exemple géométrie d'un patch avec emplacement imbriqué (Nested-slot).....	47
Figure II. 21: Adaptation par charges capacitives aux extrémités.....	48
Figure II. 22: Adaptation par utilisation des méandres.....	48
Figure II. 23: Géométrie d'une MDA symétrique comprenant 2N méandres.	49
Figure II. 24: Antenne à méandre équidistante.....	50
Figure II. 25: Antenne à ligne de méandre avec alimentation en boucle à couplage inductif.	50
Figure II. 26: Structure de l'antenne IFA.	51
Figure II. 27: Antenne PIFA élémentaire.	51
Figure II. 28: Processus de génération itérative des fractales.....	53

Chapitre III : Conception et résultats de simulation

Figure III. 1: Méthodologie de conception d'antenne des tags.	56
Figure III. 2: Les influences de l'environnement sur l'onde électromagnétique selon les différentes fréquences.	57
Figure III. 3: Géométrie de Hilbert à a)- la première itération. b)- La deuxième itération. ...	58
Figure III. 4: Structure de l'antenne dipôle fractale à la deuxième itération.....	58
Figure III. 5: Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale mono-bande (2.45 GHz).	59
Figure III. 6: Structure de l'antenne dipôle fractale.	60
Figure III. 7: Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale.....	61
Figure III. 8: Diagramme de rayonnement dans le plan horizontal ($\varphi = 0^\circ$) et dans le plan vertical ($\varphi = 90^\circ$) à 0,86 GHz.....	62
Figure III. 9: Représentation du diagramme de rayonnement avec les coordonnées	63
Figure III. 10: Impédance complexe de l'antenne en fonction de la fréquence	63
Figure III. 11: Géométrie de l'antenne dipôle.	65
Figure III. 12: Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle (2.45GHz).....	66
Figure III. 13: Géométrie de l'antenne dipôle fractale.	67
Figure III. 14: Coefficient de réflexion de l'antenne avec fractale adapté à 50Ω	68

Figure III. 15: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction du paramètre w_d	70
Figure III. 16: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre w_d	70
Figure III. 17: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction de paramètre l_d	72
Figure III. 18: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre l_d	72
Figure III. 19: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction de paramètre x	73
Figure III. 20: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre x	74
Figure III. 21: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction de paramètre l	75
Figure III. 22: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre l	75
Figure III. 23: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction de paramètre k	77
Figure III. 24: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre k	77
Figure III. 25: Modèle géométrique final de l'antenne fractale d'Hilbert.....	80
Figure III. 26: Diagramme de rayonnement (2D) dans (a) le plan E ($\Phi = 0^\circ$) et (b) le plan H ($\phi = 90^\circ$) à la fréquence ($f = 0.92$ GHz).	81
Figure III. 27: Représentation du diagramme de rayonnement avec les coordonnées Sphériques (θ, ϕ).	81
Figure III. 28: Courbes de l'impédance de l'antenne ($\text{Re}[Z]$ et $\text{Im}[Z]$) en fonction de la fréquence.	82

Liste des Tableaux

Chapitre I : Technologie RFID

Tableau I. 1: Types D'antennes De Tags RFID.	15
--	----

Chapitre III : Conception et résultats de simulation

Tableau III. 1: Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale Mono-Bande.	59
Tableau III. 2: Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale.	60
Tableau III. 3: Dimensions optimisées de l'antenne dipôle.	65
Tableau III. 4: Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale.	67
Tableau III. 5: Déférents puces RFID-UHF disponible dans le marché.	69
Tableau III. 6: Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « wd ».	71
Tableau III. 7: Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « ld ».	72
Tableau III. 8: Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « x ».	74
Tableau III.9 : Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « l ».	76
Tableau III. 10: Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « k ».	77
Tableau III. 11: Tableau récapitulatif des paramètres optimaux.	79
Tableau III. 12: Les nouveaux paramètres optimaux élargis de l'antenne.	79

Liste d'abréviation

BF : Base Frequency

CPS : Cyber-Physical System

CST : Computer Simulation Technology

CST MWS : Computer Simulation Technology Microwave Studio

dB : Decibel

dBi : Decibel Isotropic

EM : Électromagnétique

EPC : Electronic Product Code

HF : Haute Fréquence

IBM : International Business Machines

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IFA : Inverted-F Antenna

IFF : Identification Friend or Foe

ISO : International Organization for Standardization

ISO/IEC : International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission

LF : Low Frequency

MES : Manufacturing Execution System

MIT : Massachusetts Institute of Technology

PIFA : Planar Inverted-F Antenna

PTMP : Point To MultiPoint

RFID : Radio Frequency Identification

SHF : Super High Frequency

TOS : Taux d'Onde Stationnaire

UHF : Ultra Haute Fréquence

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

Introduction générale



INTRODUCTION GENERALE

La technologie d'identification par radiofréquence, plus connue sous l'acronyme RFID (Radio Frequency Identification), puise ses origines dans les dispositifs développés durant la Seconde Guerre mondiale, destinés à distinguer les avions amis des ennemis à l'aide d'ondes radio. Ce n'est cependant qu'à partir des années 1970 que la RFID a commencé à se développer dans le domaine civil, avec l'émergence des premiers systèmes d'identification automatique [1]. Grâce aux avancées rapides dans les domaines de l'électronique, des circuits intégrés et des communications sans fil [2], cette technologie a connu une évolution remarquable, passant de simples dispositifs de lecture à des systèmes sophistiqués, capables de fonctionner à grande distance, avec une capacité de stockage accrue, une meilleure robustesse et une fiabilité élevée.

Aujourd'hui, la RFID est omniprésente dans de nombreux secteurs d'activité : gestion des stocks, traçabilité des produits, transport et logistique, contrôle d'accès, santé, agriculture intelligente, ou encore industrie. Elle repose sur une communication sans contact entre un lecteur et une étiquette (ou tag) via des ondes radio, permettant l'identification et l'échange d'informations à distance, sans nécessité d'un alignement visuel [3].

Dans ce contexte, l'antenne joue un rôle crucial, car elle assure la transmission et la réception du signal électromagnétique. Les performances globales d'un système RFID dépendent donc en grande partie de la conception de l'antenne et de sa capacité à s'adapter à l'impédance du reste du système, notamment celle de la puce RFID.

L'objectif principal de ce travail est de concevoir, analyser et d'adapter deux types d'antennes RFID dipôles basée sur le fractale de Hilbert pour cela nous allons utiliser deux approches :

Dans la première antenne nous allons appliquer le troisième fractale pour le compacter et l'adapter à 50Ω fonctionnant à la fréquence 0.92 GHz.

Dans la deuxième antenne nous allons appliquer le fractale pour le compacter et l'adapter à une puce RFID UHF fonctionnant dans la bande 860–960 MHz.

Pour ce faire, des outils de simulation avancée, notamment le logiciel CST Studio Suite, ont été utilisés pour modéliser, analyser et optimiser les différentes topologies proposées.

Afin de répondre à ces objectifs, ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Le chapitre 1 présente une étude générale de la technologie RFID. Il aborde les principes de fonctionnement des systèmes RFID, les différentes catégories (actifs, passifs, semi-passifs),

leurs composants, les bandes de fréquences exploitées, ainsi que les principales applications industrielles et commerciales. Ce chapitre fournit ainsi un cadre théorique solide pour comprendre l'environnement global de l'étude.

Le chapitre 2 est consacré aux antennes RFID et aux techniques d'adaptation d'impédance. Après avoir décrit les principales familles d'antennes utilisées dans ce domaine (dipôles, patchs, boucles, etc.), ce chapitre explore leurs caractéristiques clés telles que le gain, la bande passante, la directivité, ainsi que les techniques d'adaptation et de miniaturisation permettant un couplage optimal avec la puce RFID et une facilité d'intégration dans les milieux restreints.

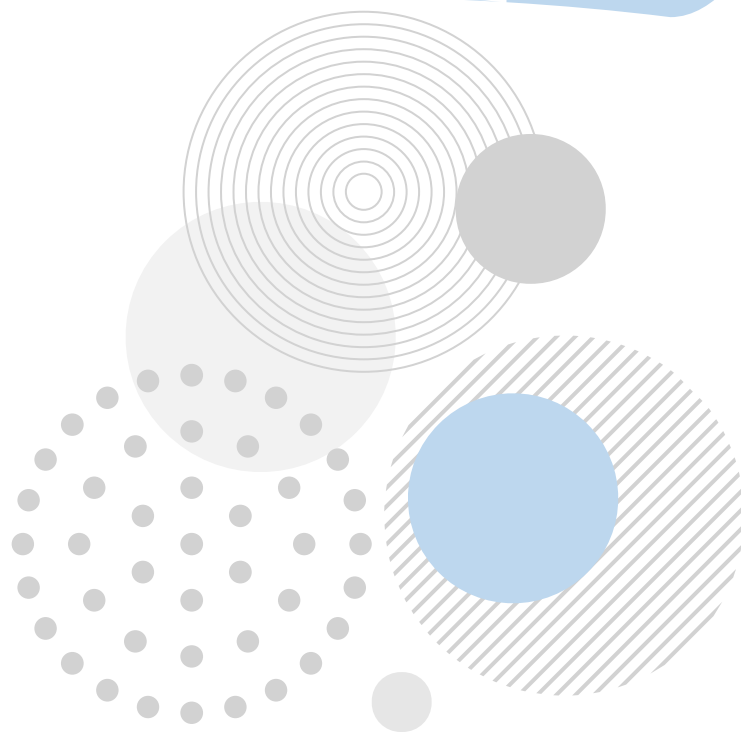
Le chapitre 3 est dédié à l'étude de la miniaturisation et de l'adaptation d'impédance à travers la conception, la modélisation et la simulation de deux antennes dipôles imprimées, basées sur une géométrie fractale de Hilbert d'ordre deux. La première antenne est conçue pour être adaptée à une impédance standard de 50 ohms, ce qui permet de l'intégrer facilement dans des systèmes de mesure conventionnels. Cette adaptation est obtenue grâce à l'ajout d'un troisième segment dans la structure, permettant un meilleur contrôle de l'impédance. La seconde antenne, quant à elle, est spécifiquement optimisée pour fonctionner avec une puce RFID Alien Higgs-3, caractérisée par une impédance complexe de $Z_{puce} = 27 - j200 \Omega$. La conception vise à assurer une adaptation d'impédance fine dans la bande UHF (860–960 MHz), afin de garantir une transmission efficace de la puissance et une portée de lecture optimale.

Puis nous allons passer aux résultats de simulation par CST Microwave Studio tel que l'impédance d'entrée de l'antenne et le diagramme de rayonnement. Tous les résultats de simulation sont suivis par des commentaires.

A la fin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Technologie RFID



I.1 PRESENTATION DU CHAPITRE

La technologie RFID (Radio Frequency Identification), qui est aujourd'hui une des solutions les plus innovantes et largement utilisées dans divers domaines. La RFID permet l'identification automatique et sans contact d'objets à l'aide de radiofréquences. Ce chapitre explore la technologie RFID (Radio Frequency Identification) sous plusieurs aspects essentiels. Nous commencerons par la définition de la technologie RFID, en expliquant ses principes de base et ses composants. Nous aborderons ensuite l'histoire et l'évolution de la RFID, en retraçant son développement et son adoption dans différents secteurs. Le principe de fonctionnement de la RFID sera détaillé pour comprendre comment l'identification sans contact fonctionne. Nous examinerons aussi la fréquence de fonctionnement de cette technologie, en mettant en lumière les différentes gammes de fréquences utilisées.

Ensuite, nous présenterons l'architecture de la RFID, en expliquant les composants matériels et logiciels qui la composent. Nous verrons également les diverses applications de la technologie RFID, telles que dans la gestion des stocks et la sécurité. Enfin, nous discuterons des avantages et inconvénients de la RFID, en analysant ses bénéfices et ses défis. Ce chapitre se conclura par une conclusion récapitulative des points abordés et des perspectives d'avenir de cette technologie.

I.2 INTRODUCTION

L'identification électronique se divise en deux grandes catégories :

- **L'identification avec contact**
- **L'identification sans contact**

I.2.1 IDENTIFICATION AVEC CONTACT

Ce type d'identification repose sur des dispositifs qui communiquent par l'intermédiaire de contacts électriques. On retrouve principalement deux types d'outils :

- **Les circuits mémoire** : Ce sont des modules de différentes tailles et formes qui intègrent des fonctions de mémoire embarquée.
- **Les cartes à puce** : Utilisées dans des contextes variés, les exemples les plus courants incluent les cartes bancaires et les badges d'accès.

I.2.2 IDENTIFICATION SANS CONTACT

Cette forme d'identification regroupe trois principaux types de technologies :

- **La vision optique** : Ce système nécessite une ligne de vue directe entre l'identifiant et le lecteur (comme avec un laser ou une caméra CCD). Son coût est faible, mais il est limité par son besoin de visibilité directe.
- **La communication infrarouge** : Offrant un débit élevé, une bonne portée et une forte directivité, elle exige également une visibilité directe entre les appareils.
- **La radiofréquence (RFID)** : Elle permet une communication sans contact et sans visibilité directe entre un lecteur et un identifiant (ou « tag »). Elle peut même gérer plusieurs identifiants simultanément dans son champ de détection.

La radio-identification, connue sous le sigle RFID (pour *Radio Frequency Identification*), est une technologie sans fil utilisée pour identifier des objets, des personnes, suivre des mouvements ou localiser des éléments. Un système RFID fonctionne grâce à un petit dispositif appelé tag, qui contient les données à transmettre. Ce tag est lu par un lecteur RFID, qui traite ensuite les informations selon l'application visée.

Les données stockées peuvent inclure l'identité de l'objet, sa position, ou des caractéristiques comme le prix, la couleur ou encore l'historique d'achat. Introduite dans les années 1980 pour le suivi et le contrôle d'accès, la RFID s'est largement démocratisée grâce à sa capacité à suivre les objets en déplacement et à son coût de mise en œuvre relativement faible [4].

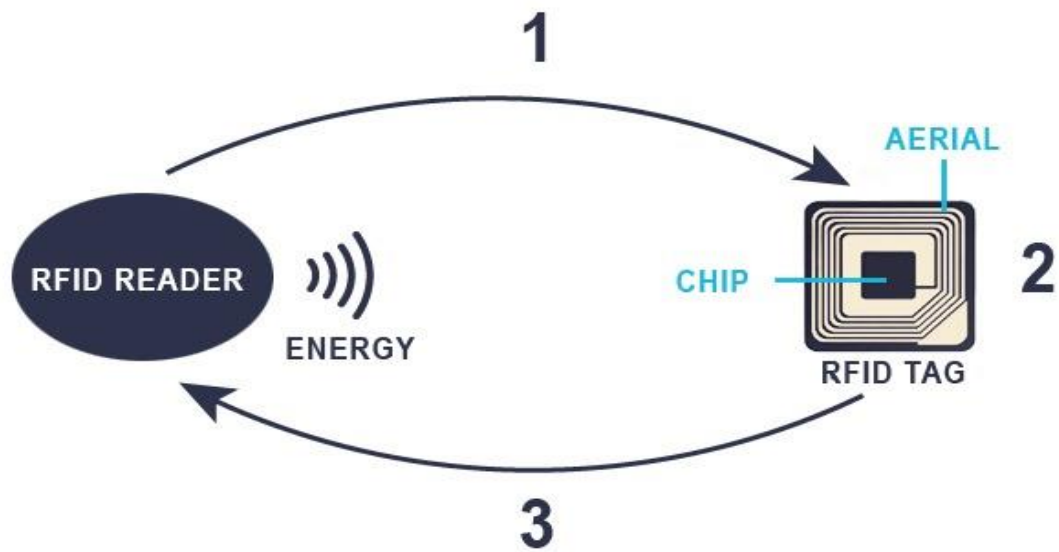


Figure I. 1: La technologie RFID

1-Le lecteur RFID émet une onde porteuse de signal vers la puce.

2-L'antenne de l'étiquette RFID, dans le champ de l'onde, capte le signal et le transmet à la puce. L'onde reçue charge la puce en énergie, qui est activée. Elle renvoie ensuite l'information au lecteur par l'onde porteuse.

3-Le lecteur reçoit l'information et l'interprète [5].

I.3 HISTORIQUE ET EVOLUTION DE LA RFID

La technologie RFID (Radio Frequency Identification) existe depuis plus de soixante ans. Elle trouve ses origines dans le domaine militaire, durant la Seconde Guerre mondiale. À l'époque, elle était utilisée à titre expérimental pour identifier les avions ennemis à l'aide d'un système appelé IFF (Identification Friend or Foe). Comme pour Internet, cette technologie a évolué au fil du temps, délaissant ses applications militaires pour devenir une solution innovante largement adoptée par le secteur privé et les consommateurs [6].



Figure I. 2: Première Utilisations de l'RFID

La RFID est aujourd'hui perçue comme une technologie capable de transformer profondément notre quotidien et nos méthodes de travail, au même titre que l'électricité ou les télécommunications à la fin du XIXe siècle.

I.3.1 LES GRANDES ETAPES D'EVOLUTION DE LA RFID :

- **1946** : L'ingénieur russe Léon Theremin conçoit un dispositif d'espionnage pour l'Union soviétique. Cet outil capte les ondes radio pour transmettre des informations audio. Bien qu'il n'intègre pas de fonction d'identification, il est considéré comme un précurseur de la RFID en raison de son fonctionnement basé sur la modulation des ondes radio.
- **1948** : Harry Stockman publie un article intitulé « *Communication by Means of Reflected Power* », considéré comme le premier document théorique sur la RFID. Il y annonce que des recherches approfondies seront nécessaires pour surmonter les défis techniques de cette technologie.
- **1973** : Mario Cardullo dépose le premier brevet officiel pour une application RFID aux États-Unis. Il s'agissait d'un système d'identification destiné aux locomotives. Pendant les années 60-70, la RFID reste principalement utilisée dans le secteur militaire, notamment pour sécuriser l'accès à des sites sensibles comme les installations nucléaires.
- **Années 1980** : Des progrès technologiques permettent l'émergence du tag passif, un identifiant sans source d'énergie embarquée, ce qui le rend moins coûteux. En Europe, la première utilisation dans le secteur privé concerne l'identification du bétail. Par la

suite, la RFID est adoptée dans diverses applications industrielles, comme les chaînes de production automobile.

- **Années 1990** : Débuts de la normalisation des équipements RFID, facilitant leur interopérabilité. La miniaturisation progresse également : IBM réussit à intégrer l'ensemble du système RFID dans une seule puce.
- **1999** : Création du centre de recherche Auto-ID au MIT (Massachusetts Institute of Technology), spécialisé dans le développement de la RFID.
- **2004** : Le centre Auto-ID devient EPCglobal, une organisation internationale chargée de promouvoir la norme EPC (Electronic Product Code), favorisant l'adoption de la RFID dans la gestion de la chaîne logistique à l'échelle mondiale [7].

I.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les systèmes RFID consistent en des étiquettes attachées aux objets à identifier. Chaque tag a sa propre mémoire interne «en lecture seule» ou «réécriture» en fonction du type et de l'application. La configuration typique de cette mémoire est de stocker des informations sur le produit, telles que la date de fabrication de l'ID unique de l'objet, etc [8].

Le lecteur RFID génère des champs magnétiques qui permettent au système RFID de localiser des objets se trouvant dans son champ de lecture. Cette énergie électromagnétique et le signal d'interrogation généré par le lecteur active les étiquettes cette dernière transmettent alors en retour un signal et donc un dialogue s'établit entre les deux entités, selon un protocole de communication prédéfini, et des données pourront être échangées.

Donc la communication du tag vers le lecteur repose sur la technique de rétro-modulation. Le moyen utilisé pour réaliser cette rétro-modulation, consiste à commuter une charge (impédance) placée en parallèle entre la puce électronique et l'antenne de l'étiquette [9].

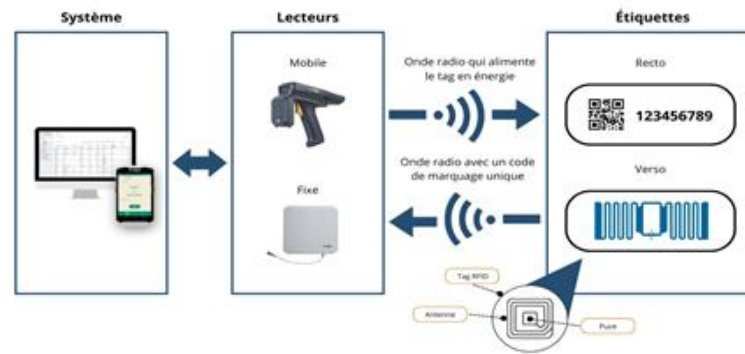


Figure I. 3 : Principe de fonctionnement

S'il y a plusieurs tags valides, ils répondent tous en même temps, ce qui entraîne une collision de signaux à la fin du lecteur qui est considéré comme une indication de plusieurs étiquettes. Le lecteur gère ce problème en utilisant un algorithme anticollision conçu pour permettre aux étiquettes d'être triées et sélectionnées individuellement [10].

I.5 LES COMPOSANTS D'UN SYSTEME RFID

Un système RFID utilise la technologie sans fil communiquant par ondes radio, il est constitué de trois composants :

1. Un tag (parfois appelé un transpondeur ou étiquette), qui se compose d'une puce d'antenne, et parfois d'une batterie.
2. Le lecteur (parfois appelé un interrogateur ou un dispositif lecture/écriture), qui se compose d'antenne, d'un module électronique RF, et d'un circuit de commande.
3. Un contrôleur (parfois appelé hôte), il peut être un PC ou un poste de travail contenant une base de donnée et un logiciel de commande (middleware) [11].

I.5.1 L'ETIQUETTE RFID (TAG)

Un tag est un transpondeur, c'est-à-dire un circuit intégré couplé avec une antenne comme représenté en Figure I.2, incorporé dans un objet distant. Il peut avoir différentes sources d'alimentation, soit la sienne, soit celle fournie par un lecteur RFID. Sa mémoire peut varier de quelques centaines de bits (comme pour les tags EPC5) à quelques kilo-octets (comme des cartes à puce sans contact).

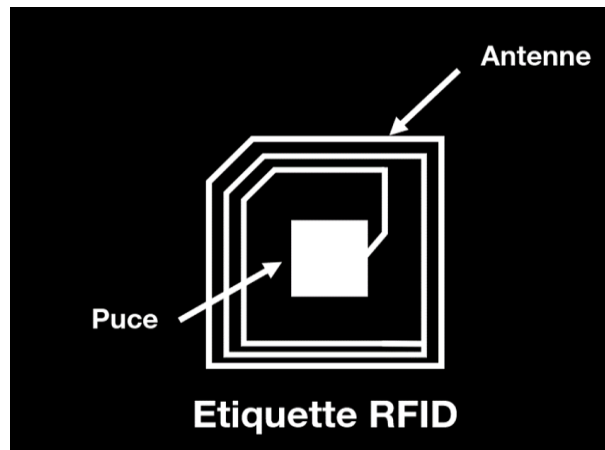


Figure I. 4: Un exemple d'un tag

I.5.1.1 Tag Sans Puce

Ce sont des tags qui ne disposent pas de circuit électrique et qui utilisent des principes physique ou chimiques pour générer un code d'identification. Ce type de tag constitué de réflecteur positionné sur un matériau piézoélectrique et d'une antenne reliée à un transducteur qui transforme les ondes radiofréquences en ondes acoustiques (et vice-versa). Cette technique fonctionne très bien à 2.4 GHz. A des fréquences très élevées les pertes sont trop grandes pour que ce principe soit utilisé [12].

I.5.1.2 Tag avec puce

Un tag RFID avec puce est une étiquette équipée d'une puce électronique qui contient des données spécifiques, telles qu'un identifiant unique, et qui peut être lue par un lecteur RFID. Ce tag est généralement constitué de deux parties principales : une puce et une antenne. La puce stocke les informations et les transmet à travers l'antenne sous forme d'ondes radio lorsqu'elle est interrogée par un lecteur RFID.

On peut différencier les tags RFID constitués d'une puce en fonction de leur source d'alimentation. On peut distinguer trois catégories : tag actif, tag passifs et tag semi-passif [13].

➤ Tag Actif

Ils nécessitent une source d'alimentation, soit en étant connectés à un réseau électrique, soit en utilisant l'énergie fournie par une batterie intégrée. Dans ce dernier cas, la durée de vie d'un tag dépend de l'énergie disponible dans la batterie, ce qui est influencé par le nombre d'opérations de lecture auxquelles il est soumis. Un exemple de tag actif est le transpondeur utilisé sur un

avion pour identifier son pays d'origine. Les tags actifs permettent une communication directe sans passer par un serveur central [12].

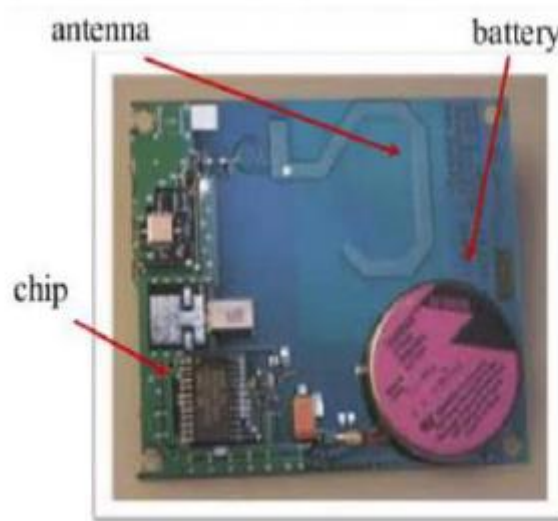
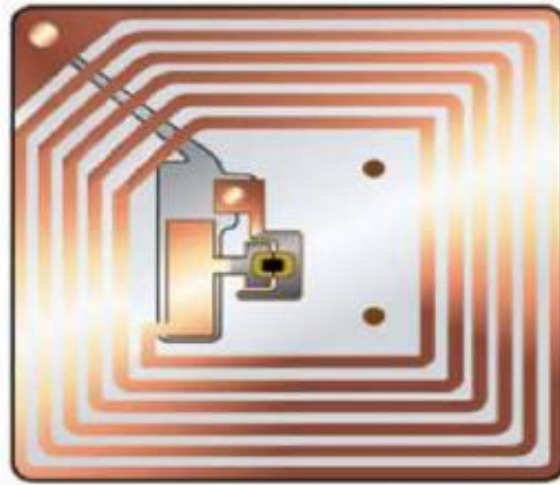
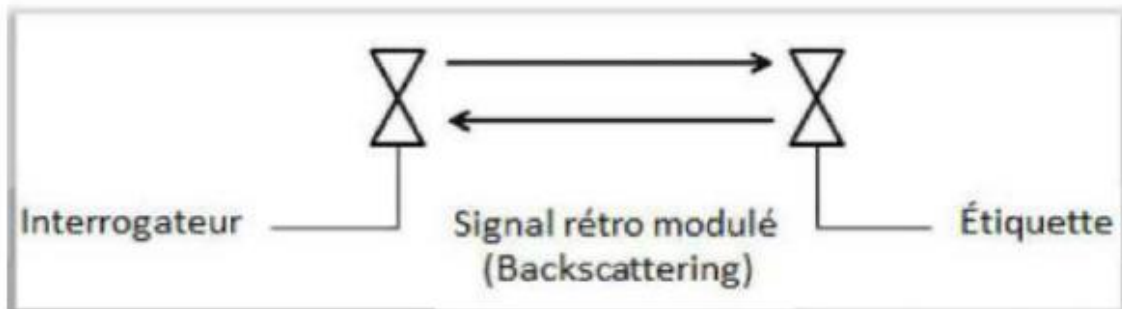


Figure I. 5: Tag RFID Active

➤ Tag passive

Ces tags, n'ayant pas d'alimentation externe, tirent leur énergie de l'effet électromagnétique créé par le signal reçu du lecteur. Ce courant leur permet d'alimenter leurs microcircuits. Ils sont peu coûteux à fabriquer et sont généralement utilisés dans des productions à grande échelle. On les retrouve principalement dans les secteurs de la logistique et du transport.

Ils fonctionnent sur différentes bandes de fréquences radio, en fonction de leur capacité à transmettre des données sur de courtes ou longues distances et à travers divers matériaux (air, eau, métal). La distance de lecture est généralement inférieure à un mètre. Les fréquences basses et hautes sont standardisées au niveau mondial. Ces puces sont fixées sur les produits pour permettre un suivi, notamment lors des inventaires. Selon les cas, elles peuvent être jetables ou réutilisables [12].

**Figure I. 6:** Tag passive**Figure I. 7:** Tag passive

➤ **Tag semi passives**

Les tags semi-passifs (ou semi-actifs) sont des dispositifs RFID qui combinent des caractéristiques des tags passifs et actifs. Contrairement aux tags passifs, ils disposent d'une batterie interne qui leur permet d'alimenter leurs circuits, ce qui améliore leur portée de lecture et la vitesse de communication. Cependant, comme les tags passifs, ils ne peuvent pas émettre de signal de manière autonome ; ils nécessitent toujours un lecteur RFID pour activer la communication [13].



Figure I. 8: Tag semi passive

I.5.2 Lecteur RFID

Un lecteur RFID est un appareil électronique conçu pour interagir avec des étiquettes RFID (tags). Ces étiquettes contiennent des informations numériques qui peuvent être lues ou modifiées par le lecteur via des signaux radio. Un lecteur RFID émet des ondes radio, qui activent les étiquettes passives et permettent la transmission de données. Selon le type de technologie RFID utilisée (à basse fréquence, haute fréquence, ou ultra-haute fréquence), les lecteurs peuvent fonctionner sur des distances de quelques centimètres à plusieurs mètres [14].

Fonctionnement général

1. Le lecteur envoie une onde radio qui fournit de l'énergie à l'étiquette (dans le cas des étiquettes passives).
2. L'étiquette, une fois activée, renvoie ses informations au lecteur.
3. Le lecteur reçoit ces données et les transmet à un système informatique pour traitement.

Les lecteurs RFID sont utilisés dans une variété de domaines, y compris la gestion des stocks, la logistique, les systèmes de sécurité, le suivi des actifs, et le contrôle d'accès [14].



Figure I. 9: (a) Lecteur portable, (b) Lecteur-poignée fixe pour un contrôlé d'accès.

I.6 PUCE DE TAG

I.6.1 PUCE DE TAG RFID

La puce RFID (ou circuit intégré RFID) est le composant central d'une étiquette RFID. Elle joue un rôle clé dans l'identification et la communication entre le lecteur RFID et l'étiquette. Elle contient un identifiant unique (ID) ou d'autres données qui peuvent être lues et parfois modifiées via un lecteur RFID [15].

I.6.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

- **Stockage des données:** La puce RFID contient une mémoire dans laquelle des informations spécifiques sont stockées, comme un identifiant unique, des informations de produit, ou d'autres types de données.
- **Énergie :** Les tags passifs n'ont pas de batterie propre. Ils utilisent l'énergie émise par le lecteur RFID pour s'activer et transmettre les données stockées. Les tags actifs possèdent leur propre batterie et peuvent émettre des signaux sur de plus longues distances.
- **Communication sans contact :** Lorsque le lecteur émet un signal radio, la puce capte ce signal (si elle est passive) et lui répond par l'envoi des données stockées, via un signal radio également. Ce processus est entièrement sans contact [15].

I.6.3 APPLICATIONS DES PUCES RFID

Les puces RFID sont utilisées dans de nombreux domaines :

- **Gestion des stocks** : Suivi des marchandises dans les entrepôts, magasins, et chaînes de production.
- **Contrôle d'accès** : Badges ou cartes RFID utilisées pour sécuriser l'accès à des bâtiments ou des zones protégées.
- **Suivi des animaux et des objets** : Identification et suivi d'animaux ou d'objets précieux grâce à des tags RFID intégrés [15].

I.7 ANTENNE DE TAG RFID

L'antenne de tag RFID est une composante essentielle d'un système RFID. Elle permet à l'étiquette (ou tag) de capter l'énergie du signal émis par le lecteur RFID et d'échanger des informations avec lui. Cette antenne est généralement constituée d'un fil conducteur ou d'une boucle métallique et peut être de différentes formes, tailles et configurations, selon le type de système RFID utilisé et l'application spécifique [15].

I.7.1 TYPES D'ANTENNES DE TAGS RFID

Le tableau I.1 récapitule les types d'antennes de Tag RFID [15].

Type d'antenne	Fréquences utilisées	Polarisation	Avantages principaux	Inconvénients	Exemples d'applications
Linéaire (rectangulaire)	UHF (860–960 MHz), HF (13,56 MHz)	Linéaire	Simplicité, bonne portée en orientation fixe	Sensible à l'orientation	Logistique, suivi de colis
Circulaire	UHF, parfois HF	Circulaire (RHCP/LHCP)	Tolérante à l'orientation du tag	Plus volumineuse	Portiques RFID, systèmes de tri automatique
À boucle (Loop)	HF (13,56 MHz), UHF	Inductif (HF)	Bonne immunité aux interférences, robuste	Portée limitée en HF	Billets de transport, cartes d'accès

Tableau I. 1: Types D'antennes De Tags RFID.

I.8 FREQUENCE DE FONCTIONNEMENT DANS UN SYSTEME RFID

Les systèmes RFID utilisent des ondes électromagnétiques, ils doivent respecter un certain nombre de réglementations. Le signal radiofréquence se situe entre le signal électrique et le signal infrarouge. Il couvre un large spectre allant de 3 KHz à 300 GHz. Les systèmes RFID utilisent des gammes de fréquences qu'on peut les classer en quatre catégories [16].

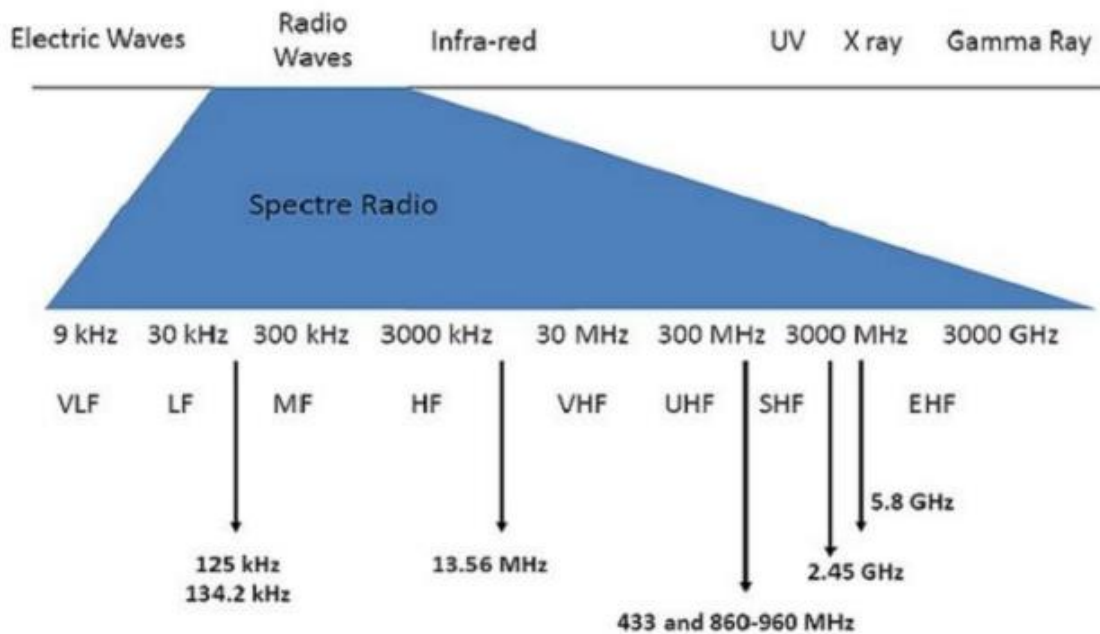


Figure I. 10: Les Fréquence de la RFID.

❖ Basse fréquence (LF) : 125 kHz - 134 kHz

- **Caractéristiques** : Les **tags RFID LF** ont une faible portée, généralement de quelques centimètres à 1 mètre. Ces systèmes sont moins sensibles aux interférences dues à l'eau et aux métaux, mais leur capacité à transmettre des données à une longue distance est limitée.
- **Applications** : Ils sont utilisés dans des applications telles que l'identification des animaux (ex : puces RFID pour animaux) et des systèmes de contrôle d'accès dans des environnements fermés.

❖ Haute fréquence (HF) : 13,56 MHz

- **Caractéristiques** : Cette fréquence est utilisée pour des tags RFID HF qui ont une portée de lecture allant de quelques centimètres à 1 mètre. Elle est

largement utilisée dans les systèmes où la communication à courte portée est nécessaire.

- **Applications** : Cartes de transport public, billetterie sans contact, gestion des stockset suivi des actifs.

❖ **Ultra-haute fréquence (UHF) : 860 MHz - 960 MHz**

- **Caractéristiques** : Les systèmes RFID **UHF** ont une portée de lecture bien plus grande que les systèmes LF et HF, généralement de 3 à 10 mètres. Cependant, les interférences dues aux matériaux métalliques et liquides peuvent affecter leur performance. Ils permettent une communication plus rapide et sont capables de lire plusieurs tags simultanément.
- **Applications** : Suivi des biens, gestion des stockset logistiquedans des entrepôts, ainsi quesuivi des véhicules.

❖ **Micro-wave RFID : 2.45 GHz**

- **Caractéristiques** : Utilisée dans des applications spécialisées, cette fréquence permet des communications à très longue distance, mais est sensible aux interférences dues aux matériaux comme l'eau et les métaux. Cette technologie est utilisée dans des systèmes qui nécessitent des lectures très rapides.
- **Applications** : Suivi des véhicules et applications spéciales comme la gestion de la chaîne d'approvisionnement à très grande échelle [17].

I.8.1 CHOIX DE LA FREQUENCE EN FONCTION DES APPLICATIONS

Le choix de la fréquence RFID dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- **Portée** : Les fréquences plus élevées (comme UHF) permettent des portées plus grandes.
- **Vitesse de lecture** : Les systèmes UHF peuvent lire plusieurs tags simultanément, ce qui les rend idéaux pour des applications de gestion de l'inventaire où plusieurs articles sont suivis en même temps.

- **Environnement d'utilisation** : Les matériaux tels que l'eau et les métaux peuvent interférer avec les fréquences plus élevées. Dans de tels environnements, il est souvent préférable d'utiliser des tags RFID LF ou HF.

I.9 LES APPLICATIONS DE LA TECHNOLOGIE RFID

I.9.1 L'INDUSTRIE AUTOMOBILE

Une automobile est le parfait exemple d'un produit d'assemblage complexe. Le nombre d'étapes, le nombre de pièces est gigantesque. Autant avoir une traçabilité précise du flux de marchandises. Les constructeurs automobiles font donc appel aux solutions d'identification pour différentes tâches lors de la production.

Pour l'identification des carrosseries, par exemple, le transpondeur UHF est suspendu dans le passage de roue ce qui permet d'identifier clairement le véhicule. Il est toujours possible de lire le transpondeur, même sur de grandes distances. Un MES (Manufacturing Execution System) tient à disposition les informations produites souhaitées pour chaque étape de fabrication grâce au numéro d'identification de véhicule sur le transpondeur. Il est également possible de les lire directement [18].

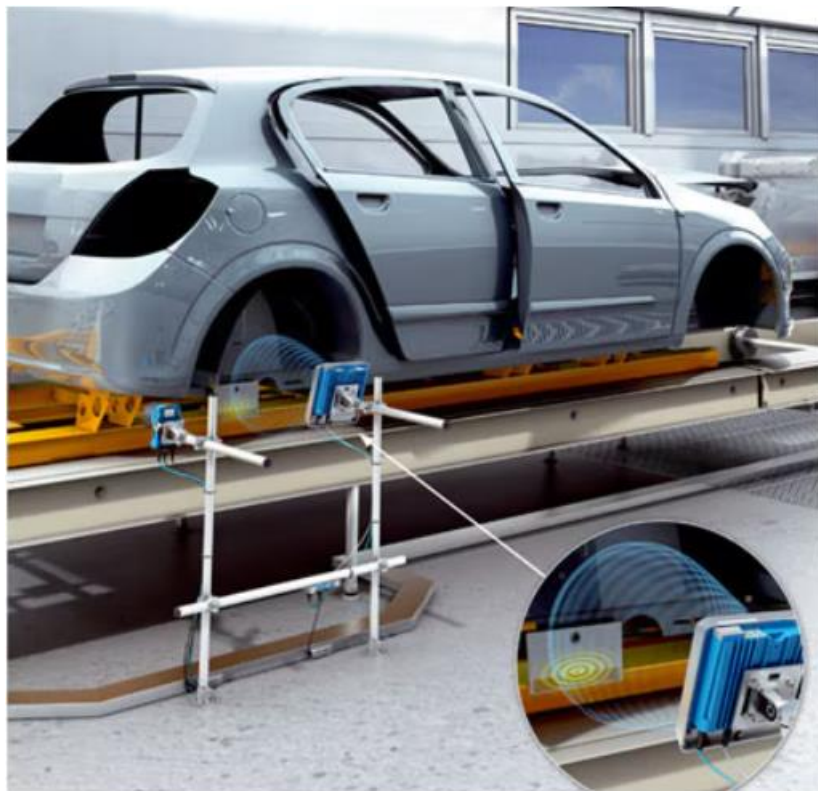


Figure I. 11: L'industrie automobile

I.9.2 AÉROPORT ET SUIVI DES BAGAGES

La technologie RFID est utilisée pour l'identification des bagages au moyen des étiquettes dites hybrides. Il s'agit de l'habituelle « étiquette en papier avec code-barres imprimé » et d'un transpondeur RFID intégré à l'étiquette. Pendant l'enregistrement des bagages, un appareil de lecture/écriture RFID qui écrit et lit automatiquement le transpondeur RFID. Le bagage est donc acheminé automatiquement jusqu'au bon dock pour l'embarquement. Le même processus s'effectue à l'arrivée et restitue la valise au comptoir de reprise des bagages [18].

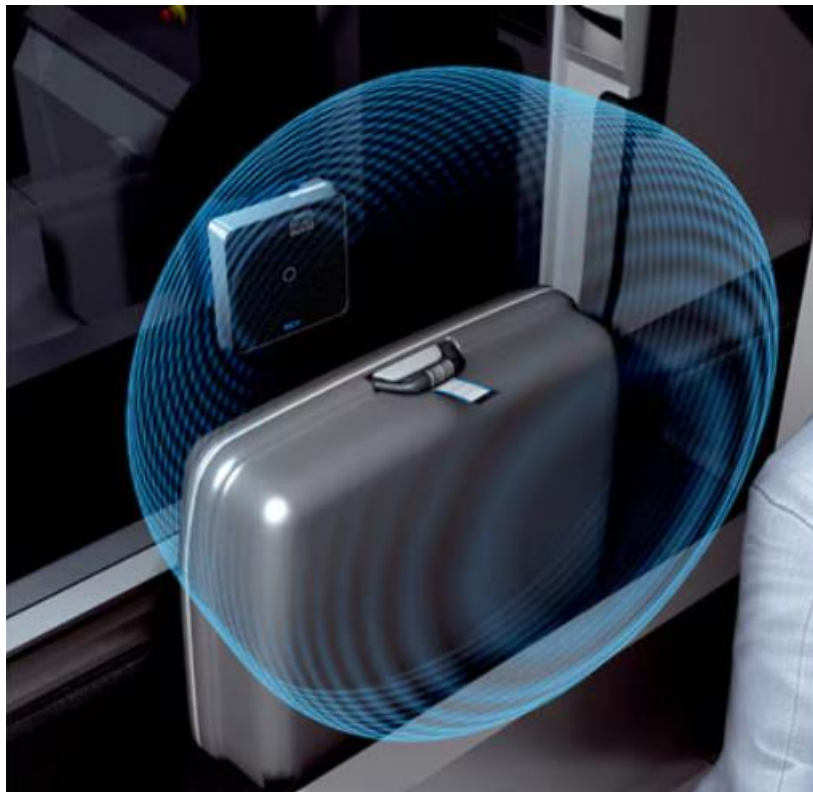


Figure I. 12: Aéroport et suivi des bagages.

I.9.3 LES CHARIOTS DE MANUTENTION EN LOGISTIQUE

Les applications RFID concernant les chariots de manutention ou les véhicules sans conducteur sont également très répandues en logistique. Par exemple, les systèmes d'aide à la conduite assistent les conducteurs de chariots élévateurs à fourche dans les entrepôts où les allées sont étroites, afin qu'ils puissent atteindre rapidement et sans erreur le prochain lieu de stockage. Les transpondeurs RFID sont insérés dans le sol des allées étroites. Robustes, ils ne prennent pas beaucoup de place. Au niveau du chariot, l'appareil de lecture/écriture RFID lit le transpondeur et la commande de véhicule s'arrête automatiquement à la colonne cible du rayon [18].



Figure I. 13: Les chariots de manutention en logistique.

I.9.4 IDENTIFICATION ANIMALE

L'introduction de la RFID pour l'identification animale remonte aux années 80. La technologie est utilisée pour l'inventaire, le contrôle de production et l'automatisation de l'alimentation animale. Les tags sont attachés aux oreilles des animaux ou encore incorporés dans des bagues ou colliers, en fonction du type et de la taille de l'animal. La RFID peut servir à tracer l'origine d'un animal pour réaliser des contrôles de qualité ou de santé, par exemple pour contenir des épidémies. – la plus fameuse étant la maladie de la vache folle ou, plus récemment, la grippe porcine. Une telle utilisation de la RFID nécessite une interopérabilité complète entre les différentes compagnies de production. C'est pour cela que certains standards ont été créés, en particulier l'ISO/IEC 11784 et l'ISO/IEC 11785 qui reposent sur la bande de fréquence LF 134,2 kHz [19].



Figure I. 14: Animal portant un tag RFID accroché à son oreille.

I.9.5 BIBLIOTHEQUE

La RFID facilite le prêt de livres et la gestion des stocks dans les bibliothèques. Elle automatise les procédures d'emprunt/retour des ouvrages et détecte si un livre a été mal replacé sur les étagères. De plus, avec l'installation de portiques aux sorties de la bibliothèque, tout livre dont l'emprunt n'a pas été enregistré peut déclencher une alarme. Les bibliothèques utilisent typiquement la technologie RFID avec la bande de fréquence HF 13,56 MHz basée sur le standard ISO/IEC 15693 [19].



Figure I. 15: système RFID pour une bibliothèque.

I.9.6 PASSEPORT BIOMETRIQUE

Le besoin de mieux contrôler les passagers aux douanes s'est traduit par la mise en circulation du passeport électronique en Europe à partir de mai 2006. La puce RFID du passeport contenait alors toutes les données d'état civil de la première page du passeport, ainsi que la photo d'identité en format numérique. Le 31 octobre 2008, l'émission de passeport électronique a été remplacée par celle des passeports biométriques [20].



Figure I. 16: Passeport biométrique

I.10 AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE RFID

➤ **Lecture rapide et sans contact**

Les étiquettes RFID peuvent être détectées à distance, sans nécessiter de contact direct ou de ligne de vue, ce qui rend la lecture des données bien plus rapide que celle des codes-barres traditionnels.

➤ **Automatisation des opérations**

La RFID permet d'identifier automatiquement les objets, facilitant ainsi les opérations comme les entrées et sorties de stock sans intervention humaine, réduisant le temps et les coûts liés à la gestion manuelle.

➤ **Amélioration de la traçabilité**

Grâce à la RFID, chaque produit peut être suivi avec précision tout au long de son

parcours logistique, offrant une meilleure visibilité et un meilleur contrôle sur la chaîne d'approvisionnement.

➤ **Réduction des erreurs humaines**

En automatisant la collecte des données, la RFID limite les erreurs de saisie manuelle ou de mauvaise lecture, assurant une fiabilité accrue des informations.

➤ **Suivi des stocks en temps réel**

Cette technologie permet de connaître en temps réel l'état des stocks, ce qui optimise la gestion des approvisionnements et réduit les risques de rupture.

➤ **Renforcement de la sécurité**

Le suivi en continu des produits via RFID contribue à prévenir les vols et les pertes, en déclenchant des alertes en cas d'anomalie ou de déplacement non autorisé.

I.11 DEFIS ET LIMITATIONS DE LA TECHNOLOGIE RFID

➤ **Coût d'Implémentation élevé**

La mise en place d'un système RFID, comprenant des lecteurs, des antennes, des étiquettes et des logiciels, peut entraîner des coûts importants, ce qui peut constituer un frein pour les petites et moyennes entreprises.

➤ **Interférences avec certains matériaux**

Les signaux radio utilisés par la RFID peuvent être perturbés par des matériaux comme le métal ou les liquides, ce qui peut nuire à la précision et à la fiabilité des lectures.

➤ **Absence de standardisation**

Le manque d'uniformité des normes et des protocoles entre les différents systèmes RFID rend difficile l'intégration de ces technologies entre différents partenaires commerciaux ou avec des systèmes existants.

➤ **Questions de confidentialité**

Le suivi en temps réel des objets, voire des individus, soulève des préoccupations concernant la protection de la vie privée et l'éventuelle exploitation abusive des données collectées.

➤ **Limitations techniques des étiquettes RFID**

Les étiquettes RFID, en fonction de la fréquence utilisée (LF, HF, UHF), peuvent présenter des limites en termes de portée de lecture ou de capacité de stockage des données, restreignant leur efficacité dans certains cas.

➤ **Vulnérabilités liées à la sécurité des données**

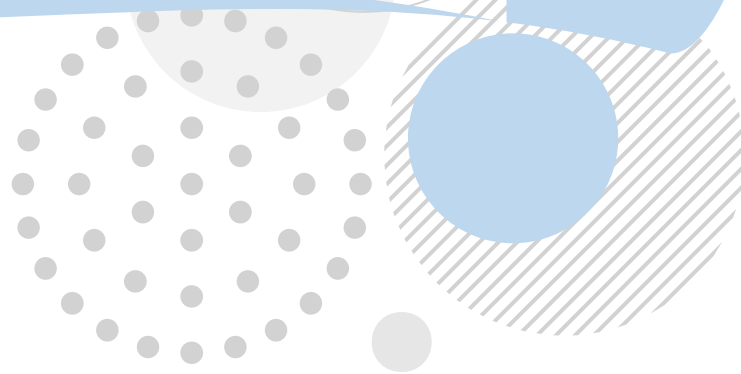
Les systèmes RFID peuvent être exposés à des risques de piratage, comme le clonage, l'interception ou la modification des données, nécessitant ainsi des mesures de sécurité supplémentaires pour protéger les informations sensibles.

I.12 CONCLUSION

La RFID s'affirme comme une technologie clé dans le développement des systèmes d'identification et de gestion automatisée. Son fonctionnement sans contact, sa rapidité d'exécution et sa flexibilité d'intégration en font une solution adaptée aux exigences modernes de performance et de connectivité. Malgré certaines limites techniques ou économiques, son potentiel d'évolution reste important. Elle constitue ainsi une base solide pour les innovations futures dans des domaines variés, allant de la logistique à la santé, en passant par la sécurité et le commerce.

Chapitre II

Techniques d'adaptation et de miniaturisation d'antennes de tag RFID



II.1 PRESENTATION DU CHAPITRE

Ce chapitre traite les antennes utilisées dans les systèmes RFID, en abordant d'abord la définition d'une antenne, puis le principe de fonctionnement qui régit son rôle dans la transmission et la réception des ondes électromagnétiques. Il présente ensuite les paramètres fondamentaux d'une antenne, regroupés en deux grandes catégories : les paramètres de rayonnement et les paramètres de circuit. Le chapitre poursuit avec une description des différents types d'antennes utilisées dans les tags RFID, notamment les antennes IFA (Inverted-F Antenna), les antennes patch, les antennes dipôles imprimés, ainsi que les antennes à fentes imprimées. Il aborde également la modélisation électrique des puces RFID, essentielle pour assurer une bonne compatibilité entre l'antenne et la puce. Une classification des antennes est ensuite proposée, distinguant les antennes omnidirectionnelles, sectorielles et directionnelles (ou directives). Enfin, le chapitre se termine par une présentation des méthodes et techniques d'adaptation et de miniaturisation des antennes de tags RFID UHF passifs.

II.2 INTRODUCTION

Le nom antenne vient de la zoologie, dans laquelle le nom latin antennae désigne les longs et fins palpeurs des insectes [21].

Une antenne est un dispositif conçu pour transmettre ou recevoir des ondes électromagnétiques, généralement dans le cadre de communications sans fil. Elle convertit les signaux électriques en ondes radio (lors de la transmission) ou inversement, elle capte les ondes radio et les transforme en signaux électriques (lors de la réception). Les antennes sont utilisées dans une large gamme de technologies, telles que la radio, la télévision, les télécommunications et, bien sûr, les systèmes RFID [22].

En radioélectricité, une antenne est un dispositif permettant de rayonner (émetteur) ou de capter (récepteur) les ondes électromagnétiques. L'antenne est un conducteur électrique plus ou moins complexe généralement placé dans un endroit dégagé. Il existe des dizaines de types d'antennes, différents par leur fonctionnement, leur géométrie, leur technologie. Par conséquent, le domaine des fréquences qu'elles peuvent recevoir et émettre est lui aussi différent [23].

II.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe de fonctionnement d'une antenne repose sur sa capacité à émettre ou à capter des ondes électromagnétiques. Lors de l'émission, un courant électrique alternatif traverse l'antenne, créant un champ électromagnétique qui se propage dans l'espace sous forme d'ondes radio. Lors de la réception, l'antenne capte ces ondes électromagnétiques et les transforme en un courant électrique alternatif qui peut ensuite être traité par un récepteur pour extraire l'information transportée par l'onde.

Les antennes fonctionnent en fonction de leur conception (longueur, forme, orientation), qui sont adaptées à la fréquence des ondes qu'elles sont destinées à recevoir ou à transmettre. Par exemple, une antenne dipolaire est souvent utilisée pour émettre et recevoir des ondes dans des fréquences spécifiques [24].

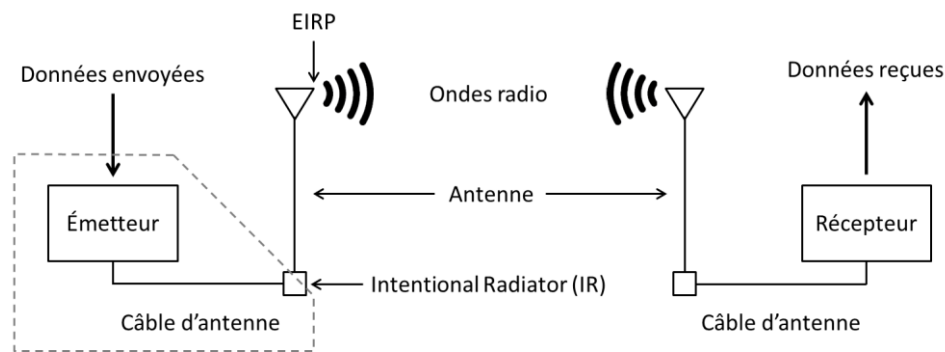


Figure II. 1: Rôle d'une antenne

II.4 PARAMETRES FONDAMENTAUX D'UNE ANTENNE

II.4.1 PARAMETRE DE RAYONNEMENT

II.4.1.1 Définitions des zones de Rayonnement

Peu importe le type d'antenne, les champs produits présentent toujours des variations qui suivent les lois $1/r$, $1/r^2$ et $1/r^3$. Ces variations des champs en fonction de la distance peuvent être interprétées de la manière suivante :

- Les termes en $1/r$ sont associés au rayonnement.
- Les termes en $1/r^2$ pour E sont liés à l'induction.
- Les termes en $1/r^3$ pour E et en $1/r^2$ pour H proviennent de l'électrostatique.

On distingue également trois zones ayant des caractéristiques distinctes pour l'expression des champs. Bien que les limites de ces zones soient peu précises, elles dépendent des dimensions de l'antenne (longueur h_x, y, z) le long de l'axe considéré. En effet, à mesure que les dimensions de l'antenne augmentent, il se produit un déphasage croissant entre les différents points de la structure de l'antenne par rapport à un axe perpendiculaire à l'observation.

a) Zone de Rayleigh (Zone proche)

Dans cette zone de champ proche (ou zone de Rayleigh), il y a échange d'énergie réactive entre l'antenne et le milieu extérieur. A courte distance (par rapport à la longueur d'onde),

$r < \frac{D^2}{2\lambda}$ Densité de puissance est quasi constante [25].

b) Zone de Fresnel (Zone de transition)

Est la région intermédiaire entre la zone proche et la zone lointaine. Dans cette zone, les champs se propagent, mais la distribution des ondes devient plus complexe à prédire, car il existe des effets de diffraction et de réflexion. Les calculs de rayonnement dans cette zone ne sont pas aussi simples que dans la zone lointaine, mais l'onde commence à devenir plus homogène [26].

Dans une seconde zone $\frac{D^2}{2\lambda} < r < \frac{2D^2}{\lambda}$ densité de puissance est fluctuante.

c) Zone de Fraunhofer (Zone lointaine)

Dans la zone de champ lointain (ou de Fraunhofer), à grande distance (par rapport à la longueur d'onde), les champs sont rayonnés sous la forme d'onde (quasiment) plane. Si r est la distance à l'antenne, dans cette zone $r > \frac{2D^2}{\lambda}$ la densité de puissance décroît en $\frac{1}{r^2}$ [25].

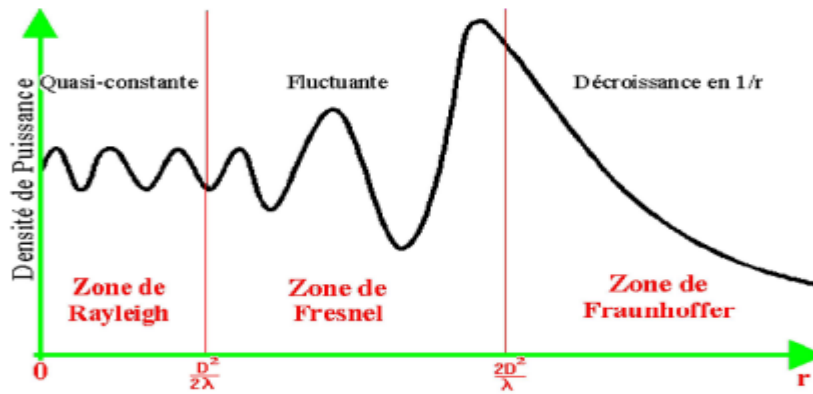


Figure II. 2: Déférents zones de rayonnement

D est le diamètre de la surface équivalente de l'antenne, r la distance de l'antenne. Le rayonnement d'une antenne dépend de ses caractéristiques géométriques et physiques. Les "Paramètres Caractéristiques des Antennes" définissent le rayonnement d'une antenne et permettent la comparaison d'antennes différentes.

II.4.1.2 Diagramme de Rayonnement

Le diagramme de rayonnement illustre les variations de la puissance émise par l'antenne selon les différentes directions de l'espace et met en évidence les orientations où la puissance rayonnée est maximale. On distingue des diagrammes de rayonnement quasi-omnidirectionnels, qui diffusent l'énergie dans toutes les directions, et des diagrammes directifs, où l'énergie est concentrée dans des directions spécifiques. Il est important de noter que l'antenne isotrope, qui rayonne de manière uniforme dans toutes les directions, est une notion théorique et n'existe pas réellement [27].

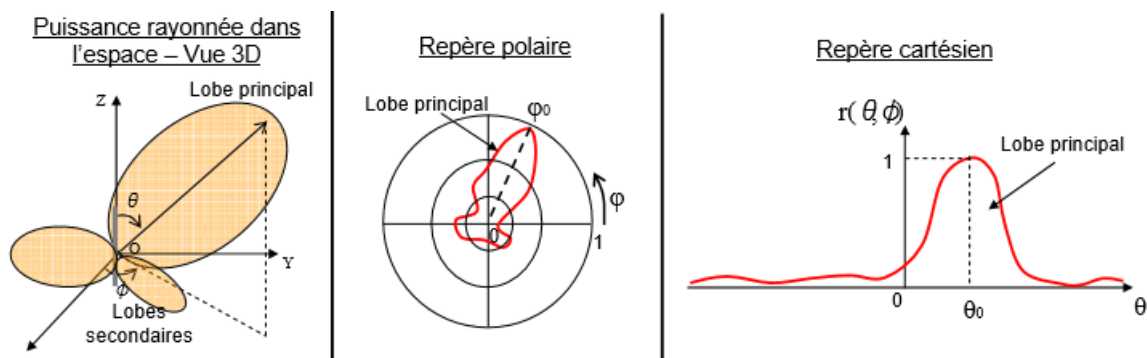


Figure II. 3: Représentation de diagramme de rayonnement d'une antenne.

II.4.1.3 Directivité

La directivité d'une antenne D est définie comme le rapport entre l'intensité maximale rayonnée par l'antenne dans une direction donnée et l'intensité moyenne rayonnée dans toutes les directions (si l'antenne rayonnait uniforme). Cela peut être exprimé par la formule suivante :

$$D = \frac{4\pi \cdot I_{max}}{P_{total}} \quad (II.1)$$

- I_{max} est l'intensité de l'antenne dans la direction de la radiation maximale,
- P_{total} est la puissance totale moyenne rayonnée par l'antenne sur l'ensemble de l'espace.

La directivité est souvent exprimée en décibels (dB) pour indiquer une mesure logarithmique de la concentration de l'énergie [24], et la formule devient alors :

$$D_{dB} = 10 \cdot \log_{10} D \quad (II.2)$$

II.4.1.4 Le gain

Le gain d'une antenne G est défini comme le rapport de l'intensité maximale d'une antenne dans une direction donnée par rapport à l'intensité d'une antenne de référence dans la même direction. Le gain prend en compte la directivité (la concentration de l'énergie) mais aussi l'efficacité de l'antenne à convertir l'énergie en rayonnement [26].

La formule mathématique du gain peut être exprimée de la manière suivante :

$$G = \frac{4\pi \cdot I_{max}}{P_{total}} \quad (II.3)$$

II.4.1.5 Polarisation

La polarisation d'une antenne est définie comme la direction des champs électromagnétiques produits par l'antenne lorsque l'énergie rayonne. Ces champs directionnels déterminent la direction dans laquelle l'énergie s'éloigne ou est reçue par l'antenne. La polarisation est un concept crucial pour la compatibilité entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice, car pour une communication optimale, les deux antennes doivent être polarisées de manière similaire [28].

Il existe plusieurs types de polarisation, parmi lesquels les plus courants sont la polarisation linéaire et la polarisation circulaire

➤ **polarisation linéaire**

La **polarisation linéaire** est le type de polarisation dans lequel le champ électrique de l'onde électromagnétique oscille dans une seule direction, généralement parallèle ou perpendiculaire à la surface de l'antenne.

Dans une antenne à polarisation linéaire, le champ électrique de l'onde émise ou reçue oscille le long d'une ligne droite. Cela signifie que l'orientation du champ électrique reste constante pendant le temps d'oscillation.

□ La polarisation linéaire peut être soit horizontale (lorsque le champ électrique oscille horizontalement) soit verticale (lorsque le champ oscille verticalement).

La polarisation linéaire est la polarisation la plus courante.

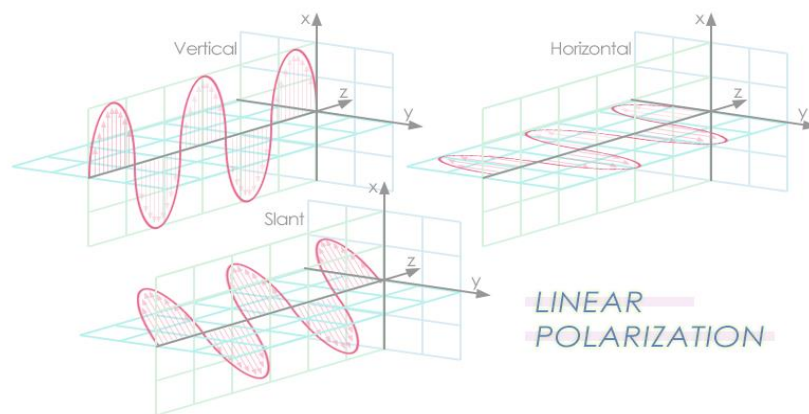


Figure II. 4:Polarisation linéaire.

➤ **Polarisation circulaire**

La polarisation circulaire est un type de polarisation dans lequel le champ électrique de l'onde électromagnétique décrit une trajectoire circulaire autour de la direction de propagation de l'onde. Cela signifie que le vecteur champ électrique effectue une rotation complète dans l'espace pendant la propagation de l'onde.

Dans la polarisation circulaire, le champ électrique tourne autour de la direction de propagation de l'onde, avec une rotation constante dans un sens (horaire ou antihoraire). Cette rotation peut être droite (circularité horaire) ou gauche (circularité antihoraire) [29].

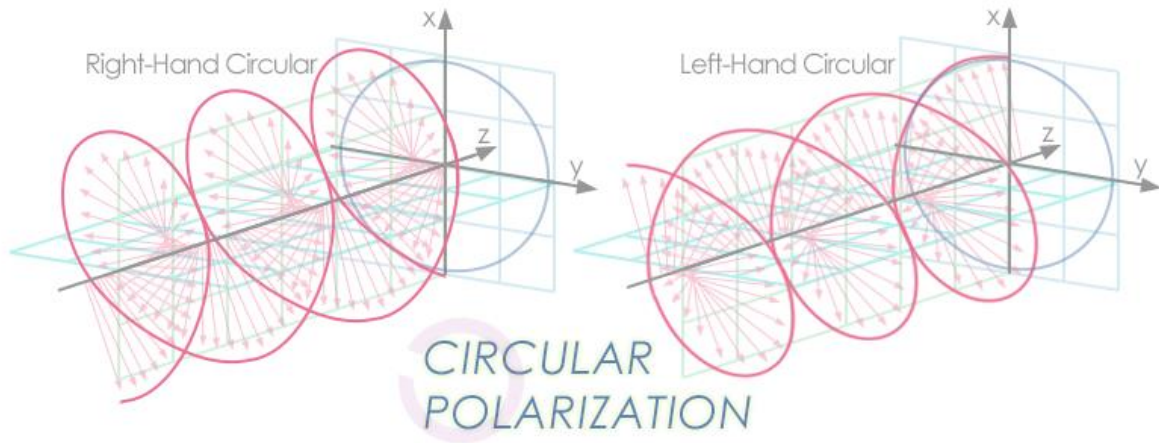


Figure II. 5: Polarisation circulaire.

II.4.1.6 Efficacité De Rayonnement

L'efficacité de rayonnement (η) d'une antenne est le rapport entre la puissance rayonnée utile et la puissance totale qui est fournie à l'antenne. Elle mesure la capacité de l'antenne à transformer l'énergie électrique en énergie rayonnée, en prenant en compte les pertes dans l'antenne [30].

La formule générale de l'efficacité de rayonnement peut être écrite comme suit :

$$\eta = \frac{P_{\text{rayonnée}}}{P_{\text{fourni}}} \quad (\text{II.4})$$

- ✓ Prayonnée est la puissance effective rayonnée par l'antenne,
- ✓ Pfourni est la puissance totale fournie à l'antenne.

II.4.2 PARAMETRE DE CIRCUIT

II.4.2.1 Impédance d'entrée

L'impédance est définie comme la résistance à la circulation du courant dans un élément de circuit et, est mesurée comme rapport de tension V et de courant I

$$Z = \frac{V}{I} \quad (\text{II.5})$$

Une antenne est caractérisée par une impédance d'entrée complexe d'où

$$Z_a = R + jX \quad (\text{II.6})$$

Avec $R = R_r + R_p$ (II.7)

R_r : résistance avec rayonnement.

R_p : résistance avec perte [31].

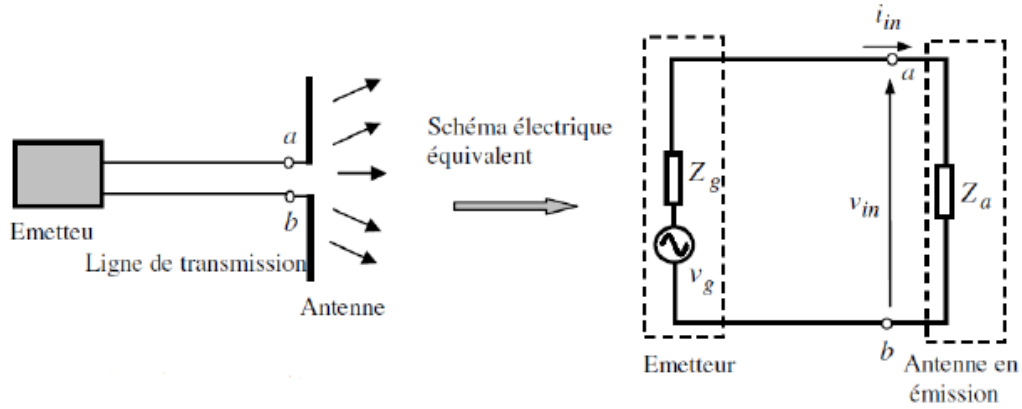


Figure II. 6: Antenne émission et son impédance équivalent.

II.4.2.2 Coefficient de Transmission

Le coefficient de transmission (T) exprime la fraction de la puissance incidente (venant de la ligne de transmission ou du générateur) effectivement transmise à l'antenne, c'est-à-dire utilisée pour rayonner de l'énergie électromagnétique.

Il est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne et à celle de la ligne de transmission.

$$T = 1 - |\Gamma|^2 \quad (II.8)$$

Γ est le **coefficient de réflexion**, donné par :

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (II.9)$$

- ✓ Z_{in} = impédance d'entrée de l'antenne.
- ✓ Z_0 = impédance caractéristique de la ligne (souvent 50 Ω).
- ✓ $|\Gamma|^2$ représente la **fraction de puissance réfléchie**.
- ✓ T est donc compris entre 0 et 1 :
 - $T=1 \rightarrow$ toute la puissance est transmise (adaptation parfaite).
 - $T=0 \rightarrow$ toute la puissance est réfléchie (mauvaise adaptation) [32].

II.4.2.3 Coefficient de Réflexion

Une antenne s'adapte à une ligne de transmission à impédance caractéristique Z_0 réelle (Généralement 50Ω ou 75Ω). Le coefficient de réflexion d'une antenne Γ est défini par l'équation suivante :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (\text{II.10})$$

Z_a , Z_0 sont respectivement l'impédance d'entrée de l'antenne et l'impédance caractéristique de la ligne.

Le coefficient de réflexion est un nombre sans dimension, donc on peut le représenter sous forme de paramètre S en décibel par le coefficient S_{11} toujours de signe négatif [32]:

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

II.4.2.4 facteur de qualité d'antenne

Le facteur de qualité d'une antenne décrit à quel point l'antenne est sélective en fréquence. Il exprime le rapport entre l'énergie stockée dans le champ électromagnétique de l'antenne et l'énergie réellement rayonnée par cycle.

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{Energie stockée}}{\text{Energie dissipée par cycle}} \quad (\text{II.12})$$

- Un Q élevé signifie que l'antenne a une bande passante étroite → elle est très sélective en fréquence (utile pour certaines applications comme la réception de signaux précis).
- Un Q faible indique une large bande passante, donc une antenne plus tolérante aux variations de fréquence (ex. : antennes pour communications à large bande) [33].

II.4.2.5 Bande passante

La bande passante d'une antenne correspond à l'intervalle de fréquences pour lequel ses performances radioélectriques respectent des critères définis par une norme spécifique. La manière de définir cette bande passante varie selon l'application visée.

Dans le cas des applications RFID, la bande passante d'une antenne est définie comme la plage de fréquences pour laquelle au moins 90 % de la puissance incidente est transmise à l'antenne. Cela équivaut à un paramètre S_{11} inférieur ou égal à -10 dB , indiquant un bon niveau d'adaptation d'impédance [33].

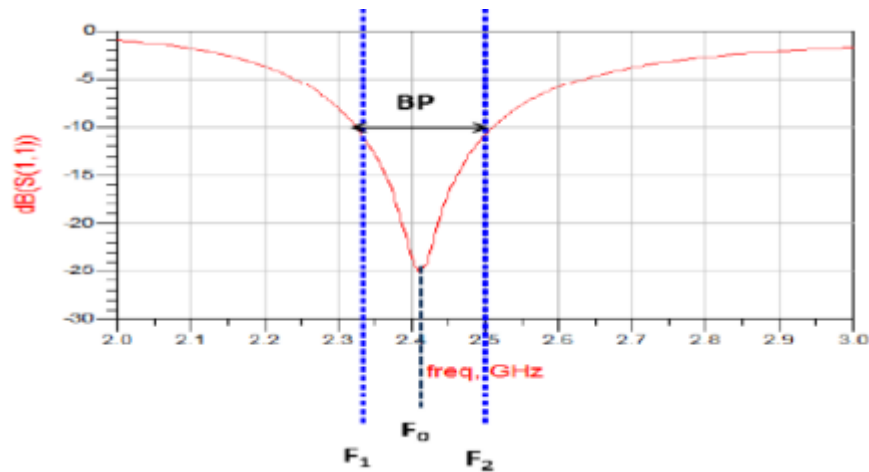


Figure II. 7: Mesure de la bande passante à partir du tracé du coefficient de réflexion.

II.4.2.6 Taux d'Onde Stationnaire (TOS)

Le TOS (Taux d'Onde Stationnaire), appelé aussi VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) en anglais, est défini comme le rapport entre l'amplitude maximale et minimale des ondes stationnaires le long de la ligne de transmission.

Ce rapport est directement lié au coefficient de réflexion complexe de l'antenne. Par conséquent, il constitue un indicateur clé de l'adaptation d'impédance entre l'antenne et la ligne d'alimentation. Un TOS faible signifie une bonne adaptation, tandis qu'un TOS élevé indique des pertes par réflexion plus importantes.

$$TOS = VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (II.13)$$

Plus le TOS se rapproche de 1 ce qui correspond à une absence de réflexion, meilleure est la transmission du signal. En pratique, une antenne est considérée comme correctement adaptée lorsque son TOS est inférieur à 2 à sa fréquence de résonance. Ce seuil équivaut à un coefficient de réflexion S11 de -10 dB [34].

II.4.2.7 Distance de lecture

La distance de lecture d'une antenne RFID correspond à la distance maximale à laquelle un lecteur RFID peut communiquer avec une étiquette (tag) et en obtenir une réponse fiable. Elle dépend de plusieurs facteurs physiques et techniques : (Puissance d'émission du lecteur, Sensibilité de l'étiquette (tag), Gain de l'antenne, Fréquence utilisée ...)

Dans le cas des systèmes **UHF RFID** (champ lointain), une approximation de la distance de lecture d peut être donnée par une adaptation de la formule de Friis [35]:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{P_{min}}} \quad (\text{II.14})$$

- ✓ λ : longueur d'onde.
- ✓ P_t : puissance transmise.
- ✓ G_t, G_r : gains des antennes du lecteur et du tag.
- ✓ P_{min} : puissance minimale requise pour activer le tag.

II.5 ANTENNES DE TAG RFID

Dans cette section, nous allons présenter quelques types d'antennes couramment utilisées pour les tags RFID. Le choix de l'antenne dépend principalement de l'application visée, car il n'existe pas de modèle universel adapté à toutes les situations. C'est donc l'usage prévu qui détermine les caractéristiques nécessaires à l'antenne. Par exemple, les antennes patch et les antennes de type F inversé sont particulièrement bien adaptées aux environnements contenant des surfaces métalliques.

Dans la littérature, plusieurs configurations d'antennes ont été développées pour les tags RFID passifs en bande UHF. Parmi les plus répandues, on retrouve les quatre types suivants :

- Les antennes IFA (Inverted-F Antenna).
- Les antennes patch.
- Les antennes dipôles (imprimés).
- Les antennes à fentes imprimées [34].

II.5.1 Les Antennes IFA

L'antenne IFA, ou antenne en F inversé, est très utilisée dans les tags RFID compacts, notamment en ultra haute fréquence (UHF). Elle tire son nom de sa forme qui ressemble à un "F" retourné. Les antennes miniatures, dont la longueur est généralement de l'ordre de $\lambda/4$. Elles ont l'avantage d'offrir un rayonnement quasi-isotrope, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications où l'orientation du tag par rapport au lecteur RFID est variable ou difficile à contrôler [33].

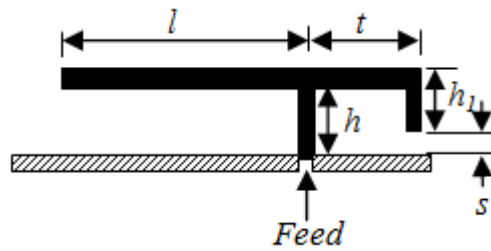


Figure II. 8: représentation d'antenne IFA.

L'antenne IFA peut se décliner sous différentes géométries:

1. La première est l'antenne IFA classique, de type filaire, composée de conducteurs minces.
2. Ensuite, on retrouve l'antenne IFA planaire (PIFA – Planar Inverted-F Antenna), qui est une version modifiée de l'antenne IFA filaire, dans laquelle les fils sont remplacés par des bandes conductrices plus larges. Cette modification permet d'élargir la bande passante de l'antenne. Ce type d'antenne, souvent fabriqué par emboutissage, est particulièrement utilisé dans les téléphones portables.
3. Enfin, l'antenne IFA coplanaire (Coplanar IFA) présente une géométrie dans laquelle l'élément rayonnant en forme de F inversé et le plan de masse se trouvent sur la même couche du substrat. Cette configuration vise à simplifier le processus de fabrication ainsi que la connexion avec la puce RFID. La structure résultante peut être assimilée à un dipôle asymétrique, dont les deux bras sont représentés par le F inversés et le plan de masse, avec une taille d'environ un quart de la longueur d'onde [33].

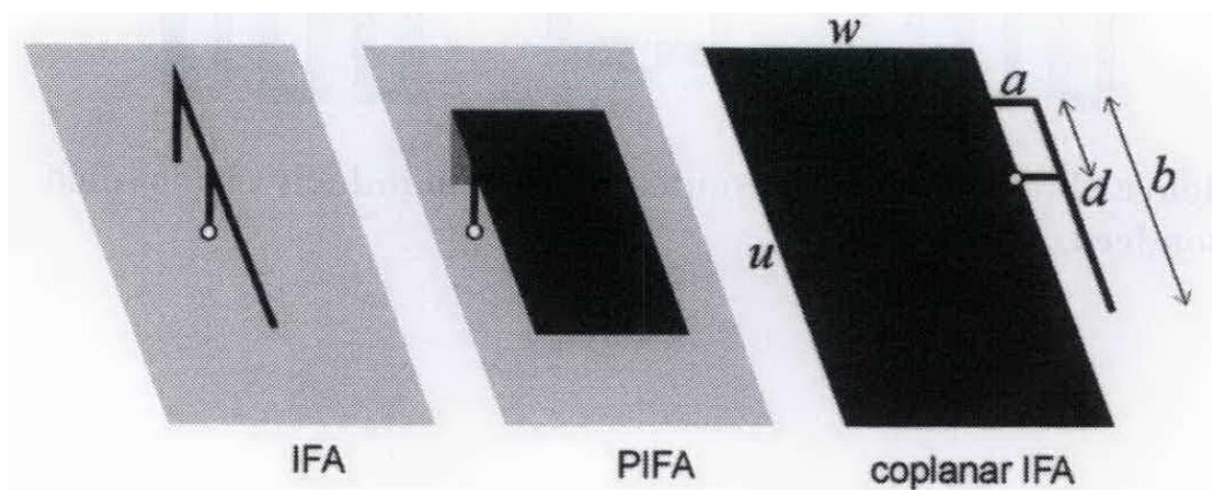


Figure II. 9: Différentes configurations d'antennes IFA.

II.5.2 Antenne Patch

Une antenne patch consiste en un élément métallique de forme quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, dipôle,...etc.) déposé sur la surface d'un substrat diélectrique qui présente sur l'autre face un plan conducteur (plan de masse).

- Une antenne patch rectangulaire est l'antenne la plus courante;
- Les antennes microruban ou patch deviennent de plus en plus utiles car elles peuvent être imprimées directement sur une carte de circuit imprimé.
- Elles sont de plus en plus répandues sur le marché de la téléphonie mobile.
- Elles sont peu coûteuses.
- Elles ont un profil bas et sont faciles à fabriquer [27].

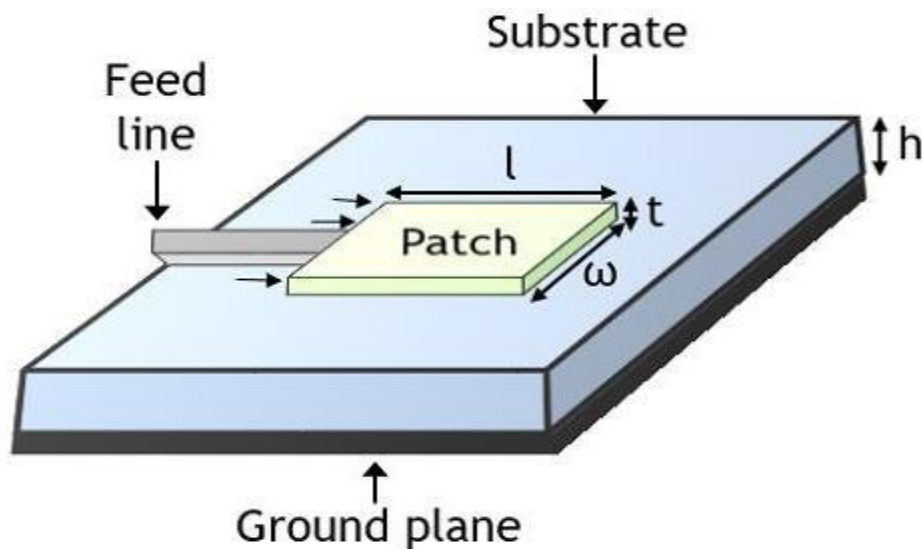


Figure II. 10: Géométrie d'antenne patch.

Ce type d'antenne peut être analysé à l'aide de plusieurs approches. Les méthodes les plus couramment utilisées sont :

- le modèle de la ligne de transmission.
- le modèle de la cavité.
- le modèle électromagnétique, qui repose sur l'utilisation des équations intégrales et de la méthode des moments.

❖ Il existe plusieurs techniques permettant d'alimenter une antenne patch. Pour garantir de bonnes performances, le choix de l'alimentation doit prendre en compte certains aspects pratiques, notamment l'adaptation d'impédance, la réduction des pertes d'insertion, ainsi que la minimisation des discontinuités pouvant entraîner un rayonnement indésirable.

Parmi les méthodes d'alimentation les plus couramment utilisées on retrouve :

- l'alimentation par ligne micro-ruban.
- l'alimentation par connecteur coaxial.
- l'alimentation par couplage électromagnétique [27].

II.5.3 Antenne Dipôles

Les antennes dipôles sont largement utilisées dans la technologie RFID en raison de leur sensibilité à la polarisation linéaire et de leur diagramme de rayonnement omnidirectionnel, ce qui les rend efficaces pour des communications dans toutes les directions autour de l'antenne.

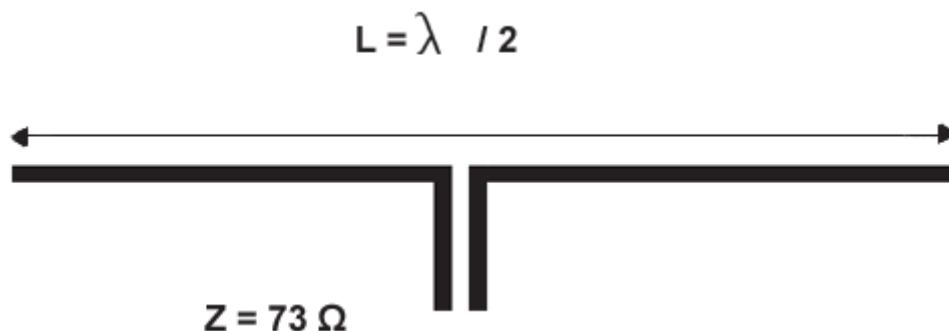


Figure II. 11: Antenne dipôles.

Le dipôle imprimé, quant à lui, est une antenne monocouche constituée de deux bras conducteurs orientés dans des directions opposées, gravés sur un substrat diélectrique. Sa longueur totale correspond généralement à une demi-longueur d'onde, bien qu'elle puisse être réduite à l'aide de techniques de miniaturisation. L'alimentation est appliquée au centre, entre les deux branches [33].

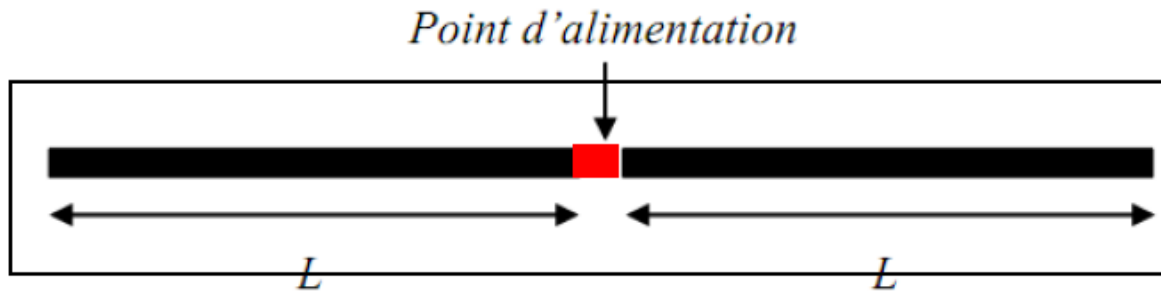


Figure II. 12: Géométrie de base d'une antenne dipôle.

Dans les systèmes RFID, on utilise souvent un dipôle imprimé, c'est-à-dire gravé sur un substrat diélectrique (comme une carte électronique).

- Monocouche, il est facile à fabriquer.
- Sa longueur totale est généralement d'une demi-longueur d'onde ($\lambda/2$) à la fréquence de fonctionnement, bien qu'il puisse être miniaturisé (en le repliant, en le méandrant, etc.).
- Le point d'alimentation est placé au centre, entre les deux bras [36].

➤ **Avantages de l'antenne dipôle en RFID**

- **Rayonnement omnidirectionnel** : elle émet dans toutes les directions dans le plan perpendiculaire à son axe.
- **Polarisation linéaire** : ce qui permet une meilleure compatibilité avec les lecteurs RFID de même polarisation.
- **Conception simple et économique** : facile à fabriquer et à intégrer sur des étiquettes ou circuits imprimés.
- **Bonne efficacité** : même avec une faible puissance dans les tags passifs.

II.5.4 Les antennes à fentes (imprimées)

Un autre type d'antenne utilisé en technologie RFID est l'antenne à fente. Elle se distingue par sa large bande passante et sa facilité d'intégration aux circuits électroniques, ce qui en simplifie la fabrication.

Les antennes à fente imprimées comportent une ouverture, théoriquement de forme quelconque, réalisée dans le plan de masse et reliée au substrat. Il s'agit d'antennes monocouches. Elles sont souvent considérées comme les structures duales des antennes dipôles.

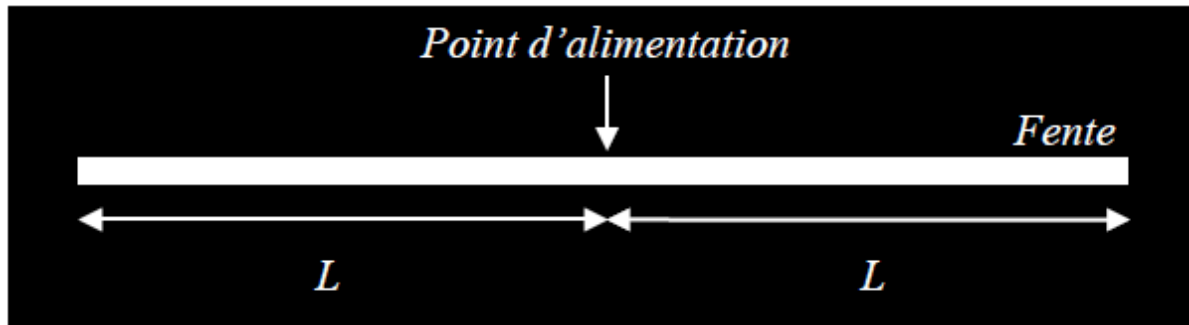


Figure II. 13: Géométrie de base d'une antenne à fente.

Les antennes à fente sont généralement moins appréciées que les antennes dipôles en raison de la quantité importante de matériau conducteur qu'elles nécessitent, ce qui entraîne un coût plus élevé.

II.6 MODELISATION ELECTRIQUE DES PUCES RFID

La connaissance de la valeur de l'impédance d'entrée de l'antenne est primordiale lors de la conception des antennes RFID. Cette valeur devra être forcément égale au conjugué de la valeur de l'impédance de la puce, afin de pouvoir transmettre un maximum de puissance à la puce pour l'activer. L'impédance d'entrée Z_c des puces RFID UHF est à valeur complexe, leur partie réelle est comprise entre quelques ohms et plusieurs centaines d'ohms. Leur partie imaginaire est négative à cause de l'effet capacitif en entrée du redresseur qui assure la récupération d'énergie pour l'alimentation de la puce RFID [12].

Un modèle électrique équivalent de l'impédance d'entrée peut être modélisé par une résistance et une capacité, soit en parallèle par R_p et C_p (figure II.14.a) soit en série par R_s et C_s (figure II.14.b).

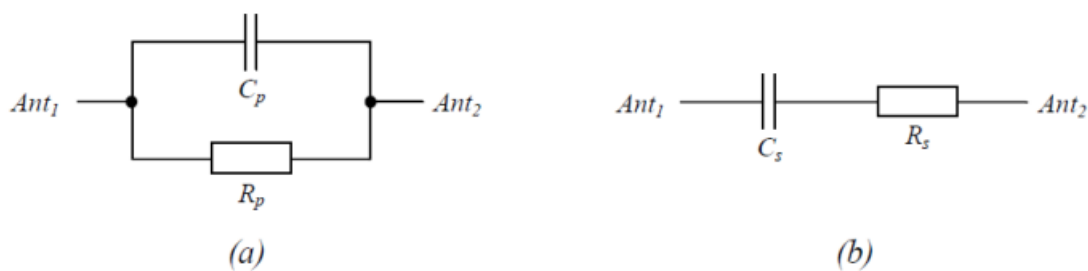


Figure II. 14: Modèle équivalent de l'impédance d'entrée des puces RFID UHF. (a) Circuit parallèle. (b) Circuit série.

Les deux modèles présentés sont équivalents. Les fabricants des puces RFID fournissent généralement soit l'impédance Z_c , l'admittance Y_c ou les valeurs des éléments d'un des deux modèles de la figure 2.16. Les équations (II.16) et (II.18) permettent d'obtenir la valeur de ces éléments en fonction de l'impédance d'entrée Z_c .

$$R_p = \frac{\text{Re}(Z_c)^2 \text{Im}(Z_c)^2}{\text{Re}(Z_c)} \quad (\text{II.15}) \quad \text{et} \quad C_p = \frac{\text{Im}(Z_c)}{2\pi.f.(\text{Re}(Z_c)^2 + \text{Im}(Z_c)^2)} \quad (\text{II.16})$$

$$R_s = \text{Re}(Z_c) \quad (\text{II.17}) \quad \text{et} \quad C_p = \frac{1}{2\pi.f.\text{Im}(Z_c)} \quad (\text{II.18})$$

Ces valeurs doivent être prises en considération lors de la simulation électromagnétique de la structure de l'antenne [12].

II.7 CLASSIFICATION DES ANTENNES

Nous pouvons classer des antennes selon leur type d'utilisation dans trois différentes catégories.

II.7.1 ANTENNES OMNIDIRECTIONNELLES

Les antennes omnidirectionnelles émettent un rayonnement uniforme à 360 degrés dans le plan horizontal. Elles sont généralement utilisées comme nœuds centraux ou points de concentration dans un réseau. Leur champ électromagnétique est polarisé verticalement, et elles sont souvent associées à des points d'accès pour établir des connexions de type Point à Multi-Point.

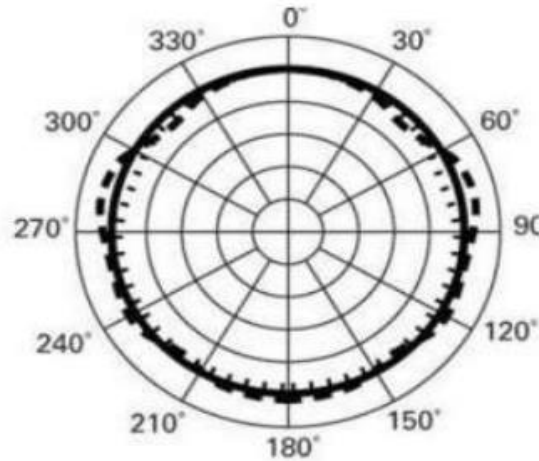


Figure II. 15: Diagramme de rayonnement d'une antenne omnidirectionnelle Isotrope.

II.7.2 ANTENNES SECTORIELLES

Les antennes sectorielles sont conçues pour offrir un gain plus élevé que les antennes omnidirectionnelles, tout en couvrant un angle limité de l'azimut, généralement compris entre 60° et 120°. Selon leur conception, elles peuvent être polarisées soit verticalement, soit horizontalement.

Tout comme les antennes omnidirectionnelles, elles sont souvent utilisées avec des points d'accès pour établir des liaisons de type Point à Multi-Point (PTMP).

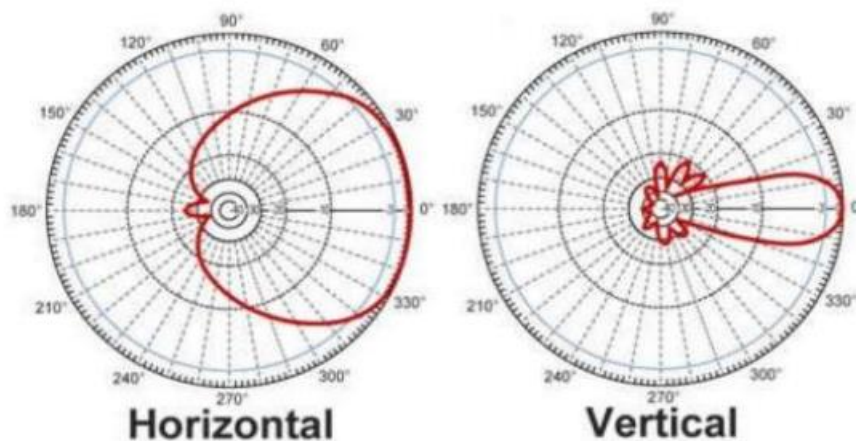


Figure II. 16: Diagramme de rayonnement d'une antenne sectoriel.

II.7.3 ANTENNES DIRECTIONNELLES (DIRECTIVES)

Les antennes directionnelles, aussi appelées directives, possèdent un gain élevé et sont orientées spécifiquement vers le point d'accès. Elles se caractérisent par un angle d'ouverture étroit, ce qui permet de concentrer le signal dans une direction précise. Ces antennes sont principalement utilisées pour établir des liaisons point à point sur de longues distances.

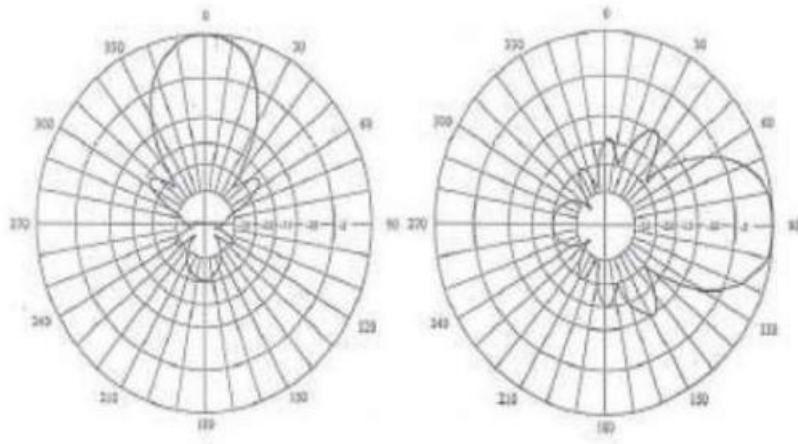


Figure II. 17: Diagramme de rayonnement d'une antenne Directionnelle.

II.8 TECHNIQUES D'ADAPTATION D'IMPEDANCE DES ANTENNES DE TAGS RFID UHF PASSIFS

L'adaptation d'impédance entre l'antenne et la puce représente le facteur clef dans la conception d'antenne RFID. L'impédance de la puce ($Z_{\text{chip}} = R_{\text{chip}} + jX_{\text{chip}}$) dépend de la fréquence. La majorité des puces UHF disponibles présentent une réactance $-100 < X_{\text{chip}} < -600\Omega$, tandis que la partie réelle a un ordre de grandeur plus petite que la partie imaginaire. L'impédance d'antenne devrait être inductive afin de réaliser l'adaptation. Les méthodes les plus connues sont l'adaptation par un T, par couplage inductif des boucles magnétiques, par utilisation des fentes, méthode des charges capacitives en bout, méthode qui utilise les paramètres géométriques et les éléments parasites [37].

II.8.1 T-MATCH

Cette technique rend l'adaptation plus facile. Un T-match constitué d'une boucle rectangulaire, et permettant d'adapter facilement l'impédance de l'antenne à celle de la puce, la variation de longueur et de largeur de la ligne de boucle fait varier la résistance et la réactance de l'antenne [9].

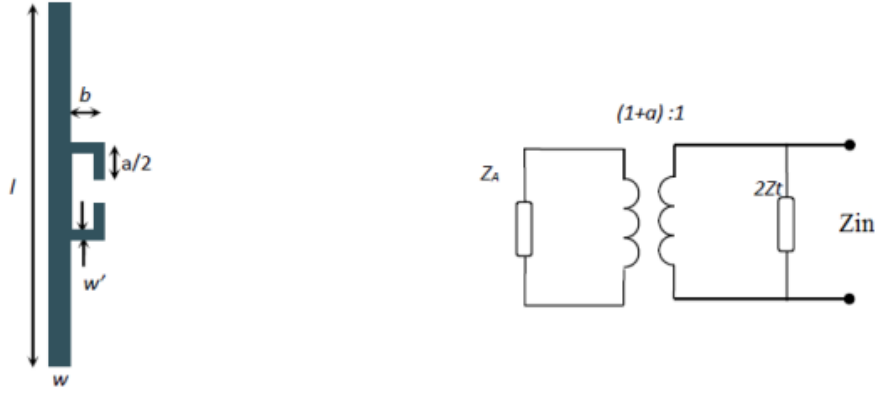


Figure II. 18: Exemple T-match pour un dipôle planaire et leur circuit équivalent.

Dans la figure II.19, l'impédance d'entrée d'un dipôle planaire d'une longueur l peut varier en introduisant un stub court-circuit à son centre. La source de l'antenne est placée au dipôle secondaire d'une longueur $a \leq l$, placée à une distance b du dipôle primaire [9].

L'impédance au point de source donné par :

$$Z_{in} = \frac{2Z_t(1+\alpha)^2 Z_a}{2Z_t + (1+\alpha)^2 Z_a} \quad (\text{II.19})$$

L'impédance de court de circuit formé par les conducteur t-match :

$$Z_t = jZ_0 \tan\left(\frac{ka}{2}\right) \quad (\text{II.20})$$

L'impédance caractéristique des deux lignes transmission espacé avec b :

$$Z_0 \cong 276 \log_{10} \frac{b}{\sqrt{r_{\text{ext}} r_{\text{int}}}} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$Z_t = jZ_0 \tan(ka/2)$: représente l'impédance d'entrée de stub court-circuit ;

$k = 2\pi/\lambda$.

$Z_0 = 276 \times \log(\sqrt{b/r_{\text{ext}}})$: l'impédance caractéristique des deux stubs court-circuit placé à une distance b du dipôle primaire.

Z_a : l'impédance de dipôle à son centre et sans le T.

$r_e = 0.25w$ et $r_{0e} = 8.25w$: les rayons équivalents des dipôles principale et secondaire respectivement [9].

II.8.2 BOUCLE A COUPLAGE INDUCTIF

Le fonctionnement de cette méthode est presque identique à celle méthode précédente (T-match), aussi un dipôle rayonnant peut avoir une excitation à travers d'une petite boucle a couplage inductive, placé à proximité du corps rayonnant où les bornes de la boucle connecté avec la puce. La force du couplage est contrôlée par la distance entre la boucle et le corps rayonnant dont l'adaptation de l'impédance est maitrisée par la variation des dimensions de la boucle. Le couplage inductif peut modéliser comme un transformateur, et l'impédance d'entrée au borne de la boucle est donné par :

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = Z(\text{boucle}) + \frac{(2\pi \cdot f \cdot M)^2}{Z_a} \quad (\text{II.22})$$

Où l'impédance de la boucle est :

$$Z(\text{boucle}) = j2\pi f L(\text{boucle})$$

La réactance totale dépend de l'inductance L :

$$X_{in}(f_0) = 2\pi f_0 L(\text{boucle}) \quad (\text{II.23})$$

Tandis que la résistance est liée :

$$R_{in}(f_0) = \frac{(2\pi f M)^2}{R_a(f_0)} \quad (\text{II.24})$$

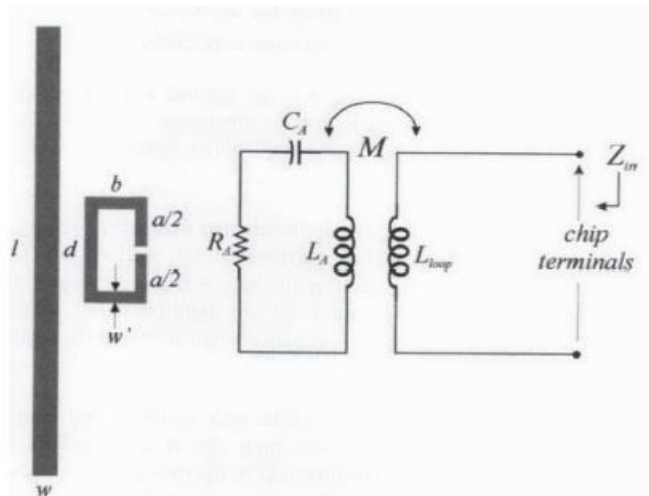


Figure II. 19: Exemple d'une boucle proche au corps rayonnant et leur circuit équivalent.

II.8.3 ADAPTATION PAR INSERTION DE FENTES

À l'aide d'une fente non résonnante, il est possible de générer une réactance inductive, ce qui est favorable pour l'adaptation d'impédance complexe. Le profil de cette fente peut être assimilé à un transformateur d'impédance, chaque discontinuité (ou dent) jouant le rôle d'un élément de stockage d'énergie. En augmentant le nombre de dents, on introduit de nouveaux degrés de liberté, ce qui permet d'améliorer la miniaturisation du système et de concevoir des dispositifs multi bandes. Lorsque la taille de la fente devient comparable à celle du patch conducteur, les caractéristiques de rayonnement dépendent conjointement des deux structures. Plus précisément, le gain maximal de l'antenne est principalement déterminé par la longueur l du côté du patch, tandis que l'adaptation d'impédance peut être ajustée en modifiant l'allongement de la fente ainsi que ses dimensions a et b [38].

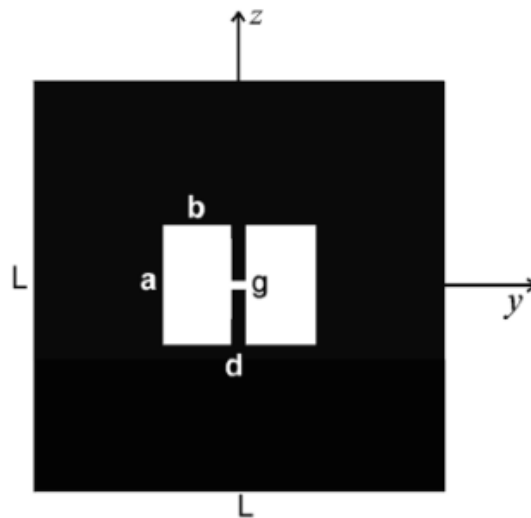


Figure II. 20: Exemple géométrie d'un patch avec emplacement imbriqué (Nested-slot)

II.8.4 ADAPTATION PAR CHARGES CAPACITIVES AUX EXTREMITES

L'ajout de charges capacitatives aux extrémités du dipôle constitue une méthode efficace pour adapter l'impédance de l'antenne à celle de la puce. Cette technique permet également de réduire la taille globale de l'antenne dipôle en formant des structures élargies à ses extrémités, tout en maintenant de bonnes performances de rayonnement.

En conséquence, une grande quantité de charges se réunira à l'extrémité chargée du dipôle, ce qui augmente la capacité de l'antenne et par conséquent sa réactance capacitive diminue. Donc, un dipôle chargé à ces extrémités ressemble plus inductif qu'un dipôle classique de même longueur ce qui facilite l'adaptation [38].

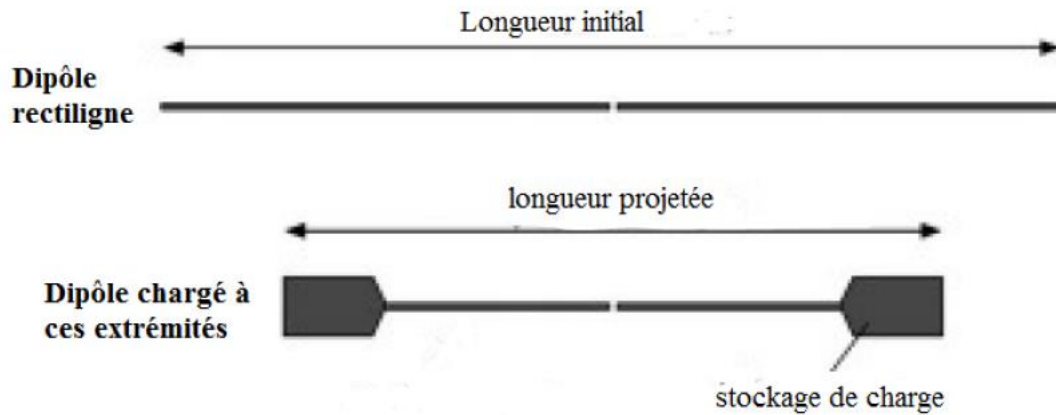


Figure II. 21: Adaptation par charges capacitatives aux extrémités.

II.8.5 ADAPTATION D'UNE ANTENNE DIPOLE PAR UNE INDUCTANCE SERIE (UTILISATION DES MEANDRES)

Le dipôle replié peut être analysé en décomposant la tension appliquée en parties différentielle et commune. La partie différentielle lorsque les deux fils reçoivent des tensions opposées, et la partie commune, lorsque les segments à gauche et à droite reçoivent la même tension (Figure II.23). Les tensions différentielles se propagent le long de ce qui ressemble à une ligne de transmission bifilaire; puisque le courant sur le fil à gauche est toujours égal en grandeur et en direction opposée à celui sur le fil de droite. Le rayonnement de ces courants s'annule et donc la ligne de transmission n'a aucune résistance de radiation associée à cela. Dans le cas particulier où chaque bras de l'antenne est un quart de la longueur d'onde, les segments de ligne de transmission transforment le court-circuit à leur bout dans en circuit ouvert, pour que la tension de ligne de transmission ne génère aucun courant du tout.

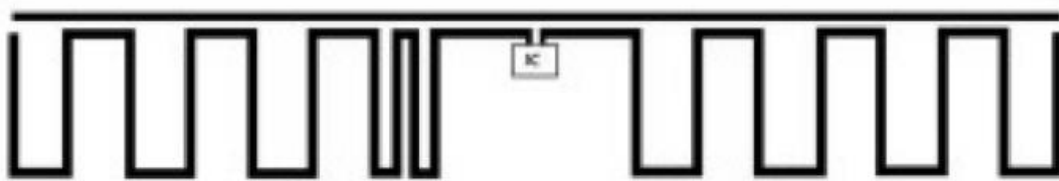


Figure II. 22: Adaptation par utilisation des méandres.

II.9 TECHNIQUES DE MINIATURISATION DES ANTENNES

II.9.1 DIPOLE MEANDRE

Les antennes à méandres représentent une catégorie particulièrement intéressante d'antennes résonantes. Elles ont fait l'objet de nombreuses études dans le but de diminuer la taille physique des éléments rayonnants dans les antennes filaires, telles que les antennes unipolaires, les dipôles et les dipôles repliés.

En augmentant la longueur totale du conducteur, tout en maintenant une longueur axiale fixe, on parvient à abaisser la fréquence de résonance de l'antenne. Cette approche est notamment exploitée dans les dispositifs d'identification par radiofréquence (RFID), où la miniaturisation de l'antenne constitue une exigence essentielle de conception. Pour cela, des sections sinueuses sont intégrées à la structure d'un dipôle classique afin d'en réduire l'encombrement physique, comme illustré dans la Figure II.23 [39].

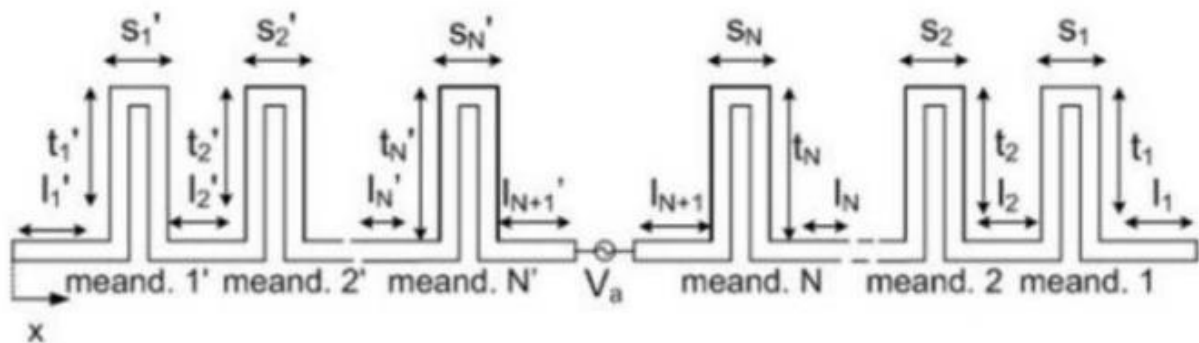


Figure II. 23: Géométrie d'une MDA symétrique comprenant 2N méandres.

Des résonances sont atteintes à des fréquences inférieures par rapport aux dipôles droites. En outre, la bande passante est réduite avec un faible rendement [40].

➤ Exemple d'une structure sinueuse

Les différentes structures sinueuses sont : [41]

- A) Une antenne à ligne de méandres équidistante ($f = 953$ MHz [40]) avec alimentation en match-T : dans ce type, le corps rayonnant est plié par un nombre égal de plis espacés à la même distance.

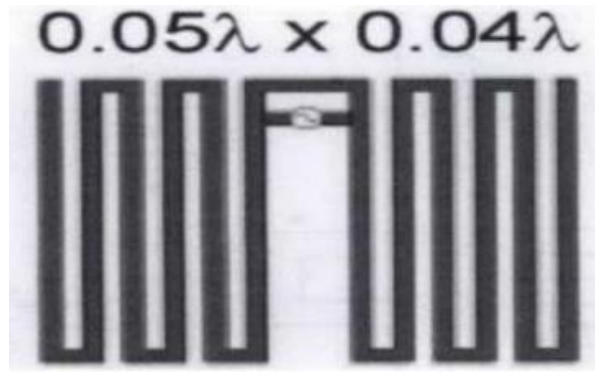


Figure II. 24: Antenne à méandre équidistante.

B) Antenne à ligne de méandre ($f = 915 \text{ MHz}$ [381]) avec alimentation de boucle à couplage inductif.

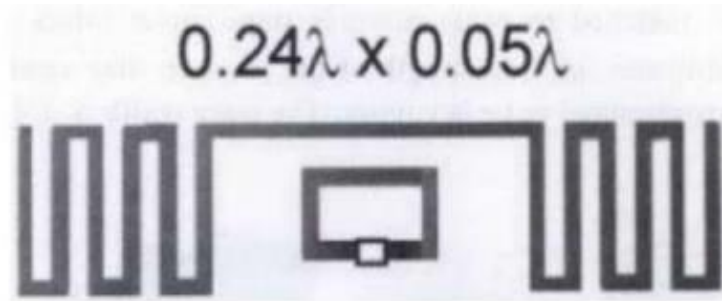


Figure II. 25: Antenne à ligne de méandre avec alimentation en boucle à couplage inductif.

II.9.2 CONFIGURATION F-INVERTED

L'antenne IFA (Inverted-F Antenna) est une variante de l'antenne monopole, où la section supérieure a été pliée vers le bas pour réduire la hauteur de l'antenne tout en conservant une longueur nécessaire pour créer la résonance. Ces antennes sont normalement imprimées sur un substrat diélectrique [42].

Son principe de fonctionnement consiste à établir un mode de résonance quart d'onde. Pour forcer l'établissement de ce mode, on impose une condition de circuit ouvert à l'une des extrémités de la ligne et une condition de court-circuit à l'autre extrémité. Il reste alors à exciter le mode en un point d'impédance adaptée à la source d'alimentation.

Les paramètres basiques prépondérants pour la conception d'une antenne IFA sont : La longueur L , la hauteur H (Figure II.26) et l'épaisseur 1 du bras de l'antenne et L'écart S qui est utilisé pour optimiser l'adaptation [42].

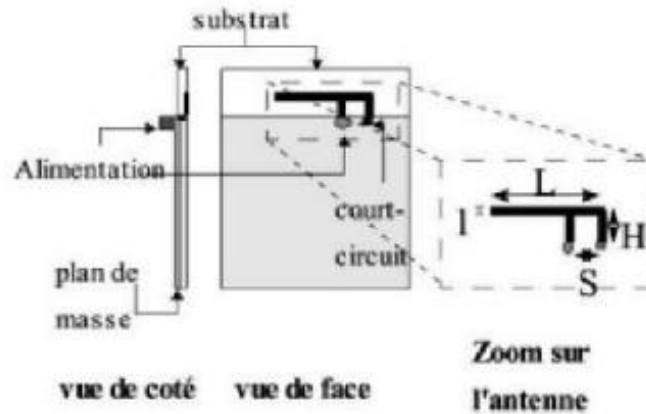


Figure II. 26: Structure de l'antenne IFA.

Une structure similaire est l'antenne PIFA (Planar Inverted F-Antenna en anglais). Contrairement à l'antenne IFA, le fil horizontal est remplacé par un plan rectangulaire avec un fil ou une plaque pour réaliser le court-circuit, comme le montre la Figure II.27 [42].

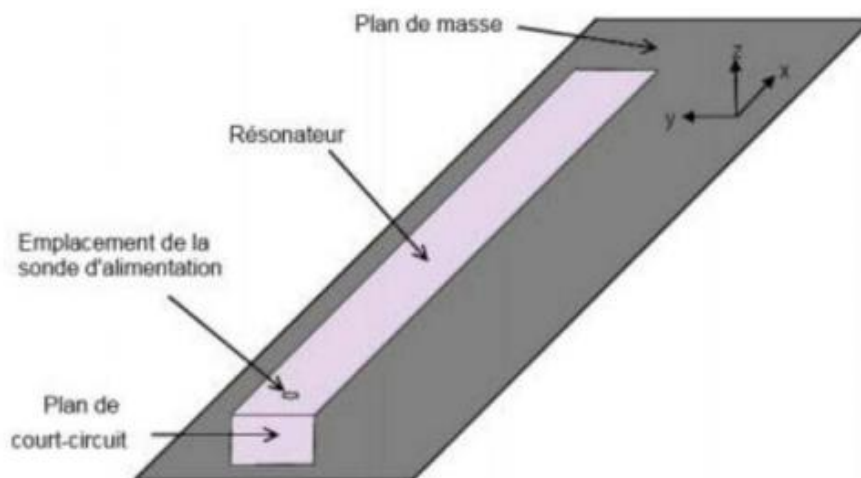


Figure II. 27: Antenne PIFA élémentaire.

L'inconvénient majeur de ces antennes est leurs bandes passantes étroites et le caractère difficilement maîtrisable de la polarisation des ondes et du rayonnement. De plus, les antennes PIFA sont complexes et leur configuration volumique rend leur fabrication normalement difficile et coûteuse [42].

II.9.3 METHODE A GEOMETRIE FRACTALE

Les géométries fractales ont permis de comprendre les formes d'objets naturels tels que, les feuilles ou encore les flocons de neige. Elles présentent la particularité de réduire l'espace occupé en une, deux ou trois dimensions. D'où l'intérêt pour la géométrie fractale dans la conception d'antenne, elle peut aussi réaliser la multifréquence et la réduction de la taille de l'antenne. Diverses géométries fractales sont explorées pour des antennes avec des caractéristiques spéciales telles que Sierpinsky unipolaire, courbe de koch unipolaire, et courbe de Hilbert.

Ces formes fractales, générées d'une façon itérative, peuvent être déterministes ou aléatoires :

- *Déterministe* : si les paramètres de la fractale sont gardés constants à chaque itération.
- *Aléatoire* : si un de ces paramètres change d'une façon aléatoire le long de l'opération de génération. Ces derniers sont les plus utilisées dans la pratique, et peuvent servir à décrire de nombreux objets extrêmement irréguliers du monde réel (les montagnes, les lignes des côtes, les nuages...).

Les antennes fractales présentent la particularité de réduire l'espace occupé en une, deux ou trois dimensions, d'où l'intérêt pour la géométrie fractale dans la conception d'antenne. Les géométries fractales peuvent être décrits et générés en utilisant un processus itératif qui conduit à des structures auto-similaire comme illustre la figure III.28 [26].

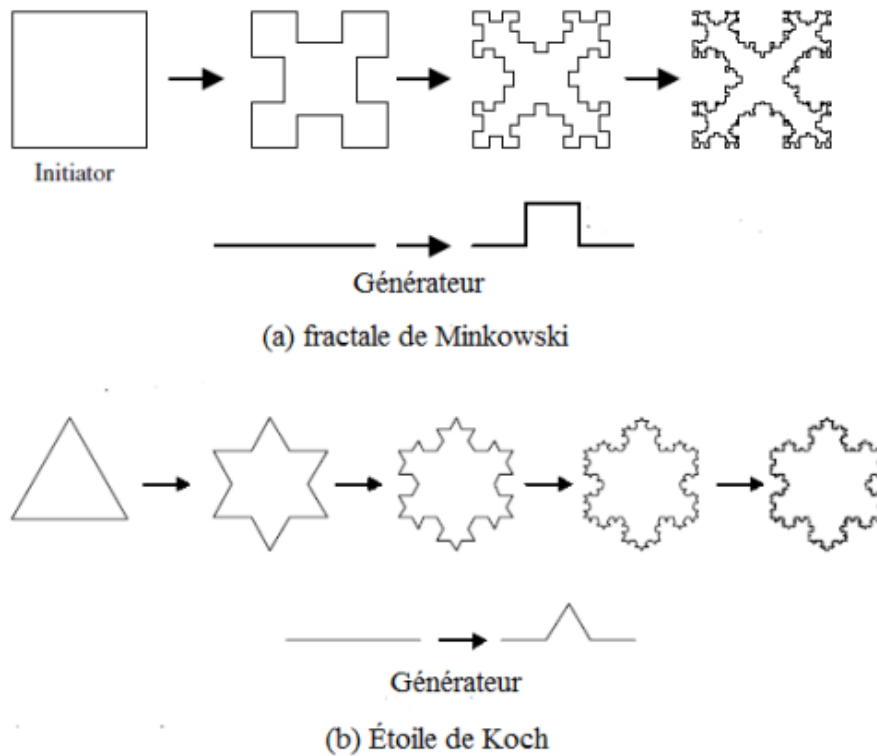


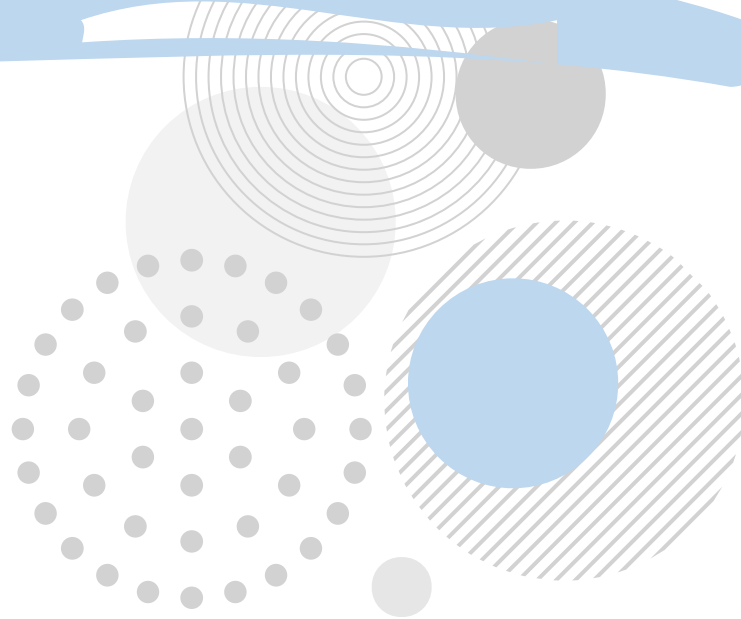
Figure II. 28: Processus de génération itérative des fractales.

II.10 CONCLUSION

De manière générale, la compréhension des antennes dans le contexte RFID constitue un élément fondamental pour assurer la performance, la fiabilité et l'efficacité des systèmes de communication sans fil. Leur conception doit répondre à des contraintes techniques précises, tant sur le plan électromagnétique qu'électrique, tout en s'adaptant aux environnements d'utilisation. Une maîtrise approfondie des principes physiques et des méthodes d'adaptation permet ainsi de développer des solutions RFID optimisées, capables de répondre aux exigences croissantes des applications modernes en matière de traçabilité, d'identification et de connectivité.

Chapitre III

Conception et résultats de simulation



III.1 INTRODUCTION ET PRESENTATION DU CHAPITRE

Ce chapitre présente la méthodologie de conception d'antennes pour les tags RFID UHF passifs, en mettant particulièrement l'accent sur les techniques de miniaturisation tout en garantissant une efficacité optimale. Nous introduirons également le logiciel CST Microwave Studio, un outil essentiel pour la conception, la simulation et l'optimisation des antennes. Grâce à cet environnement de simulation électromagnétique 3D, il est possible d'affiner précisément les paramètres des antennes et d'analyser leurs performances.

La conception des antennes RFID dans la bande UHF s'appuie principalement sur l'utilisation de structures fractales de Hilbert, qui permettent de réduire la taille des antennes tout en améliorant leurs caractéristiques électromagnétiques. L'objectif est également d'assurer une adaptation optimale avec les puces RFID couramment utilisées sur le marché, notamment la puce Alien Higgs 3. Ce chapitre inclut une étude paramétrique détaillée ainsi que les résultats des simulations menées pour évaluer l'efficacité et la performance des antennes conçues.

Enfin, la méthodologie de conception est exposée à travers un organigramme clair, décrivant les étapes clés depuis la définition des exigences jusqu'à la validation expérimentale des antennes, en insistant sur l'importance de l'optimisation itérative pour répondre aux besoins spécifiques des applications RFID.

III.2 LA METHODOLOGIE DE CONCEPTION D'ANTENNE DES TAGS RFID UHF PASSIF

La conception d'antenne de tag RFID UHF passif nécessite de mettre en œuvre une méthodologie de développement dont l'organigramme est présenté dans la figure (Figure III.1). Lors de la sélection des applications RFID, les exigences et contraintes du système seront mises en correspondance avec les exigences de l'étiquette. L'étiquette sera conçue le plus, souvent à l'aide de logiciel de simulation électromagnétique 3D afin d'optimiser les performances comme la distance de lecture, le gain, l'impédance de l'antenne... Une fois la conception terminée, nous réalisons les antennes et les mesurons pour s'assurer si la conception satisfait aux besoins de l'application. S'il est satisfait, le processus de conception sera réussi. Dans le cas contraire, il faut continuer à l'adapter et l'optimiser jusqu'à ce que les exigences soient satisfaites [18].

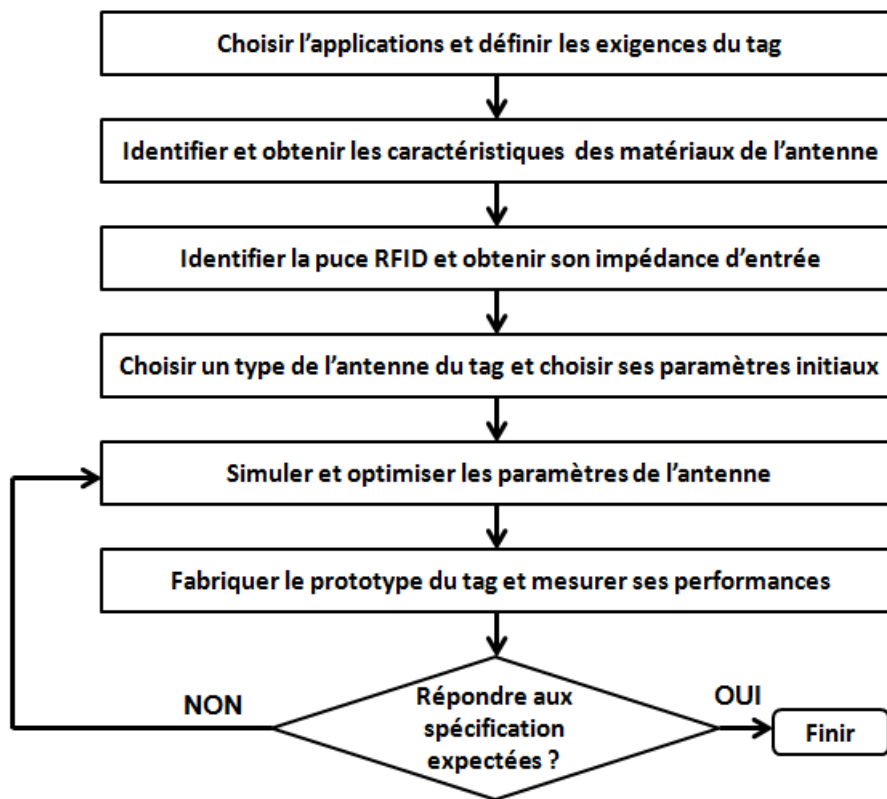


Figure III. 1: Méthodologie de conception d'antenne des tags.

III.2.1 CONTRAINTES POUR LA CONCEPTION DU TAG RFID

Pour que le système RFID fonctionne bien, une condition préalable est la nécessité de définir clairement les exigences de conception. Chaque situation a des besoins différents qui dépendent en fonction de l'objet d'application, les réglementations de chaque pays, la capacité d'interagir avec les autres systèmes de télécommunication [43].

III.2.1.1 La fréquence et la bande passante

La fréquence est choisie en fonction de l'application. En effet aussi bien les hautes fréquences que les basses fréquences peuvent être envisagées. Cependant, les caractéristiques de chaque gamme de fréquence sont très différentes en termes d'application. En effet, l'environnement ou les obstacles entre l'étiquette et le lecteur peuvent influencer sur la performance du système. Les fréquences LF et HF sont utilisées Normalement dans les environnements comme les matériaux diélectriques (papier, plastique, céramique, etc....) qui peuvent laisser pénétrer dans les champs électromagnétiques. Ils sont également utilisés pour des matériaux à fortes pertes diélectriques ou des milieux métalliques car la pénétration de

l'onde électromagnétique est souvent suffisante. Néanmoins, la distance de lecteur demeure modeste, le plus souvent bien inférieure au mètre, car il s'agit d'un couplage magnétique [18].

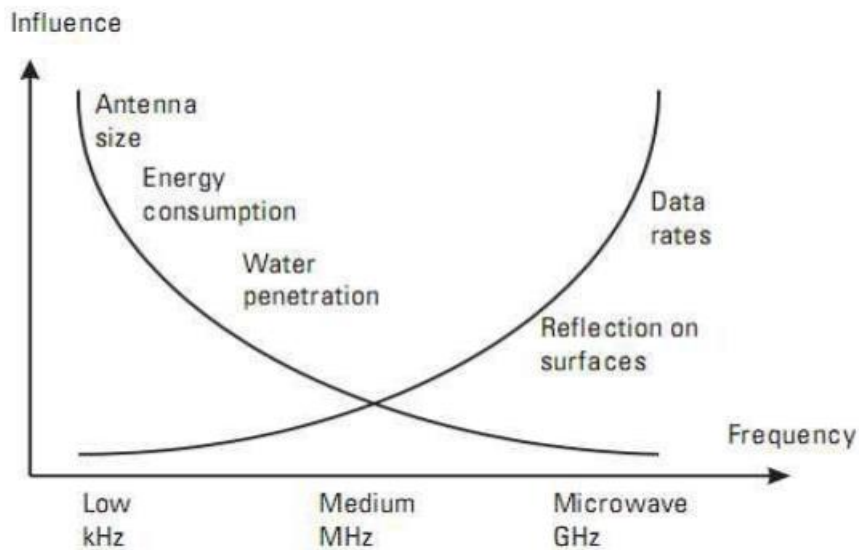


Figure III. 2: Les influences de l'environnement sur l'onde électromagnétique selon les différentes fréquences.

III.3 PRESENTATION DU LOGICIEL CST

CST Studio Suite est une solution logicielle d'analyse EM 3D hautes performances dédiée à la conception, à l'analyse et à l'optimisation des composants et systèmes électromagnétiques (EM). Les solveurs de champ électromagnétique destinés aux applications de l'ensemble du spectre EM sont proposés dans une seule et unique interface utilisateur. Il est possible d'associer les solveurs pour réaliser des simulations hybrides, ce qui offre aux ingénieurs la flexibilité requise pour analyser des systèmes entiers composés de nombreux éléments, de façon efficace et simple. La co-conception avec d'autres produits SIMULIA permet d'intégrer la simulation EM au flux de conception et booste le processus de développement dès les premières étapes [31].

III.4 FRACTALE DE HILBERT A L'ITERATIONS DEUX

De nombreuses formes fractales ont été développées depuis leur introduction, donnant naissance à des structures géométriques basées sur des motifs répétitifs. Parmi celles-ci, la courbe de Hilbert, proposée en 1891 constitue un exemple classique [38-39].

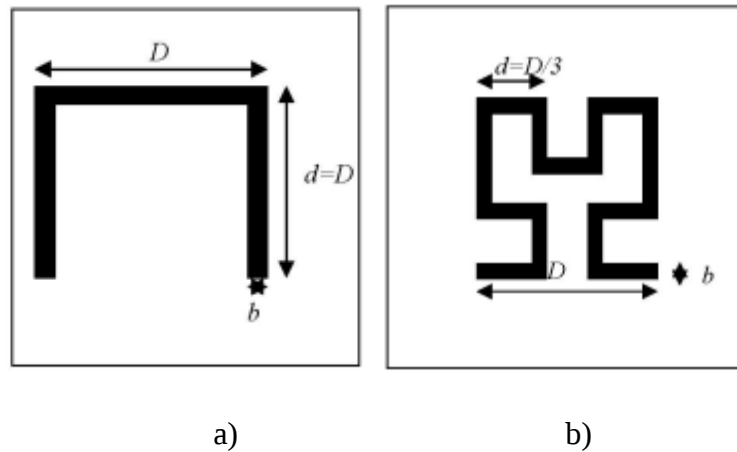


Figure III. 3: Géométrie de Hilbert à a)- la première itération. b)- La deuxième itération.

La **Figure III.3** présente la configuration d'une antenne utilisant cette courbe comme structure. Dans ce schéma, D représente la largeur totale de l'antenne, d désigne le segment fractal ou l'espace entre les motifs, et b correspond à la largeur de la ligne d'antenne.

III.5 ANTENNE DIPOLE FRACTALE DE HILBERT RFID ADAPTEE A 50Ω [44]

On a choisi cette antenne comme antenne de départ pour notre antenne de la section suivante (III.6), afin de l'adapter par un 3^{ème} fractale. La géométrie de cette antenne est caractérisée par un patch rayonnant sous forme d'un dipôle, dont chaque pôle représente une forme fractale de Hilbert à l'itération 2. Le patch est déposée sur un substrat de type FR4 de permittivité de $\epsilon_r = 4.3$, d'une hauteur de $h=1.5$ mm et un cuivre d'épaisseur $t=0.035$ mm pour l'élément rayonnant. Cette antenne mono-bande est destinée à fonctionner à la fréquence 2.45 GHz normalisée pour les applications RFID Figure III.4 [44].

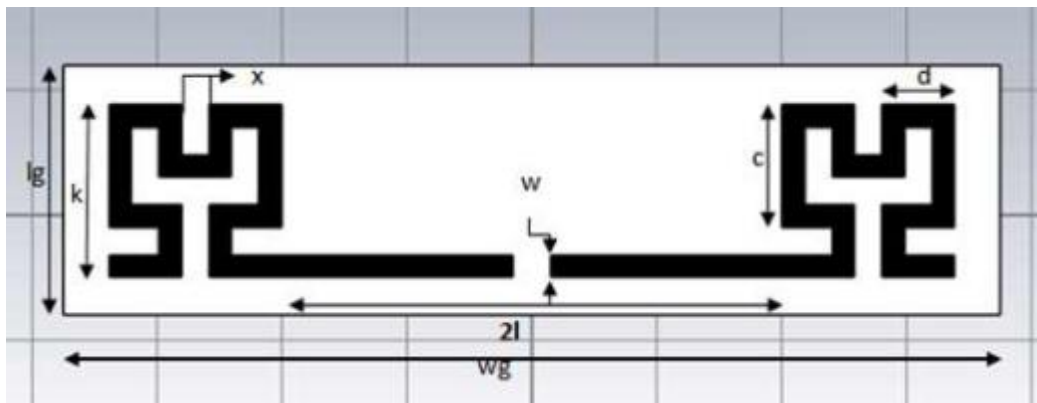


Figure III. 4: Structure de l'antenne dipôle fractale à la deuxième itération.

Le tableau III.1 résume et récapitule toutes les dimensions optimisées de cette antenne [44].

Paramètres	wg	lg	x	k	w	l	d	c
Valeur (mm)	75	24	2.212	13.836	1.8	20	5.81	9.82

Tableau III. 1: Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale Mono-Bande.

Le coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale mono-bande ayant les dimensions théoriques du tableau III.1 est illustré sur la figure III.5 [44].

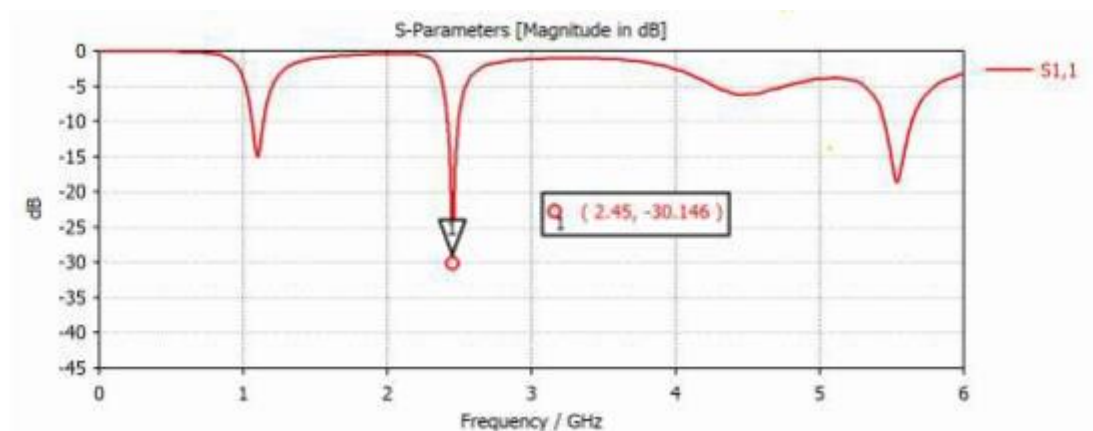


Figure III. 5: Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale mono-bande (2.45 GHz).

De la figure III.5 qui représente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, on peut tirer la remarque sur le caractère multi-bande de l'antenne, parmi ces bandes on trouve une bande de fréquences appartient au système RFID. La bande est au tour de la fréquence 2.45 GHz avec une bonne adaptation de -30.146 dB.

III.6 ANTENNE DIPOLE FRACTALE RFID ADAPTEE PAR UN 3^{EME} FRACTALEA 50Ω

III.6.1 LA GEOMETRIE D'ANTENNE

La géométrie de cette antenne se repose sur une structure composée de trois fractales de Hilbert à l'itération 2. Chaque pôle de l'antenne représente une forme fractale distincte, tandis que la troisième fractale, placée au centre, est utilisée pour assurer l'adaptation d'impédance. L'antenne est réalisée sur un substrat FR4 qui a une constante diélectrique de 4.3, une épaisseur de 1.5 mm et une tangente de perte de 0.017. L'épaisseur de cuivre est de 0.035 mm. Cette

antenne est conçue pour fonctionner en mono-bande, optimisée à la fréquence de 0.860 MHz, fréquemment utilisée dans les applications RFID (voir Figure III.6).

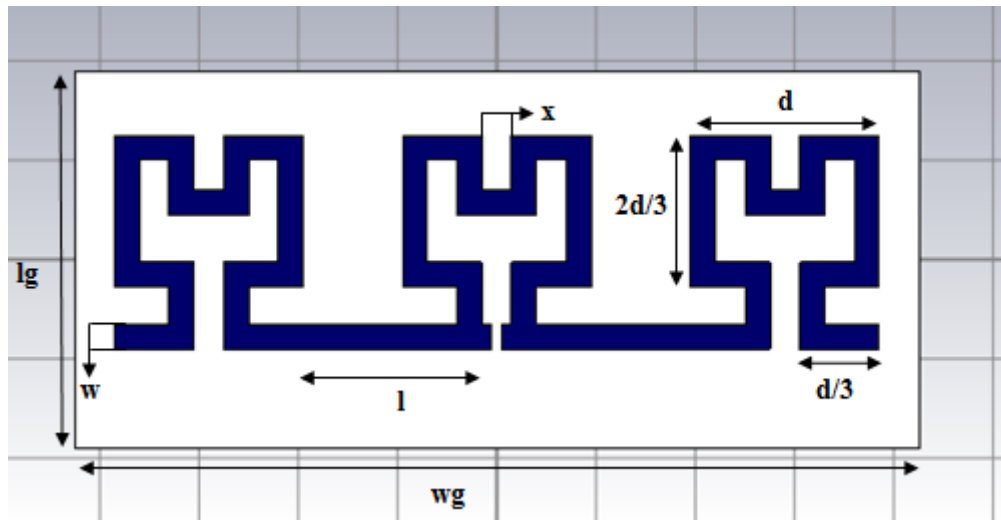


Figure III. 6: Structure de l'antenne dipôle fractale.

À l'issue d'une analyse paramétrique approfondie portant sur les différents paramètres géométriques de l'antenne, les dimensions optimales ont été déterminées. Celles-ci sont récapitulées dans le tableau III.2.

paramètres	wg	lg	L	w	d	x	H	R
Valeurs (mm)	85	38	19.5	2.5	24	6.2	1.5	0.035

Tableau III.2 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale.

III.6.2 COEFFICIENT DE REFLEXION

Le coefficient de réflexion est illustré dans la figure III.7. Sa valeur à 860MHz est de -29dB, ce qui montre une bonne adaptation. La bande passante à -10 dB est de -33MHz ce qui amplement suffisant pour les applications RFID.

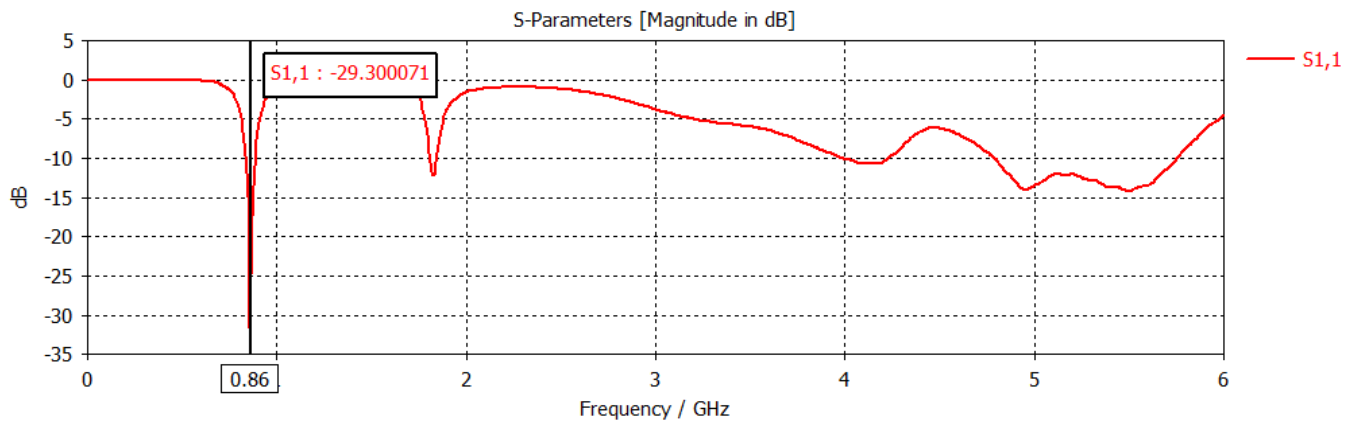


Figure III. 7: Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale.

Grâce à cette adaptation, nous avons observé une chute de la fréquence de résonance de 2.45 GHz à 0.86 GHz, ce qui constitue une miniaturisation efficace de l'antenne. Cela montre que plus la structure fractale est complexe (par ajout d'éléments), plus la longueur électrique augmente, entraînant une résonance à une fréquence plus basse.

Les avantages de l'ajout de l'élément fractal :

1- Miniaturisation efficace

- Le motif de Hilbert permet de replier la longueur d'onde dans une surface compacte.
- L'ajout d'une troisième fractale augmente encore plus la longueur électrique, ce qui abaisse la fréquence de résonance sans agrandir l'antenne.

2- Gain d'espace

- L'antenne devient plus compacte, ce qui est idéal pour les systèmes intégrés, portables ou embarqués.

3- Contrôle précis de la fréquence

- En ajustant l'ordre d'itération ou le nombre de fractales, on peut régler la fréquence de fonctionnement de manière fine.

4- L'utilisation comme élément d'adaptation

- Une bonne adaptation à une fréquence moins.

L'intégration du motif fractal de Hilbert dans la structure de l'antenne a conduit, d'une part, à une réduction significative de la fréquence de résonance, passant de 2,45 GHz à 0,86 GHz, sans modification notable des dimensions physiques, et d'autre part, à une amélioration de l'adaptation d'impédance. Cette baisse de fréquence démontre l'efficacité des structures fractales pour la miniaturisation, grâce à l'augmentation de la longueur électrique dans un volume restreint. Ce type de conception se révèle particulièrement adapté aux applications à fortes contraintes d'encombrement, telles que les systèmes embarqués, les objets connectés et les dispositifs sans fil compacts.

III.6.3 DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

Afin d'évaluer les performances de rayonnement de l'antenne, les diagrammes de directivité ont été tracés dans les deux plans orthogonaux principaux : le plan E (horizontal, $\varphi = 0^\circ$) et le plan H (vertical, $\varphi = 90^\circ$), comme illustré à la figure III.8. De plus, la figure III.9 présente le diagramme de rayonnement en trois dimensions à la fréquence de 0,86 GHz. Les résultats montrent que l'antenne présente un comportement bidirectionnel dans le plan E, typique des antennes dipôles, et un rayonnement quasi-omnidirectionnel dans le plan H. La directivité mesurée est d'environ 1,59 dBi, ce qui confirme un rayonnement relativement uniforme, convenant à des applications nécessitant une couverture spatiale étendue.

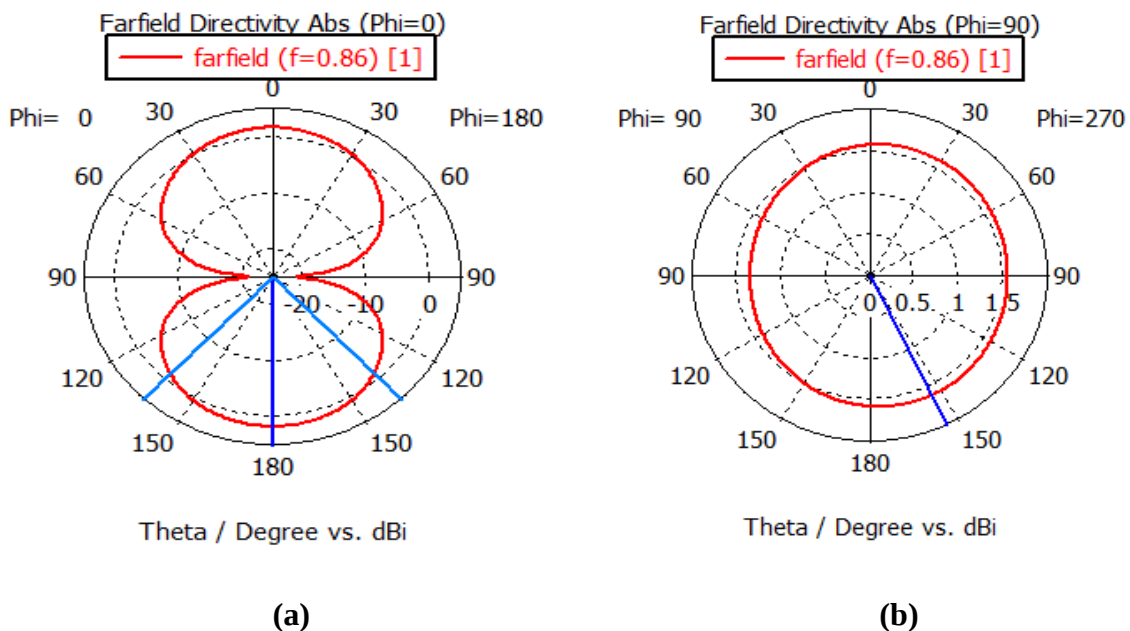


Figure III. 8: Diagramme de rayonnement dans le plan horizontal ($\varphi = 0^\circ$) et dans le plan vertical ($\varphi = 90^\circ$) à 0,86 GHz.

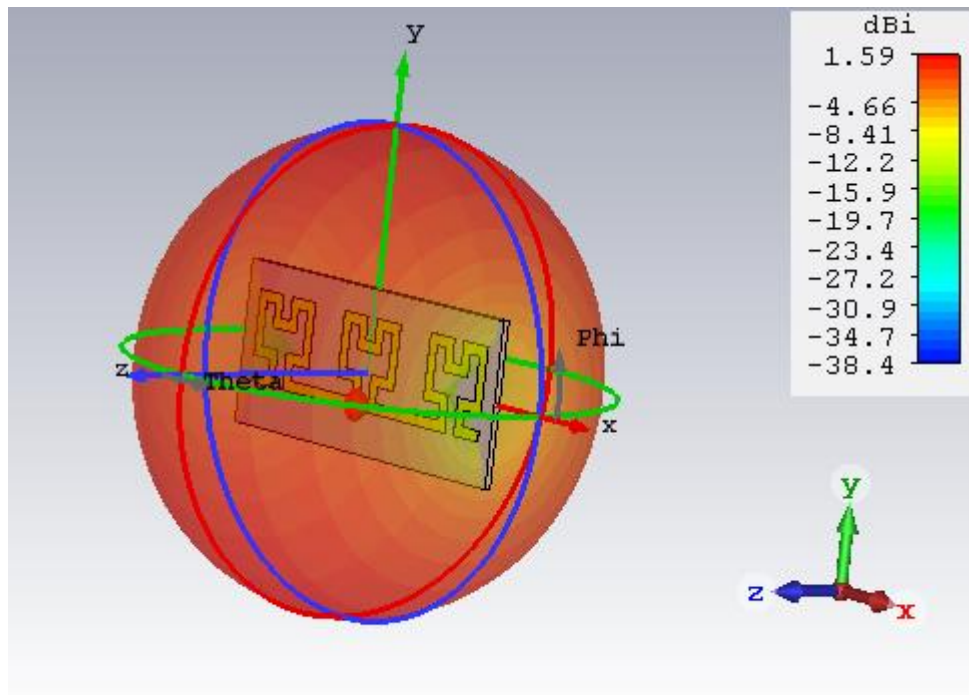


Figure III. 9: Représentation du diagramme de rayonnement avec les coordonnées Sphériques (θ , ϕ).

III.6.4 IMPEDANCE D'ENTREE DE L'ANTENNE

La figure III.10 représente l'évolution de l'impédance complexe de l'antenne en fonction de la fréquence. L'impédance $Z(f)$ est composée de deux parties : la partie réelle $\text{Re}[Z]$, représentée en rouge, et la partie imaginaire $\text{Im}[Z]$ en vert.

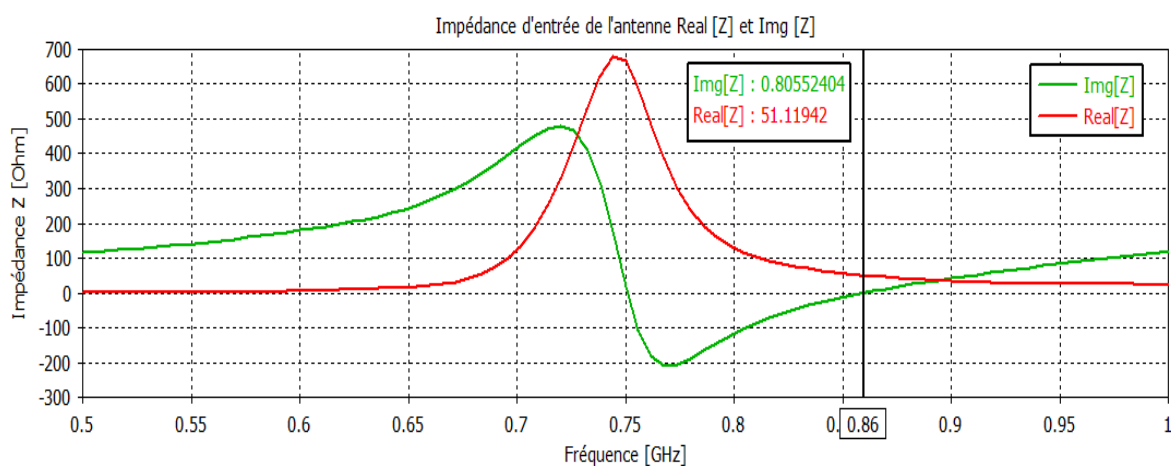


Figure III. 10: Impédance complexe de l'antenne en fonction de la fréquence

On observe sur la figure III.10 que :

- La partie réelle de l'impédance (courbe rouge) présente un pic à environ 0.75 GHz, atteignant une valeur supérieure à 680 Ω , ce qui indique une résonance à cette fréquence.
- La partie imaginaire de l'impédance (courbe verte) traverse l'axe horizontal (valeur nulle) à plusieurs fréquences. L'une de ces fréquences est 0.86 GHz, indiquée par le curseur sur la figure. À ce point :
 - $\text{Im}[Z] \approx 0.80$ ce qui est proche de zéro.
 - $\text{Re}[Z] \approx 51.11$ ce qui est proche de l'impédance caractéristique standard de 50 Ω .

Cette fréquence (0.86 GHz) correspond donc à une adaptation optimale entre l'antenne et la ligne de transmission. En effet, une impédance réelle proche de 50 Ω et une partie imaginaire quasi nulle signifient que l'antenne est bien accordée à cette fréquence. D'après cette courbe, la fréquence de résonance se situe autour de 0.75 GHz, tandis que la meilleure adaptation a lieu à environ 0.86 GHz. Ce point est crucial pour garantir une transmission efficace du signal.

III.7 ANTENNE DIPOLE FRACTALE ADAPTEE A UNE PUCE RFID

III.7.1 ANTENNE DIPOLE DE BASE

Dans le but de concevoir une antenne de dimensions réduites (miniaturisée), une première étape consiste à réaliser une antenne résonnant à la fréquence de 2400 MHz. Pour ce faire, l'équation (III.1) est utilisée afin de déterminer la longueur du demi-bras du dipôle, notée $Wd/2$.

$$wd = 0.47\lambda = 0.47 \frac{v}{f} \quad (\text{III.1})$$

f : La fréquence de résonance.

v : La vitesse de propagation dans le milieu sur les brins du dipôle.

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{III.2})$$

c_0 : La vitesse de la lumière dans le vide.

ϵ_{eff} : La constante diélectrique du milieu environnant.

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

h : l'épaisseur du substrat.

L_d : la largeur du dipôle.

III.7.1.1 Géométrie de l'antenne

L'antenne illustrée dans la figure III.11 se compose d'un dipôle planaire de dimensions $W_d \times L_d$, posé sur un substrat FR4 de dimensions $W_s \times L_s \times h$, qui a une constante diélectrique de 4.32, une épaisseur de 1.5 mm et une tangente de perte de 0.017. L'épaisseur de cuivre est de 0.035 mm. Un plan de masse, de dimensions $W \times L$, est situé sur le même plan que l'élément rayonnant. Cette géométrie présente dans la figure ci-dessous (figure III.11).

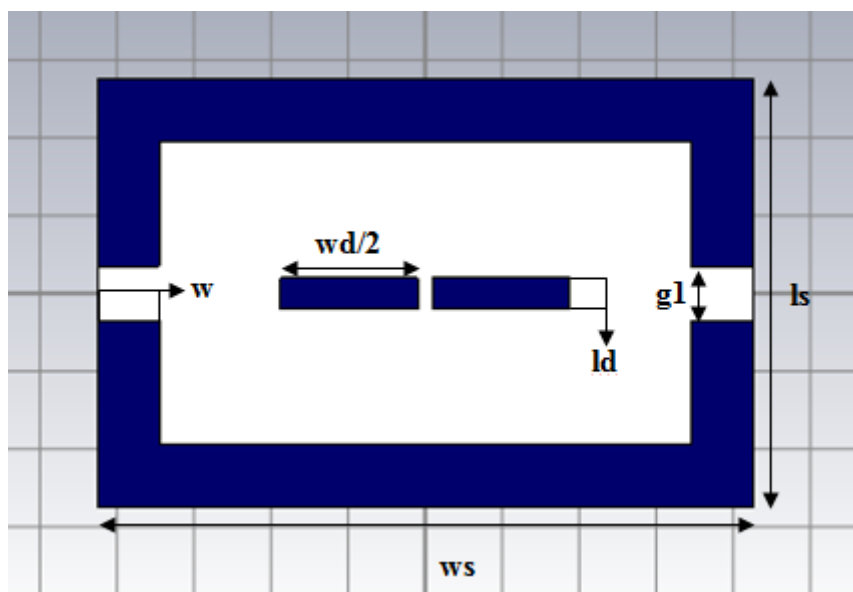


Figure III. 11: Géométrie de l'antenne dipôle.

Les valeurs des dimensions sont présentées dans le tableau III.3.

Paramètres	w_s	L_s	w	g_1	l_d	w_d	$W_d/2$	h	R
Dimensions (mm)	85	55	8	7	4	37.5	18.75	1.5	0.035

Tableau III. 3: Dimensions optimisées de l'antenne dipôle.

III.7.1.2 Coefficient de réflexion

La figure III.12 montre le coefficient de réflexion S_{11} obtenu après l'alimentation de l'antenne par un port discret de 50 ohms. On observe ainsi une résonance proche de (2.45 GHz).

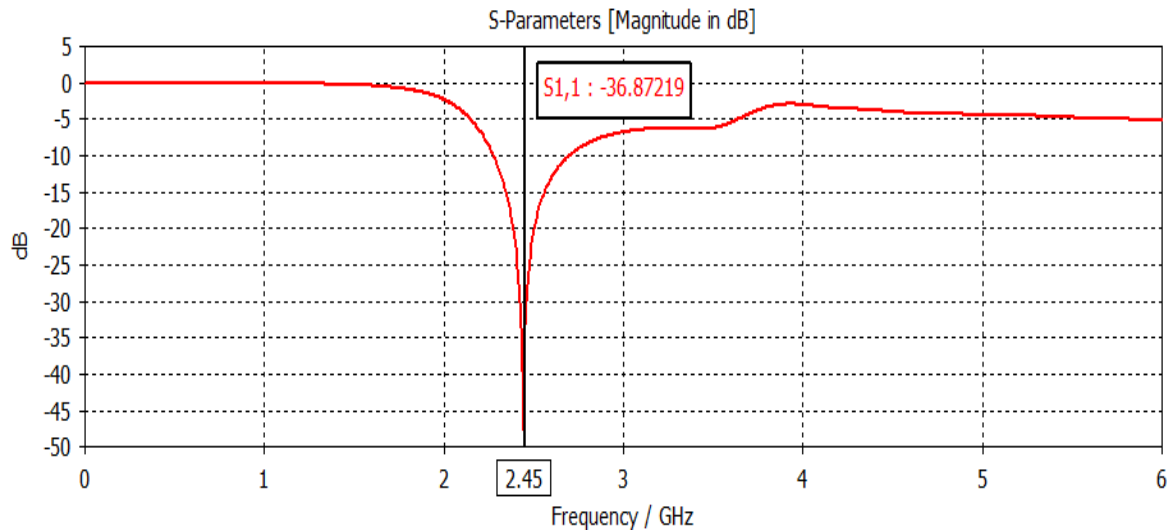


Figure III. 12: Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle (2.45GHz).

Nous savons que la taille de l'antenne est inversement proportionnelle à la fréquence de Résonance. Notre but est de ramener la fréquence de travail dans la bande UHF (860-960 MHz) tout en conservant la même taille de l'antenne, pour cela nous allons ajouter des modifications pour qu'elle résonne dans cette bande.

III.7.2 ANTENNE DIPOLE FRACTALE ADAPTE A 50 Ω

III.7.2.1 Géométrie de l'antenne

Dans le but de miniaturiser l'antenne et de réduire sa fréquence de fonctionnement, la structure classique du dipôle a été modifiée en adoptant une configuration fractale de type Hilbert, comme cela a été proposé dans plusieurs travaux antérieurs sur les antennes auto similaires. Les bras du dipôle conventionnel ont été remplacés par des motifs fractals de type Hilbert d'une manière perpendiculaire, ce qui engendre une répartition complexe de réactances capacitives et inductives distribuées, influençant significativement l'impédance d'entrée. La géométrie de l'antenne résultante est illustrée à la figure III.13, où l'on observe clairement l'intégration des segments fractals ainsi que la configuration symétrique des bras rayonnants. L'antenne est réalisée sur un substrat FR4 caractérisé par une constante diélectrique de 4,32,

une épaisseur de 1,5 mm, une tangente de perte de 0,017 et une épaisseur de cuivre de 0,035 mm.

Cette transformation géométrique permet de réduire significativement la fréquence de résonance par rapport à un dipôle droit de base de dimensions équivalentes, tout en conservant une bonne adaptation d'impédance.

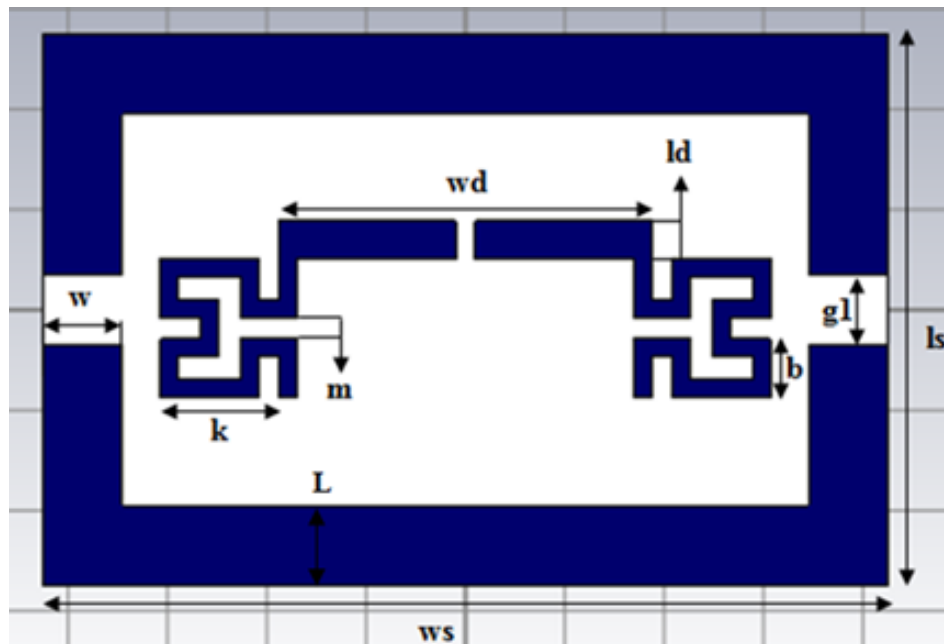


Figure III. 13: Géométrie de l'antenne dipôle fractale.

Les dimensions optimisées de l'antenne sont regroupées et présentées dans le tableau III.4

Paramètres	ws	Ls	W	L	g1	ld	wd	k	M	x	B
Dimensions (mm)	85	55	8	8	7	4	37.5	13.836	1.8	2.212	5.81

Tableau III. 4: Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale.

III.7.2.2 Coefficient de réflexion

La Figure III.14 présente le coefficient de réflexion S11 obtenue après avoir alimenté l'antenne Avec un discrète port de 50 Ohms, d'où on remarque qu'on a eu une résonance a une fréquence 920MHz.

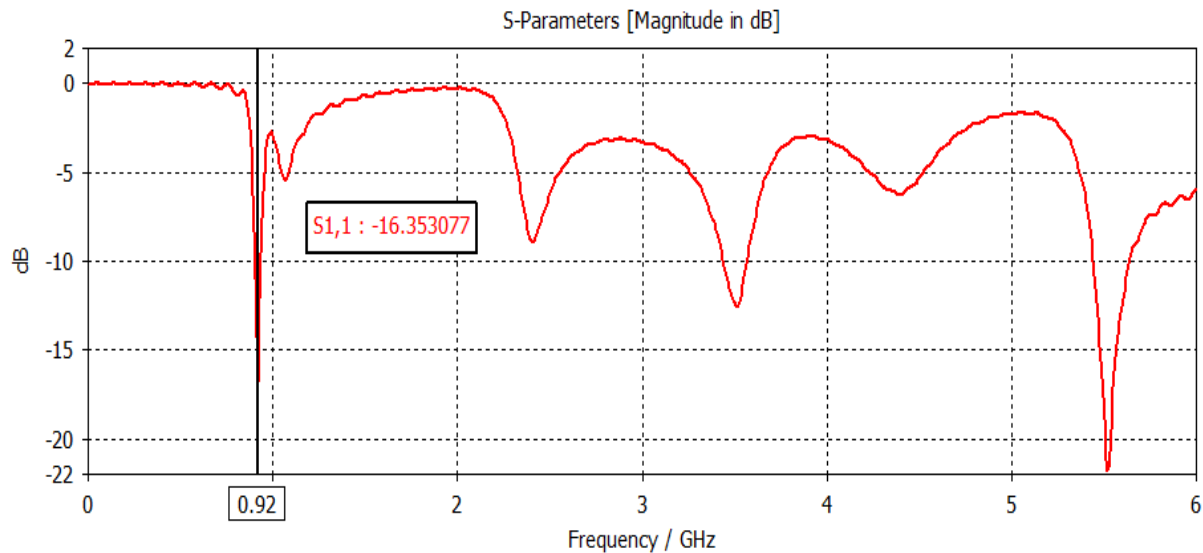


Figure III. 14: Coefficient de réflexion de l'antenne avec fractale adapté à 50Ω

III.7.3 ÉVOLUTION DES PUCES RFID UHF ET CHOIX TECHNOLOGIQUE

Les évolutions récentes et celles à venir de la technologie RFID UHF s'orientent vers l'intégration de puces compactes, à faible seuil de puissance et à grande capacité mémoire, tout en respectant les exigences de la norme EPC Class 1 Gen 2. Ces avancées visent à améliorer la performance et la fiabilité des systèmes RFID, notamment dans des environnements contraints. Le tableau III.5 présente un aperçu comparatif de certaines des puces RFID UHF les plus utilisées actuellement sur le marché, en mettant en évidence leurs principales caractéristiques techniques.

Dans le cadre de l'adaptation de notre antenne à une puce RFID, le choix s'est porté sur la puce Alien Higgs-3 [45], sélectionnée à partir d'une analyse comparative basée sur plusieurs critères techniques : impédance d'entrée, sensibilité, consommation énergétique et popularité d'usage.

Cette puce se caractérise par une impédance d'entrée complexe de $27 - j200 \Omega$ à 920 MHz, nécessitant une adaptation spécifique de l'antenne pour assurer un transfert de puissance maximal.

Par ailleurs, la puce Alien Higgs-3 est largement reconnue pour sa faible consommation d'énergie, sa bonne sensibilité de lecture, ainsi que sa large adoption dans des domaines clés tels que la logistique, la traçabilité de produits et la gestion des stocks intelligents.

Puce RFID	Puissance min de fonctionnement (dBm)	RC (Ω) Série	Cc (pF) Série	Fréquence de Travail
AlienHiggs3	-18	1500	0.85	920 MHz
AlienHiggs 4	-18.5	1500	0.85	860-960 MHz
XWIMPINJ	-17.4	1650	1.21	860-960 MHz
Monza 4				
IMPINJ	-17.8	1800	0.825	860-960 MHz
Monza 5				
NXPUCODE	-15	1385	1.16	860-960 MHz
G2XM/G2XL				
Strap XRAG2	-16	1500	0.85	860-960 MHz

Tableau III. 5: Différentes puces RFID-UHF disponibles dans le marché.

III.7.4 ETUDE PARAMETRIQUE

Dans le but d'adapter efficacement l'impédance de l'antenne à la fréquence cible de 920 MHz, une étude paramétrique a été réalisée. Cette étude consiste à analyser l'impact de la variation de plusieurs paramètres géométriques clés, listés dans le tableau III.4, sur les performances électromagnétiques de l'antenne, notamment son adaptation d'impédance et sa fréquence de résonance.

Influence du paramètre wd

La première phase de l'analyse a porté sur le paramètre wd, qui correspond à la longueur horizontale du bras du dipôle fractal. Ce paramètre a une influence directe sur la fréquence de résonance de l'antenne.

Pour évaluer son impact, sa valeur a été variée de 35 mm à 33 mm, par pas réguliers, et les courbes de S11 ont été observées à chaque étape. Cette variation permet d'identifier la configuration optimale qui assure un meilleur appariement à l'impédance de la puce AlienHiggs-3, soit environ $27 - j200 \Omega$ à 920 MHz.

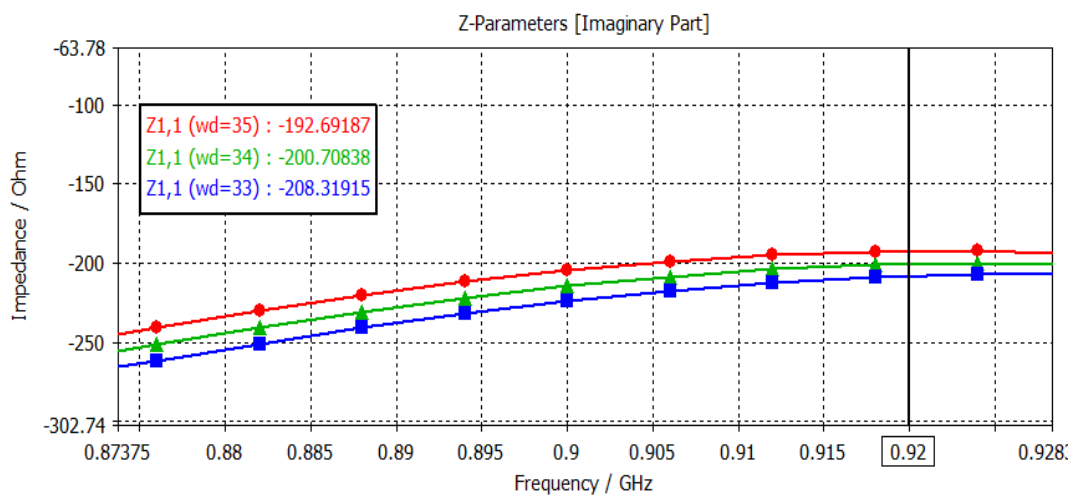


Figure III. 15: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction du paramètre wd.

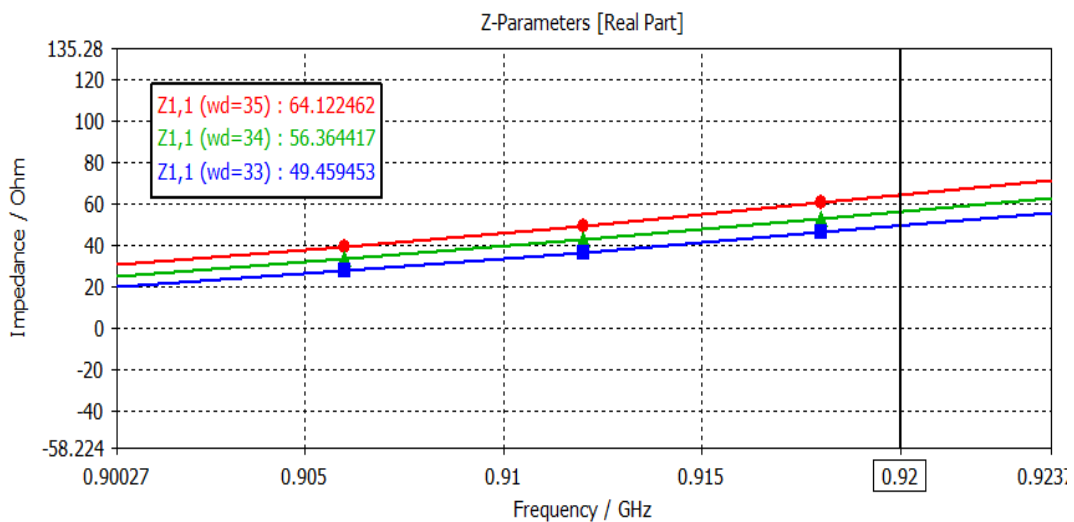


Figure III. 16: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre wd.

Paramètre	Longueur de dipôle wd (mm)		
	Wd= 35	Wd=34	Wd=33
Impédance d'entrée	$Z_p=64-j192$	$Z_p=56-j200$	$Z_p=49-j208$
Zpuce (Ω) à 920 MHz			

Tableau III. 6: Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « wd ».

Les résultats obtenus montrent clairement que la variation de la longueur du dipôle (wd) influence à la fois la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne. Cette sensibilité du paramètre wd permet d'ajuster efficacement l'appariement avec l'impédance complexe de la puce RFID.

À l'issue de cette analyse, il a été déterminé que la valeur optimale de wd est 33 mm, car elle permet d'obtenir la meilleure adaptation d'impédance à la fréquence de 920 MHz, minimisant ainsi le coefficient de réflexion (S11) et maximisant le transfert de puissance.

Impact du paramètre ld

La deuxième étape de l'étude paramétrique consiste à analyser l'effet de la largeur du bras du dipôle, notée ld, sur l'impédance d'entrée de l'antenne à la fréquence de 920 MHz. Pour ce faire, la valeur de ld a été progressivement réduite de 3,2 mm à 1,8 mm, et les composantes réelle et imaginaire de l'impédance d'entrée ont été extraites à chaque itération.

Les figures III.17 et III.18 présentent respectivement l'évolution de la partie imaginaire et de la partie réelle de l'impédance en fonction de la variation de ld.

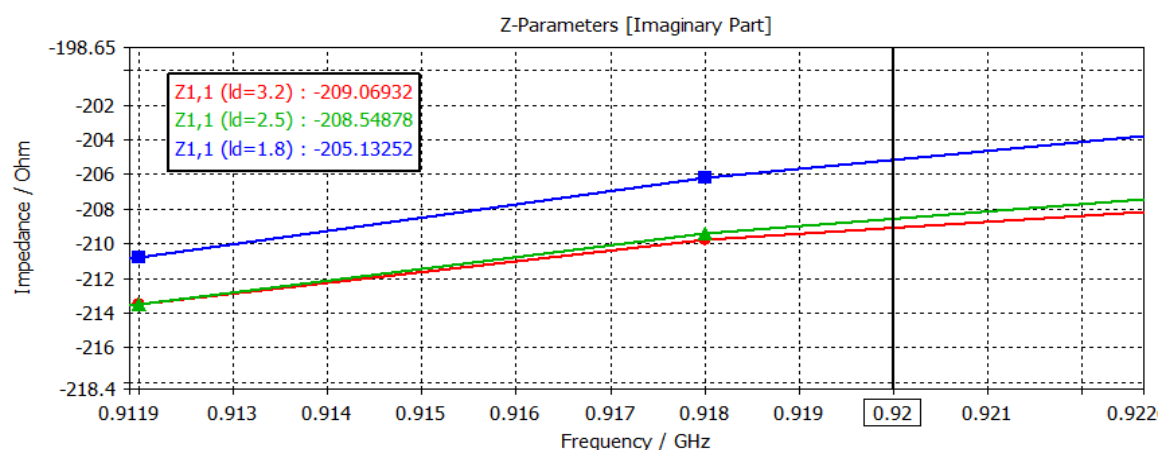


Figure III. 17: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction de paramètre ld.

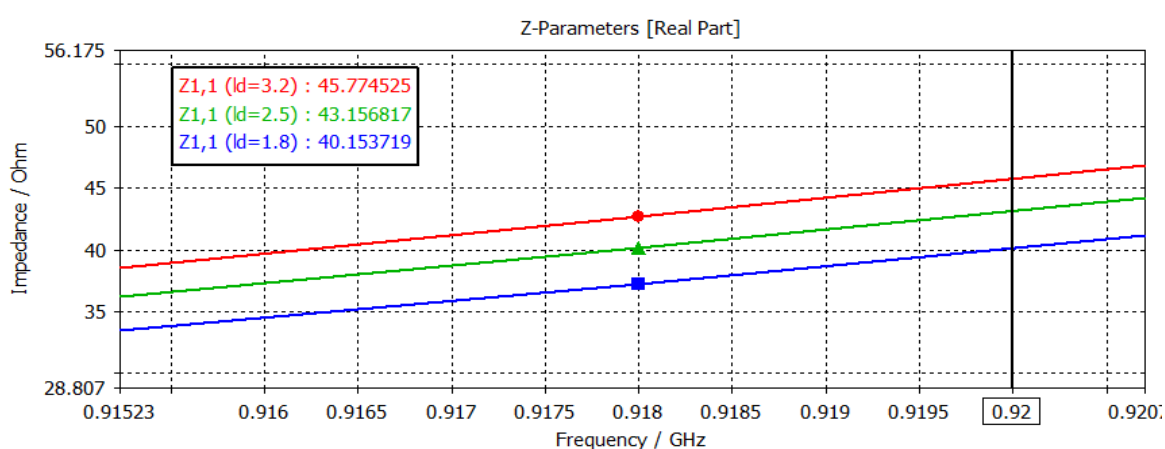


Figure III. 18: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre ld.

Les résultats de simulation sont résumés dans le tableau III.7 ci-dessous :

Largueur de dipôle ld (mm)			
Paramètre	ld= 3.2	ld=2.5	ld=1.8
Impédance d'entrée	Zp=45-j209	Zp=43-j208	Zp=40-j205
Zpuce (Ω) à 920 MHz			

Tableau III. 7: Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « ld ».

Ces résultats indiquent que la réduction de la largeur l_d permet un rapprochement progressif de l'impédance d'entrée vers celle de la puce RFID ciblée (Alien Higgs-3 : $27 - j200 \Omega$).

Par conséquent, la valeur optimale retenue pour une meilleure adaptation d'impédance est $l_d = 1,8 \text{ mm}$, car elle minimise l'écart entre les impédances conjuguées et favorise un couplage plus efficace à 920 MHz.

Impact du paramètre x

Après avoir fixé les valeurs optimales des paramètres w_d et l_d , l'étude paramétrique se poursuit avec l'analyse de l'influence du paramètre x , représentant l'espace vide entre les segments du motif fractal. Ce paramètre joue un rôle important dans l'ajustement de la répartition des courants et donc dans la réactance globale de l'antenne.

Pour cette analyse, x a été modifié de 2,2 mm à 2 mm, et l'évolution des composantes réelle et imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne a été observée.

Les résultats sont illustrés dans les figures III.19 (partie imaginaire) et III.20 (partie réelle) de l'impédance, en fonction de la variation du paramètre x .

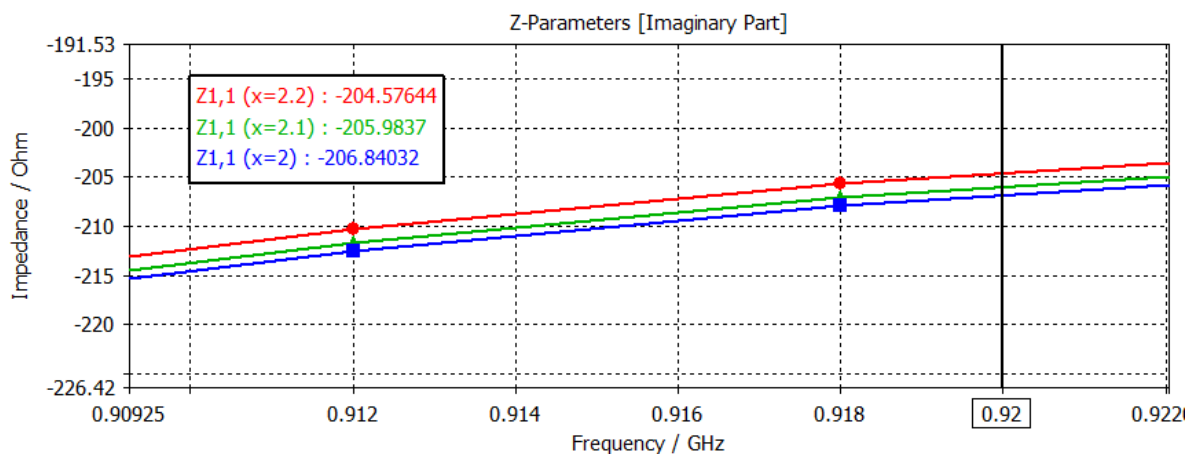


Figure III. 19: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction de paramètre x .

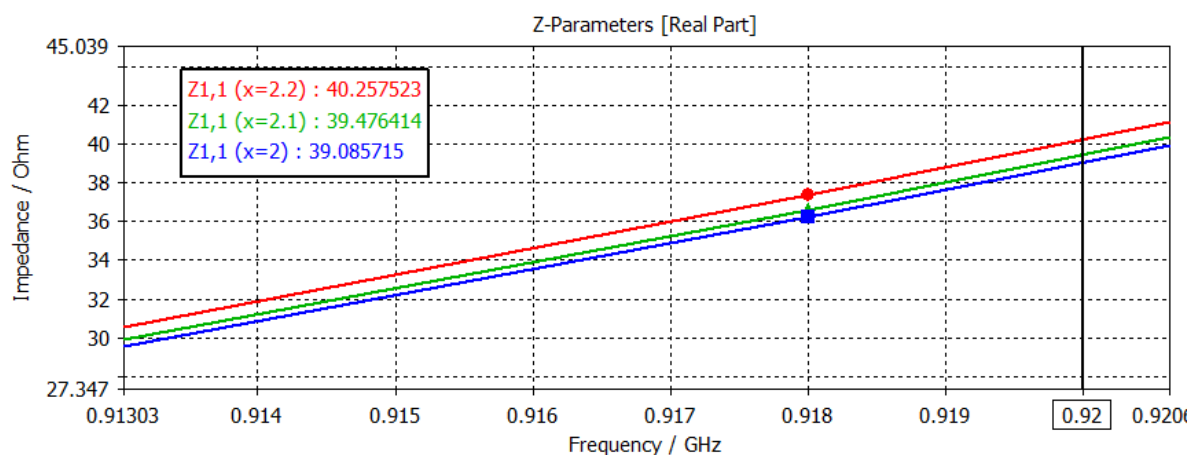


Figure III. 20: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre x.

L'espace vide dans le fractale x (mm)			
Paramètre	x= 2.2	x=2.1	x=2
Impédance d'entrée	$Z_p=40-j204$	$Z_p=39-j205$	$Z_p=39-j206$
Zpuce (Ω) à 920 MHz			

Tableau III. 8: Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « x ».

Les résultats montrent que la variation du paramètre x a une influence modérée mais non négligeable sur l'impédance d'entrée. En réduisant x, la composante imaginaire se rapproche légèrement de celle de la puce RFID cible.

En conclusion, la valeur optimale retenue pour ce paramètre est $x = 2$ mm, car elle permet un meilleur ajustement global de l'impédance à la fréquence de fonctionnement de 920 MHz.

✚ Impact du paramètre l

Après avoir analysé l'influence des paramètres w_d , l_d et x, l'étude paramétrique se poursuit avec l'examen de l'effet du paramètre l, représentant la longueur du segment latéral du motif fractal. Ce paramètre intervient directement dans la configuration de la géométrie du dipôle et influence la distribution des courants ainsi que la réactance globale de l'antenne.

Dans cette étape, la valeur de l a été modifiée entre 8,2 mm et 8,6 mm, et son impact sur la partie réelle et imaginaire de l'impédance d'entrée a été évalué à la fréquence de 920 MHz.

Les figures III.21 et III.22 présentent respectivement l'évolution de la composante imaginaire et réelle de l'impédance d'entrée en fonction de l .

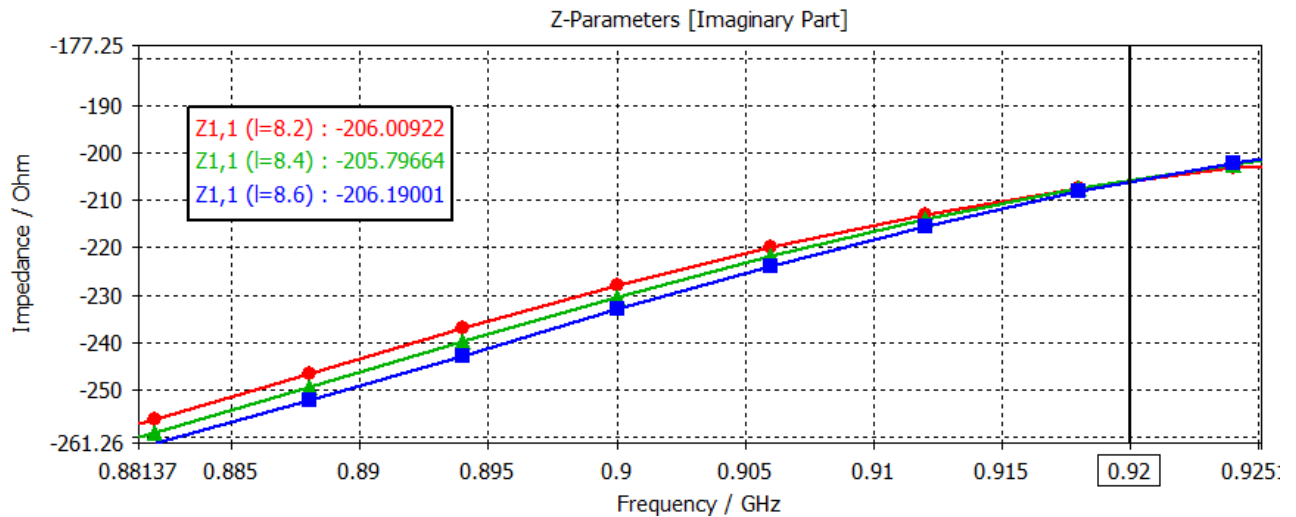


Figure III. 21: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction de paramètre l .

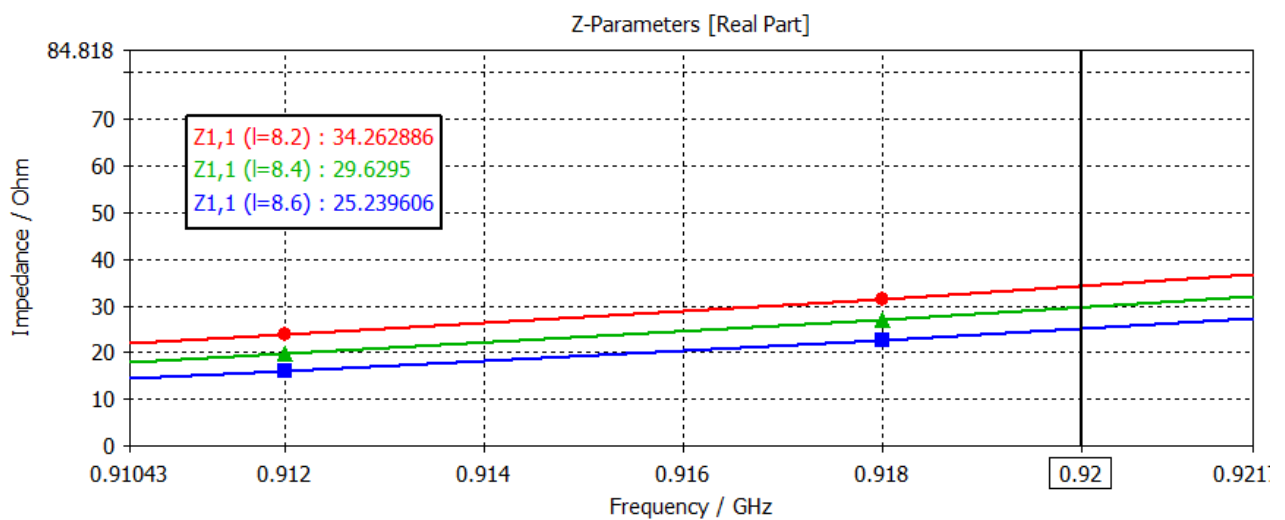


Figure III. 22: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre l .

Paramètre	Longueur de l (mm)		
	l= 8.2	l=8.4	l=8.6
Impédance d'entrée	$Z_p=34-j206$	$Z_p=29-j205$	$Z_p=25-j206$
$Z_{puce} (\Omega)$ à 920 MHz			

Tableau III.9 : Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « l ».

Les résultats indiquent que l'augmentation de la longueur l permet de réduire progressivement la partie réelle de l'impédance, tout en maintenant pratiquement constante la partie imaginaire. Cette tendance rapproche l'impédance d'entrée de celle de la puce Alien Higgs-3 ($27 - j200 \Omega$), facilitant ainsi une meilleure adaptation.

En conclusion, la valeur optimale pour ce paramètre est $l = 8,6$ mm, car elle offre l'appariement le plus proche de l'impédance cible à la fréquence de 920 MHz.

Impact du paramètre k

Enfin, la dernière étape de l'étude paramétrique porte sur le paramètre k, représentant la longueur du segment horizontal du motif fractal. Ce paramètre joue un rôle clé dans le contrôle de la résonance fine de l'antenne et dans l'ajustement précis de son impédance d'entrée.

Dans cette analyse, la valeur de k a été légèrement modifiée entre 13,75 mm et 13,95 mm, dans le but de rapprocher l'impédance d'entrée de l'antenne de celle de la puce RFID Alien Higgs-3 à 920 MHz.

Les figures III.23 et III.24 illustrent respectivement l'évolution de la partie imaginaire et de la partie réelle de l'impédance en fonction des variations du paramètre k.

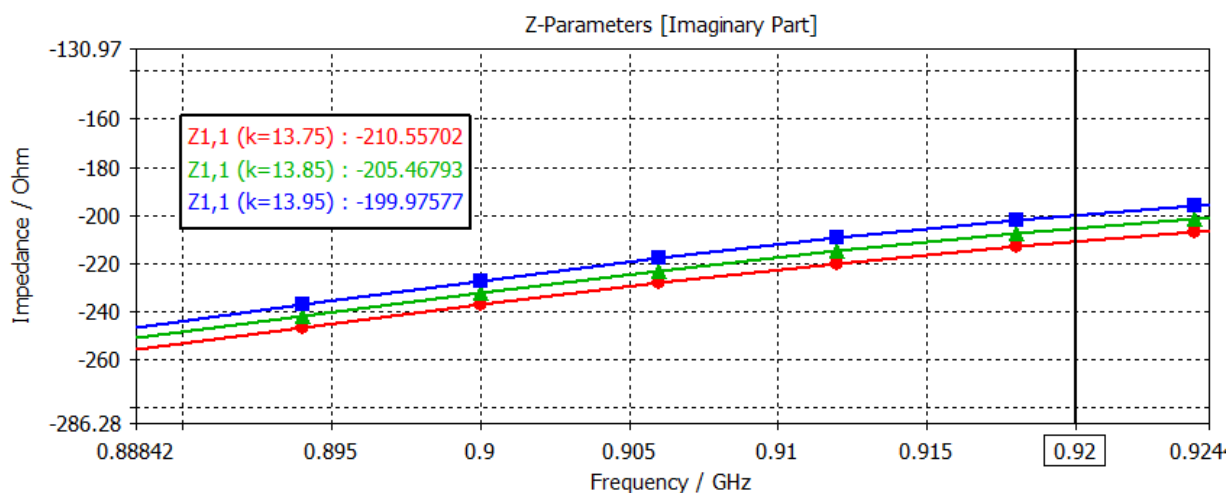


Figure III. 23: Partie imaginaire d'impédance de la puce en fonction de paramètre k .

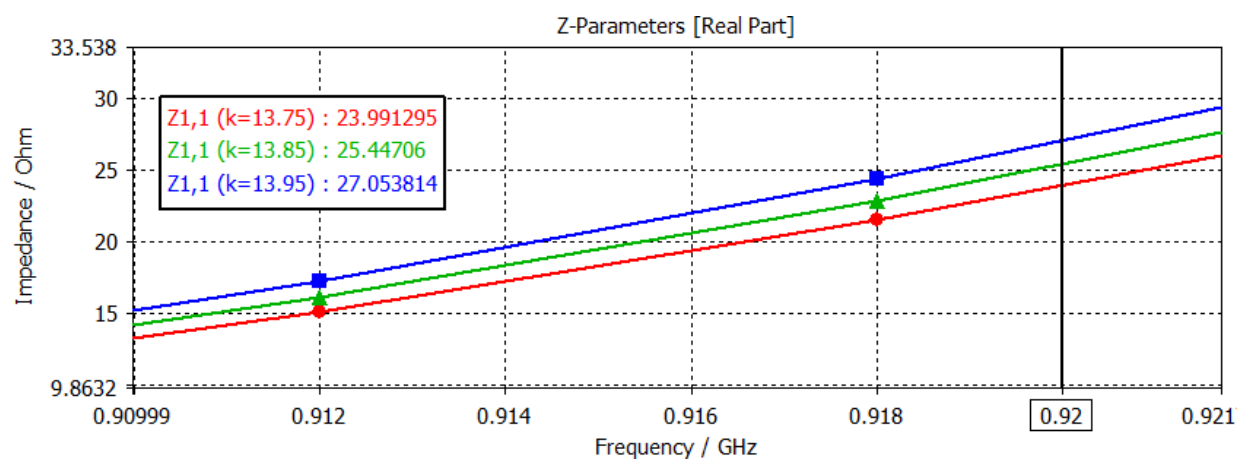


Figure III. 24: Partie réelle d'impédance de la puce en fonction de paramètre k .

Longueur de fractale k (mm)			
Paramètre	$k= 13.75$	$k=13.85$	$k=13.95$
Impédance d'entrée	$Z_p=23-j210$	$Z_p=25-j205$	$Z_p=27-j199$
$Z_{puce} (\Omega)$ à 920 MHz			

Tableau III. 10: Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « k ».

Les résultats démontrent que l'augmentation progressive de la longueur k permet d'ajuster avec précision la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance d'entrée, en la rapprochant de la valeur cible de $27 - j200 \Omega$ correspondant à la puce RFID sélectionnée.

En conclusion, la valeur optimale retenue pour ce paramètre est $k = 13,95$ mm, car elle offre le meilleur appariement d'impédance à la fréquence de 920 MHz, assurant ainsi un couplage maximal entre l'antenne et la puce.

Synthèse de l'étude paramétrique

L'étude paramétrique menée dans cette section a permis d'évaluer l'impact de plusieurs paramètres géométriques de l'antenne fractale sur son impédance d'entrée à la fréquence cible de 920 MHz, en vue d'une adaptation optimale à la puce RFID Alien Higgs-3, caractérisée par une impédance de référence de $Z = 27 - j200 \Omega$.

Les paramètres étudiés sont :

w_d : longueur du bras du dipôle

l_d : largeur du bras du dipôle

x : espace vide entre segments fractals

l : longueur latérale

k : longueur du segment horizontal du motif fractal

À travers une série de simulations et d'analyses des courbes S_{11} et des valeurs d'impédance (réelle et imaginaire), les valeurs optimales ont été identifiées pour chaque paramètre.

Paramètre	Plage étudiée (mm)	Valeur optimale (mm)	Impédance obtenue $Z(\Omega)$
wd	35 $\rightarrow$ 33	33	40 – j205
ld	3.2 $\rightarrow$ 1.8	1.8	40 – j205
x	2.2 $\rightarrow$ 2.0	2.0	39 – j206
l	8.2 $\rightarrow$ 8.6	8.6	25 – j206
k	13.75 $\rightarrow$ 13.95	13.95	27 – j199

Tableau III. 11: Tableau récapitulatif des paramètres optimaux.

L'ajustement progressif des paramètres géométriques a permis d'obtenir une impédance d'entrée très proche de celle de la puce Alien Higgs-3, garantissant une excellente adaptation à la fréquence de 920 MHz.

Les paramètres optimaux élargis sont récapitulés sur le tableau III.12.

Paramètres	ws	Ls	w	L	g1	ld	wd	k	M	x	b
Dimensions (mm)	85	55	8	8.6	7	1.8	33	13.95	1.8	2	5.81

Tableau III. 12: Les nouveaux paramètres optimaux élargis de l'antenne.

À l'issue de cette étude paramétrique, la structure de l'antenne a été modifiée pour prendre la forme suivante.

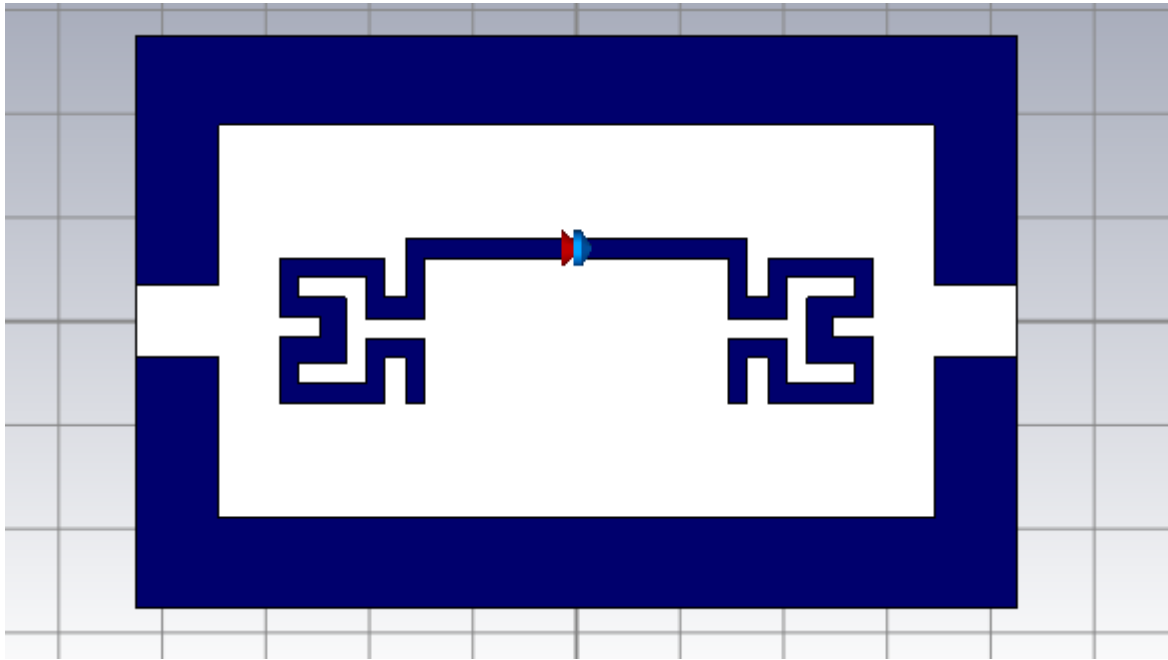


Figure III. 25: Modèle géométrique final de l'antenne fractale d'Hilbert.

III.7.4.1 Diagramme de Rayonnement

Les diagrammes de rayonnement de l'antenne simulée ont été extraits à partir des résultats CST, à la fréquence de 0,92 GHz, afin d'analyser la répartition angulaire du champ rayonné. Les représentations en deux dimensions (2D) sont illustrées dans la figure III.26, tandis que le diagramme tridimensionnel (3D) est présenté dans la figure III.27.

La figure III.26 montre le comportement de l'antenne dans :

le plan E ($\varphi = 0^\circ$), correspondant au plan vertical,

le plan H ($\varphi = 90^\circ$), correspondant au plan horizontal.

La figure III.27 représente la distribution spatiale du rayonnement dans un repère sphérique (θ, ϕ), fournissant une vision globale de la directivité de l'antenne.

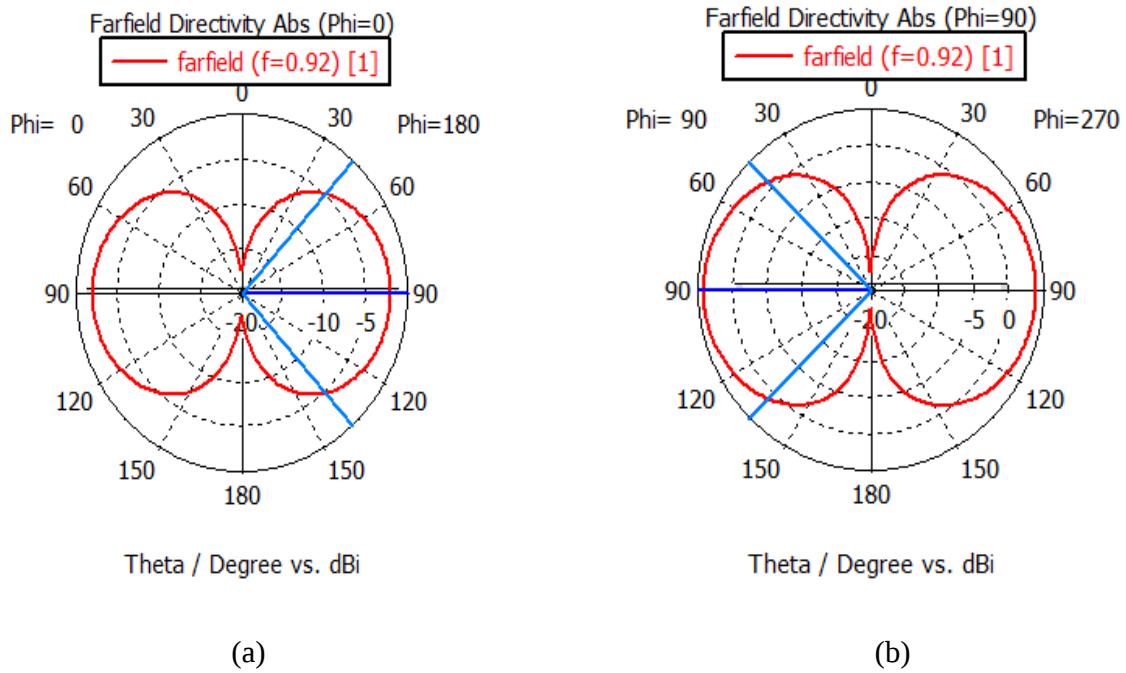


Figure III. 26: Diagramme de rayonnement (2D) dans (a) le plan E ($\phi = 0^\circ$) et (b) le plan H ($\phi = 90^\circ$) à la fréquence ($f = 0.92$ GHz).

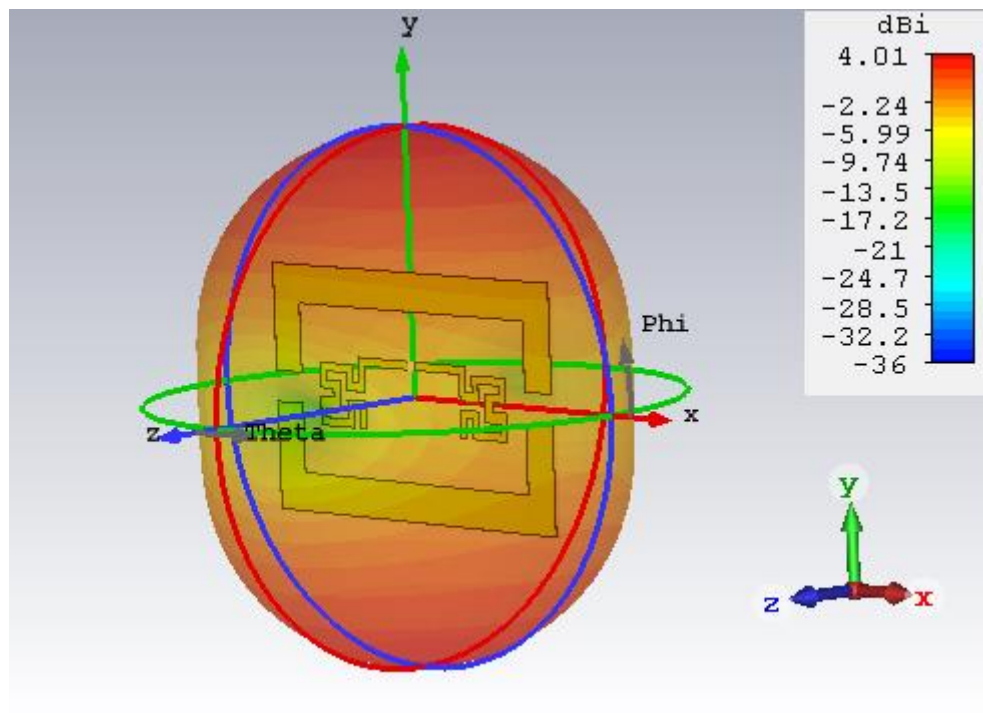


Figure III. 27: Représentation du diagramme de rayonnement avec les coordonnées Sphériques (θ, ϕ).

Les résultats mettent en évidence un comportement quasi-directionnel de l'antenne dans les deux plans principaux. Le rayonnement présente une bonne symétrie, avec une répartition spatiale relativement uniforme, ce qui est typique des structures dipolaires optimisées.

La directivité maximale obtenue est de 4,01 dBi, ce qui confirme les bonnes performances de rayonnement de l'antenne dans la bande UHF ciblée. Cette caractéristique rend la structure particulièrement adaptée aux applications RFID, où un rayonnement équilibré et suffisamment directif est souhaité pour maximiser la portée et la fiabilité de lecture.

III.7.4.2 Impédance d'entrée de l'antenne

La figure III.28 représente l'évolution de l'impédance complexe $Z(f)$ d'un circuit en fonction de la fréquence dans la bande 0,4 – 1,4 GHz. L'impédance est décomposée en deux composantes: la partie réelle $\text{Re}[Z]$ et la partie imaginaire $\text{Im}[Z]$ représentées respectivement par les courbes orange et bleue.

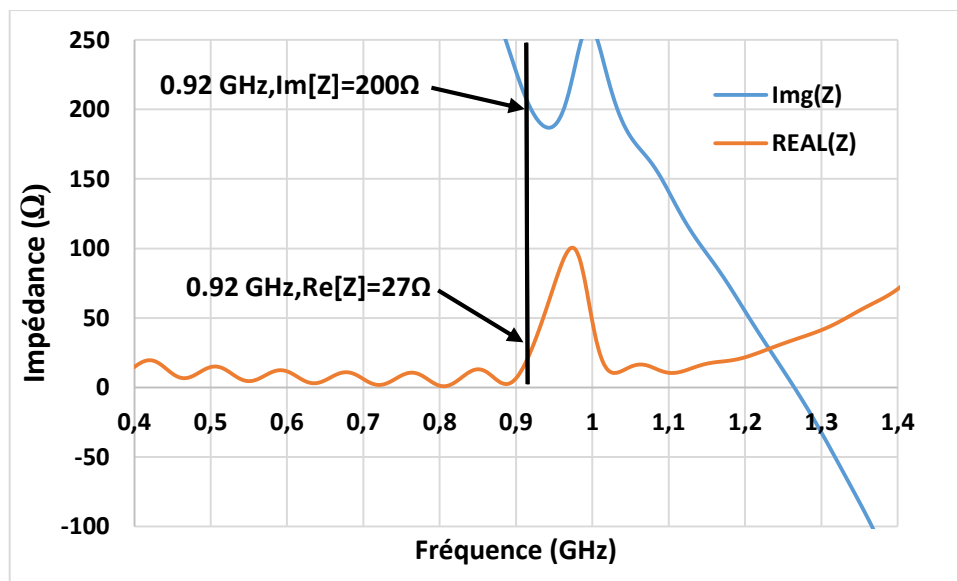


Figure III. 28: Courbes de l'impédance de l'antenne ($\text{Re}[Z]$ et $\text{Im}[Z]$) en fonction de la fréquence.

À partir de cette figure, on peut observer un comportement résonant du circuit autour de 0,92 GHz. En effet, à cette fréquence :

- La partie réelle de l'impédance atteint une valeur de 27 Ω , ce qui suggère une adaptation partielle du circuit à l'impédance caractéristique du système

- La partie imaginaire est particulièrement élevée, atteignant 200Ω , indiquant une forte réactance inductive à cette fréquence.

Ce pic dans la partie imaginaire et la variation de la partie réelle traduisent une résonance ou un désaccord important du circuit avec la charge à cette fréquence. $Z_{ant} = 27 + j 200 \Omega$, ce qui correspond au conjugué de l'impédance de la puce.

III.9 CONCLUSION

Ce travail a mis en évidence l'intérêt stratégique de l'utilisation des structures fractales, et plus particulièrement de la courbe de Hilbert, pour la miniaturisation et l'adaptation d'impédance des antennes dipôles imprimées destinées aux systèmes RFID UHF.

Dans un premier temps, l'intégration de la fonction d'adaptation directement dans la géométrie fractale s'est révélée extrêmement efficace. En exploitant les propriétés auto-similaires de la courbe de Hilbert à travers l'itération 2, l'antenne a pu être miniaturisée significativement, avec une réduction de la fréquence de résonance de 2,45 GHz à environ 0,86 GHz, tout en conservant une bonne adaptation d'impédance.

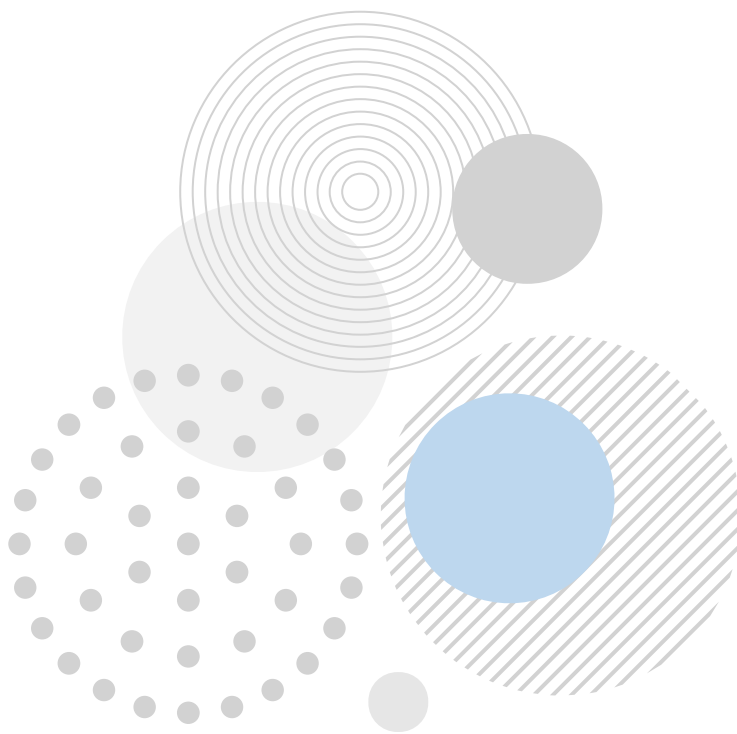
Cette approche démontre que la géométrie fractale remplit un double rôle essentiel : elle permet non seulement de réduire les dimensions physiques de l'antenne, mais aussi de contribuer activement à son adaptation sans recourir à des composants d'adaptation externes.

Dans un second temps, après la validation d'un dipôle imprimé adapté à 2,45 GHz, la géométrie fractale a été exploitée pour déplacer la fréquence de fonctionnement vers la bande UHF, autour de 920 MHz, en vue de l'intégration d'une puce RFID Alien Higgs-3, caractérisée par une impédance complexe de $Z_{puce} = 27 - j200 \Omega$.

La phase de modélisation, d'optimisation et de simulation sous CST MICROWAVE STUDIO a permis d'aboutir à une antenne bien adaptée à cette impédance, confirmant la pertinence des choix géométriques effectués.

Cette étude confirme que l'approche fondée sur les structures fractales de Hilbert constitue une solution performante, compacte et efficace pour la conception d'antennes UHF, parfaitement adaptées aux systèmes RFID, en particulier dans des environnements où les contraintes d'encombrement, d'efficacité et d'intégration sont critiques.

Conclusion générale



CONCLUSION GENERALE

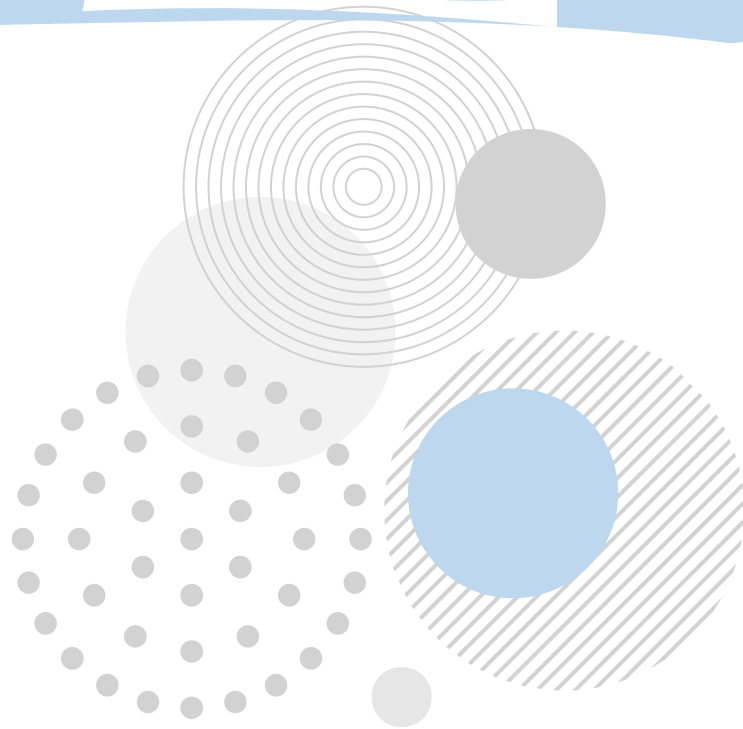
La Radio Frequency Identification (RFID) est une technologie d'identification automatique qui utilise les ondes radio pour transférer des données entre un lecteur et une étiquette électronique, appelée tag. Contrairement aux codes-barres, la RFID ne nécessite pas de ligne de vue directe, ce qui permet une identification rapide et sans contact. Le marché mondial des étiquettes RFID connaît une croissance significative, notamment dans la bande UHF. Cette bande offre des distances de communication étendues, permettant une lecture à distance de plusieurs mètres, ce qui est idéal pour des applications telles que la gestion des stocks, le suivi des actifs et la logistique. Ce travail a mis en évidence l'intérêt stratégique de l'utilisation des structures fractales, et plus particulièrement de la courbe de Hilbert, pour la miniaturisation et l'adaptation d'impédance des antennes dipôles imprimées destinées aux systèmes RFID UHF.

Dans un premier temps, l'intégration de la fonction d'adaptation directement dans la géométrie fractale s'est révélée extrêmement efficace. En exploitant les propriétés auto-similaires de la courbe de Hilbert à travers l'itération 2, l'antenne a pu être miniaturisée significativement, avec une réduction de la fréquence de résonance de 2,45 GHz à environ 0,86 GHz, tout en conservant une bonne adaptation d'impédance. Cette approche démontre que la géométrie fractale remplit un double rôle essentiel : elle permet non seulement de réduire les dimensions physiques de l'antenne, mais aussi de contribuer activement à son adaptation sans recourir à des composants d'adaptation externes.

Dans un second temps, après la validation d'un dipôle imprimé adapté à 2,45 GHz, la géométrie fractale a été exploitée pour déplacer la fréquence de fonctionnement vers la bande UHF, autour de 920 MHz, en vue de l'intégration d'une puce RFID Alien Higgs-3, caractérisée par une impédance complexe de $Z_{puce} = 27 - j200 \Omega$. La phase de modélisation, d'optimisation et de simulation sous CST MICROWAVE STUDIO a permis d'aboutir à une antenne bien adaptée à cette impédance, confirmant la pertinence des choix géométriques effectués.

Cette étude confirme que l'approche fondée sur les structures fractales de Hilbert constitue une solution performante, compacte et efficace pour la conception d'antennes UHF, parfaitement adaptées aux systèmes RFID, en particulier dans des environnements où les contraintes d'encombrement, d'efficacité et d'intégration sont critiques.

Référence Bibliographique



REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] M. Roberti, "The History of RFID Technology," *RFID Journal*, 16 Jan. 2005.
- [2] L. H. L. S. et D. M., "RFID Handbook: Applications, Technology, Security, and Privacy, Chichester", UK: John Wiley & Sons, 2008.
- [3] S. Sankalp, "Understanding the Role of RFID Antennas in Tag and Reader Communication," *Journal*, 2 Sept. 2024.
- [4] "Introduction à la RFID," Centre National RFID. [En ligne]. Disponible: <http://www.centrenational-rfid.com/introduction-a-la-rfid-article-15-fr-ruid-17.html>
- [5] "RFID Technology," Etikouest Converting. [En ligne]. Disponible: <https://www.etikouest-converting.com/en/company/rfid-technology/>
- [6] "History of RFID," Chainlane Blog. [En ligne]. Disponible: <https://www.chainlane.io/blog/rfid-history>
- [7] "RFID Basics and History," Datascan. [En ligne]. Disponible: <https://datascan.com/fr/rfid-basics-and-history/>
- [8] K. Ahsan, H. Shah, et P. Kingston, "RFID Applications: An Introductory and Exploratory Study," *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, vol. 7, no. 1, no. 3, Jan. 2010.
- [9] "Fonctionnement d'un système RFID," Connectwave. [En ligne]. Disponible: <https://www.connectwave.fr/techno-appli-iot/rfid/fonctionnement-dun-svsteme-rfid/>
- [10] S. Lewis, "A Basic Introduction to RFID Technology and Its Use in the Supply Chain," LARAN RFID, White Paper, 2004.
- [11] M. Khelladi, F. Mouhoubi, W. Walid, "Conception d'antennes tags miniatures UHF pour applications RFID," *Mémoire d'ingénieur, École Nationale Polytechnique*, 2009–2010.
- [12] K. Finkenzeller, "RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification", 2nd ed., Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2003.
- [13] A. Ghiotto, "Conception d'antenne de tag RFID UHF, Application à réalisation par jet de matière," *Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble*, Nov. 2008.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [14] S. B. Miles, S. E. Sarma, et J. R. Williams, "Chapter 2: RFID technology and its applications," 2nd ed, Cambridge University Press, 2008, pp. 16–32.
- [15] S. A. Ahson et M. Ilyas, (éds.), "RFID Handbook: Applications, Technology, Security, and Privacy", 1st ed., Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [16] R. Kheddam, "Approches logicielles de sûreté de fonctionnement pour les systèmes RFID," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Spécialité Informatique, 9 avr. 2014.
- [17] C. M. T. Calafate, P. Manzoni, et M. R. Hossain, "Introduction to RFID Technology."
- [18] "Applications de la technologie RFID," Sick Sensor Blog. [En ligne]. Disponible: www.sick.com/fr/fr/sick-sensor-blog/quelles-sont-les-applications-de-la-technologie-rfid-/w/blog-rfid-technology-3/
- [19] A. Douidi, O. Chikh, "Conception et simulation de tags RFID," Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen, 2017–2018.
- [20] N. Rouabeh, « Modélisation et simulation des antennes RFID à base de métamatériaux, » Mémoire de Magister, Laboratoire de Recherche DIMMER, Université Ziane Achour-Djelfa, 2014.
- [20] "Les antennes," ARISS Formation. [En ligne]. Disponible: <https://f5xg.jimdofree.com/ariss-formation/formation-technique/les-antennes/>
- [22] IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas, IEEE Std 145-2013.
- [23] "Rôle des antennes émettrices et réceptrices," Maxicours. [En ligne]. Disponible: <https://www.maxicours.com/se/cours/role-des-antennes-emettrices-et-receptrices/>
- [24] J. D. Kraus et R. J. Marhefka, "Antennas for All Applications", 3rd ed., New York: McGraw-Hill, 2002.
- [25] "E-learning FACSci," Université Annaba. [En ligne]. Disponible: <https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/>
- [26] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", 3rd ed., Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 4 avr. 2005.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [27] W. Benabderrahmane, "Étude et adaptation d'antennes TAG RFID," Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen, 30 juin 2019.
- [28] "Introduction to antenna polarization," JEM Engineering Blog. [En ligne]. Disponible: <https://jemengineering.com/blog-intro-to-antenna-polarization/>
- [29] D. J. Griffiths, "Introduction to Electrodynamics", 4th ed., Boston: Pearson (Addison-Wesley), oct. 2012.
- [30] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", 4th ed., Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 22 nov. 2011.
- [31] B. Bourezzane, A. E. Mansouri, "Conception d'une antenne de tag RFID passif sur la bande UHF," Mémoire de Master Académique, Université Kasdi-Merbah-Ouargla.
- [32] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", 4th ed., Wiley, 2016.
- [33] H. Bouteldja, M. A. Zidane, "Étude et conception d'antennes imprimées pour identification RFID," Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, juin 2015.
- [34] "IOT, NFC, RFID News & Knowledge," RFID Tag World. [En ligne]. Disponible: <https://www.rfidtagworld.com/news/IOT-News-NFC-News-RFID-News-Knowledge-1.html>
- [35] K. Finkenzeller, "RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification", 3rd ed., Chichester, UK: John Wiley & Sons, juin 2010.
- [36] N. Popović, "UHF RFID Antenna: Printed Dipole Antenna with a CPS Matching Circuit and Inductively Coupled Feed," International Journal of Engineering Business Management", vol. 4, no. 1, 2012.
- [37] J. Curty, N. Joehl, C. Dehollain, et M. J. Delercq, "Remotely Powered Addressable UHF RFID Integrated System," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 40, no. 11, pp. 2193–2202, Nov. 2005.
- [38] A. Ghiotto, S. F. Cantalice, T. P. Vuong, A. Pouzin, G. Fontgalland, et S. Tedjini, "Miniaturized Patch Antenna for the Radio Frequency Identification of Metallic Objects," Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. (IMS), Atlanta, 15–20 June 2008.

- [39] A. M. A. Salama, "Antennas of RFID Tags," dans *Radio Frequency Identification: Principes et applications de l'identification par radiofréquence, Méthodes de conception et solutions*, C. Turcu, éd., Croatie: IntechOpen, fév. 2010.
- [40] G. Marroco, "The art of UHF RFID antenna design: impedance-matching and size reduction technique," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 50, no. 1, pp. 66–79, Feb. 2008.
- [41] M. S. Sneha, P. J. Deore, et J. B. Jadhav, "Meandering Dipole Antenna for Passive UHF RFID Application," *International Journal of Advances in Electronics and Computer Science*, vol. 2, no. 8, août 2015.
- [42] M. B. Nogueira, "Conception d'un système d'antennes pour la localisation en temps réel avec réseau de capteurs sans fils," *Thèse de doctorat, Université de Grenoble*, 13 déc. 2013.
- [43] F. Z. Gourari, "Étude et Conception d'antennes RFID UHF : modèle électrique et miniaturisation," *Thèse de Master, Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen*, 2018.
- [44] N. E. M. Bahloul et S. Daif, "Adaptation d'impédance des antennes pour des tag RFID," *Mémoire de Master Académique, Université 8 Mai 1945 – Guelma*, 2023–2024.
- [45] F. K. Byondi et Y. Chung, « UHF RFID Conductive Fabric Tag Design Optimization », *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5380, Août 2021, doi: 10.3390/s21165380.