

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

Université 8Mai 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 Technologie**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

Adaptation d'impédance des antennes pour des tag RFID

Présenté par :

Bahloul Nor El malak

Daif Sara

Sous la direction de :

Dr. Mahri Omar

Année Universitaire : 2023-2024

Remerciement Remerciement

« Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, MAHRI OMAR, pour son encadrement, sa patience et sa confiance tout au long de ce travail de recherche. Ses précieux conseils, son expertise et son soutien inébranlable ont été d'une aide inestimable et ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

*Mes remerciements vont également à l'ensemble des professeurs du département de **Département d'Electronique et Télécommunications de l'Université, 8 Mai 1945 _Guelma_ Faculté des Sciences et de la Technologie** pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mes années d'études. Leur passion et leur dévouement pour la recherche m'ont inspiré et motivé à poursuivre mes propres questionnements scientifiques.*

Merci également aux membres du jury de ma soutenance de mémoire pour avoir accepté de faire partie du jury. Leurs remarques et suggestions ont été précieuses et m'ont permis d'en améliorer la qualité.

Un merci spécial à mes camarades de classe et amis, SOUFIEN, AMANI, IMANE, SAMIRA, pour leurs encouragements, leurs échanges intellectuels stimulants et pour tous les moments partagés.

Je ne saurais oublier ma famille, BAHLOUL et DAIF, pour leur soutien indéfectible et pour avoir toujours cru en moi. Leurs encouragements ont été mon refuge et ma motivation durant tout le parcours académique.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Que ce soit à travers des discussions enrichissantes, des conseils ou simplement par leur présence, leur contribution a été précieuse.

Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif autant que personnel, et je suis profondément reconnaissant envers tous ceux qui m'ont accompagné. »

Dédicace

« Où peut-on être mieux qu'au sein de sa famille ! »

Jean-François Marmontel

Je voudrais consacrer ce travail.

À mes chers parents Bahloul Djamel et Amirouche Hasiba, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À mes sœurs Rjma et Chahd, mes amis Sara, Samira, Amani et Khawla et Je suis tellement reconnaissante envers mon chat mechmech qui veille avec moi la nuit et à tous ceux qui sont dans ma vie... pour leurs encouragements et leur amour.

À toutes les personnes qui m'ont soutenu.

Merci d'être toujours là pour moi.

Bahloul nor el malaK

Dédicace

Avant tout je dis el hAmdou lillAh 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 :

A Mes chers parents :

SAADI et RBIHA que je respecte beaucoup, car ils m'ont tout donnée et aisée dans ma vies personnel et professionnel et je souhaite que je rembourse tous ce sacrifices.

A mes frères :

ABD ELAZIZ , sa femme INES et leur prince AMIR,

SALIM, sa femme HADJER et leur prince MOHAMED BAYREM et la princesse MERIEM BATOUL.

A mes sœurs :

KENZA et CHAIMA.

Merci pour l'Aide, merci pour l'encouragement et merci pour tout.

A tous mes amis et collègues :

MALAK, AMANI,IMANE

A mon professeur :

OMAR MAHRI .

Qui m'a encadré tout Au long de mon cursus universitaire.

A toute ma famille : DAIF

Daif sara

RESUME

La RFID, identification par radio fréquence, est une technologie émergente qui permet l'identification des objets, personnes ou animaux à l'aide des ondes radio (sans contact). Le principe est basé sur la rétrodiffusion d'un signal émet à partir de la station de base (lecteur ou interrogateur) vers l'étiquette RFID (tag) où se trouve une très sensible antenne, le tag communique ainsi son identifiant par rétro-modulation du signal reçu par le lecteur. Ce signal permet après modulation et décodage au niveau de l'interrogateur d'avoir l'identifiant EPC (Electronic Product Code) du tag RFID. C'est le principe de base de la RFID passive qui contribue à l'élan de l'électronique ubiquitaire pour la traçabilité des articles à base de technologie d'auto-identification.

Ce projet de fin d'études vise à concevoir des antennes imprimées pour des applications RFID opérant dans la bande UHF à 0,868 GHz (Europe) et 0,915 GHz (USA), et à les adapter à des puces RFID existantes sur le marché en utilisant le logiciel CST, notamment les antennes dipôles basées sur des motifs fractals. Pour cela, deux conceptions d'antennes ont été présentées : la première basée sur le fractal de Hilbert à la deuxième itération, et la deuxième basée sur le fractal de Hilbert à la troisième itération. Pour chaque antenne, la géométrie et les dimensions ont été optimisées, en utilisant la technique des méandres pour l'adaptation.

Les performances de ces antennes ont été évaluées à travers la représentation du coefficient de réflexion, du diagramme de rayonnement et de l'impédance d'entrée.

Mots-clés : Identification par radiofréquence (RFID), RFID UHF passive, tag RFID, conception d'antennes imprimés, simulation, puce électronique.

ABSTRACT

Radio Frequency Identification (RFID) is an emerging technology that promises to be ubiquitous in the near future. It allows for the identification of objects by exchanging data through radio frequency signals and the ability to dynamically store information and communicate wirelessly with their environment. Applications include traceability, medical monitoring of patient status, production control, and more.

In this work, we studied the architecture of RFID systems and focused on passive UHF RFID technology, specifically the design of printed RFID tag antennas for UHF frequencies of 0.868 GHz and 0.915 GHz.

Various antenna designs were studied, designed, and based on fractal geometries and meander technique. For each antenna, we optimized its geometry and dimensions using multiple simulations with CST software. The performance of these antennas was also evaluated by plotting the reflection coefficient, radiation pattern, and input impedance. An antenna prototype was fabricated to verify the simulation results.

These antennas will provide the link between a reader and an electronic chip attached to them, in which data about the object carrying the tag will be stored.

Keywords: Radio Frequency Identification (RFID), passive UHF RFID, RFID tag, printed antenna design, simulation, electronic chip.

ملخص

RFID، أو التعريف عن طريق موجات الراديو، هي تقنية ناشئة تسمح بتحديد الأشياء أو الأشخاص أو الحيوانات باستخدام موجات الراديو (بدون تلامس). يعتمد المبدأ على إعادة إرسال إشارة من محطة أساسية (قارئ أو استجواب) إلى ملصق RFID (علامة) حيث يوجد هوائي حساس للغاية، وبالتالي ينقل الملصق معرفه عن طريق إعادة تعديل الإشارة المستلمة بواسطة القارئ. تسمح هذه الإشارة، بعد التعديل وفك التشفير على مستوى الاستجواب، بالحصول على رمز المنتج الإلكتروني (EPC) لعلامة RFID. هذا هو المبدأ الأساسي لـ RFID السلبي الذي يساهم في ازدهار الإلكترونيات في كل مكان لتتبع العناصر باستخدام تقنية التعريف الذاتي.

يهدف مشروع نهاية الدراسة هذا إلى تصميم هوائيات مطبوعة لتطبيقات RFID العاملة في نطاق UHF عن 0.868 جيجاهرتز (أوروبا) و 0.915 جيجاهرتز (الولايات المتحدة الأمريكية)، وتكييفها مع شرائح RFID الموجودة في السوق باستخدام برنامج CST، وخاصة الهوائيات ثنائية القطب المستندة إلى أنماط الفركتلات. لهذا الغرض، تم تقديم تصميمين للهوائيات: الأول يعتمد على فركتال هيلبرت في التكرار الثاني، والثاني يعتمد على فركتال هيلبرت في التكرار الثالث. لكل هوائي، تم تحسين الهندسة والأبعاد باستخدام تقنية المتعرجات للتكيف.

تم تقييم أداء هذه الهوائيات من خلال تمثيل معامل الانعكاس ونمط الإشعاع ومقاومة الدخل.

الكلمات المفتاحية: التعرف عن طريق التردد الراديوي (RFID)، UHF RFID السلبي، ملصق RFID، تصميم هوائي مطبوع، محاكاة، شريحة إلكترونية.

TABLE DES MATIÈRES

TITRES	PAGES
REMERCIEMENT	VII
DEDICACE	VII
RESUME	VII
TABLES DES MATIERES	VII
LISTES DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES ABREVIATIONS	VII
SYMBOLES	VII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : LA TECHNOLOGIE RFID	
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 HISTORIQUE ET DEVELOPPEMENT DE LA RFID	3
I.3 DEFINITION	4
I.4 COMPOSITION D'UN SYSTEME RFID	5
I.4.1 L'ÉTIQUETTES RFID	6
I.4.1.1 L'étiquette RFID sans puce	6
I.4.1.2 L'étiquette RFID avec puce	7
I.4.2 UN LECTEUR RFID	10
I.4.3 UNE INFRASTRUCTURE D'APPUI	10
I.5 LA PUCE RFID	11
I.6 L'ANTENNE DU TAG RFID	12
I.7 LA FREQUENCE DE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES RFID	13
I.8 COMPARATIFS DES DIFFERENTS SYSTEMES RFID	15
I.9 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	16
I.9.1 LES SYSTEMES A COUPLAGE MAGNETIQUES (EN CHAMP PROCHE)	16
I.9.1.1 Les systèmes LF	17
I.9.1.2 Les systèmes HF	17
I.9.2 LES SYSTEMES A COUPLAGE ELECTROMAGNETIQUE (EN	18

CHAMP LOINTAIN)	
I.10 REGLEMENTATION ET NORMALISATION	19
I.11 DOMAINES D'APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE RFID	19
I.11.1 RFID DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE	19
I.11.2 RFID DANS LE DOMAINE MEDICAL	20
I.11.3 RFID DANS LA MARINE	21
I.11.4 RFID ET LES DOCUMENTS D'IDENTITE	21
I.11.5 RFID DANS L'ARMEE	22
I.12 RFID DANS LES SYSTEMES D'ENTREPOSAGE ET DE DISTRIBUTION	23
I.13 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA TECHNOLOGIE RFID	23
I.14 CONCLUSION	24
CHAPITRE II : METHODES D'ADAPTATION DES ANTENNES AUX PUCES RFID	
II.1 INTRODUCTION	25
II.2 DEFINITION D'UNE ANTENNE	25
II.3 BREF HISTORIQUE	26
II.4 APPLICATIONS DES ANTENNES	27
II.5 MECANISME DE TRAVAIL L'ANTENNE	27
II.6 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES D'UNE ANTENNE	28
II.6.1 CARACTERISTIQUES DE RAYONNEMENTS	28
II.6.1.1 Les régions du champ électromagnétique	28
II.6.1.2 Diagramme de rayonnement	29
II.6.1.3 Efficacité de rayonnement	29
II.6.1.4 Directivité	30
II.6.1.5 Le gain	30
II.6.1.6 La polarisation de champ	30
II.6.2 CARACTERISTIQUE DE CIRCUIT	32
II.6.2.1 Impédance d'entrée	32
II.6.2.2 Coefficient de réflexion	32
II.6.2.3 Le coefficient de transmission	33
II.6.2.4 Facteur de qualité	33

II.6.2.5 La bande passante	33
II.6.2.6 distance de Lecteur	33
II.7 TYPES D'ANTENNE RFID	34
II.7.1 ANTENNES UNIVERSELLES	35
II.7.2 ANTENNES RFID LARGE PORTEE (UHFLONGUE PORTEE)	35
II.7.3 ANTENNES RFID COURTE PORTEE	36
II.7.4 ANTENNES RFID ROBUSTES	36
II.7.5 ANTENNES RFID DU SOL	37
II.8 CLASSIFICATION DES ANTENNES	37
II.8.1 ANTENNES OMNIDIRECTIONNELLES	38
II.8.2 LES ANTENNES SECTORIELLES	38
II.8.3 ANTENNES DIRECTIONNELLES DIRECTIVES	39
II.9 LES METHODES DE MINIATURISATION DE L'ANTENNE	39
II.9.1 REPLIEMENT DU DIPOLE (MEANDRING)	40
II.9.2 UTILISATION DES ANTENNES FRACTALES	41
II.10 LES METHODES D'ADAPTATION D'IMPEDANCE	43
II.10.1 ADAPTATION PAR UN T (T-MATCH)	43
II.10.2 ADAPTATION AVEC UNE BOUCLE A COUPLAGE INDUCTIF	45
II.10.3 ADAPTATION PAR UTILISATION DES FENTES	46
II.10.4 ADAPTATION PAR CHARGES CAPACITIVES AUX EXTREMITES	47
II.10.5 ADAPTATION D'UNE ANTENNE DIPOLE PAR UNE INDUCTANCE SERIE (UTILISATION DES MEANDRES)	48
II.11 LA METHODOLOGIE DE CONCEPTION D'ANTENNE DU TAG RFID	48
II.11.1 METHODOLOGIE DE CONCEPTION	48
II.11.2 LES EXIGENCES DE CONCEPTION	49
II.12 OUTILS DE SIMULATION	50
II.13 CONCLUSION	53
CHAPITRE III : CONCEPTION ET ADAPTATION DES ANTENNES AUX PUCES RFID	

III.1 INTRODUCTION	55
III.2 DEFINITION DU LOGICIEL CST STUDIO SUITE	55
III.3 FRACTALE DE HILBERT A L' ITERATIONS DEUX	55
III.3.1 ANTENNE DIPOLE FRACTALE RFID (2.45 GHz) ADAPTEE A 50 Ω	56
III.3.2 ANTENNE DIPOLE FRACTALE A LA DEUXIEME ITERATION RFID (0.868 GHz) ADAPTEE A 50 Ω	58
III.3.3 ANTENNE DIPOLE FRACTALE A L'ITERATION 2 ADAPTEE A UNE PUCE RFID	60
III.3.3.1 effet des dimensions	61
III.4 FRACTALE DE HILBERT A L'ITE RATIONS TROIS	66
III.4.1 ANTENNE DIPOLE FRACTALE A L'ITERATION TROIS (2.45GHz) ADAPTEE A 50 Ω	67
III.4.2 ANTENNE DIPOLE FRACTALE A L'ITERATIONS TROIS RFID (0.868 GHz) ADAPTEE A50 Ω	69
III.4.3 ANTENNE DIPOLE FRACTALE RFID A L'ITERATIONS TROIS ADAPTEE A UNE PUCE RFID	70
III.4.3.1 effet des dimensions	72
III.5 CONCLUSION	76
CONCLUSION GENERALE	79
BIBLIOGRAPHIQUE	80

LISTE DES FIGURES

TITRES	PAGES
CHAPITRE I : LA TECHNOLOGIE RFID	
Figure I.1 : la technique de RFID.	5
Figure I.2 : les éléments principaux d'un système RFID	6
Figure I.3 : concept d'un système SAW RFID	7
Figure I.4 : un exemple d'un tag RFID actif	8
Figure I.5 : un exemple d'un tag RFID UHF passif	9
Figure I.6 : un exemple d'un tag semi passif.	9
Figure I.7 : Les différents types des lecteurs RFID	10
Figure I.8 : présente le schéma général d'un lecteur RFID.	11
Figure I.9 : Présente quelques exemples d'antennes de tag RFID UHF et micro-ondes	12
Figure I.10 : Fréquences couramment utilisées en RFID.	13
Figure I.11 : Schéma explicatif d'un couplage inductif	16
Figure I.12 : Tag RFID LF	16
Figure I.13 : tag RFID HF	17
Figure I.14 : Principe de fonctionnement de la RFID à couplage électromagnétique	18
Figure I.15 : Utilisation d'RFD dans l'industrie automobile	20
Figure I.16 : Utilisation de la RFID dans les soins de santé	20
Figure I.17 : Utilisation de la RFID dans la Marine	21
Figure I.18 : Utilisation de la RFID dans les documents d'identité	22
Figure I.19 : Utilisation de la RFID dans l'armée	22
Figure I.20 : Utilisation de la RFID dans les systèmes d'entreposage et de distribution.	23
CHAPITRE II: METHODES D'ADAPTATION DES ANTENNES AUX PUCES RFID	
Figure II.1 : Système de communication sans fil comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice.	26
Figure II.2: Historique des radiocommunications.	26

Figure II.3 : Quelques applications des antennes selon la bande de fréquences.	27
Figure II.4 : Régions du champ électromagnétique d'une antenne.	29
FigureII.5 :Différent représentation du diagramme de rayonnement.	29
Figure II.6 : Antenne polarisée linéairement.	31
Figure II.7 : Antenne polarisée circulairement.	31
Figure II.8 : L'impédance modèle de circuit RFID.	32
Figure II.9 : Exemple d'une bande passante.	33
Figure II.10 : Illustration de la distance de lecture entre un lecteur RFID et un tag.	34
figure II.11 : Antenne universelle RFID laird 980.	35
figure II.12 : Antenne RFID large porté.	35
figure II.13 : Antenne RFID courte portée.	36
figure II.14 : Antenne RFID robustes.	37
figure II.15 : Antenne RFID du sol.	37
figure II.16 : Diagramme de rayonnement d'une antenne omnidirectionnelle Isotrope.	38
figure II.17 : Diagramme de rayonnement d'une antenne sectoriel.	39
figure II.18 : Diagramme de rayonnement d'une antenne Directionnelle.	39
FigureII.19 : Géométrie de base d'une antenne méandre	40
Figure II.20 : Les paramètres décrivant la géométrie d'une antenne méandre	41
Figure II.21 : Processus de génération itérative des fractales	42
Figure II.22 : Adaptation en T et son circuit équivalent	43
Figure II.23 : Court-circuit formé par la ligne de transmission de deux conducteurs	44
Figure II.24 : Ligne de transmission a deux conducteurs	44
Figure II.25 : Adaptation par un couplage inductif et son circuit équivalent	45
Figure II.26 : Configuration d'une antenne adaptée par fente	46

Figure II.27 : Adaptation par charges capacitives aux extrémités	47
Figure III.28 : Adaptation par utilisation des méandres	48
Figure II.29 : Méthodologie de conception des antennes RFID	49
Figure II.30 : Méthodologie de simulation d'antenne	52
CHAPITRE III : CONCEPTION ET ADAPTATION DES ANTENNES AUX PUCES RFID	
Figure III.1 : Géométrie de Hilbert à la deuxième itération.	56
Figure III.2 : Structure de l'antenne dipôle fractale à la deuxième itération.	56
Figure III.3 : Conception de Structure de l'antenne dipôle fractale à l'itération 2 sous CST.	57
Figure III.4 : Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale mono-bande (2.45 GHz).	57
Figure III.5 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération 2 avec méandres.	58
Figure III.6 : Conception de l'antenne dipole fractale à l'itération 2 avec méandres sous CST.	59
Figure III.7 : Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale à l'itération 2 avec méandres.	59
Figure III.8 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération 2 avec puce.	60
Figure III.9 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération 2 avec puce sous CST.	61
Figure III.10 : Impédance de la puce simulée en fonction de la fréquence pour différents valeurs de paramètre « a ». (a) partie réelle. (b) partie imaginaire.	62
Figure III.11 : Impédance de la puce simulée en fonction de la fréquence pour différents valeurs de paramètre « x ». (a) partie réelle.	63

(b) partie imaginaire.	
Figure III.12 : Impédance de la puce simulée en fonction de la fréquence pour différents valeurs de paramètre « s ». (a) partie réelle (b) partie imaginaire.	64
Figure III.13 : Diagramme de rayonnement en 2D.	65
Figure III.14 : Diagramme de rayonnement en 3D.	65
Figure III.15 : La partie réelle et imaginaire de l'impédance de l'antenne simulée en fonction de la fréquence.	66
Figure III.16 : Structure de troisième itération de Hilbert.	67
Figure III.17 : Géométrie de l'antenne dipole fractale à l'itération trois adaptée à 50Ω.	67
Figure III.18 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération trois sous CST.	68
Figure III.19 : Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale à l'itération trois.	68
Figure III.20 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération trois.	69
Figure III.21 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération trois sous CST.	70
Figure III.22 : Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale.	70
Figure III.23 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération trois avec puce.	71
Figure III.24 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération trois avec puce sous CST.	71
Figure III.25 : Impédance de la puce en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs du paramètre 'a'. (a) partie réelle (b) partie imaginaire.	72
Figure III.26 : Impédance d'entrée en fonction du paramètre 'x'. (a) partie réelle (b) partie imaginaire.	73

Figure III.27 : Impédance d'entrée en fonction du paramètre 's'. (a) partie réelle (b) partie imaginaire.	74
Figure III.28 : Diagramme de rayonnement en 2D.	75
Figure III.29 : Diagramme de rayonnement en 3D.	75
Figure III.30 : La partie réelle et imaginaire de l'impédance de l'antenne simulée en fonction de la fréquence.	76

LISTE DES TABLEAUX

Titres	Pages
CHAPITRE I : LA TECHNOLOGIE RFID	
Tableau I.1: Comparaison des différents systèmes RFID à bande étroite	10
Tableau I.2: les différentes fréquences des systèmes RFID	14
Tableau I.3: fréquences autorisée pour les applications RFID	14
Tableau I.4: Comparaison de différentes bandes de la technologie RFID	15
Tableau I.5: Avantages et inconvénients de la technologie RFID	24
CHAPITRE III : CONCEPTION ET ADAPTATION DES ANTENNES AUX PUCES RFID	
Tableau III.1 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale Mono-Bande.	57
Tableau III.2 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale à l'itération 2 avec méandres.	58
Tableau III.3 : Exemple de puces RFID-UHF disponible dans le marché.	60
Tableau III.4 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale à l'itération 2.	61
Tableau III.5 : Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « a ».	62
Tableau III.6 : Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre 'x'.	63
Tableau III.7 : Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre 's'.	64
Tableau III.8 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale à l'itération trois.	68

Tableau III.9 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale à l'itération trois.	69
Tableau III.10 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale à l'itération trois.	71
Tableau III.11 : Résultats de simulation selon la variation du paramètre 'a'.	72
Tableau III.12 : Résultats de simulation selon la variation du paramètre 'x'.	73
Tableau III.13 : Résultats de simulation selon la variation du paramètre 's'.	74

LISTE DES ABREVIATIONS

Bf : basse fréquence ;

CST : Computer Simulation Technologie ;

CST MWS: Computer Simulation Technology Micro Wave Studio ;

dB: decibels ;

dBi: decibel isotopic ;

EM : électromagnétique ;

EPC: Electronic Product Code GLOBAL;

ETSI : European Télécommunications Standards Institute ;

EU : European Union;

FCC : Federal Communications Commission ;

GPS : Global Positioning System;

GSM :Global System for Mobile communications;

HF : Haut Frequency;

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers ;

ISO : International Organization for Standardization;

IBM : International Business machines;

IFF : Identify , Friend or Foe ;

LF : Low Frequency;

MIT : Massachusetts Institute of Technology ;

PTM : Point To Multi Point Communication ;

PTMP : Point à Multi Point ;

RFID : Radio-Frequency Identification;

SAW : Surface Acoustique Wave ;

SHF : Super High Frequency;

TBF : Très basses fréquences ;

UHF : Ultra haute fréquence (Ultra High Frequency);

US : United States .

SYMBOLES

$D(\theta, \varphi)$: Directivité de l'antenne lecteur dans la direction (θ, φ) ;

$G(\theta, \varphi)$: le Gain de l'antenne lecteur dans la direction (θ, φ) ;

P_{ray} : La puissance rayonnée d'une antenne ;

P_{accp} : La puissance acceptée par une antenne ;

R: Résistance d'antenne ;

X: réactance d'antenne ;

Γ : Coefficient de réflexion;

S_{11} : Coefficient de réflexion (premier élément de la matrice chaîne);

r: la distance théorique de lecture ;

EIRP: puissance isotope rayonnée équivalente.

G_t : le gain de l'antenne d'émission

G_r : le gain de l'antenne de réception

P_r : la puissance collectée sur l'antenne de réception

λ : Longueur d'onde

τ : coefficient de transmission

η_{ray} : Rendement de la puissance rayonnée

Q : Facteur de qualité

ω : Longueur d'Onde

BW : Bande passante



*INTRODUCTION
GENERALE*

La RFID l'identification par radiofréquence est une forme de communication sans fil qui incorpore l'utilisation d'un couplage électromagnétique ou électrostatique dans la partie radiofréquence du spectre électromagnétique pour identifier de manière unique un objet, un animal ou une personne.

Les premières applications à grande échelle de la technologie RFID (radio Frequency identification) ont vu le jour durant les années 90 pour l'identification des animaux, principalement les bovins et ovins, dans les systèmes de contrôle d'accès dans les immeubles ou les autobus, la logistique, ou encore pour la protection contre le vol. Les études de marché annoncent une utilisation accrue de cette technologie dans les années à venir et ce dans divers domaines de la vie courante.

Le principe de base du fonctionnement de la RFID est simple, il s'agit d'échanger des informations numériques à moyenne distance par radiofréquence. Ces informations devront être contenues dans un support de très petite taille et de très faible cout. Cette technologie offre la possibilité de faire de la lecture multiple (lecture de plusieurs objets simultanément) et la visibilité directe n'est pas nécessaire.

L'objectif de ce travail est de concevoir et d'analyser de deux types d'antennes dipôles à base du fractale de Hilbert, afin de les adapter à des puces RFID fonctionnant dans la bande UHF (860-960) GHz en utilisant le logiciel CST-MWS comme plateforme de conception et de simulation.

Le manuscrit est réparti en trois chapitres, comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons définir la technologie RFID et son principe de fonctionnement, Les éléments principaux d'un système RFID, ainsi que les différentes bandes radiofréquences seront passés en revue. Les différents domaines d'application de la technologie RFID, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette technologie seront évoqués.

Le deuxième chapitre portera dans un premier temps sur les paramètres fondamentaux des antennes (définition ; application ; mécanisme de travail ; caractéristiques de rayonnements et de circuit) ainsi que les types et la classification de ces antennes et en termine par les méthodes de miniaturisation de l'antenne. Dans le deuxième temps, on

Introduction générale

s'intéresse à l'adaptation d'impédance des tags RFID UHF passif aux antennes et les différentes méthodes d'adaptation et de conception les plus connus.

Le troisième chapitre est consacré à la conception, l'analyse et la simulation de deux types d'antennes dipôles imprimées en forme de fractal de Hilbert à l'itération 2 et l'itération 3, ces antennes seront associées à des tags RFID par la technique d'adaptation de méandres. Puis nous allons passer aux résultats de simulation tel que l'impédance d'entrée de l'antenne et le diagramme de rayonnement. Tous les résultats de simulation sont suivis par des commentaires.

Le travail est achevé par une conclusion générale.



CHAPITRE I
La thechnologie RFID

I.1 INTRODUCTION

L'identification par radiofréquence, mieux connue sous le nom de RFID, est une technologie experte, très compétitive et flexible, particulièrement adaptée aux opérations automatisées. Contrairement à d'autres technologies d'identification comme les codes à barres, la RFID utilise les ondes radio pour lire les données contenues dans des dispositifs appelés étiquettes ou tags RFID. Cette technologie est principalement utilisée pour surveiller, identifier et suivre à distance des objets, des animaux et des personnes en utilisant les ondes radio.

Dans ce chapitre nous allons donner quelques notions sur la technologie RFID, ainsi que son historique et son évolution au fil du temps. Le système RFID et ses constituants seront décrits à savoir le lecteur, les tags et le système de traitement de données, nous discutons aussi les principes de fonctionnement, et quelques applications. Ensuite, les différents types de tags ainsi que les fréquences de fonctionnement de la technologie RFID seront détaillées, et nous allons parler sur l'état de l'art des systèmes RFID UHF passif, ainsi que quelques applications de la technologie RFID. Nous terminerons par les différents avantages et inconvénients de la technologie RFID.

I.2 HISTORIQUE ET DEVELOPPEMENT DE LA RFID

Les systèmes RFID ne sont pas nouveaux dans leur principe, des dispositifs d'identification d'avions par transpondeurs IFF (Identify : Friend or Foe) ont été utilisés dès la deuxième guerre mondiale, mais ce sont les progrès des télécommunications et de l'électronique en générale qui ont rendu possible le développement de cette technique, en plein essor depuis quelques années, nous pouvons échelonner l'évolution de la technologie RFID comme suit :

- ❖ **En 1940** : La notion de RFID (identification par fréquences radio) est apparue la première fois lors de la seconde guerre mondiale ; il est directement lié au développement de la radio et du radar (1935 : Watson-Watt). Pour identifier si les avions qui arrivaient dans l'espace aérien britannique étaient amis ou ennemis, les alliés mettaient en place dans leurs avions des transpondeurs afin de répondre aux

interrogations de leurs radars. Ce système, dit IFF (Identify : Friend or Foe) est la première utilisation de la RFID.

- ❖ **En 1969** : Le premier brevet lié à la technologie RFID est déposé aux Etats-Unis par Mario Cardullo qui l'utilise pour l'identification des locomotives.
- ❖ **En 1970** : Les systèmes RFID restent une technologie confidentielle, à usage militaire pour le contrôle d'accès aux sites sensibles, notamment dans le secteur du nucléaire.
- ❖ **En 1980** : La technologie est transférée vers le secteur privé ; dès le début des années 1980, les tags RFID commencent à être fabriqués par plusieurs sociétés européennes et américaines. Les avancées technologiques permettent l'apparition du tag passif recevant son énergie par le signal du lecteur. Cette particularité rend le tag moins coûteux car il permet l'absence de source d'énergie embarquée.
- ❖ **En 1990** : Début de la normalisation pour une interopérabilité des équipements RFID.

De plus, la miniaturisation du système RFID permet son intégration dans une seule puce électrique par IBM.

- ❖ **En 1999** : Fondation par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) de l'Auto-ID center : centre de recherches spécialisé en identification automatique entre autre RFID.
- ❖ **En 2004** : Le "Auto-ID Center" du MIT devient EPC-global, une organisation dont le but est de promouvoir la norme EPC-sort de super code barre stocké dans un tag,
- ❖ élaborée par les universitaires et adoptée par l'industrie.
- ❖ **Durant 2005-2009** : Les technologies RFID sont aujourd'hui largement répandues dans quasiment tous les secteurs industriels (aéronautique, automobile, logistique, transport, santé, vie quotidienne, etc.). L'ISO (International Standard Organisation) a largement contribué à la mise en place de normes tant techniques qu'applicatives permettant d'avoir un haut degré d'interopérabilité voire d'interchangeabilité, et la création du Centre National de Référence RFID [1][2][3].

I.3 DEFINITION

Le terme « RFID », acronyme de l'expression anglo-saxonne Radiofrequency Identification à l'aide d'ondes Radiofréquences: est un terme générique qui désigne un vaste ensemble d'applications pour l'identification d'objet au sens large, au moyen d'une communication par ondes radio, c'est-à-dire « sans-fil ».

Tout (personnes, objets, végétaux, etc.) est a priori identifiable et le terme « RF » couvre tous les types de liaisons « sans fil » ou « sans contact » réalisées à l'aide d'ondes électromagnétiques, des très basses fréquences (TBF) aux infra-rouges et jusqu'à la lumière visible. La technique d'identification la plus courante est le stockage d'un numéro de série dans une puce à laquelle est attachée une antenne d'émission / réception, l'ensemble puce-antenne est généralement appelé « étiquette RFID ».

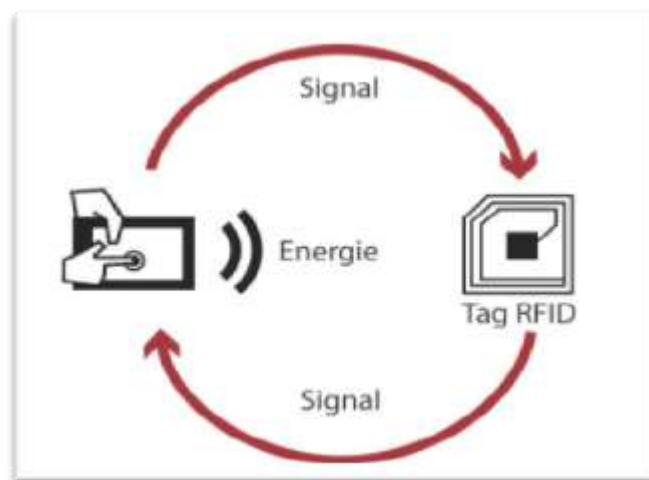


Figure I.1: La technique de RFID.

Un interrogateur envoie une demande d'identification aux étiquettes, qui lui communiquent en retour les informations contenues dans la puce. Ces informations peuvent ensuite être traitées par un système informatique pour répondre à des besoins applicatifs extrêmement divers. L'étendue de ce terme peut provoquer une certaine confusion dans la définition des applications RFID. Il en est de même avec les termes « passif », « actif », « semi-actif » qui sont explicités plus loin. Seuls les termes définis ci-dessous sont reconnus et promus par l'ISO (International Organization for Standardization - Organisation Internationale de Normalisation) [4].

I.4 COMPOSITION D'UN SYSTEME RFID

Un système RFID est composé principalement de trois éléments nécessaires à son fonctionnement. Ces éléments physiques de base sont :

- Une étiquette (tag ou transpondeur) encapsulée ou collée sur le produit à identifier.
- Un lecteur (interrogateur ou station de base) il est soit fixe, soit adjoint à un système portable.
- Un système hôte (contrôleur ou ordinateur) avec différents logiciels dépendants de l'application [5].

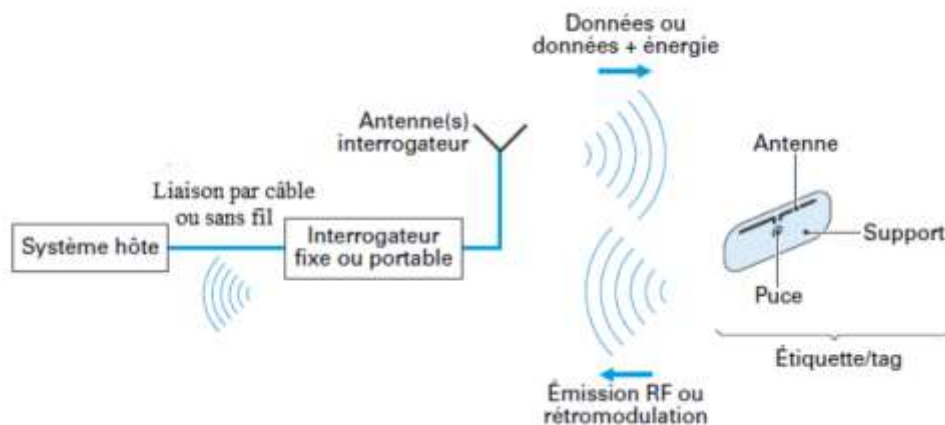


Figure I.2: Les éléments principaux d'un système RFID

I.4.1 L'ÉTIQUETTE RFID

Les étiquettes RFID sont attachées à tout objet que le système RFID a besoin d'identifier ou de tracer. Les étiquettes peuvent être placées directement sur un objet individuel, ou bien sur le conditionnement des objets (cartons, containers). Une première classification possible des tags ou étiquettes RFID est basée sur la présence ou non d'une puce électronique :

I.4.1.1 L'étiquette RFID sans puce

Est une étiquette qui ne possède pas de circuits intégrés (puce), elle ne représente aujourd'hui qu'une très faible part du marché, Il s'agit d'un transpondeur à lecture seule et ne comportant pas d'alimentation embarquée .On la nomme également code à barres RF.

Les étiquettes RFID sans puce :

- ❖ Ne possèdent pas de circuits électroniques ;
- ❖ Elles utilisent plutôt des principes d'identification physiques ou chimiques ;

❖ La technologie SAW (Surface Acoustic Wave) est un exemple des étiquettes RFID sans puce ; Il implique des étiquettes qui disposent d'un ou de plusieurs réflecteurs positionnés sur un matériau piézoélectrique selon une certaine configuration déterminant le code d'identification et d'une antenne jointe à un transcodeur [6].

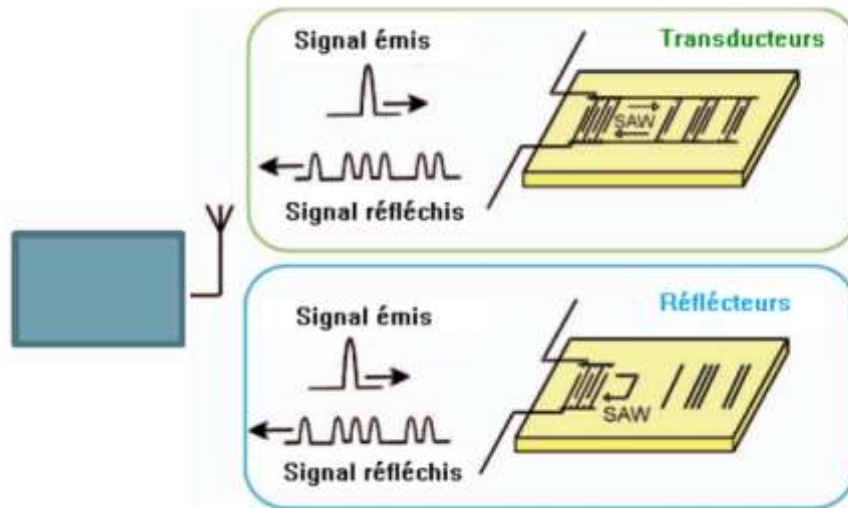


Figure I.3: Concept d'un système SAW RFID.

I.4.1.2 L'étiquette RFID avec puce

Est le système le plus utilisé sur le marché actuel, elle se compose d'une antenne et d'un circuit intégré plus ou moins complexe (simple machine d'état ou véritable microcontrôleur). La plupart des tags RFID ont au moins un circuit intégré (IC), souvent connu comme une puce de silicium, contenant l'ID du tag et la logique nécessaires pour naviguer dans le protocole qui guide les discussions entre l'étiquette et le lecteur. Dans la suite de ce mémoire, on exposera seulement ce type d'étiquettes.

On peut différencier les tags RFID constitués d'une puce en fonction de leur source d'alimentation. On peut distinguer trois catégories [12].

➤ Tag actif

Les étiquettes actives sont les plus chères car elles sont plus complexes à produire, elles assurent des fonctions de transmission soit de captage soit de traitement de l'information captée, soit les deux. De ce fait, elles ont besoin d'une alimentation embarquée et sont donc caractérisées par la durée de vie de celle-ci. Si le prix est un facteur discriminatif, il faut

savoir que ces étiquettes s'avèrent particulièrement bien adaptées à certaines fonctions, dont notamment la création de systèmes d'authentification, de sécurisation, d'antivol, etc....

En général, elles sont idéales pour tout ce qui concerne le déclenchement d'une alerte ou d'une alarme. Elles peuvent émettre à plusieurs centaines de mètres [7].

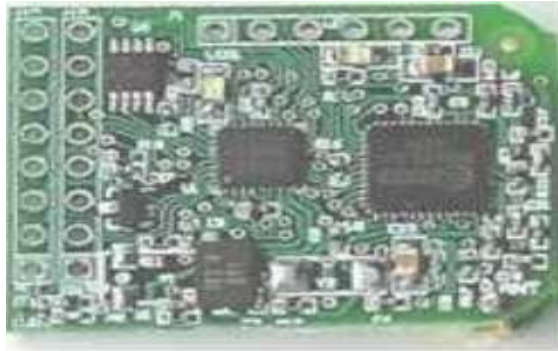


Figure I.4: Un exemple d'un tag RFID actif.

➤ Tag passif (sans batterie)

Ces tags, ne disposant pas d'alimentation externe, dépendent de l'effet électromagnétique de réception d'un signal émis par le lecteur. C'est ce courant qui leur permet d'alimenter leurs microcircuits. Ils sont :

- ✓ Peu coûteux à produire ;
- ✓ Généralement réservés à des productions en volume ;
- ✓ Ce sont eux que l'on trouve plus particulièrement dans la logistique et le transport ;
- ✓ Ils utilisent différentes bandes de fréquences radio selon leur capacité à transmettre à distance plus ou moins importante et au travers de substances différentes (air, eau, métal). La distance de lecture est inférieure à un mètre. Les basses et hautes fréquences sont normalisées au niveau mondial ;
 - ✓ Ces puces sont collées sur les produits pour un suivi allant jusqu'à l'inventaire ;
 - ✓ Elles sont jetables ou réutilisables suivant les cas.

Ce type de tag est constitué d'une antenne et d'une puce électronique tous les deux intégrés sur le même support [7].

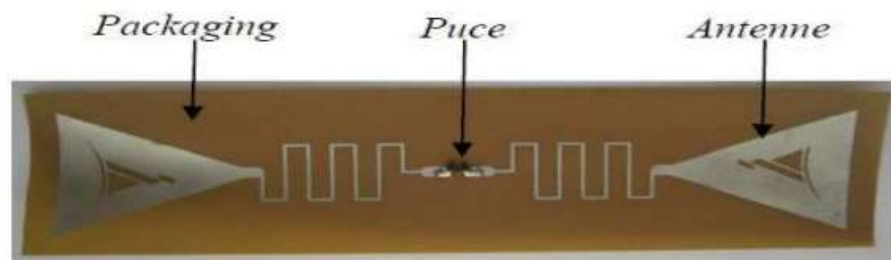


Figure I.5: Un exemple d'un tag RFID UHF passif.

➤ Tag semi-passif

Ces tags constituent un compromis entre les tags passifs et actifs. En effet, de même façon que les tags actifs, ils disposent d'une batterie externe afin d'alimenter le récepteur radio et les circuits intégrés de contrôle. Toutefois, ils ne disposent pas d'émetteur radio et utilisent, ainsi une modulation retro-réfléctive pour transmettre les informations aux lecteurs de la même façon que les tags passifs [7].



Figure I.6: Un exemple d'un tag semi passif.

D'après le tableau I.1; qui dresse un comparatif entre les systèmes actifs, semi actifs et passifs ; on voit tout l'intérêt que présentent les systèmes passifs en termes de coût et de durée de vie [8].

Type	Distance	Débit	Durée de vie	Coût
Passif	+	+	+++	+
Semi actif	++	++	++	++
Actif	+++	+++	+	+++

Tableau I.1: Comparaison des différents systèmes RFID à bande étroite.

I.4.2 UN LECTEUR RFID

Les lecteurs, souvent appelé « interrogateurs », sont des équipements mobile, fixe ou portatif selon l'application. Il émet un signal radio qui déclenche la réponse du tag. Cette communication se fait grâce à chaque antenne RFID intégrée dans chacun d'entre eux.

Dans les systèmes plus sophistiqués, le signal radio du lecteur peut contenir des commandes destinées à la puce, des instructions pour effectuer des opérations de lecture/écriture dans la mémoire de la puce, voire des mots de passe. La taille du lecteur, dépend de nombreux paramètres. Il peut varier de la taille d'une pièce de monnaie à celle d'un ordinateur de poche. Un lecteur peut être doté de fonctionnalités GPS et de dispositifs de connexion à des systèmes et des réseaux d'information [9].



Figure I.7: Les différents types des lecteurs RFID

I.4.3 UNE INFRASTRUCTURE D'APPUI

Typiquement un système de supervision connecté aux lecteurs, permettant le traitement et l'exploitation des données des tags, qui pourront alimenter d'autres bases de

données et applications pour un traitement ultérieur. Le lecteur peut être décomposé en trois parties principales :

- ❖ Une ou plusieurs antennes ;
- ❖ Une station de base ;
- ❖ Système hôte [10].

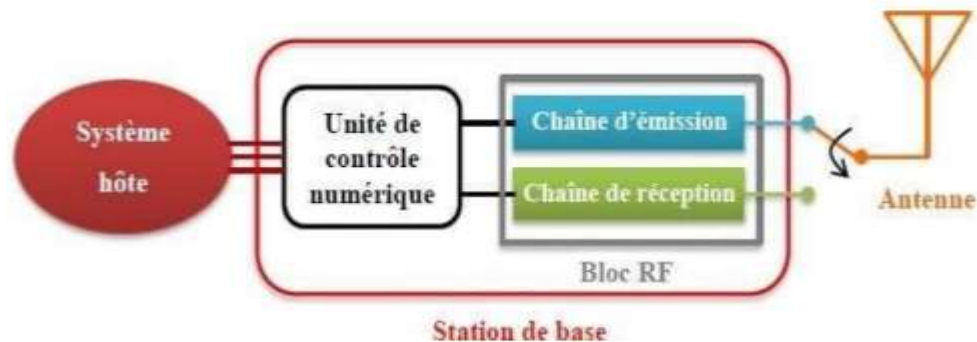


Figure I.8: Présente le schéma général d'un lecteur RFID.

I.5 LA PUCE RFID

Le nombre de puces électroniques dédiées à des applications RFID est important et ne cesse d'augmenter. En général, à une puce est associée une fréquence, ou quelques fréquences voisines. Le choix de la puce s'effectue en fonction de la complexité, du niveau de sécurité requis et d'autres critères liés à l'application RFID. Une des caractéristiques importantes de la puce est son impédance équivalente (impédance d'entrée), qui nous permet, sous certaines conditions une connexion à l'antenne avec le maximum d'efficacité possible [11].

En vue de concevoir un tag RFID pour une certaine application, le choix de la puce prend en compte :

- **La norme:** il existe différentes normes mettant en œuvre différents protocoles de communication. En fonction de l'application et pour permettre l'interopérabilité avec les lecteurs le tag RFID devra répondre à une norme imposant le choix d'un certain type de puce RFID.
- **La capacité mémoire:** certaines applications demandent l'enregistrement d'information sur le tag. Il existe des puces RFID avec différentes capacités mémoire.

- **Le coût** : c'est un critère important. Le coût de la puce RFID sera intégré dans le coût du tag RFID. Le coût du tag RFID peut également imposer le choix d'un procédé de fabrication du tag ainsi qu'un certain type de packaging pour la puce.
- **Les performances** : les puces RFID consomment plus ou moins d'énergie et permettent donc d'atteindre des distances de communication plus ou moins importantes.

La grande majorité des puces RFID ont un unique port d'entrée permettant de connecter une antenne. Cependant il existe des puces RFID dotées de deux ports d'entrée permettant de connecter deux antennes.

Les puces RFID fournies par les fabricants sont proposées sous plusieurs types de packaging : die, boîtiers standards, strap ou enfin boucle à couplage inductif. L'utilisation d'un certain type de packaging va conditionner la méthode de fixation à l'antenne et donc le procédé de fabrication. Le choix d'un packaging va donc avoir une incidence directe sur le coût de fabrication d'un tag [12].

I.6 L'ANTENNE DU TAG RFID

Pour les tags RFID, il existe de nombreux types d'antennes différenciées par leurs formes, leurs matériaux, leurs gains et leurs technologies de fabrication. Elles sont toujours spécialisées pour un type de transpondeur (suivant les caractéristiques du circuit intégré ou autre), une application, une distance et une fréquence d'utilisation.

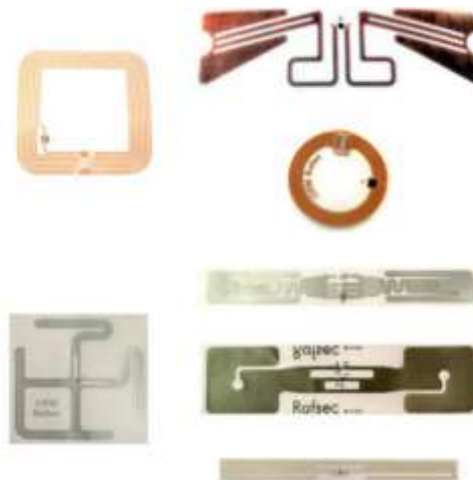


Figure I.9 : Présentation de quelques exemples d'antennes de tag RFID UHF et micro-ondes.

Le choix de l'antenne d'un tag est considéré comme étant l'élément clé dans l'établissement de la communication RFID. Cette antenne dépend intrinsèquement de l'application visée. En effet, le type de l'antenne utilisée est imposé par la nature de l'objet à identifier, sa taille ainsi que sa localisation [6].

I.7 LA FREQUENCE DE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES RFID

L'une des caractéristiques les plus importantes des systèmes RFID est la fréquence de fonctionnement du système, la fréquence de fonctionnement d'un système RFID est la fréquence à laquelle le lecteur transmet, la fréquence de transmission du tag est ignorée dans la plupart des cas, elle est la même que la fréquence d'émission du lecteur (modulation de charge, rétro diffusion) [13].

Les systèmes RFID peuvent être conçus pour rayonner en basses fréquences (de 30 à 300 KHz) jusqu'à la gamme super-haute fréquences (de 3 à 30 GHz). Ce fonctionnement a été standardisé afin d'éviter les interférences avec les autres dispositifs électromagnétiques.

La fréquence utilisée dépend du type d'application visée et les performances recherchées. En effet, on distingue 4 bandes fréquentielles dédiées à la technologie RFID :

1. *Basses fréquences (LF)* de 125KHz à 135KHz (ISO11784/5, ISO14223) ;
2. *Hautes fréquences (HF)* à 13.56. MHz (ISO 14443A 1 -4, ISO 14443B 1 -4, ISO 15693-3 et ISO 18000-3) ;

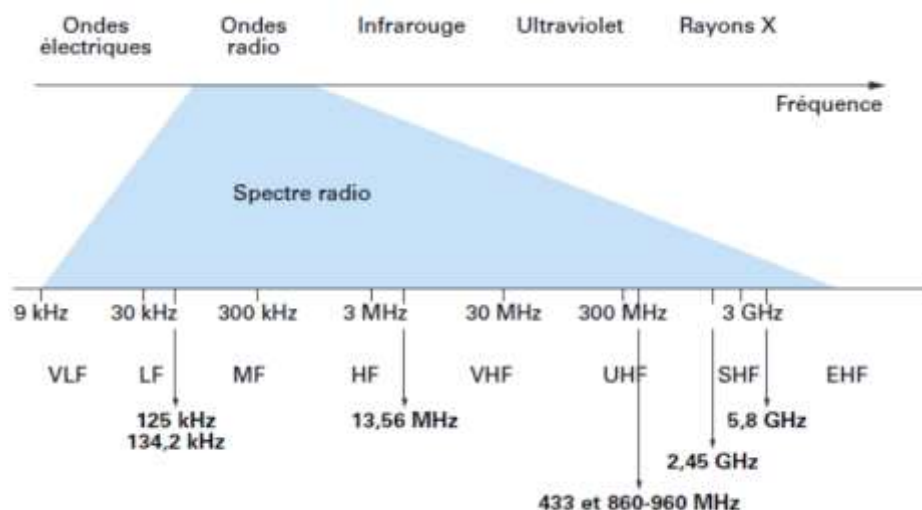


Figure I.10: Fréquences couramment utilisées en RFID.

3. *Ultra-hautes fréquences* (UHF) de 902 à 928. MHz aux USA, de 865. MHz à 868. MHz dans l'Union européenne (ISO 18000-6 ISO18000-6, EPC Gen2) ;

4. *Micro-ondes* (SHF) à 2.45 GHz ou à 5.8 GHz (ISO 18000-4, ISO 18000-5).

La figure I.10 ainsi que le tableau I .2 détaillent les fréquences utilisées en RFID [14][15].

	LF	HF	UHF	SHF
Bande	125-134 KHz	13.56 MHz	680-960 MHz	2.45-5.8 GHz
Longueur d'onde	2400 m	22m	33 cm	9 cm
Zone de champ	Proche	Proche	Proche/lointain	Lointain
Nature des tags	Passif	Passif	Actif/passif	Actif
Quelques applications	Identification animal ; systèmes d'alarme.	Prépaiement ; forfait de station de ski.	Inventaire ; gestion d'actifs.	RTL ; télépéage autoroutier.

Tableau I.2 : les différentes fréquences des systèmes RFID.

Les bandes de fréquence allouées à la RFID, la puissance d'émission autorisée et d'autres spécifications relatives à l'application sont contrôlées par des organisations de normalisation internationales et régionales telles que l'ISO et l'ETSI. Le tableau I.3 résume les différentes bandes de fréquences utilisées pour la technologie RFID [16].

Ondes radiofréquences	Fréquences retenues et /ou autorisées en RFID		
De 30 à 300 KHz F	Basses fréquences		≤ 135 KHz
De 3 à 30 MHz F	Hautes fréquences		13.56 MHz
De 300 à 3000 MHz HF	Ultra-hautes fréquences		433MHz et de 860 à 960 MHz et 2.45 GHz
De 3 à 30 GHz HF	Super-hautes fréquences		5.8 GHz

Tableau I.3:Fréquences autorisée pour les applications RFID.

I.8 COMPARATIFS DES DIFFERENTS SYSTEMES RFID

La comparaison de différents systèmes de radio-identification en termes de distance, débit, pénétration et cout, est représentée dans le tableau I.4 ;

RFID SYSTEME	Fréquence	Distance	Débit	Présentation	Cout
LF	125-134 KHz	+	+	++++	++
HF	13.56 MHz	++	++	+++	++++
UHF	860-960 MHz	+++	+++	++	++++

Tableau I.4: Comparaison de différentes bandes de la technologie RFID.

D'après le tableau I.4, les bandes de fréquence UHF offrent une moins bonne pénétration du signal à travers les obstacles que la bande HF, mais elles permettent d'atteindre des distances de lecture plus grandes et un débit d'échange d'informations plus important [12].

I.9 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Dans l'industrie, on trouve deux catégories des systèmes RFID :

I.9.1 LES SYSTEMES A COUPLAGE MAGNETIQUES (EN CHAMP PROCHE)

Dans les systèmes RFID en champ proche, la transmission de la puissance ainsi que les données à partir du lecteur sont assurées grâce au couplage mutuel à travers le champ magnétique pour un couplage inductif ou le champ électrique à travers un couplage capacitif. Dans la pratique c'est souvent le couplage magnétique qui est mis en œuvre à cause de sa simplicité. Cette famille de système RFID comprend les systèmes BF et HF Leurs transpondeurs utilisent des antennes magnétiques. Ils sont constitués d'une bobine inductive d'inductance L réalisant le rôle d'antenne, d'une puce électronique contenant l'identifiant du tag et réalisant les opérations de communication, et enfin d'une capacité C permettant de faire

résonner le circuit LC à la fréquence de travail. Le principal inconvénient des systèmes RFID en champ proche est la relative faible distance de lecture [17].

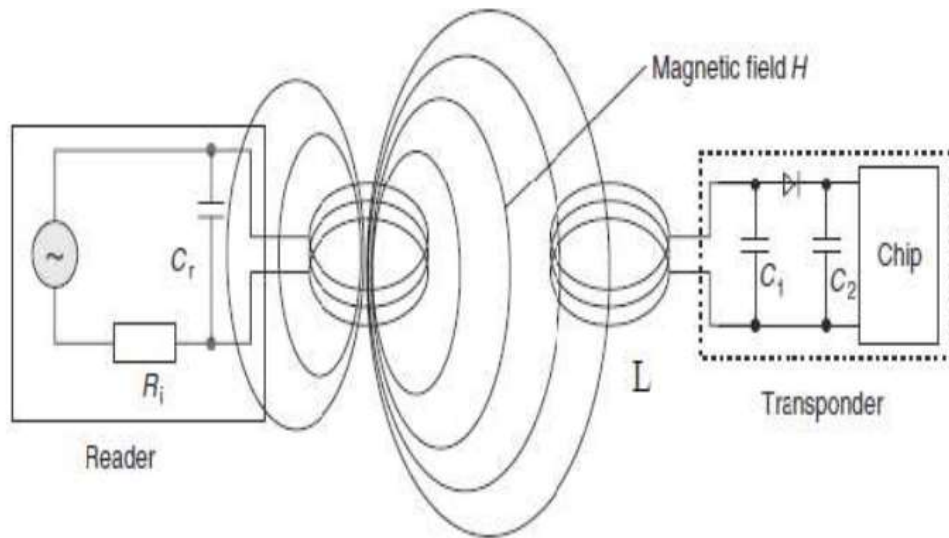


Figure I.11: Schéma explicatif d'un couplage inductif.

I.9.1.1 Les systèmes LF

L'avantage principale de ces systèmes vient de l'aptitude des ondes BF à se propager à travers les tissus biologique donc sont utilisé généralement pour des applications médical ou vétérinaire [12].

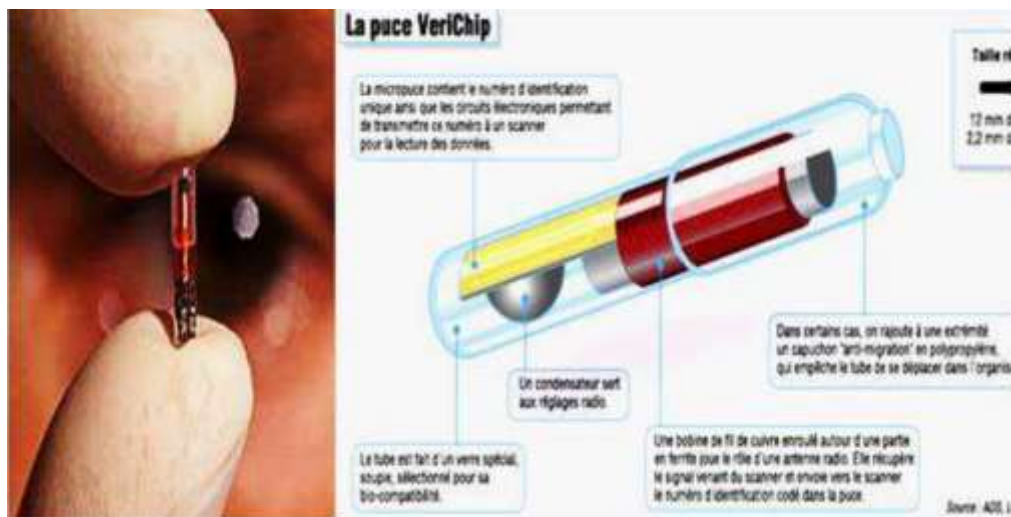


Figure I.12 : Tag RFID LF.

I.9.1.2 Les systèmes HF

Les systèmes HF sont les plus utilisés, et présentent l'avantage de fonctionnement à des distances de l'ordre du mètre, et la bonne pénétration du signal à travers les obstacles grâce à la bande de fréquence utilisé [12].

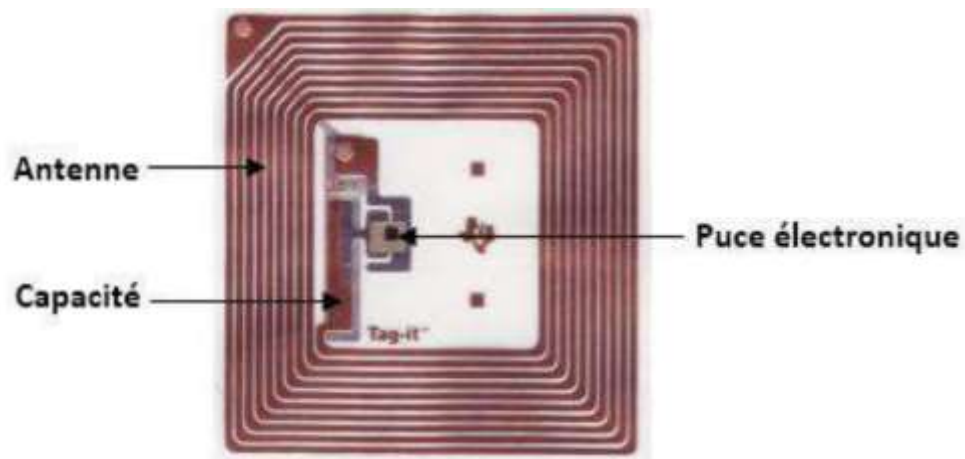


Figure I.13: tag RFID HF.

I.9.2 LES SYSTEMES A COUPLAGE ELECTROMAGNETIQUE (EN CHAMP LOINTAIN)

La méthode de couplage électromagnétique est similaire à la méthode de couplage inductif, à la différence qu'au lieu d'utiliser un champ magnétique, on utilise un champ électromagnétique qui couvre une plus grande distance pour transférer l'énergie aux étiquettes. Les étiquettes à ultra-haute fréquence (UHF) et à micro-ondes utilisent cette méthode.

Les bandes de fréquence UHF et micro-ondes offrent une moins bonne pénétration du signal à travers les obstacles que la bande HF, mais elles permettent d'atteindre des distances de lecture plus grandes et un débit d'échange d'informations plus important. On peut différencier les systèmes RFID UHF et micro-ondes en deux types :

- ❖ Les systèmes opérant sans puce électronique (dit « chipless »),
- ❖ Les systèmes opérant avec des tags possédant une puce électronique.

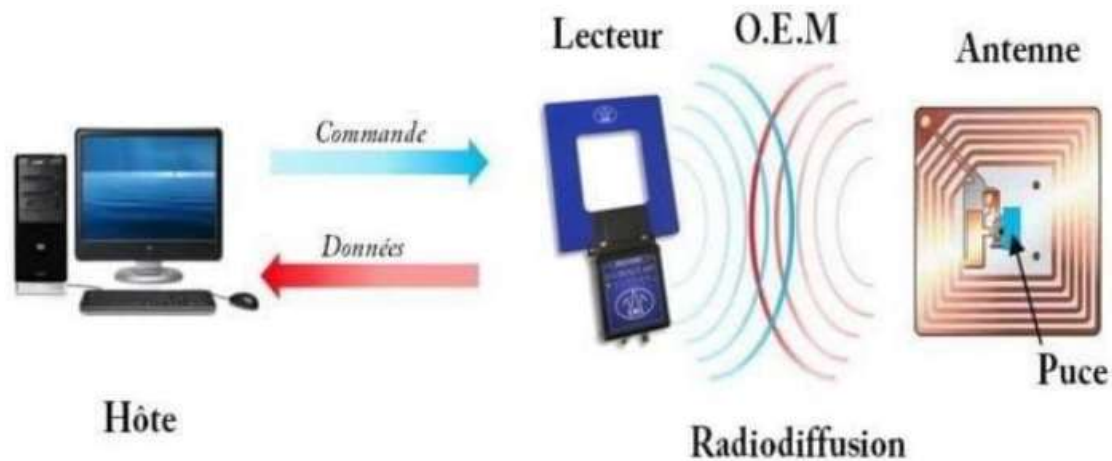


Figure I.14: Principe de fonctionnement de la RFID à couplage électromagnétique.

Le principe de fonctionnement est simple. Le lecteur émet des ondes de radio à des fréquences concrètes à travers des antennes RFID. Les ondes donnent de l'énergie aux tags pour qu'ils puissent se communiquer en émettant un ID unique. Ils n'ont pas besoin de batteries et peuvent être utilisés pendant de nombreuses années.

Les données captées par le lecteur sont transmises et traitées par un système informatique comportant un logiciel, tel qu'un système de contrôle d'inventaire, d'un système de contrôle d'accès ou d'un système de contrôle de production. La figure I.14 présente les éléments essentiels d'un système RFID [18].

I.10 REGLEMENTATION ET NORMALISATION

Le développement des normes en cours (notamment au niveau du test) sous l'impulsion des offreurs de solutions et des utilisateurs est nécessaire pour la maîtrise de cette technologie et le développement de son marché. Ce développement vise à certifier le fonctionnement, l'interopérabilité et l'interchangeabilité des systèmes RFID et de ses composants [19].

L'ISO a définie plusieurs normes pour la RFID UHF passive :

Les normes ISO/IEC 18000-63 et EPC Gen2v2 : définie La structure de la mémoire d'une puce RFID UHF passive ;

La norme ISO 18000-1 : RFID pour la gestion d'objet Partie 1 : Architecture de références et définition des paramètres à normaliser ;

La norme ISO 18000-2 : RFID pour la gestion d'objet Partie 1 : Paramètres de communication d'une interface d'air à moins de 135 KHz ;

La norme ISO 18000-3 : RFID pour la gestion d'objet Partie 1 : Paramètres de communication d'une interface d'air à 13.56 Mhz ;

La norme ISO 18000-4 : RFID pour la gestion d'objets Partie 1 : Paramètres de communication d'une interface d'air à 2.45 GHz ;

La norme ISO 18000-5 : RFID pour la gestion d'objets Partie 1 : Paramètres de communication d'une interface d'air à 5.8 GHz ;

La norme ISO 18000-6 : RFID pour la gestion d'objets Partie 1 : Paramètres de communication d'une interface d'air entre 860 MHz et 960 MHz ;

La norme ISO 18000-7 : RFID pour la gestion d'objets Partie 1 : Paramètres de communication d'une interface d'air à 433 MHz.

I.11 DOMAINES D'APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE RFID

I.11.1 RFID DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE

Les avantages que la RFID offre à l'industrie automobile, tant pour le processus de production que pour les utilisateurs finaux, sont la visibilité, la traçabilité, la flexibilité et une sécurité accrue. Le caractère unique de l'industrie - où il existe une grande variété de modèles avec de nombreuses spécifications et caractéristiques différentes, mais avec un volume modeste de composants individuels - rend les solutions RFID attrayantes pour les composants avancés et les pièces de suivi, la production flexible et rentable et la sécurité renforcée. Protection des véhicules.

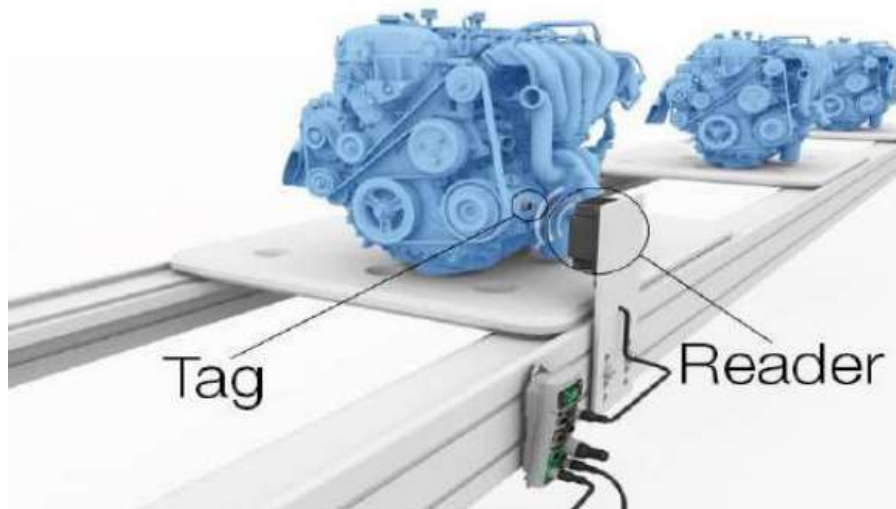


Figure I.15: Utilisation d'RFID dans l'industrie automobile.

I.11.2 RFID DANS LE DOMAINE MEDICAL

Le contrôle et la surveillance des patients peuvent également s'effectuer par le biais de puces RFID attachées ou implantées dans le corps humain de manière sous cutanée, c'est ce qu'a proposé la société Verichip , qui implante chez des patients volontaires des puces le temps de leur hospitalisation [20].



Figure I.16: Utilisation de la RFID dans les soins de santé.

I.11.3 RFID dans la Marine

La RFID est considérée comme une technologie indispensable dans le « port du futur»,

la force de cette technologie réside dans la visibilité en temps réel qu'elle procure. Les terminaux maritimes ont toujours été à la recherche d'une technologie pour résoudre le problème classique du suivi des conteneurs et des tracteurs.

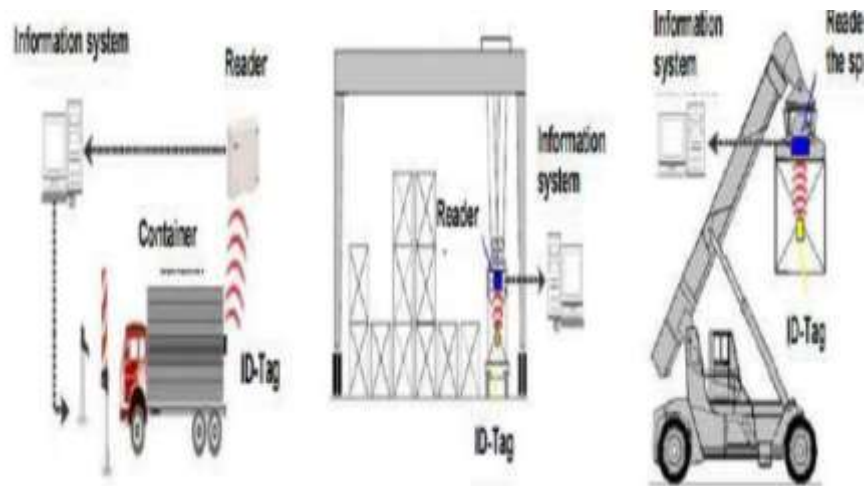


Figure I.17: Utilisation de la RFID dans la Marine.

La RFID peut aider à les localiser et fournir des données précises qui aident à coordonner leur déploiement, la technologie est également considérée comme un moyen de se conformer à diverses réglementations de sécurité après les événements du 11 septembre 2001.

En fait, certains terminaux expérimentent déjà cette technologie. Par exemple, le port de Busan a déployé un système expérimental de suivi des conteneurs RFID pour améliorer la sécurité et l'efficacité de la manutention [21].

I.11.4 RFID ET LES DOCUMENTS D'IDENTITE

L'identification des individus passe aussi par l'authentification des papiers d'identité comme dans la figure I.18. La RFID est alors un moyen d'une part de s'assurer de la validité des documents, mais aussi de s'assurer que les informations contenues dans le passeport sont également sous forme de données numérique [20].



Figure I.18: Utilisation de la RFID dans les documents d'identité.

I.11.5 RFID dans l'armée

Les applications de la RFID dans l'armée et la défense peuvent être divisées en deux domaines principaux : liés à la logistique et liés au combat. L'application de la RFID dans les chaînes d'approvisionnement logistiques aide à ajouter de la visibilité aux données des articles à chaque nœud du réseau d'approvisionnement, permettant aux commandants de visualiser le mouvement des matériaux. Cela a été un problème difficile à résoudre avec les systèmes de suivi traditionnels comme le code-barres [21].



Figure I.19: Utilisation de la RFID dans l'armée.

I.12 RFID DANS LES SYSTEMES D'ENTREPOSAGE ET DE DISTRIBUTION

La technologie RFID peut faciliter l'automatisation de tous les processus manuels. Grâce à l'automatisation, la quantité de travail peut être réduite. Étant donné que le coût de la main-d'œuvre est une dépense d'exploitation majeure dans un entrepôt, sa réduction des coûts est significative. De plus, en éliminant l'erreur humaine après l'automatisation, la précision des données peut être améliorée. Cela réduit à son tour le coût de la reprise. L'utilisation de la RFID peut également accélérer le processus de traitement. Comme le temps de traitement est réduit, le débit global peut être amélioré. De plus, étant donné que les informations peuvent être programmées dans les étiquettes ou extraites des étiquettes à n'importe quel point de traitement tout au long de la chaîne d'approvisionnement, un processus de prise de décision plus dynamique est autorisé même sans un système central d'information de contrôle [21].



Figure I.20: Utilisation de la RFID dans les systèmes d'entreposage et de distribution.

I.13 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA TECHNOLOGIE RFID

Comme tous les autres systèmes, la technologie RFID contient des avantages et des Inconvénients dans ces petites lignes on va citer brièvement quelques-unes [22] :

Avantages	Inconvénients
Détection automatisée d'objets identifiés ;	Le coût ;
Grand volume de données par rapport aux autres systèmes ;	L'interférence des ondes ;
La sécurité d'accès au contenu ;	La perturbation par l'environnement physique ;
La souplesse dans le positionnement ;	
Une moindre sensibilité aux conditions environnementales ;	La sensibilité aux ondes électromagnétique parasites ;
Possibilité de mise à jour du contenu et la durée de vie des tags.	Les interrogations sur l'impact des radios-fréquences sur la santé.

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients de la technologie RFID

I.14 CONCLUSION

On peut conclure que la technologie RFID permet de lire des informations sans contact et sans que l'objet soit visible, de mettre à jour l'information contenue, de supporter des températures importantes et d'assurer une lecture de masse, tout ce dont le code-barres est incapable.

Ce chapitre a permis d'avoir une idée générale sur cette technologie, qui présente le système d'identification par des ondes radio, ses constituants, ses applications, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Chapitre II

*Méthodes d'adaptation
des antennes RFID*

II.1 INTRODUCTION

Les antennes constituent actuellement un des éléments clés des systèmes sans fils modernes, le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement) . Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif, comme tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes posés par le bruit et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission.

Ces canaux sont aussi dépendants des propriétés de l'antenne qui va donner naissance à l'onde électromagnétique, et à l'environnement autour de l'antenne qui va influencer sur la propagation des ondes électromagnétiques. La connaissance et la modélisation de la propagation et des antennes sont complexes mais nécessaires pour dimensionner un système de transmission sans fils .

Dans ce deuxième chapitre, D'abord nous allons définir les antennes, ses applications, ainsi que leurs caractéristiques du rayonnement et de circuit, Ensuite, nous allons présenter les types d'antennes RFID, les méthodes de miniaturisation et d'adaptation de ces antennes seront discuter filaires. Enfin, on terminera la Méthodologie de conception et de simulation des antennes RFID.

II.2 DEFINITION D'UNE ANTENNE

Les antennes sont une partie essentielle de n'importe quel système sans fil. Une définition traditionnelle est la suivante : « Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager.

Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur. Un système de communication sans fil classique contenant une antenne d'émission et une antenne de réception est représenté par la figure II.1.

Selon la définition issue des standards IEEE, une antenne est définie comme un moyen de rayonner ou de recevoir les ondes radio [24].

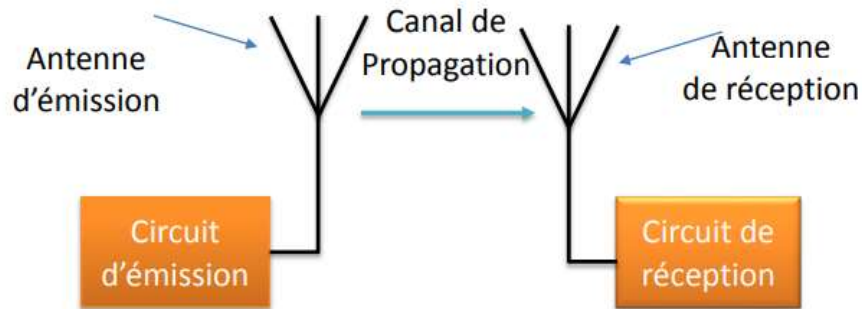


Figure II.1 : Système de communication sans fil comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice.

II.3 BREF HISTORIQUE

Le développement des radiocommunications est basé sur la théorie de l'électromagnétisme, mise au point au XIXe siècle et améliorée au XXe siècle. Les ondes électromagnétiques, support des radiocommunications, ont été prévus de manière théorique dans le cadre des équations de Maxwell et mises en évidence expérimentalement par Hertz à la fin du XIXe siècle.

Peu de temps après, les premières applications de transmission radio sont apparues. Le XXe siècle est ensuite ponctué d'innovations majeures, qui répondaient à des besoins précis. La figure II.2 dresse un prompt historique des découvertes et inventions liées aux radiocommunications et aux antennes [24].

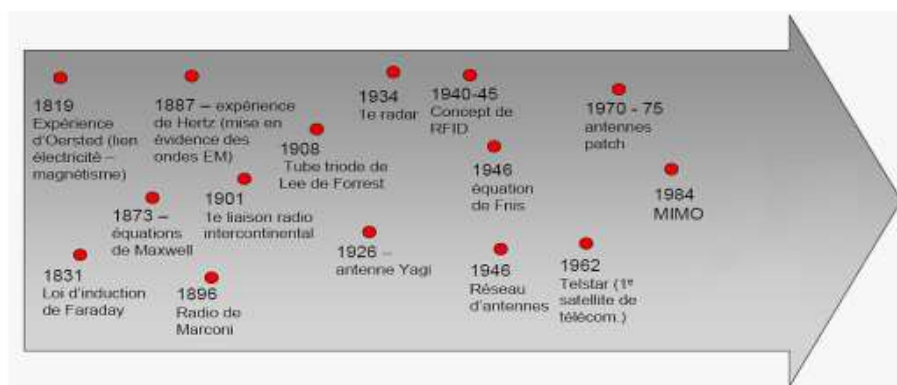


Figure II.2 : Historique des radiocommunications.

II.4 APPLICATIONS DES ANTENNES

Les antennes sont utilisées sur une large gamme de fréquences (ou de longueur d'onde) et pour un grand nombre d'applications. On peut citer :

- Communications sans-fil (GSM, WIFI, Talkie-walkie, ..) ;
- Radio/Télédiffusion ;
- Détection, radionavigation et télémessure (Radar, GPS,...) ;
- Relevé à distance et identification (Télé-relevé, RFID, ...) ;
- Récupération d'énergie (Rectenna, ...)[25].

Selon la bande de fréquences, les applications les plus courantes des antennes sont également illustrées dans la figure II.3.

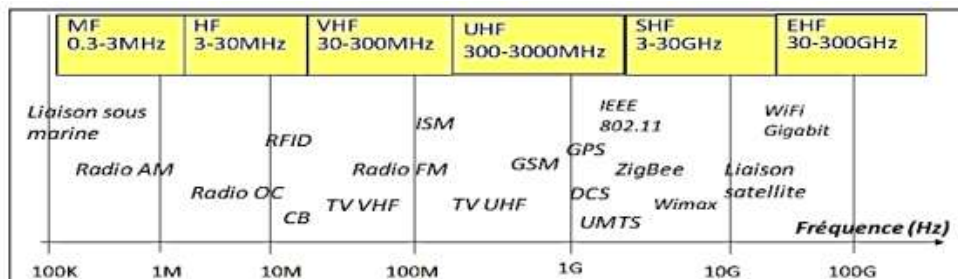


Figure II.3 : Quelques applications des antennes selon la bande de fréquences.

II.5 MECANISME DE TRAVAIL DE L'ANTENNE

Dans sa définition la plus générale, est la conversion d'une puissance électrique incidente en une puissance électromagnétique rayonnée dans une direction particulière. La RFID ou encore la Radio Fréquence Identification est une méthode permettant de mémoriser et récupérer des données à distance. Le système est activé par un transfert d'énergie électromagnétique entre une étiquette radio et un émetteur RFID. L'étiquette radio composée d'une puce électronique et d'une antenne reçoit le signal radio émis par le lecteur lui aussi équipé d'une technologie RFID. Les composants permettent à la fois de lire et de répondre aux signaux.

II.6 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES D'UNE ANTENNE

Indépendamment de sa fréquence de fonctionnement ou de sa structure physique, une antenne est caractérisée par des propriétés et des paramètres communs. Ces paramètres sont classés en deux catégories. La première catégorie s'intéresse à ses propriétés de rayonnement tandis que la seconde catégorie caractérise l'antenne comme un élément de circuit électrique.

Les principaux paramètres de l'antenne qui traduisent son comportement comme circuit sont le coefficient de réflexion, l'impédance d'entrée, le rapport d'ondes stationnaires et la bande passante. Les paramètres de rayonnement sont principalement le diagramme de rayonnement, la directivité, le gain et l'efficacité [26]. Ces paramètres seront détaillés par la suite.

II.6.1 CARACTERISTIQUES DE RAYONNEMENTS

II.6.1.1 Les régions du champ électromagnétique

L'espace entourant l'antenne est divisé en trois régions, en fonction du comportement des champs.

- **La région de champ proche réactif** : est la région immédiatement entourant une antenne. Dans cette région le champ réactif est dominant. Pour une petite antenne.
- **La région de Fresnel** : est une région intermédiaire entre la région de champ proche et la région de Fraunhofer.
- **La région de Fraunhofer** : est définie comme étant la région où le champ électromagnétique d'une antenne est indépendant de la distance par rapport à l'antenne [27].

Ces différentes régions sont délimitées par les sphères de rayon R_1 et R_2 respectivement définies par :

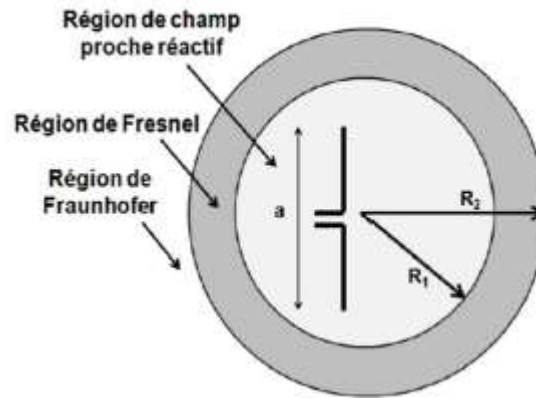


Figure II.4 : Régions du champ électromagnétique d'une antenne.

II.6.1.2 Diagramme de rayonnement

C'est la représentation graphique du rayonnement de l'antenne dans l'espace. Il est déterminé en région lointaine et varie en fonction des coordonnées directionnelles (θ, φ) , ce diagramme peut être représenté sur un plan en coordonnées cartésiennes, polaire ou bien dans l'espace à trois dimensions. Le diagramme est généralement caractérisé par un lobe principal et des lobes de rayonnement secondaires [25].

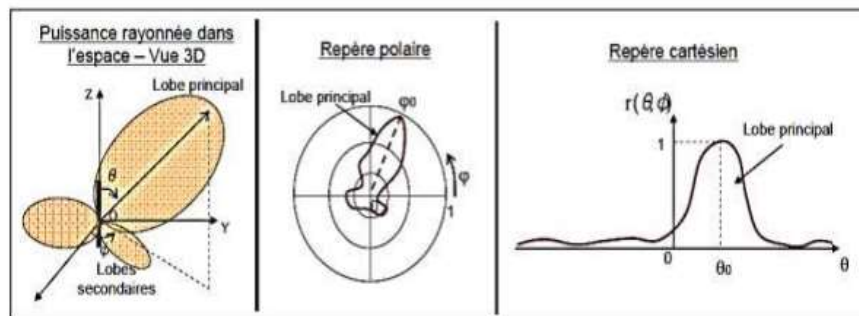


Figure II.5 : Différentes représentations du diagramme de rayonnement.

II.6.1.3 Efficacité de rayonnement

L'efficacité totale d'une antenne tient compte des pertes ohmiques et diélectriques dues aux matériaux utilisés et des pertes liées à la désadaptation [25]. L'efficacité due à la désadaptation notée η_d est directement liée au paramètre S_{11} et est définie par :

$$\eta_d = 1 - |S_{11}|^2 \quad (\text{II.1})$$

L'efficacité due aux pertes ohmiques/diélectriques (appelée efficacité de rayonnement) notée η_{ray} , est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance acceptée par l'antenne.

$$\eta_{Pray} = \frac{P_{ray}}{P_{accp}} \quad (II.2)$$

P_{ray} : La puissance rayonnée d'une antenne.

P_{accp} : La puissance acceptée par une antenne.

II.6.1.4 Directivité

La directivité dans une certaine direction $D(\theta, \varphi)$, est définie par le rapport de l'intensité de puissance rayonnée dans une certaine direction sur l'intensité de puissance rayonnée totale d'une antenne isotrope[12].

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction } (\theta, \varphi)}{\text{intensité rayonnée totale}} \quad (II.3)$$

II.6.1.5 Le gain

Le gain est la quantité de puissance transmise dans la direction du rayonnement de crête à celle d'une source isotrope, et quant à lui $G(\theta, \varphi)$ donné par le rapport de l'intensité de puissance rayonnée dans une certaine direction sur l'intensité de puissance acceptée par l'antenne qui serait rayonnée par une antenne isotrope sans pertes [12].

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction } (\theta, \varphi)}{\text{intensité rayonnée totale}} \quad (II.4)$$

II.6.1.6 La polarisation de champ

La polarisation de l'antenne est définie comme l'orientation du champ électrique d'une onde électromagnétique, c'est-à-dire la direction des oscillations dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. Les antennes peuvent être classées en fonction de la polarisation du rayonnement émis :

- **Antenne polarisée linéairement** : le vecteur champ électrique oscille en ligne droite. Le champ oscillant peut être exprimé comme la somme des vecteurs polarisés horizontalement et verticalement.

Les ondes polarisées horizontalement oscillent Perpendiculairement à la surface de la terre, tandis que les ondes polarisées verticalement oscillent parallèlement à la surface de la terre.

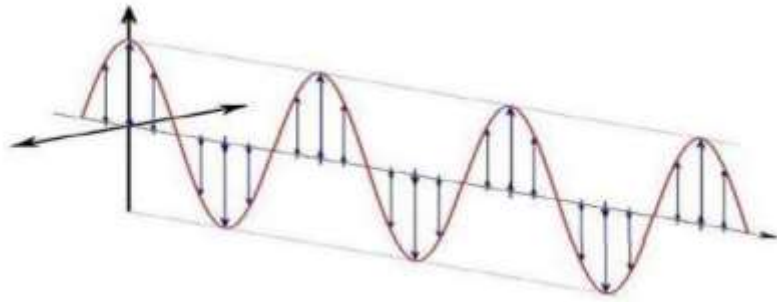


Figure II.6 : Antenne polarisée linéairement.

- **Antenne polarisée circulairement** : la direction du vecteur du champ électrique tourne dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Le champ de rayonnement d'une antenne polarisée circulaire n'est pas sensible à l'orientation de l'étiquette. C'est parce que le rayonnement polarisé circulairement contient des quantités égales de composantes horizontales et verticales de la polarisation linéaire [27].

➤

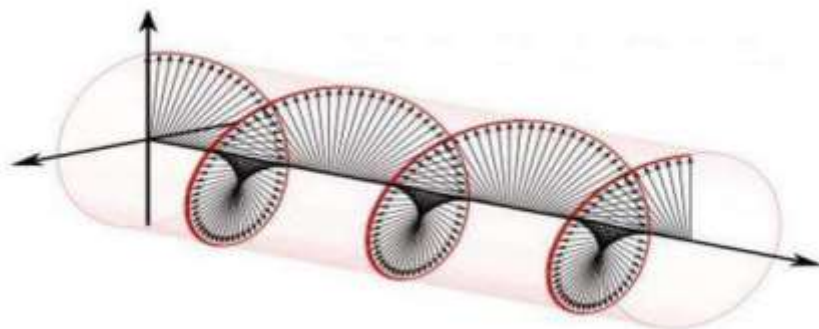


Figure II.7 : Antenne polarisée circulairement.

II.6.2 CARACTERISTIQUE DE CIRCUIT

II.6.2.1 Impédance d'entrée

Une antenne se comporte généralement comme un circuit résonant dont la fréquence de résonance centrale dépend des valeurs de l'inductance L et de capacité C . ces dernières sont généralement liées à la structure de l'antenne, ses dimensions et à son environnement.

Dans un système, l'antenne est connectée aux autres éléments par une ligne de transmission, généralement d'impédance égale à 50 ou 75 Ohm. La réponse fréquentielle d'une antenne est caractérisée par l'évolution en fréquence de son impédance d'entrée complexe [28].

$$Z_{in}[W] = R[W] + jX[W] \quad (II.5)$$

$R[W]$: résistance d'antenne.

$X[W]$: réactance d'antenne.

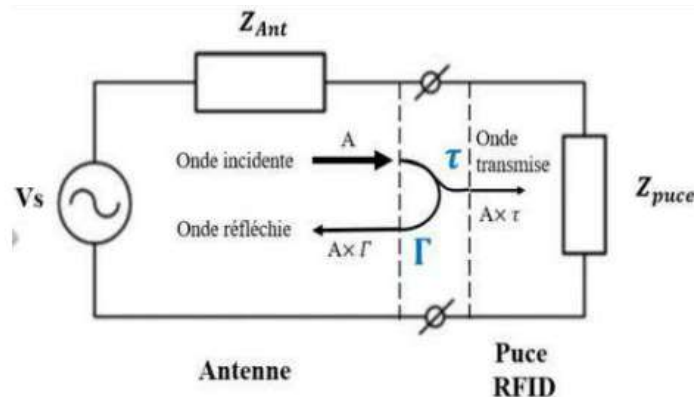


Figure II.8 :L'impédance modèle de circuit RFID.

II.6.2.2 Coefficient de réflexion

C'est le rapport d'amplitude entre l'onde EM réfléchi en entrée de l'antenne et l'onde EM incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne. Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance est renvoyée vers la source, Dans le cas particulier d'un capteur-RFID avec antenne fonctionnalisée, la désadaptation d'impédance subit Γ par l'antenne lorsque la zone capteur de celle-ci est altérée par la variation du paramètre environnemental à détecter, impacte significativement le coefficient de réflexion.

$$\Gamma = \frac{Z_{puce} - Z_{Ant}}{Z_{puce} + Z_{Ant}} \quad (II.6)$$

II.6.2.3 Le coefficient de transmission

Représente la fraction de puissance transmise de l'antenne du tag vers la puce, ou inversement de la puce vers l'antenne pour le re-rayonnement de l'onde, lors de la réponse du tag. Ce coefficient dépend également des impédances de l'antenne et la puce très utilisé en RFID [29].

$$\tau = 1 - |r^*|^2 = \frac{4R_{puce}.R_{ant}}{Z_{ant} + Z_{puce}} \quad (\text{II.7})$$

II.6.2.4 Facteur de qualité

Il est courant d'évaluer la qualité d'un élément réactif, tel qu'un condensateur ou une inductance, et est une métrique important pour les antennes car elle est inversement proportionnelle à la bande passante.

$$Q = \omega \frac{\text{énergie stockée}}{BW} \quad (\text{II.8})$$

II.6.2.5 La bande passante

Définie le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises [30].

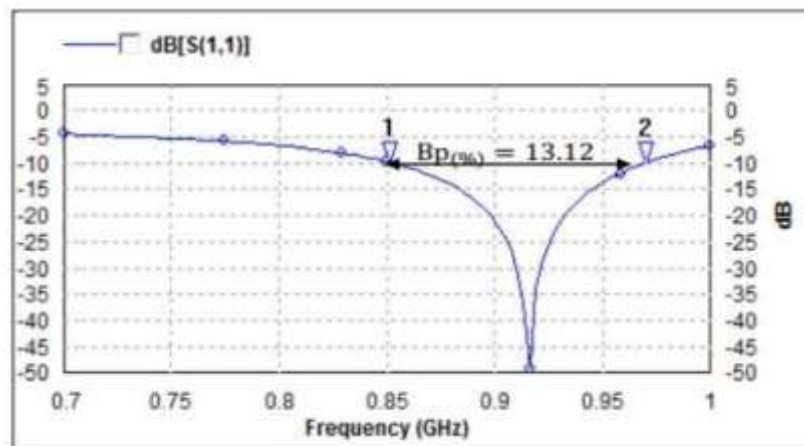


Figure II.9 :Exemple d'une bande passante.

II.6.2.6 distance de Lecteur

Dans le cas d'un capteur-RFID, l'environnement impacte plusieurs paramètres de l'antenne du tag dont le gain et le coefficient de transmission, La distance de lecture elle

regroupe en une seule formule plusieurs paramètres essentiels des performances du tag et du lecteur. Elle est tirée de l'équation de FRIIS [31].

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{EIRP \cdot G_r \cdot \tau}{P_{th}}} \quad (\text{II.9})$$

$$EIRP = P_t \cdot G_t \quad (\text{II.10})$$

r : la distance théorique de lecture

$EIRP$: puissance isotope rayonnée équivalente.

G_t : le gain de l'antenne d'émission

G_r : le gain de l'antenne de réception

P_r : la puissance collectée sur l'antenne de réception

λ : Longueur d'onde

τ : coefficient de transmission

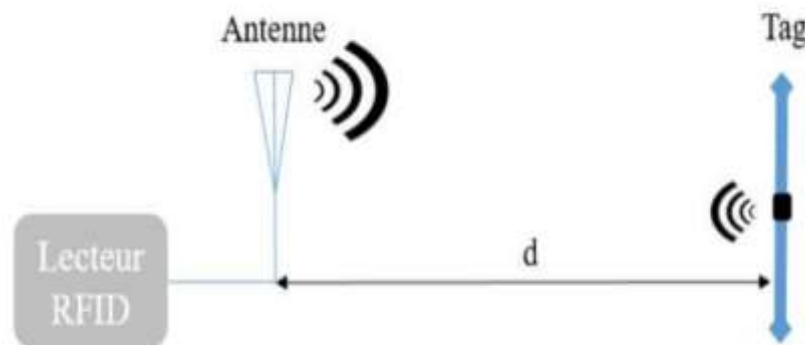


Figure II.10 : Illustration de la distance de lecture entre un lecteur RFID et un tag.

II.7 TYPES D'ANTENNE RFID

Selon le type de lecture, le type d'étiquette, l'utilisation du système RFID, les conditions de lecture, etc., le type d'antenne à intégrer au lecteur est différent. Ainsi, deux types principaux d'antennes se distinguent [32] :

Les antennes intégrées : elles sont intégrées au lecteur, leur utilisation est conseillée pour les lecteurs de basse fréquence à portée limitée ;

Les antennes externes : elles ne font pas partie du lecteur, elles sont plus puissantes et s'avèrent donc utiles pour obtenir une plus grande portée.

II.7.1 ANTENNES UNIVERSELLES

Les antennes intérieures sont utilisées principalement pour le stockage ou les processus industriels [33]. Les antennes des fréquences UHF peuvent capturer des tags jusqu'à 14 mètres de distance. Les antennes standard UHF RFID existent pour les fréquences ETSI de l'UE (865-868 MHz) et FCC de l'US (902-928 MHz).



Figure II.11 : Antenne universelle RFID Laird 980.

II.7.2 ANTENNES RFID LARGE PORTEE (UHF LONGUE PORTEE)

Ce sont des antennes utilisées dans de multiples applications et systèmes à la fois en intérieur et en extérieur. Pour les fréquences UHF préparées pour capturer des étiquettes jusqu'à 18 mètres, pouvoir réguler la portée en fonction des performances du lecteur et de l'étiquette disponible pour les fréquences globales 860 - 960 MHz, ETSI (UE) : 865-868 MHz et FCC (US) 902-928 MHz [33].



Figure II.12 : Antenne RFID large portée.

II.7.3 ANTENNES RFID COURTE PORTEE

Il s'agit d'antennes préparées pour procéder près du produit aussi bien au niveau du point de vente qu'au niveau des lignes de production. Elles sont rapides et efficaces dans des entourages complexes comme les comportant des liquides et des produits denses.

Dans ce type d'antennes, les points morts n'existent pas, ainsi qu'elle détecte tout ce qui se trouve dans la surface de l'antenne et réagit parfaitement aux objets métalliques. Disponible pour les fréquences UHF de L'EU, ETSI (865-868 Mhz) et de l'US, FCC (902-928Mhz).



Figure II.13 :Antenne RFID courte portée.

II.7.4 ANTENNES RFID ROBUSTES

Conçues pour fonctionner à l'extérieur ou sur les chariots élévateurs. Cette antenne a une protection IP très élevée. L'antenne est intégrée dans une structure robuste qui assure la protection dans des environnements industriels complexes, y compris l'absorption des chocs en cas d'impact sur l'antenne.

Dipôle propose ce dont vous avez besoin, y compris les poteaux de lecture pour l'extérieur ou une antenne spécifique pour un chariot élévateur ou un véhicule industriel. Disponible pour les fréquences UHF de L'EU, ETSI (865-868 Mhz) et de l'US, FCC (902-928Mhz) [33].



Figure II.14 :Antenne RFID robustes.

II.7.5 ANTENNES RFID DU SOL

Existent dans différentes polarités et tailles. Pour bien choisir les antennes il est essentiel de connaître sa fonction et l'environnement dans lequel ces antennes seront utilisées. Les antennes du sol sont utilisées pour des événements sportifs, des événements en général, dans les usines, les hôpitaux, etc.

Une Pour les antennes placées au sol, il est primordial qu'elles soient bien protégées dans une structure solide qui garantit sa durabilité. Disponible pour les fréquences UHF de L'EU, ETSI (865-868 Mhz) et de l'US, FCC (902-928Mhz) [33].



Figure II.15 :Antenne RFID du sol.

II.8 CLASSIFICATION DES ANTENNES

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

II.8.1 ANTENNES OMNIDIRECTIONNELLES

Ont un modèle de rayonnement de 360 degrés autour d'elles (plan horizontal) et fonctionnent normalement comme concentrateur ou passage central d'un réseau. Elles ont un champ électromagnétique verticalement polarisé et utilisées en association avec des points d'accès pour les liaisons Point à Multi Point [34].

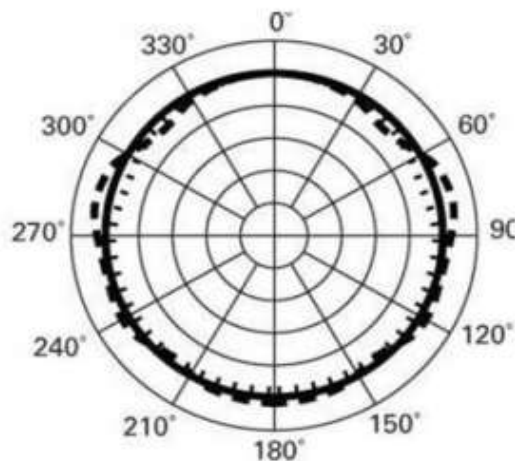


Figure II.16 :Diagramme de rayonnement d'une antenne omnidirectionnelle Isotrope.

Antenne dipôle : Les antennes dipôles sont utilisées fréquemment dans la technologie RFID, car elles sont très sensibles à la polarisation (polarisation linéaire) et présentent un rayonnement Omnidirectionnel, la figure II.16 nous présente une antenne dipôle.

II.8.2 LES ANTENNES SECTORIELLES

Conçus pour fonctionner avec un gain plus élevé que les antennes omnidirectionnelles et couvrent seulement un secteur de l'azimut typiquement de 60° à 120°. Ces antennes peuvent être trouvées avec la polarisation verticale ou horizontale selon les techniques de construction utilisées.

Elles sont aussi comme les antennes omnidirectionnelles utilisées en association avec des points d'accès pour les liaisons Point à Multi Point (PTMP) .

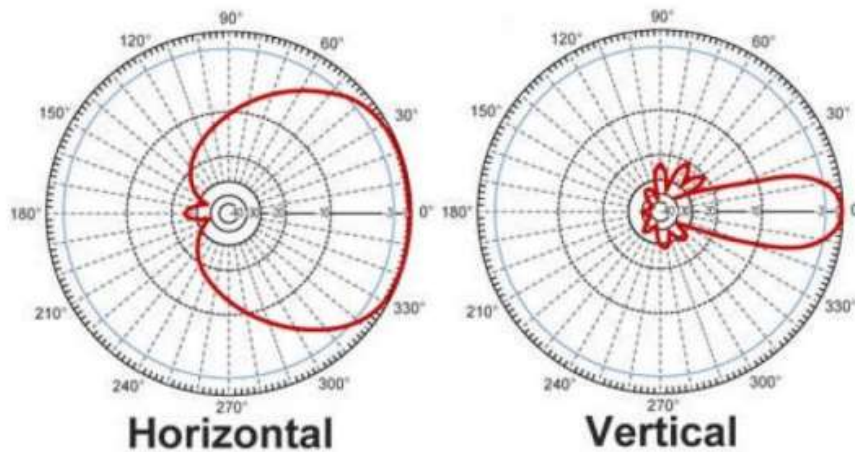


Figure II.17 :Diagramme de rayonnement d'une antenne sectoriel.

II.8.3 ANTENNES DIRECTIONNELLES DIRECTIVES

Elles ont un gain élevé et sont dirigées vers le point d'accès et elles ont un angle d'ouverture faible. Ces antennes sont également utilisées pour établir des liaisons point à point longue distance [34].

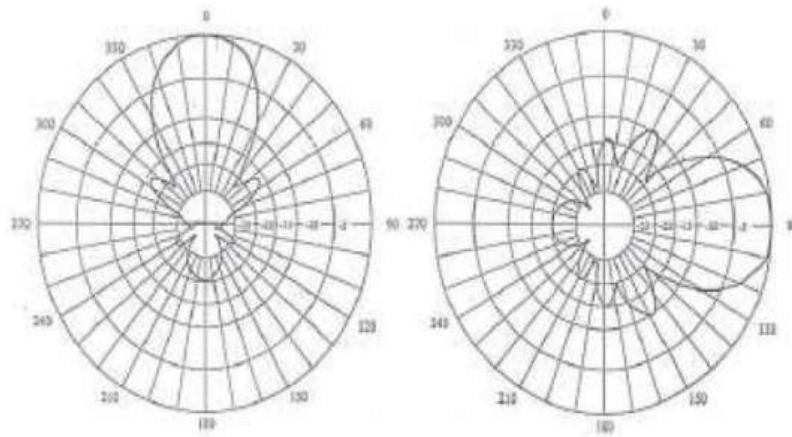


Figure II.18 :Diagramme de rayonnement d'une antenne Directionnelle.

II.9 LES METHODES DE MINIATURISATION DE L'ANTENNE

Comme la plupart des tags UHF RFID doivent être fixé sur des petits objets, la géométrie de l'antenne doit être miniaturisée. On présente dans cette partie, deux méthodes de miniaturisation d'antenne tag RFID qui sont le repliement du dipôle et l'utilisation des fractals.

II.9.1 REPLIEMENT DU DIPOLE (MEANDRING)

La méthode la plus efficace de miniaturiser une antenne dipôle est de plier les deux bras du dipôle afin de réaliser un chemin «serpenté». Avec suffisamment de pliement, nous pouvons rendre le dipôle beaucoup plus court pour la même longueur de fil. Plier le dipôle n'est pas sans conséquences électriques, lorsque le dipôle est «serpenté», la direction de la circulation du courant dans les bras voisins d'un méandre est inversée, de sorte que pour une bonne approximation ces courants s'annulent (figure II.19) et ne contribuent donc plus au rayonnement, néanmoins, ils contribuent au stockage de l'énergie électrique et aux pertes de puissance. Plus on augmente le nombre de pliement pour rendre le dipôle plus petit, plus l'annulation des courants est grande. Pour une antenne à forte densité de méandres, une bonne estimation de la résistance de rayonnement est obtenue en considérant que seules les parties de l'antenne qui sont orientées dans la direction initiale de dipôle contribuent au rayonnement, par conséquent la puissance de rayonnement diminue [35].

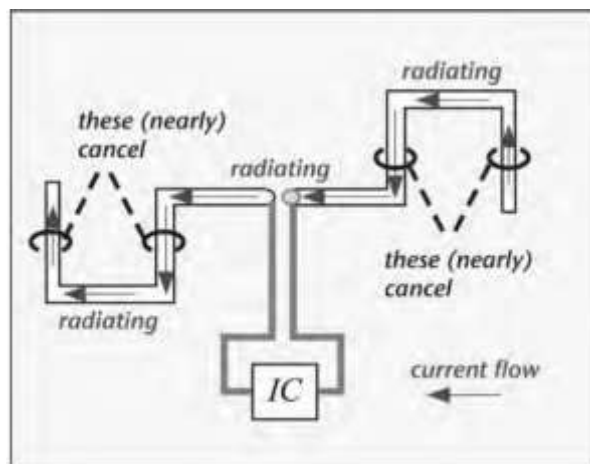


Figure II.19 : Géométrie de base d'une antenne méandre.

La nouvelle géométrie de l'antenne dipôle produit une distribution linéaire de réactance capacitive et inductive affectant l'impédance d'entrée de l'antenne. (Figure II.20) Afin d'obtenir l'impédance d'antenne souhaitée, la configuration géométrique de l'antenne à méandres est très importante. La fréquence de résonance dépend de plusieurs paramètres décrivant les dimensions physiques de la ligne méandre notamment: le nombre de spires (N), la longueur verticale (h) et horizontale (m) des segments d'une spire, la longueur de la ligne conductrice (S) et la largeur de la ligne (w) [6].

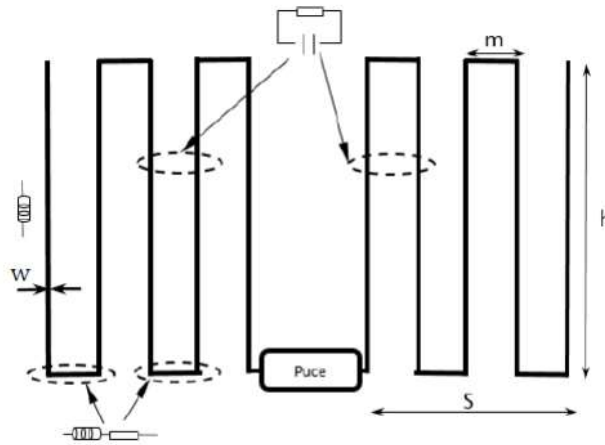


Figure II.20 : Les paramètres dérivants la géométrie d'une antenne méandre .

II.9.2 UTILISATION DES ANTENNES FRACTALES

Les antennes fractales sont basés sur le concept d'une fractale, ce qui est une géométrie générée de manière récursive qui a des dimensions fractionnaires. Le mot « fractal » est inspiré du mot latin « Fractus » qui signifie irrégulier ou brisé. Ce sont des objets possédant une structure géométrique répétitive et auto-similaire [36].

Le mathématicien Français Benoit B. Mandelbrot (1975) a inventé le terme fractal, et il a étudié la relation entre les fractales et la nature en utilisant les découvertes faites par Gaston Julia, Pierre Fatou, et Felix Hausdorff. Il a pu montrer que de nombreuses fractales existent dans la nature peuvent être utilisé pour modéliser avec précision certains phénomènes. En outre, il a été en mesure d'introduire de nouvelles formes fractales pour modéliser des structures plus complexes, y compris les arbres et les montagnes, qui possèdent une auto-similarité inhérente et auto-affinité dans leur forme géométrique. 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 II.21 [37].

Plusieurs types d'antennes fractales sont utilisés dans la conception des antennes, on trouve L'antenne de Sierpinski, L'antenne de Minkowski, L'antenne de l'arbre fractal, L'antenne de Hilbert, L'antenne de Koch. . .

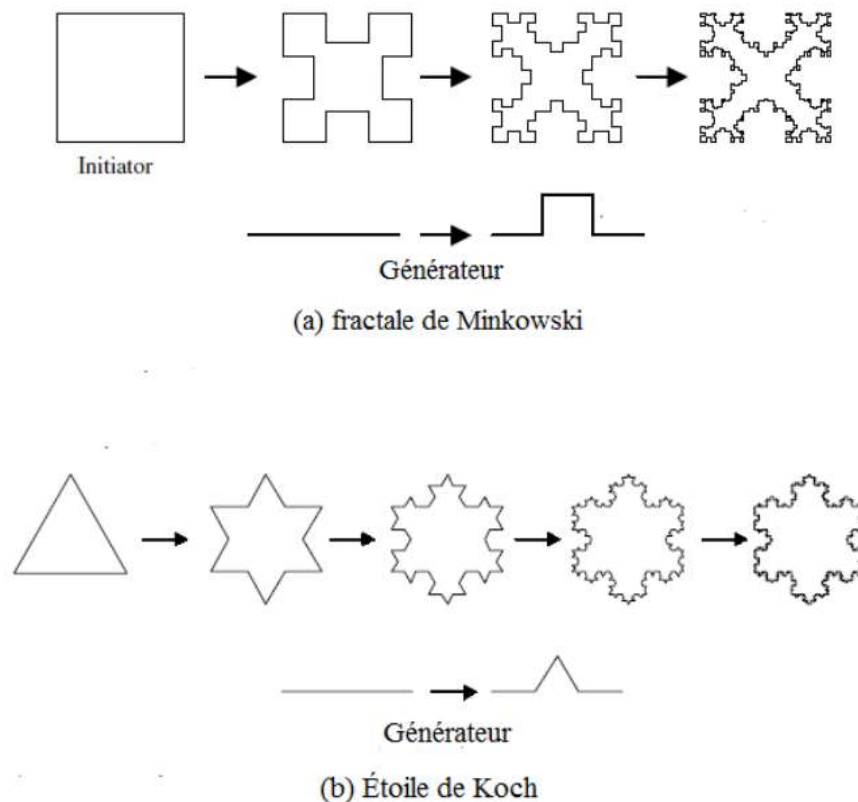


Figure II.21 : Processus de génération itérative des fractales .

II.10 LES METHODES D'ADAPTATION D'IMPEDANCE

Un tag passif RFID est composé d'une puce directement connectée à une antenne. L'adaptation d'impédance entre la puce et l'antenne est un des éléments essentiel dans la conception d'un tag RFID.

L'impédance des puces RFID est complexe. L'antenne doit être adaptée à la valeur conjuguée de cette impédance. Parfois, il existe des modèles mathématiques permettant de

déterminer l'impédance d'entrée d'une antenne comme dans le cas des antennes patches de formes simples ou des antennes dipôles. Cependant ce n'est pas toujours le cas, lorsque nous nous intéressons à des antennes moins usuelles. Une façon de faire peut consister à réaliser en simulation, une étude paramétrique afin de déterminer le comportement de l'impédance complexe d'entrée en fonction de la géométrie de l'antenne.

L'adaptation d'impédance antenne-puce peut se faire par l'insertion des éléments localisés, mais l'inconvénient de cette méthode est l'encombrement de la structure du tag et aussi l'augmentation du coût. Pour cela, une adaptation par modification de la géométrie de l'antenne est préférable.

Plusieurs méthodes d'adaptation peuvent être adoptées, les plus utilisés sont la méthode T-match, le couplage inductif par l'utilisation d'une boucle, l'inclusion des fentes et l'utilisation des méandres.

II.10.1 ADAPTATION PAR UN T (T-MATCH)

La T-match est une technique d'adaptation d'impédance des antennes dipôles [37][38].

Avec cette méthode l'impédance d'entrée d'un dipôle de longueur l peut être modifiée par l'insertion d'un stub court-circuité centré. L'alimentation de l'antenne sera fixée à un second dipôle planaire de longueur a (tel que $a < l$) et de largeur w' et placé à une distance b à partir du premier dipôle comme illustre la figure suivante :

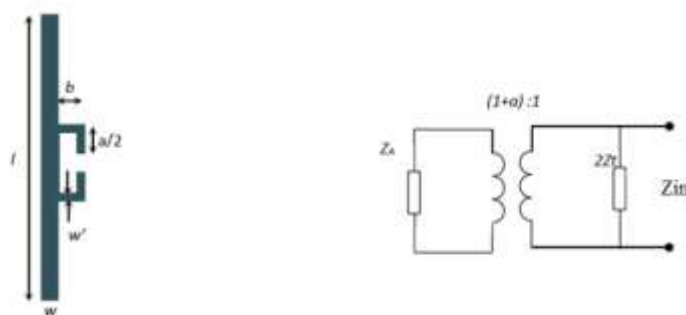


Figure II.22 Adaptation en T et son circuit équivalent .

L'impédance d'entrée Z_{in} au point d'alimentation est exprimée par la relation suivante : [40]

$$Z = \frac{2Z_t(1 + \alpha)2Z_A}{2Z_t + (1 + \alpha)2Z_A} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

- Z_A est l'impédance de dipôle lorsque la liaison T-match est absente.
- $\alpha = \ln(b/r_e)/\ln(b/r_e)$ est le facteur de division du courant entre les deux conducteurs des pacésdeb, avec $r_e = 0.25w$ et $r'_e = 8.25w$ sont les rayons équivalents du dipôle et de la T-match respectivement.
- $Z_t = jZ_0 \tan(ka/2)$ est l'impédance d'entrée du stub court-circuit formé par la ligne de transmission de deux conducteurs de longueur $a/2$, de largeur w et w' et de la séparation b (figure II.23), avec $ka = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde.
- $Z_0 \approx 276 \log_{10}(b/re r'_e)$ est l'impédance caractéristique de la ligne de transmission de deux conducteurs de longueur $a/2$ (figure II.24).

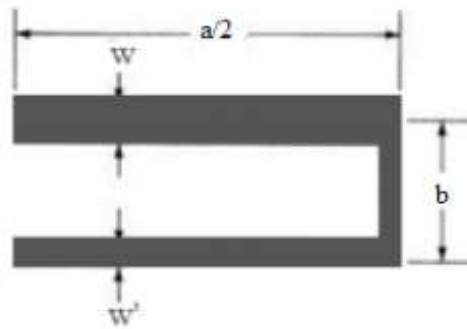


Figure II.23 : Court-circuit formé par la ligne de transmission de deux conducteurs.

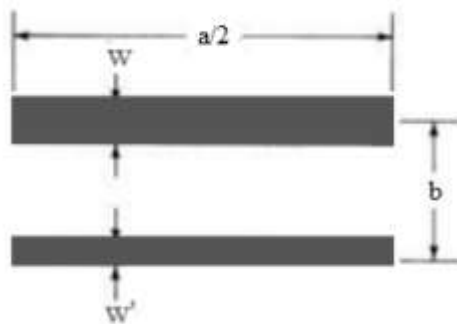


Figure II.24 : Ligne de transmission a deux conducteurs.

Les paramètres géométriques, a , w et b de la T-match peuvent être ajustés pour avoir une impédance d'entrée de l'antenne Z_{in} égale au conjugué de l'impédance de la puce Z_{chip} .

II.10.2 ADAPTATION AVEC UNE BOUCLE A COUPLAGE INDUCTIF

Cette technique consiste à placer à proximité du dipôle rayonnant une petite boucle (loop en anglais) à couplage inductif. Les bornes de la boucle sont reliées directement à la puce. Cette disposition antenne dipôle-boucle ajoute une inductance supplémentaire à l'antenne, qu'on peut contrôler sa valeur en jouant sur la distance « d » entre la boucle et le dipôle.

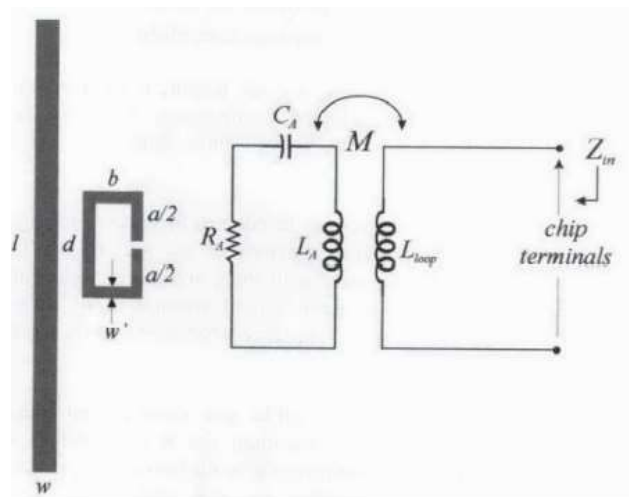


Figure II.25 : Adaptation par un couplage inductif et son circuit équivalent.

Ce couplage inductif peut être modélisé par un transformateur, et l'impédance d'entrée vue de puis les extrémités de la boucle est donnée par :

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = Z_{boucle} + \frac{(2\pi f M)^2}{Z_A} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$Z_{boucle} = j2\pi f L_{boucle} \quad \text{est l'impédance d'entré de la boucle.}$$

A la fréquence de résonance f_0 , la résistance d'entrée de l'antenne R_{in} dépend que du coefficient du couplage M entre l'antenne dipôle et la boucle inductif (équation II.13)),

tandis que la réactance d'entrée X_{in} ne dépend que de l'inductance propre de la boucle L_{boucle} (équation (II.14)) [38][40].

$$R_{in}(f_0) = \frac{(2\pi f_0 M)^2}{RA(f_0)} \quad (\text{II.13})$$

$$X_{in}(f_0) = 2\pi f_0 L_{boucle} \quad (\text{II.14})$$

II.10.3 ADAPTATION PAR UTILISATION DES FENTES

Une autre méthode complètement différente pour l'adaptation d'impédance, elle consiste à insérer une ou plusieurs fentes dans la géométrie de l'antenne. Ceci permet de rajouter un effet réactif inductif. Cette technique est largement exploitée parce qu'elle permet l'adaptation même si l'étiquette est attachée à un substrat de haute permittivité [39].

La forme de la fente peut être assimilée à un transformateur d'impédance dont chaque discontinuité fournit le stockage d'énergie et le rayonnement. Les tailles des fentes peuvent être comparables à la surface du patch, pour que les caractéristiques de rayonnement soient liées aux deux objets (patch, fentes). Autrement dit, le gain maximal de l'antenne est fixé principalement par la côte du patch l , tandis que le réglage d'impédance peut être modifiée en agissant sur les dimensions de la fente a et b . (Figure II.26)

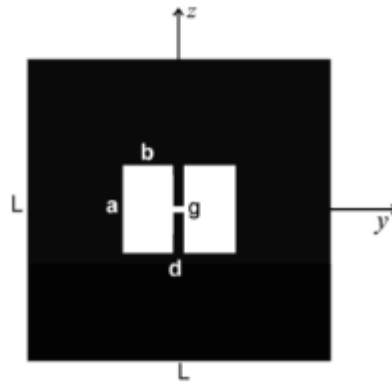


Figure II.26 : Configuration d'une antenne adaptée par fente .

II.10.4 ADAPTATION PAR CHARGES CAPACITIVES AUX EXTREMITES

L'utilisation de charge capacitive aux extrémités du dipôle est une autre méthode utilisée à la fois pour adapter l'antenne à la puce et pour réduire la taille de l'antenne dipôle par la formation d'une grande structure aux extrémités de l'antenne dipôle (figure II.27).

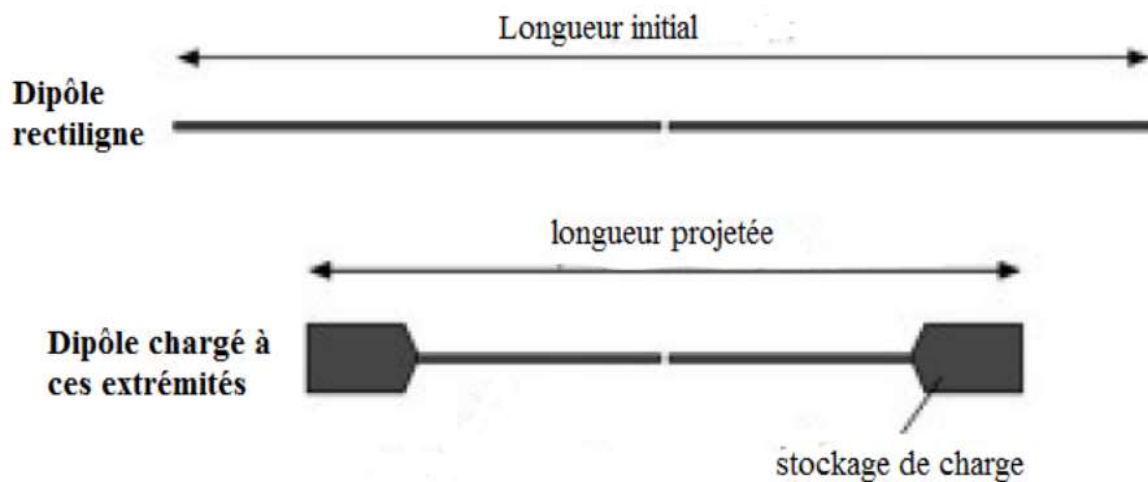


Figure II.27 : Adaptation par charges capacitives aux extrémités.

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 [35].

II.10.5 ADAPTATION D'UNE ANTENNE DIPOLE PAR UNE INDUCTANCE SERIE (UTILISATION DES MEANDRES)

Cette technique permet à la fois la miniaturisation de l'antenne et l'adaptation de l'impédance. Après le repliement du dipôle en plusieurs méandres (figure II.28), un des méandres est encore plié, et une barre horizontale est ajoutée au-dessus de l'antenne, ce qui permet d'augmenter la partie inductive de l'antenne pour une meilleure adaptation.

Toutes les dimensions de cette antenne sont ajustées afin d'avoir l'adaptation et parmi les paramètres ajustés, on trouve le nombre de méandre, la largeur W_m des méandres, et les deux longueurs L_m et l_m des méandres permettant de trouver une valeur d'inductance qui conduit à l'adaptation du dipôle [41].

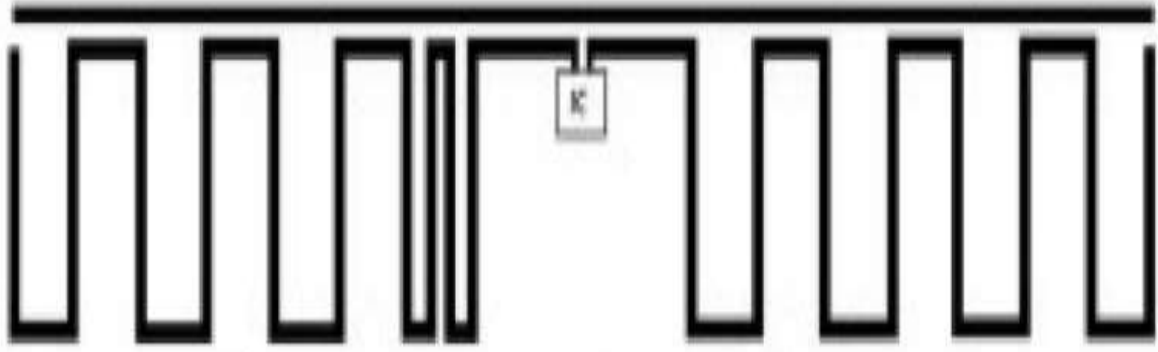


Figure III.28 : Adaptation par utilisation des méandres.

II.11 LA METHODOLOGIE DE CONCEPTION DE L'ANTENNE DU TAG RFID

II.11.1 METHODOLOGIE DE CONCEPTION

Les performances de l'antenne du tag RFID dépendent de la fréquence et de l'impédance d'entrée de la puce. La distance de lecture du tag doit être étroitement surveillée dans le processus de conception afin de satisfaire les exigences de conception, puisque les dimensions de l'antenne et la fréquence d'opération imposent des limites sur le gain maximal et la bande passante, donc il y a un compromis pour atteindre les performances optimales du tag et pour satisfaire les caractéristiques requises pour la conception d'antenne[42][43].

Dans une perspective d'industrialisation, la conception d'antenne de tag RFID UHF passif demande de mettre en œuvre une méthodologie de conception qui passe par plusieurs étapes. La méthodologie de conception de l'antenne tag RFID est illustrée dans la Figure (II.29).

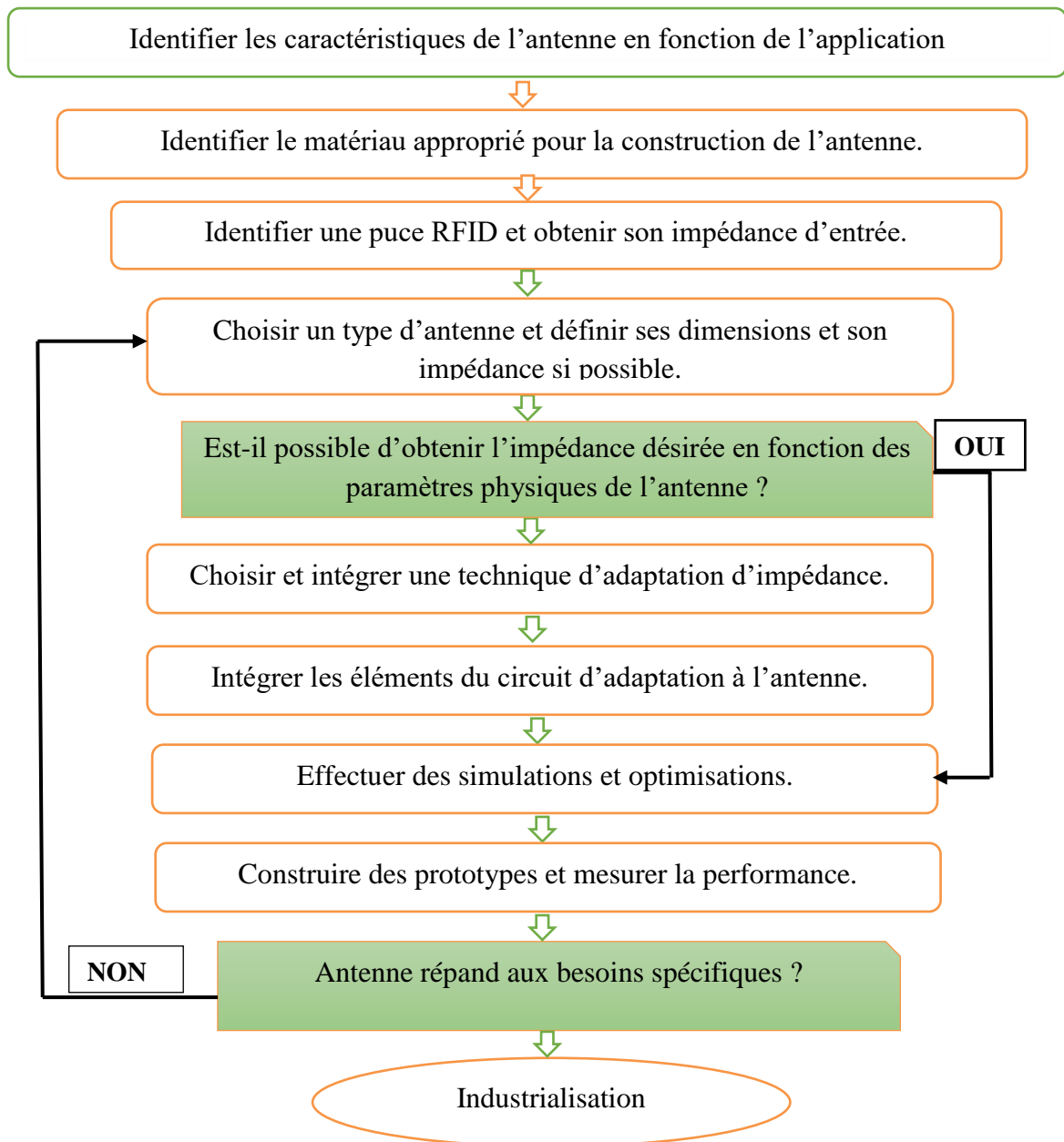


Figure II. 29 : Méthodologie de conception des antennes RFID.

II.11.2 LES EXIGENCES DE CONCEPTION

Avant de commencer la conception d'une antenne RFID UHF il est nécessaire de spécifier les caractéristiques que doit avoir l'antenne en fonction de l'application :

Sa bande de fréquence opérationnelle : en fonction du pays ou de la région géographique, la bande de fréquence de fonctionnement du tag va être différente.

Ses dimensions : l'antenne RFID par ses dimensions va déterminer la taille du tag RFID. En fonction de l'application, il faudra que l'antenne respecte certaines dimensions. Par exemple le tag devra avoir la dimension d'un bouchon ou d'une étiquette.

Son coût : le coût maximal d'un tag RFID va déterminer la puce RFID qui peut être utilisée en même temps que le type de matériaux qui constituera l'antenne et son procédé de fabrication.

En général, les étiquettes sont construites en utilisant des antennes de cuivre, d'aluminium, ou de l'encre d'argent, tandis que le matériau utilisé pour le substrat peut être du papier, les polyesters flexibles ou les substrats rigides comme FR4.

Sa distance de lecture : la distance de lecture va dépendre des régulations mais également du type d'antennes utilisées. Des antennes plus petites et moins efficaces présenteront une surface radar plus petite limitant la distance de lecture.

Son rayonnement : il est important de définir si le tag aura ou non une orientation privilégiée durant la lecture. Certaines applications peuvent nécessiter un diagramme de rayonnement presque omnidirectionnelle, donc il faudra considérer une antenne ayant un rayonnement omnidirectionnel, tandis que d'autres peuvent seulement exiger des tags pour rayonner dans une direction particulière, dans ce cas-là, on doit utiliser une antenne directive

L'objet à identifier : Il est important de connaître la nature de l'objet à identifier. Il peut s'agir par exemple de métal, ou de carton ayant un certain contenu. Il faudra alors adapter l'antenne en fonction de cet objet.

Ses conditions opérationnelles : dans une phase opérationnelle, le tag RFID peut être soumis à des stress mécaniques, à des températures extrêmes ou à des substances chimiques qui demanderont l'utilisation d'un packaging ou de matériaux particuliers

II.12 OUTILS DE SIMULATION :

L'utilisation de logiciels de simulation électromagnétique est incontournable dans la conception d'antennes. Elle permet d'analyser le comportement d'une structure et d'optimiser son fonctionnement par rapport aux paramètres et aux cahiers de charges désirés avant d'entamer la phase de réalisation. Cette étape peut être très onéreuse en termes de temps et de ressources.

Il existe de nombreux codes et logiciels simulation électromagnétique qui permettent la modélisation et le calcul du comportement électromagnétique des différentes structures. Parmi ces logiciels on peut citer :

- Le logiciel IE3D (Integrated Electromagnetic 3D) ;
- Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator);
- Le logiciel CST MWS(Computer Simulation Technology) ;

Plusieurs étapes sont nécessaires à suivre :

-La définition de la structure de l'antenne à l'aide de paramètres : Différentes fonctions du logiciel permettent de définir des structures simples et d'effectuer des opérations booléennes sur ces structures.

-La définition des matériaux diélectriques et conducteurs caractérisant la structure.

-La définition des conditions limites : Plusieurs types de conditions limites peuvent être définis dont un mur électrique ou un espace ouvert. Il est également possible de définir des symétries électriques ou magnétiques permettant de diviser le domaine de calcul et donc de diminuer le temps de calcul.

-La définition du port d'alimentation : Deux types de ports sont disponibles dont le port guide d'onde utilisé pour alimenter les lignes micro-strips ou coplanaires et les câbles coaxiaux, ainsi que le port discret adapté aux structures nécessitant des sources discrètes (dont les puces RFID).

-La définition de la plage de fréquence : Afin d'optimiser les temps de calcul de structures résonantes, il faut exclure du domaine de calcul les fréquences de résonance des modes supérieurs.

-La définition du maillage : CST Microwave Studio possède un générateur de maillage dont on peut paramétrer la densité. Le contrôle du maillage est une étape importante. Plus le nombre de maille est importante plus le temps de calcul est élevé. Cependant un nombre de maille trop faible peut générer des résultats erronés.

-Paramétrer le solveur temporel : Permet de définir le niveau de précision du solveur temporel.

-*Vérifier et analyser les résultats de simulations* : Il faut vérifier que les résultats obtenus correspondent bien à ce qui est attendu afin de valider la simulation.

-*Effectuer une étude paramétrique* : Afin d'identifier des paramètres géométriques de l'antenne pouvant améliorer les propriétés désirées, il est possible de lancer une étude paramétrique qui permettra de voir l'influence d'un paramètre sur les propriétés de l'antenne. Cette étape permet de converger vers une solution.

-*Effectuer une optimisation* : Après avoir effectué une étude paramétrique et avoir convergé vers une solution, il est possible d'utiliser les outils d'optimisation disponible sous le logiciel.

-*Exporter la structure pour le prototypage* une fois que les caractéristiques voulues sont obtenues [12].

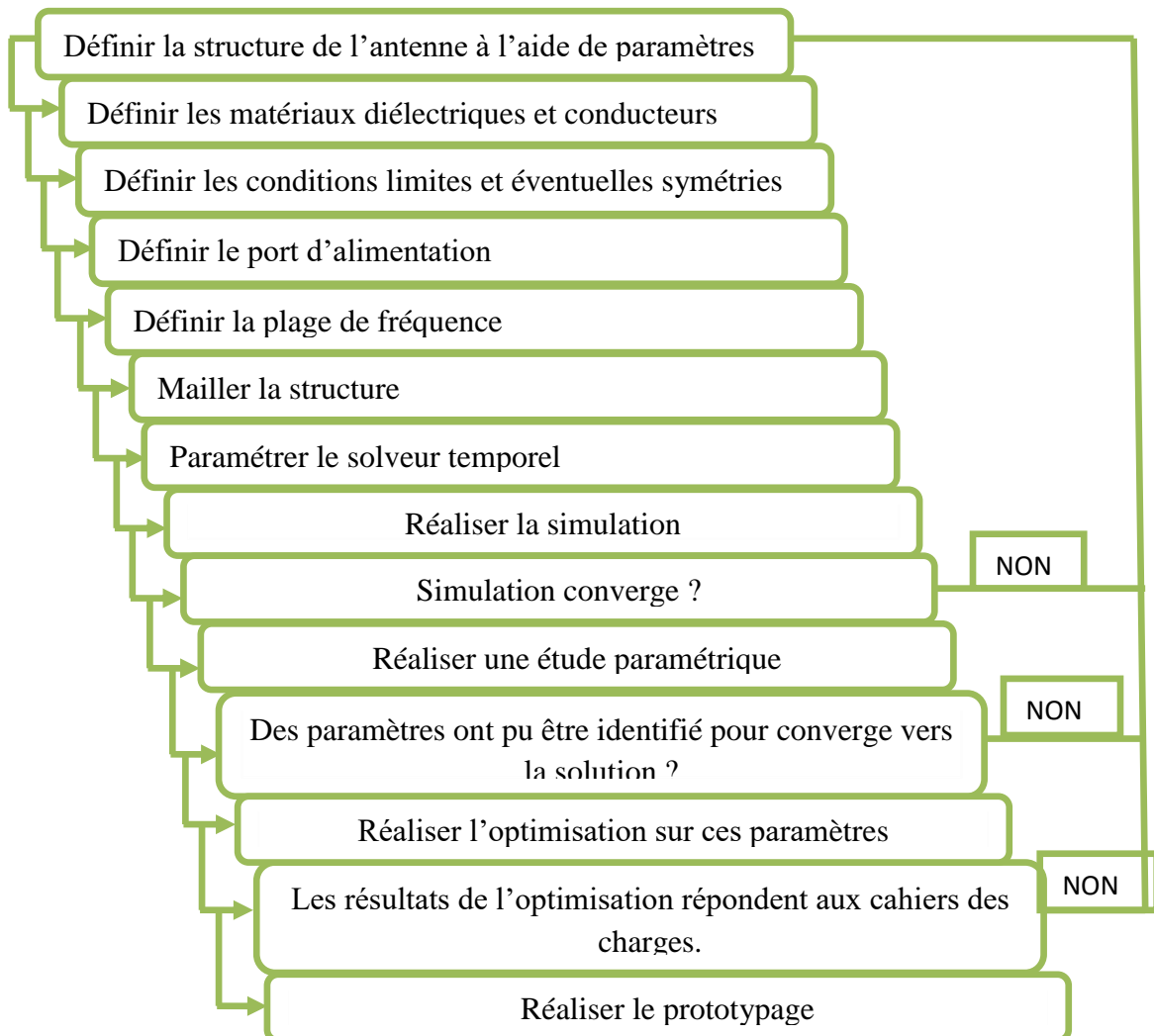


Figure II. 30 : Méthodologie de simulation d'antenne

II.13 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé les méthodes d'adaptation d'impédance et de miniaturisation des antennes pour tags RFID. Nous avons également présenté une vue d'ensemble de la conception d'antennes, en décrivant la méthodologie et les exigences de conception. Enfin, nous avons introduit les différents logiciels de simulation électromagnétique utilisés pour la conception et la simulation des antennes, en mettant l'accent sur l'outil « CST MWS » que nous avons utilisé tout au long de ce travail.

CHAPITRE III

Conception et adaptation
des antennes aux puces
RFID

III.1 INTRODUCTION

Les antennes sont exploitées dans plusieurs domaines grâce à sa facilité d'adaptation aux diverses situations, notamment dans la RFID. Les tags RFID nécessitent certaines exigences par rapport aux antennes utilisées, en effet la taille des tags est souvent miniature d'où la nécessité d'utiliser des antennes adaptées ayant des petites dimensions. [3]

L'objectif de ce chapitre est de concevoir et d'analyser des structures d'antennes dipôles imprimées associées à des tags RFID, en utilisant le logiciel CST MICROWAVE STUDIO (Computer Simulation Technologie) [37].

Dans cette partie nous allons présenter deux structures d'antennes dipôles à base des motifs fractals avec méandre conçues et simulées sous l'environnement CST, avec l'impédance complexe de la puce. La bande allouée pour le fonctionnement de l'antenne est UHF (860-960 MHz).

III.2 DEFINITION DU LOGICIEL CST STUDIO SUITE

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique. CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 Dimensions basée sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (Finite Intégration Technique). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3-Dimensions de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST, d'une par sa méthode, discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles. La méthode est une caractéristique clé de CST Micro wave qui approche est donne le choix de type de simulateur ou un treillis qui est le mieux adapté à un problème particulier [44].

III.3 FRACTALE DE HILBERT A L'ITERATIONS DEUX

Il existe de nombreux types de formes fractales qui ont été proposées après leur formulation, ainsi que des formes géométriques ont été créées en motifs répétitifs, la courbe de Hilbert a été proposée en 1891 [17][45].

La Figure III.1 illustre la structure de configuration d'antenne courbe de Hilbert. d , c et k sont respectivement la largeur de l'antenne, le segment ou l'espacement fractal et la largeur de la ligne d'antenne.



a) structure de première itération.

b) structure de deuxième itération.

Figure III.1 : Géométrie de Hilbert à la deuxième itération.

III.3.1 ANTENNE DIPOLE FRACTALE RFID (2.45 GHz) ADAPTEE A 50Ω

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 $\xi_r = 4.3$, 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.2.

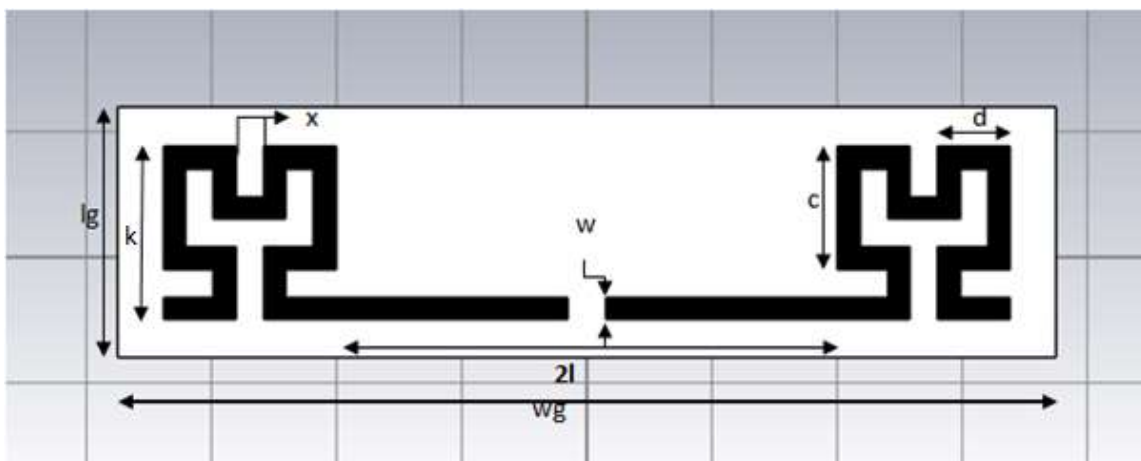


Figure III.2 : Structure de l'antenne dipôle fractale à la deuxième itération.

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

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.

La figure III.3 représente la conception de l’antenne dipôle sous le logiciel CST MWS ainsi que sa position dans le système de coordonnées cartésiennes.

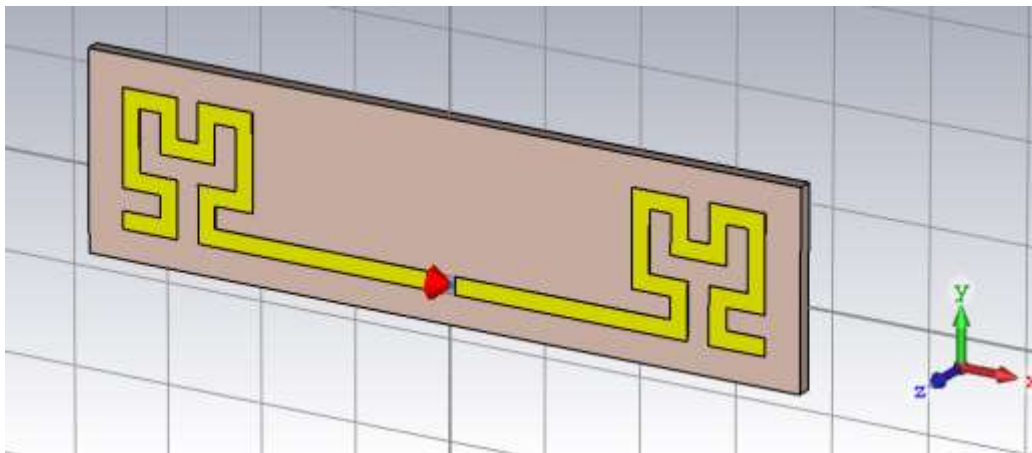


Figure III.3 : Conception de Structure de l’antenne dipôle fractale à l’itération 2 sous CST.

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.4.

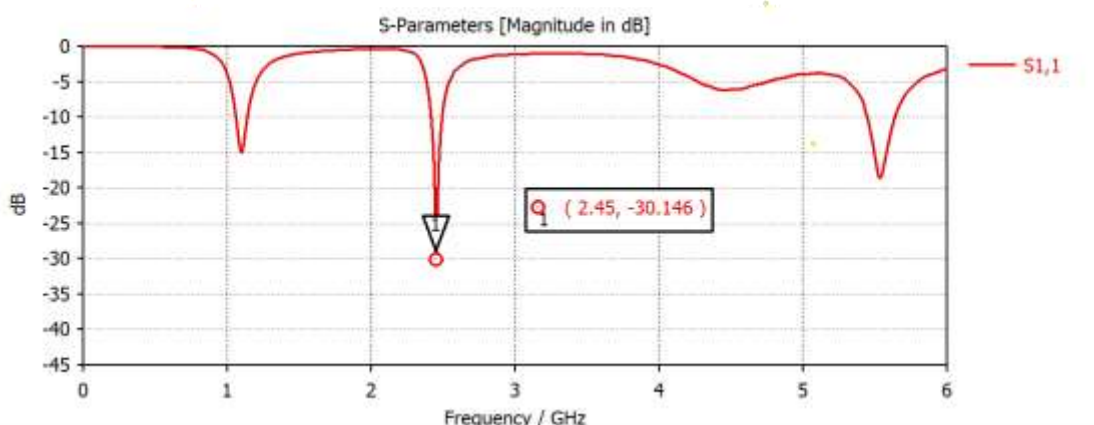


Figure III.4 : Coefficient de réflexion de l’antenne dipôle fractale mono-bande (2.45 GHz).

De la figure III.4 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.3.2 ANTENNE DIPOLE FRACTALE A LA DEUXIEME ITERATION RFID (0.868 GHz) ADAPTEE A 50Ω

Dans le cadre de diminuer la fréquence de fonctionnement de l'antenne, afin de l'adapter à une impédance complexe d'une puce, nous avons modifié notre dipôle en introduisant des méandres sur les deux coté, comme proposé par G.Marrocco [39], en repliant les bras d'une antenne dipôle Le long d'un chemin sinueux (Figure III.5), une configuration de fils est produite avec des réactances capacitives et inductives distribuées qui affectent globalement l'impédance d'entrée de l'antenne.

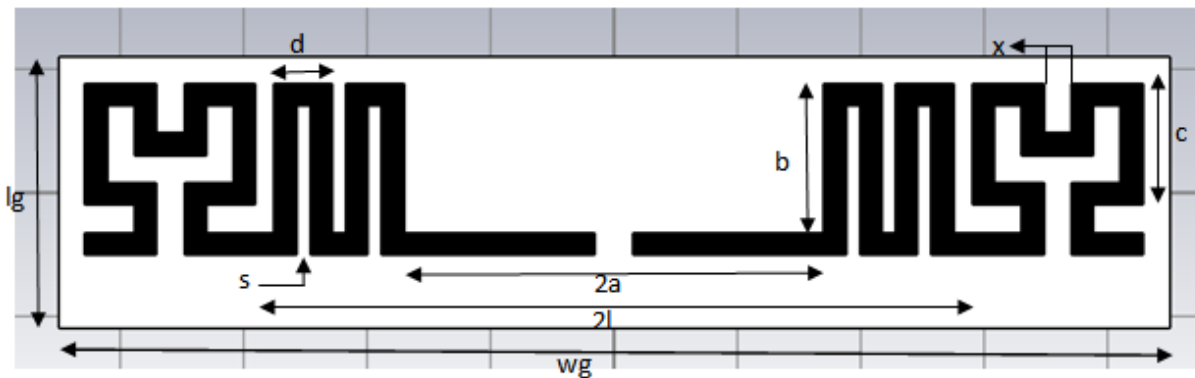


Figure III.5 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération 2 avec méandres.

Les dimensions optimisées de cette antenne sont récapitulées sur le Tableau III.2.

Paramètres	wg	lg	c	d	s	b	x	a	l
Valeur (mm)	110	24	7.8	10.8	2.5	9	1.2	22	38

Tableau III.2 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale à l'itération 2 avec méandres.

La figure III.6 représente la conception de l'antenne dipôle méandre sous le logiciel CST MWS ainsi que sa position dans le système de coordonnées cartésiennes.

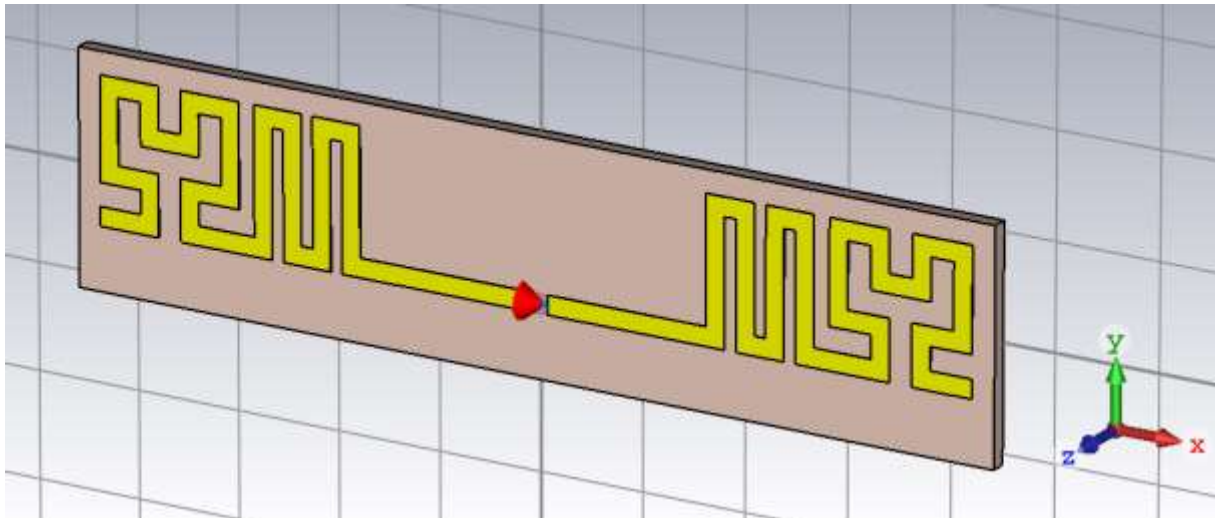


Figure III.6 : Conception de l'antenne dipole fractale à l'itération 2 avec méandres sous CST.

Le coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale à l'itération 2 avec méandres mono-bande (0,868 GHz) ayant les dimensions théoriques du tableau III.2 est montré sur la figure III.7.

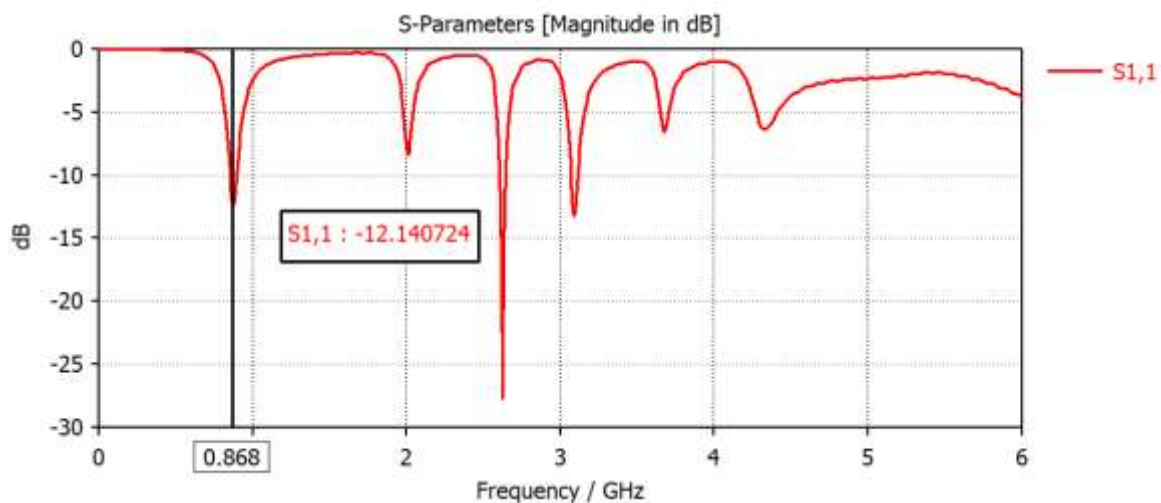


Figure III.7 : Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale à l'itération 2 avec méandres.

La Figure III.7 illustre le module du coefficient de réflexion $|S_{11}|$ de l'antenne dipôle fractale avec méandres. Le caractère multi-bandes est présent dont une bande autour de la fréquence 0,868 GHz est destiné au système RFID avec adaptation de -12.14 dB.

III.3.3 ANTENNE DIPOLE FRACTALE A L'ITERATION 2 ADAPTEE A UNE PUCES RFID

La géométrie de l'antenne conçue est illustrée sur la figure III.8. L'antenne a une taille $110 \times 24 \text{ mm}^2$. Cette antenne est conçue pour travailler à la fréquence $f=0.868\text{GHz}$. Les caractéristiques des puces RFID-UHF disponible dans le marché sont reportées dans le Tableau III.3. Cette antenne est conçue pour être adaptée à une puce **strap XRAG2** qui a une impédance d'entrée de $Z_{\text{puce}} = 27 - j157 \Omega$ à la fréquence de travaille $f=0.868 \text{ GHz}$.

RQ : L'impédance de l'antenne égale au conjugué de l'impédance de la puce $Z_{\text{ant}} = Z_{\text{puce}}^*$.

Puce RFID	Puissance min de fonctionnement (dBm)	Rc (Ω) Série	Cc (pF) Série	Fréquence de travail
AlienHiggs 4	-18.5	1500	0.85	860-960 MHz
AlienHiggs3	-18	1500	0.85	860-960 MHz
NXPUCODE G2XM/G2XL	-15	1385	1.16	860-960 MHz
IMPINJ Monza	-17.8	51800	0.825	860-960 MHz
XWIMPINJ Monza 4	-17.4	1650	1.21	860-960 MHz
strap XRAG2	-16	1500	0.85	860-960 MHz
Impinj Monza R6	-20	500	1.1	860-960 MHz

Tableau III.3 : Exemple de puces RFID-UHF disponible dans le marché.

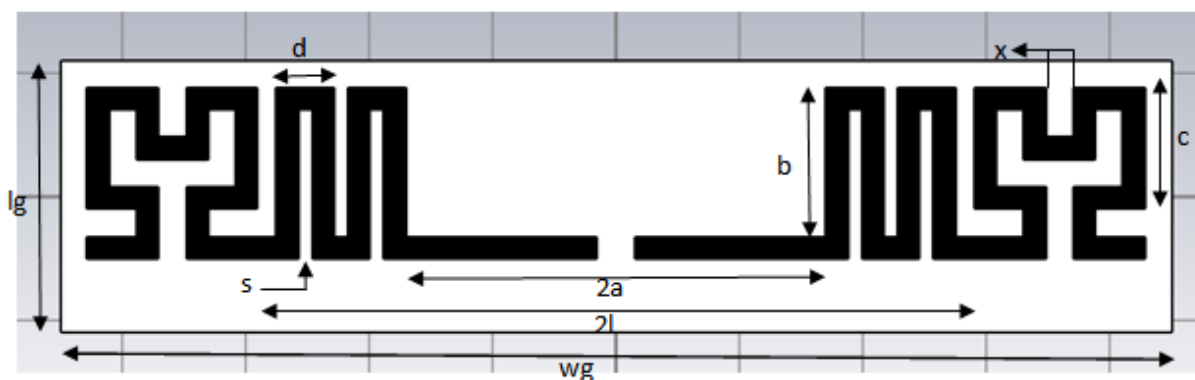


Figure III.8 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération 2 avec puce.

Le Tableau III.4 résume et récapitule toutes les dimensions optimisées de cette antenne.

Paramètres	wg	lg	c	d	s	b	x	a	l
Valeur (mm)	110	24	7.42	10.2	1	8.4	1	21	34

Tableau III.4 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale à l'itération 2.

La figure III.9 représente la conception de l'antenne dipôle méandre sous le logiciel CST MWS ainsi que sa position dans le système de coordonnées cartésiennes.

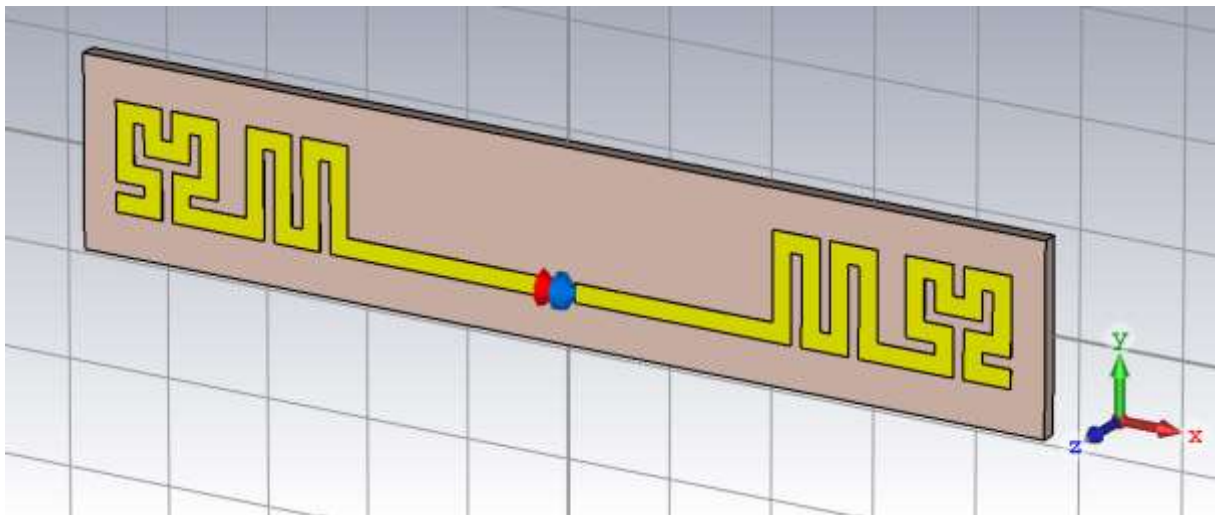
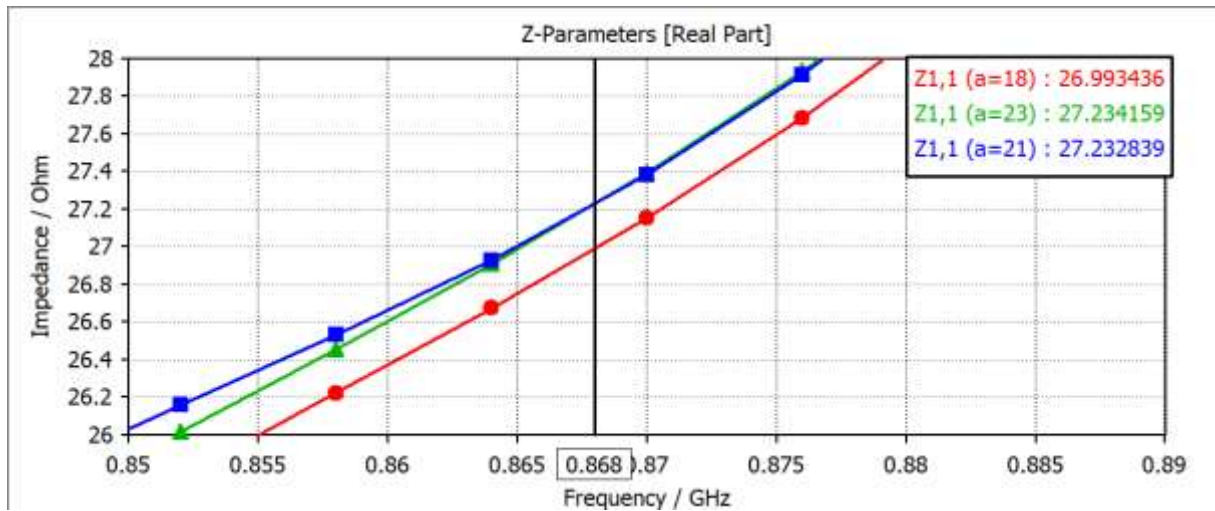


Figure III.9 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération 2 avec puce sous CST.

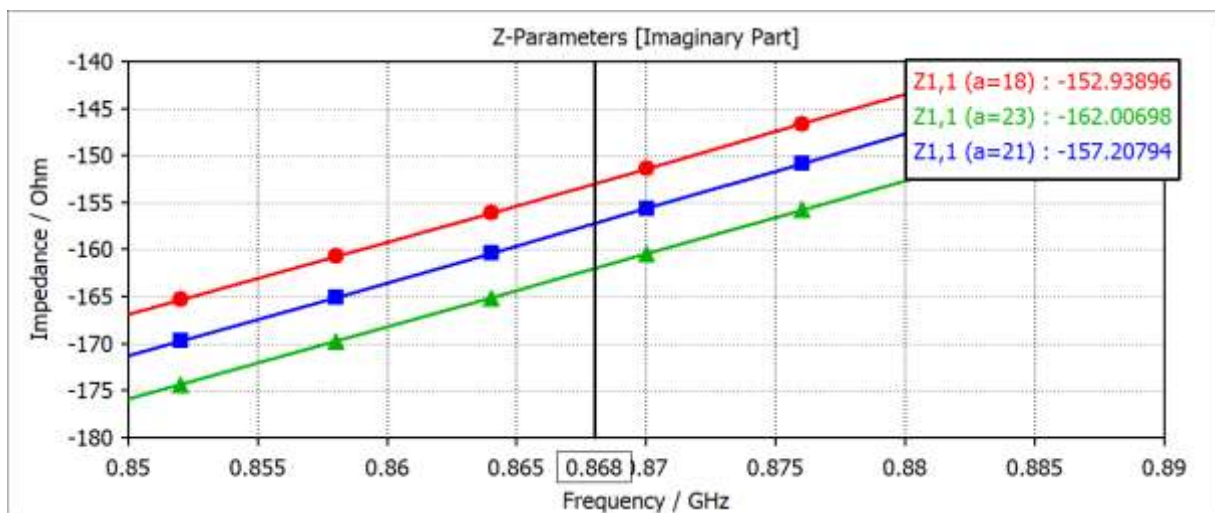
III.3.3.1 Effet Des Dimensions

Nous allons faire une étude paramétrique qui concerne une variation des paramètres 'a', 'x' et 's' pour adapter l'impédance de l'antenne à la puce strap XRAG2 qui a pour impédance $Z_{puce} = 27 - j157 \Omega$ à la fréquence 868 MHz, comme le montre le tableau III.3 (puces).

a. Effet du paramètre «a»



(a)



(b)

Figure III.10 : Impédance de la puce simulée en fonction de la fréquence pour différents valeurs de paramètre « a ». (a) partie réelle. (b) partie imaginaire.

Paramètre	a=18	a=21	a=23
Impédance Zpuce (Ω) à 868 MHz	Zpuce=26-j152	Zpuce=27-j157	Zpuce=27-j162

Tableau III.5 : Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre « a ».

D’après les résultats obtenus en variant le paramètre ‘a’ (Tableau III.5) on remarque que l’antenne est mieux adaptée lorsque a= 21mm.

b. Effet Du Paramètre «x»

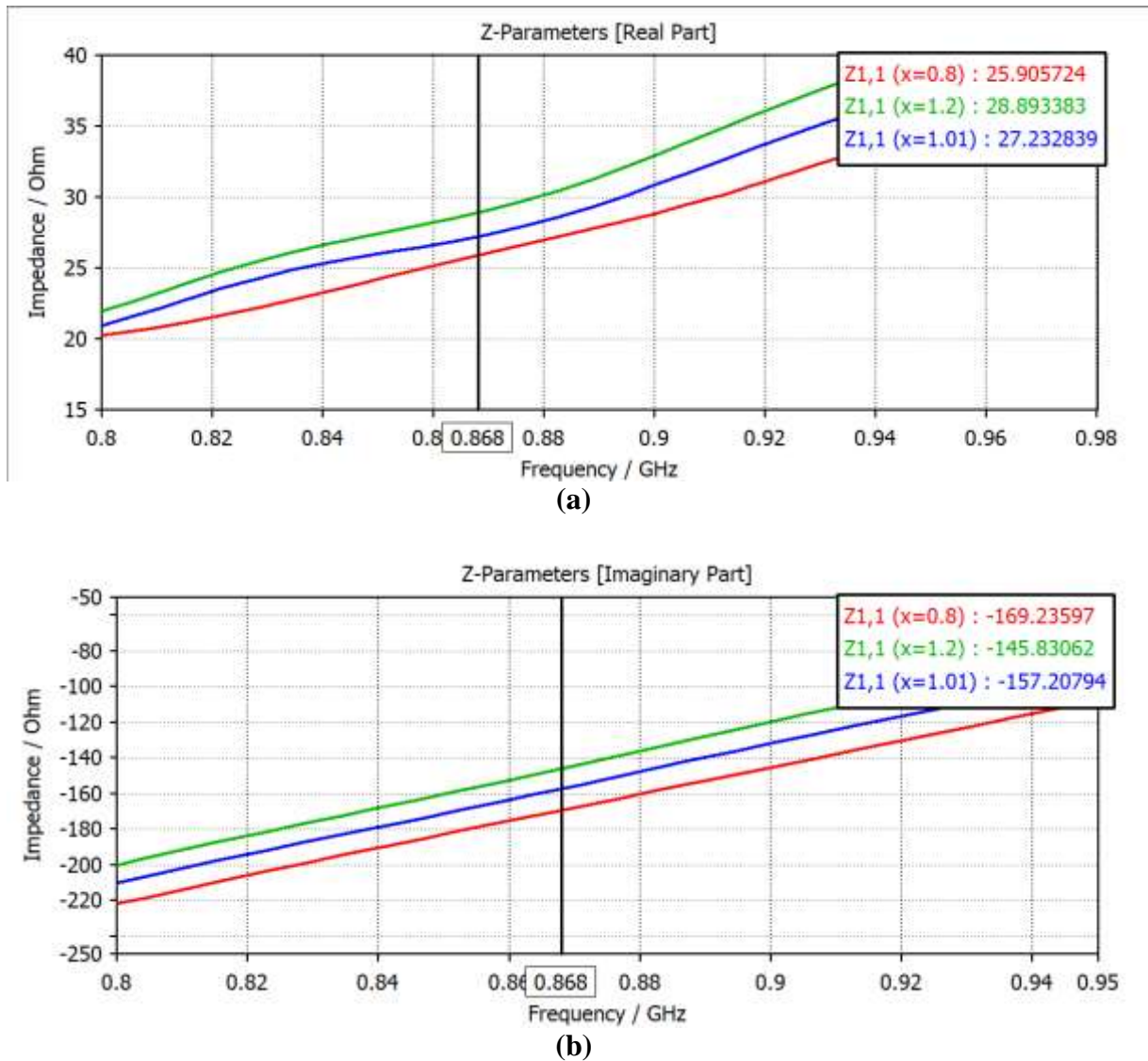


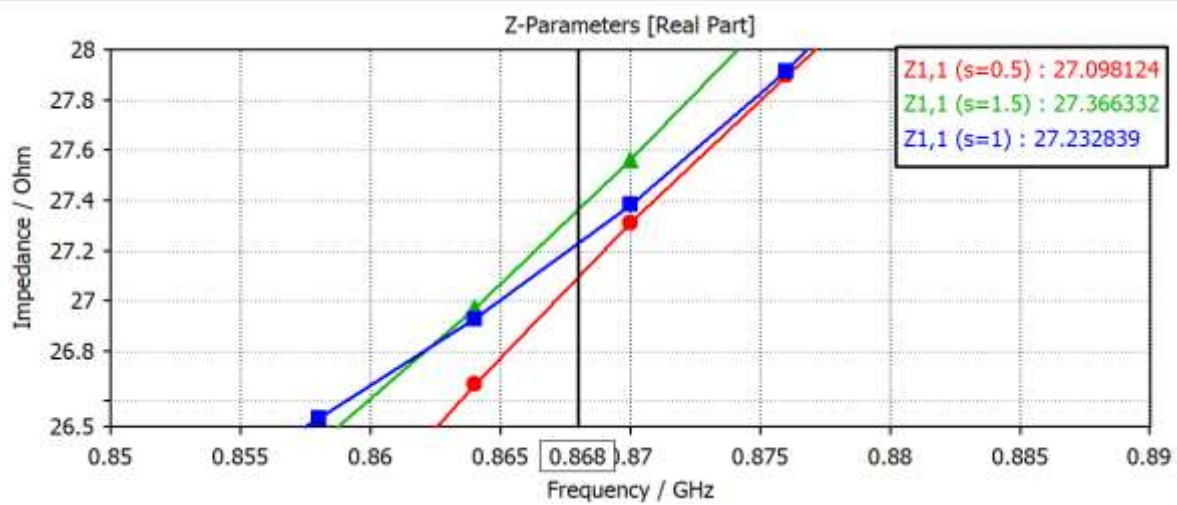
Figure III.11 : Impédance de la puce simulée en fonction de la fréquence pour différents valeurs de paramètre « x ». (a) partie réelle. (b) partie imaginaire.

Paramètre(mm)mm	x=0.8	x=1.01	x=1.2
Impédance Z _{puce} (Ω) à 868 MHz	Z _{puce} =25-j169	Z _{puce} =27-j157	Z _{puce} =28-j145

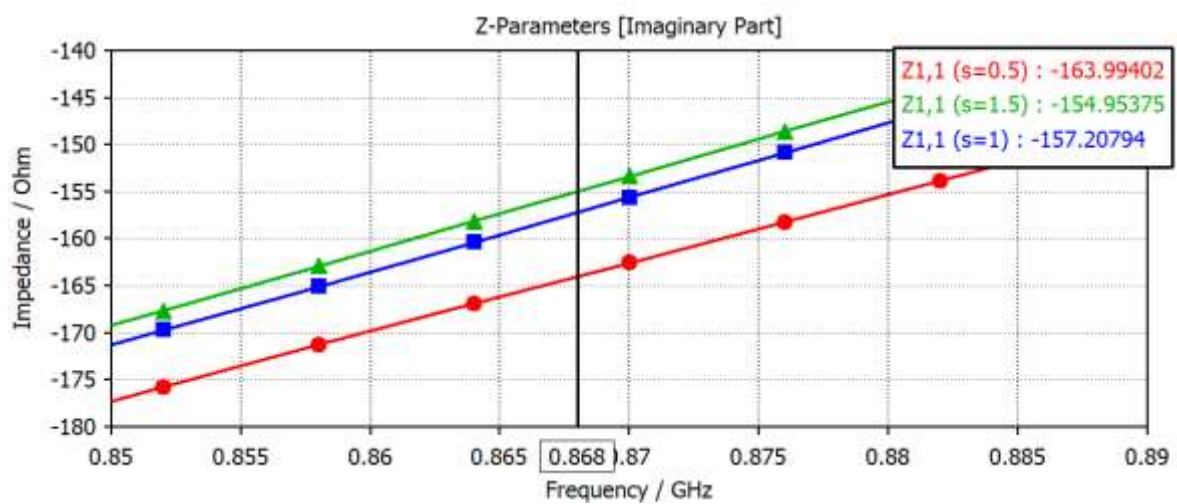
Tableau III.6 : Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre 'x'.

La valeur du paramètre x=1.01 mm est la valeur qui donne une impédance plus proche Z_{puce}=27-j157 Ω.

c. Effet Du Paramètre «s»



(a)



(b)

Figure III.12 : Impédance de la puce simulée en fonction de la fréquence pour différents valeurs de paramètre « s ». (a) partie réelle (b) partie imaginaire.

Paramètre(mm)mm	s=0.5	s=1	s=1.5
Impédance Zpuce (Ω) à 868 MHz	Za=27-j163	Za=27-j157	Za=27-j154

Tableau III.7 : Résultats de simulation pour différents valeurs de paramètre ‘s’.

D'après les résultats obtenus en variant le paramètre 's' (Tableau III.7) on remarque que l'antenne est mieux adaptée lorsque $s=1\text{mm}$.

Le diagramme de rayonnement obtenu par la simulation est représenté par les figures III.13 et III.14.

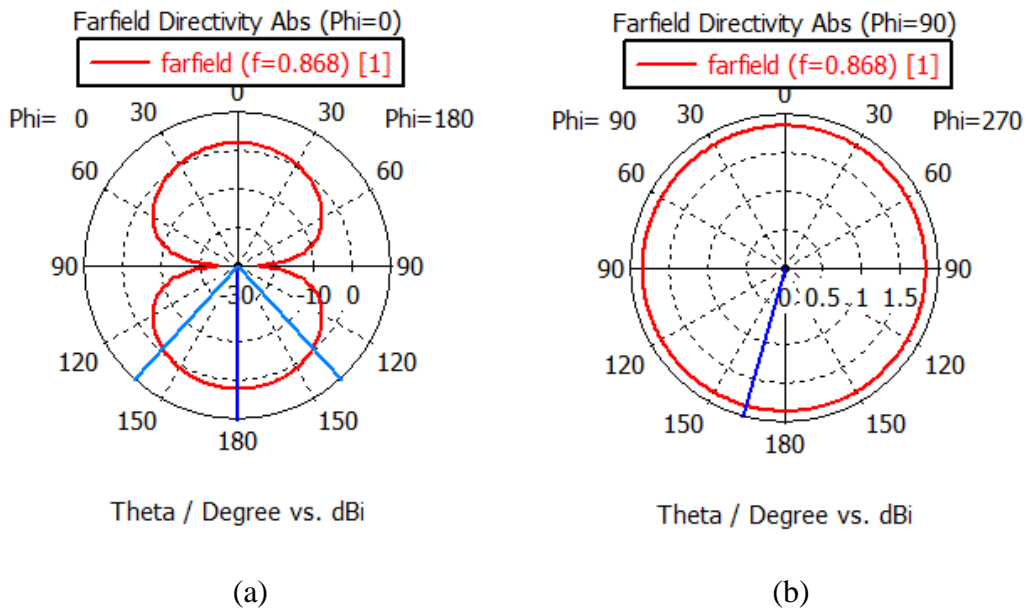


Figure III.13 : Diagramme de rayonnement en 2D.

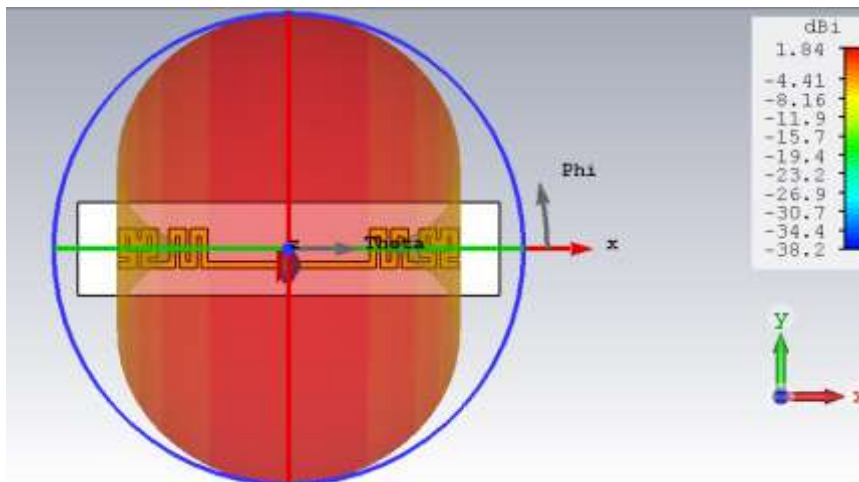


Figure III.14 : Diagramme de rayonnement en 3D.

Les figure III.13 et III.14 présentent les diagrammes de rayonnement de l'antenne dipôle fractale à l'itération 2 avec des méandres à la fréquence de fonctionnement de 0,868 GHz, nous représentons ces rayonnement en système de coordonnées polaire sur les deux plans principaux (plan E « $\Phi=0$ » et plan H « $\Phi=90$ ») ainsi qu'une représentation en 3D. Elles

présentent un diagramme bidirectionnel sur l'un des deux plans principaux et omnidirectionnel sur l'autre avec une directivité de 1.84 dBi.

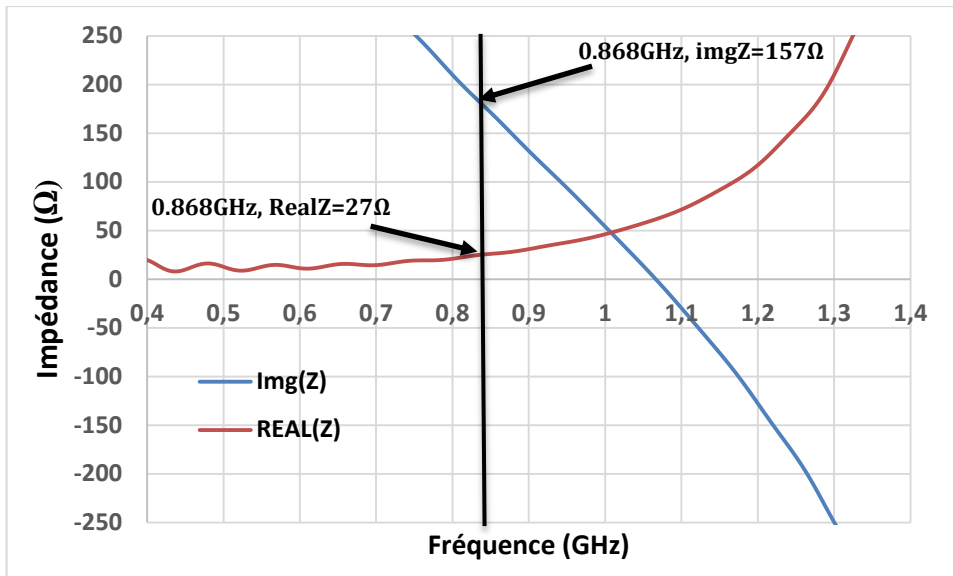


Figure III.15 : La partie réelle et imaginaire de l'impédance de l'antenne simulée en fonction de la fréquence.

La figure III.15 illustre la partie réelle et imaginaire de l'impédance de l'antenne simulée en fonction de la fréquence. On peut remarquer qu'à la fréquence de fonctionnement de 0,868 GHz l'impédance de l'antenne égale $Z_{ant} = 27 + j 157 \Omega$, ce qui correspond au conjugué de l'impédance de la puce.

III.4 FRACTALE DE HILBERT A L'ITERATIONS TROIS

L'application du fractale sur les antennes vous donne toujours l'envie d'aller en avant dans les itérations pour voir qu'est ce qu'il apporte comme performance dans leurs caractéristiques. La troisième itération de Hilbert est bien illustrée sur la Figure III.16 avec les paramètres f , c et x qui représentent respectivement la largeur de l'antenne, le segment ou l'espacement fractal et la largeur de la ligne d'antenne.



Figure III.16 : Structure de troisième itération de Hilbert.

III.4.1 ANTENNE DIPOLE FRACTALE A L'ITERATION TROIS (2.45GHz) ADAPTEE A 50 Ω

La géométrie de cette antenne est caractérisée par un élément rayonnant sous forme d'un dipôle, dont chaque pôle représente une forme fractale de Hilbert à l'itération 3. Cette antenne mono-bande est destinée à fonctionner à la fréquence 2.45 GHz normalisée pour les applications RFID. Elle est déposée sur un substrat de type FR4 de permittivité de $\xi_r = 4.3$, d'une hauteur de $h = 1.5\text{mm}$ et un cuivre d'épaisseur $t = 0.035\text{ mm}$.

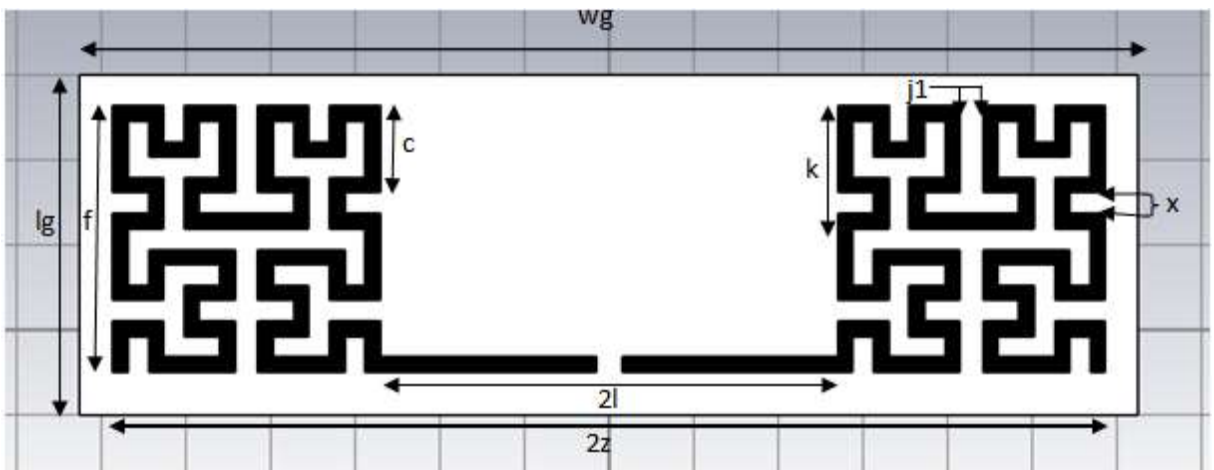


Figure III.17 : Géométrie de l'antenne dipole fractale à l'itération trois adaptée à 50Ω.

Le Tableau III.8 résumées et récapitulées toutes les dimensions optimisées de cette antenne.

Paramètres	wg	lg	x	k	w	l	c	Z	j1	f
Valeur (mm)	150	40	2.42	14.46	1.8	27	10.24	58.62	2.7	22.499

Tableau III.8 : Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale à l'itération trois.

La figure III.18 représente la conception de l'antenne dipôle à l'itération trois sous le logiciel CST MWS ainsi que sa position dans le système de coordonnées cartésiennes.

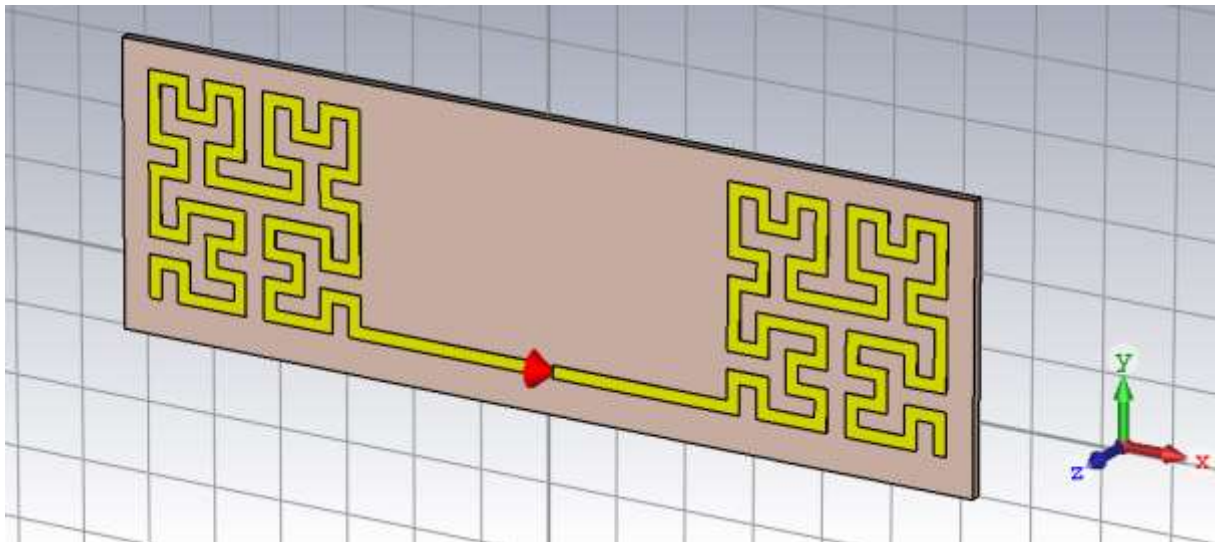


Figure III.18 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération trois sous CST.

Le coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale mono-bande ayant les dimensions théoriques du tableau III.8 est montré sur la figure III.19.

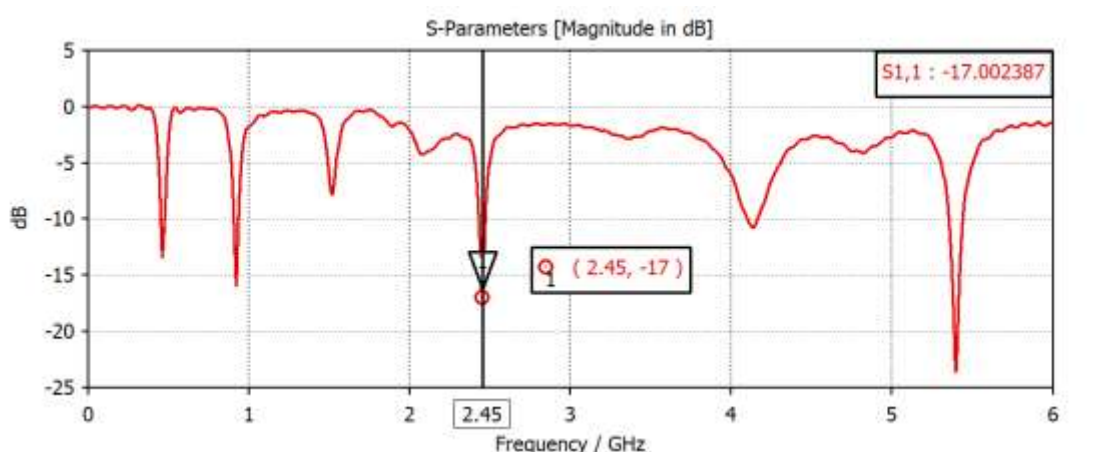


Figure III.19 : Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale à l'itération trois.

De la Figure III.19 qui représente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, on peut tirer la remarque que le comportement multi-bande est présent,

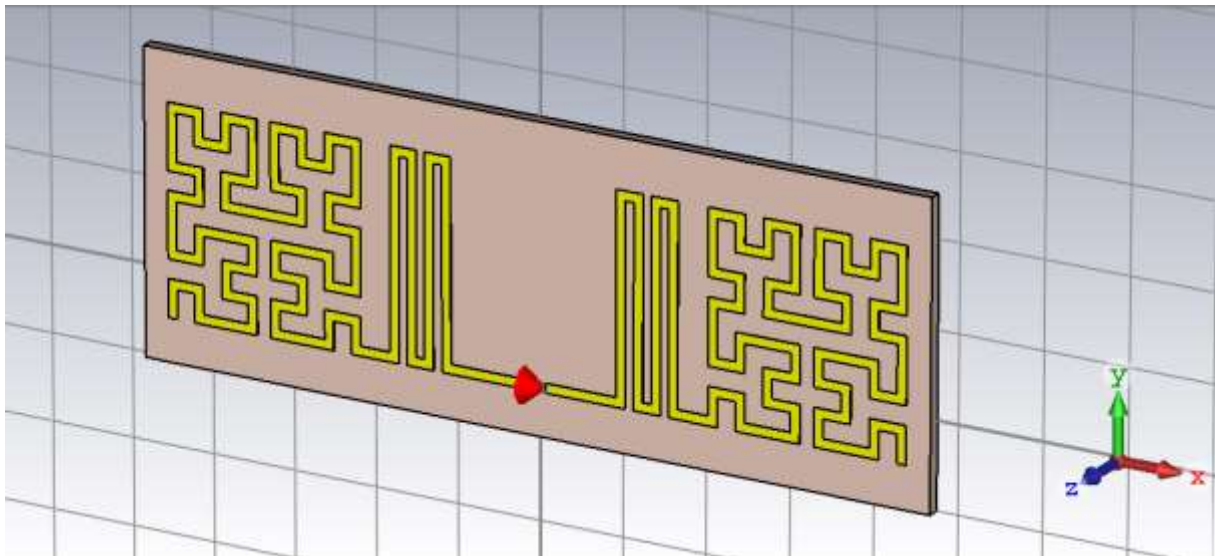


Figure III.21 : Géométrie de antenne dipole fractale à l'itération trois sous CST.

Le coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale mono-bande ayant les dimensions théoriques du tableau III.9 est montré sur la figure III.22.

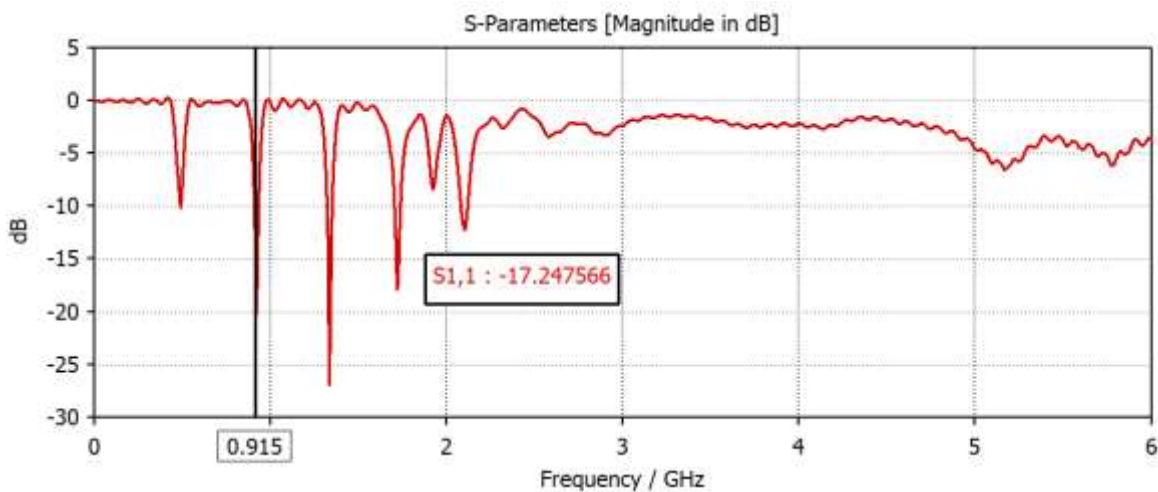


Figure III.22 : Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale.

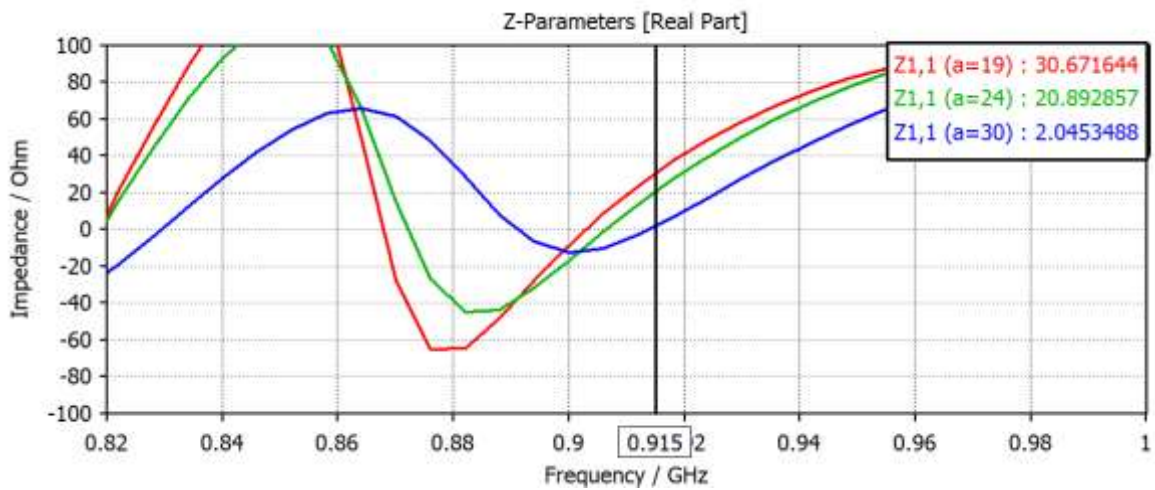
III.4.3 ANTENNE DIPOLE FRACTALE A L'ITERATION TROIS ADAPTEE A UNE PUCHE RFID

La géométrie de l'antenne conçue est illustrée sur la figure III.23. L'antenne a une taille $150 \times 40 \text{ mm}^2$. Cette antenne est conçue pour travailler à la fréquence $f=0.915\text{GHz}$. Les valeurs des paramètres utilisés dans la conception de cette antenne sont reportées dans le Tableau III.10. Cette antenne est conçue pour être adaptée à une puce **Impinj Monza R6** qui a une impédance d'entrée $Z_{\text{puce}} = 20 - j144 \Omega$ à la fréquence de travail $f=0.915\text{GHz}$.

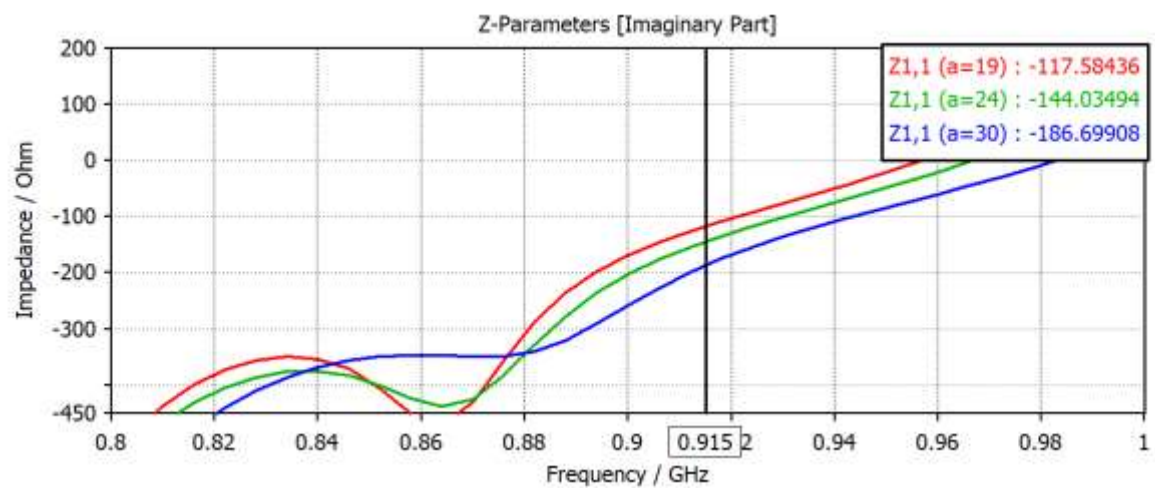
III.4.3.1 Effet Des Dimensions

Nous allons faire une étude paramétrique qui concerne la variation des paramètres ‘a’, ‘x’ et ‘s’ pour adapter l’impédance de l’antenne à la puce $Z_{puce}=20-j144 \Omega$ et à la fréquence 915 MHz.

a. Effet De paramètre «a»



(a)



(b)

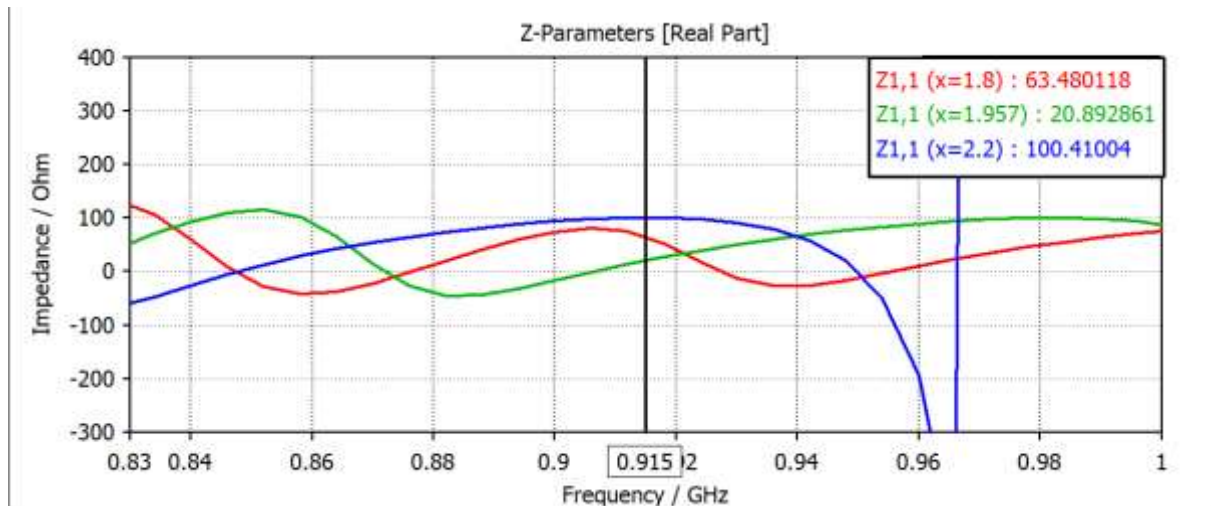
Figure III.25 : Impédance de la puce en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs du paramètre ‘a’. (a) partie réelle (b) partie imaginaire.

Paramètre(mm)mm	a=19	a=24	a=30
Impédance $Z_{puce} (\Omega)$ à 915 MHz	$Z_a=30-j117$	$Z_a=20-j144$	$Z_a=2-j186$

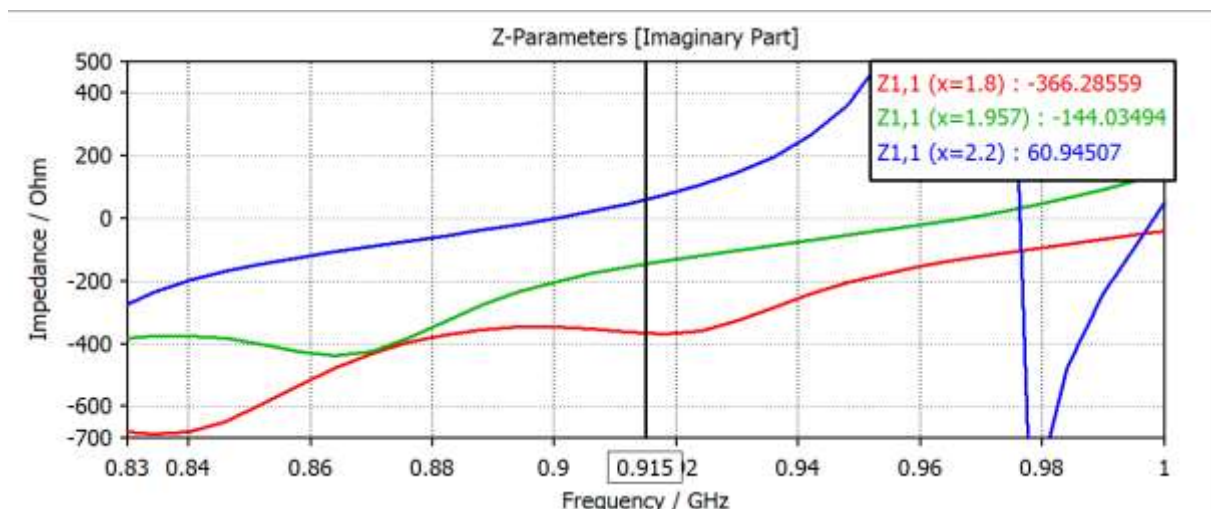
Tableau III.11 : Résultats de simulation selon la variation du paramètre ‘a’.

Selon les résultats obtenus en variant le paramètres ‘a’ (Tableau III.11) on remarque que l’antenne est bien adaptée lorsque a= 24mm.

b. Effet De paramètre «x»



(a)



(b)

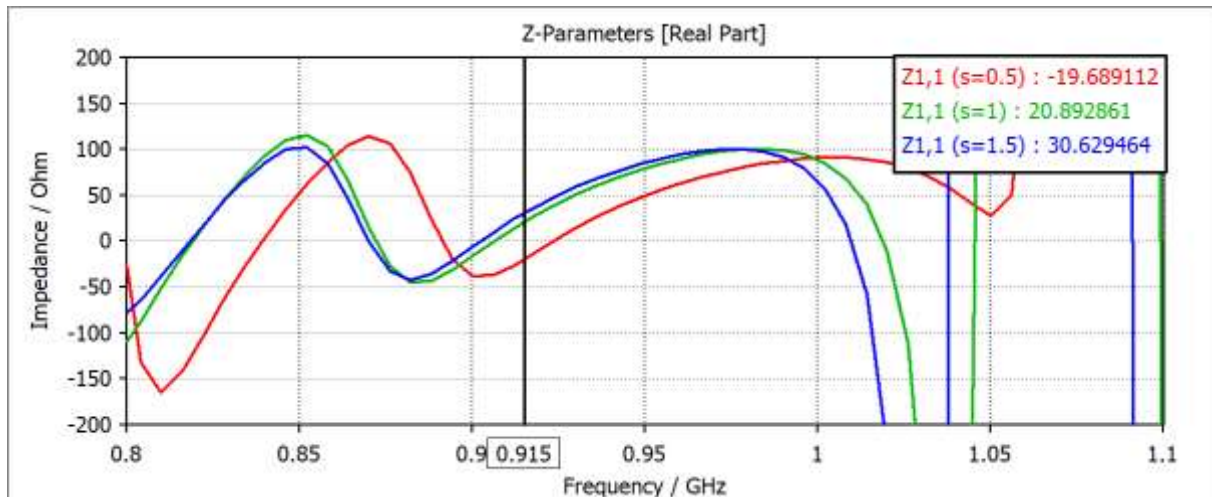
Figure III.26 : Impédance d’entrée en fonction du paramètre ‘x’. (a) partie réelle (b) partie imaginaire.

Paramètre(mm)mm	x=1.8	x=1.957	x=2.2
Impédance Zpuce (Ω) à 915 MHz	Za=63-j366	Za=20-j144	Za=100-j60

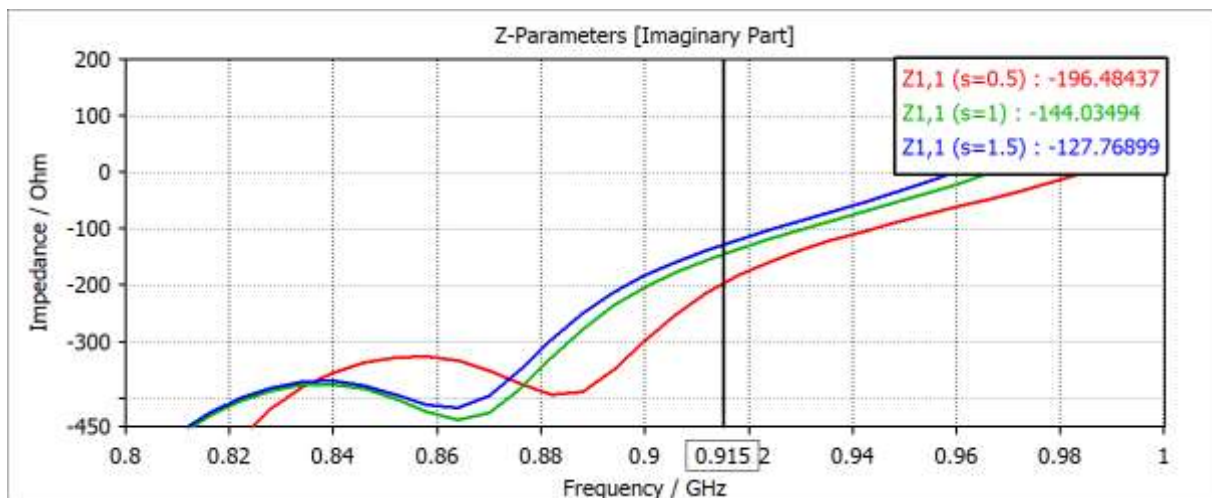
Tableau III.12 : Résultats de simulation selon la variation du paramètre ‘x’.

Selon les résultats obtenus en variant le paramètres ‘x’ (Tableau III.12) on remarque que l’antenne est mieux adaptée lorsque $x=1.957\text{mm}$.

c. Effet De paramètre «s»



(a)



(b)

Figure III.27 : Impédance d’entrée en fonction du paramètre ‘s’. (a) partie réelle (b) partie imaginaire.

Paramètre(mm)mm	s=0.5	s=1	s=1.5
Impédance Zpuce (Ω) à 915 MHz	$Z_a=-19-j196$	$Z_a=20-j144$	$Z_a=30-j127$

Tableau III.13 : Résultats de simulation selon la variation du paramètre ‘s’.

Selon les résultats obtenus en variant le paramètres 's' (Tableau III.13) on remarque que l'antenne est mieux adaptée lorsque $s=1\text{mm}$.

Le diagramme de rayonnement obtenu par la simulation est représenté par les figures III.28 et III.29.

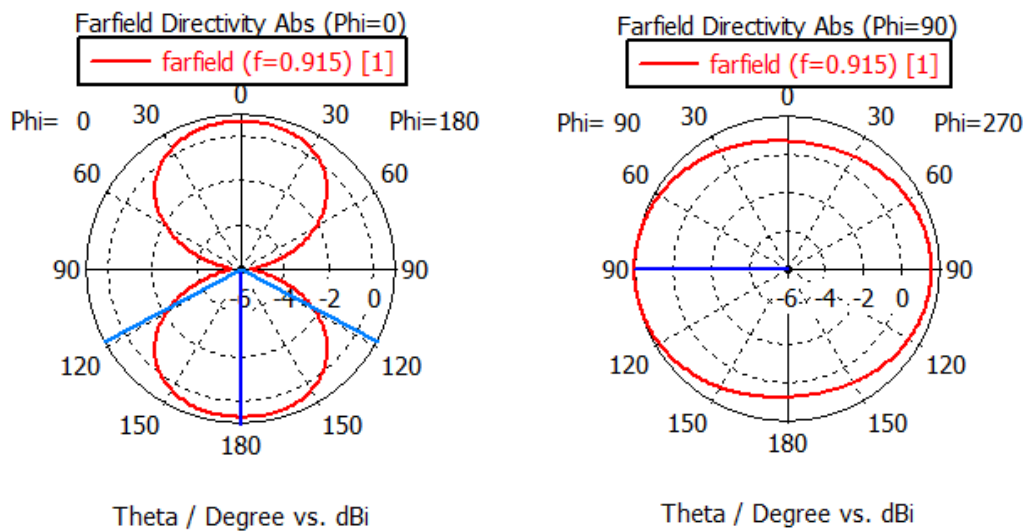


Figure III.28 : Diagramme de rayonnement en 2D.

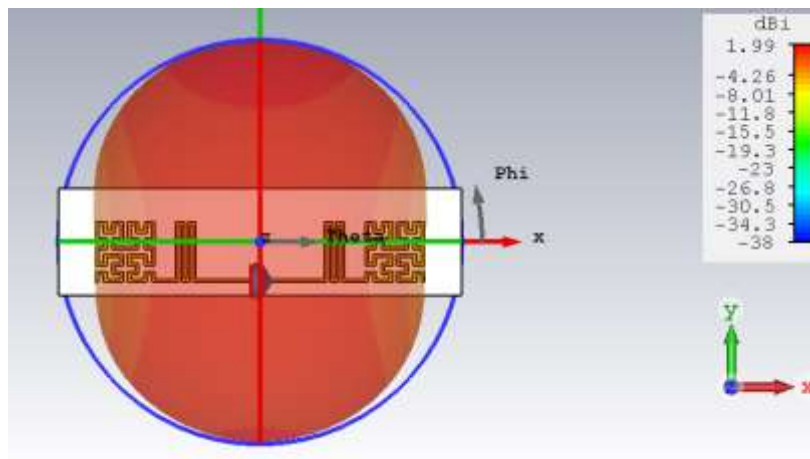


Figure III.29 : Diagramme de rayonnement en 3D.

Les figure III.28 et III.29 présentent les diagrammes de rayonnement de l'antenne dipôle fractale à l'itération trois avec des méandres adaptée à une puce RFID pour la fréquence de fonctionnement 0.915 GHz, nous représentons ces rayonnement en système de coordonnées polaire sur les deux plans principaux (plan E « Phi=0 » et plan H « Phi=90 »)

ainsi qu'une représentation en 3D. Elles présentent un diagramme bidirectionnel sur l'un des deux plans principaux et omnidirectionnel sur l'autre avec une directivité de 1.99dBi.

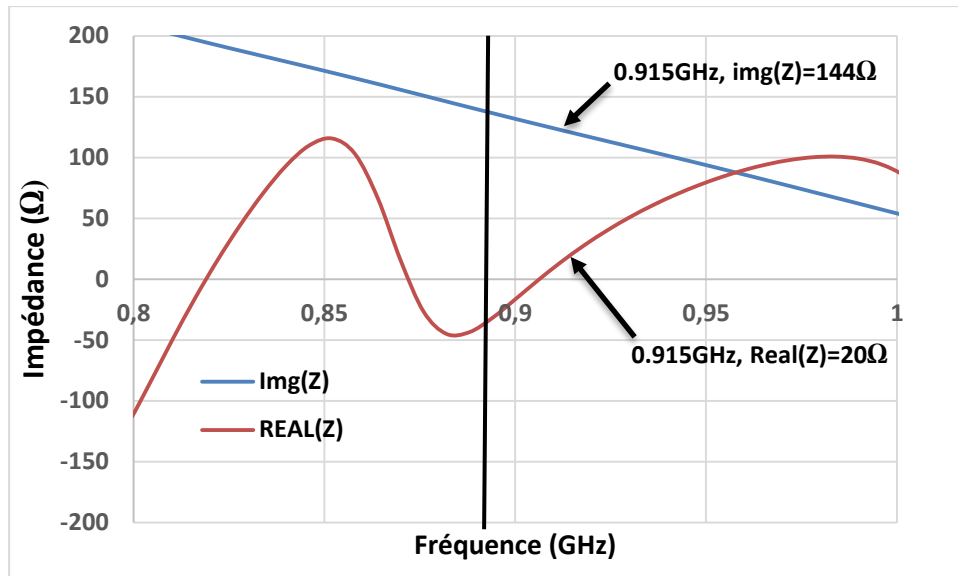


Figure III.30 : La partie réelle et imaginaire de l'impédance de l'antenne simulée en fonction de la fréquence.

La figure III.30 illustre la partie réelle et imaginaire de l'impédance de l'antenne simulée en fonction de la fréquence. On peut remarquer qu'à la fréquence de fonctionnement 0,915 GHz l'impédance de l'antenne égale $Z_{ant} = 20 + j 144 \Omega$, ce qui correspond au conjugué de l'impédance de la puce.

III.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons conçu, simulé et analysé deux structures d'antennes dipôles à motif fractal sur des patches rayonnants associées à des tags RFID à l'aide du logiciel CST. Nous avons exploré une variété d'antennes appartenant à la famille des dipôles, largement utilisées dans les systèmes RFID passifs. Ces antennes ont été illustrées à travers plusieurs exemples. Les différentes étapes de conception et de simulation ont été détaillées.

Nous avons utilisé la technique des méandres à la fois pour miniaturiser et adapter nos antennes. La première nous a permis de réduire la fréquence de fonctionnement de 2,45 GHz à 0,9 GHz, tandis que la seconde technique nous a aidés à adapter nos antennes aux puces RFID disponibles sur le marché, basée sur une étude paramétrique.

Les résultats de simulation ont montré que la première antenne, basée sur le fractal de Hilbert à l'itération 2, est adaptée à une puce de type **Strap XRAG2**, avec une impédance Z_{puce} de $27-j157 \Omega$ à la fréquence de 868 MHz. De même, la deuxième antenne, basée sur le fractal de Hilbert à l'itération 3, est adaptée à une puce de type **Impinj Monza R6**, avec une impédance Z_{puce} de $20-j144 \Omega$ à la fréquence de 915 MHz.

Le diagramme de rayonnement des deux antennes est similaire à celui d'un dipôle classique : bidirectionnel dans le plan E ($\Phi=0$) et omnidirectionnel dans le plan H ($\Phi=90$).

*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion générale

L'identification par radiofréquence est aujourd'hui utilisée dans de nombreux domaines. Ce projet s'est concentré sur l'étude et l'intégration d'un dispositif d'identification basé sur la technologie RFID. Nous avons ainsi tenté de lever le voile sur différents concepts théoriques relatifs à l'identification par radiofréquence (RFID), en particulier l'adaptation des antennes de tag RFID UHF aux puces, qui représente un défi aux concepteurs des antennes de cette catégorie.

Dans ce travail de projet de fin d'études, nous avons conçu, simulé et analysé deux structures d'antennes dipôles à motif fractal sur des patches rayonnants associées à des tags RFID à l'aide du logiciel CST. Nous avons exploré une variété d'antennes appartenant à la famille des dipôles, largement utilisées dans les systèmes RFID passifs. Ces antennes ont été illustrées à travers plusieurs exemples. Les différentes étapes de conception et de simulation ont été détaillées.

Nous avons utilisé la technique des méandres à la fois pour miniaturiser et adapter nos antennes. La première nous a permis de réduire la fréquence de fonctionnement de 2,45 GHz à 0,9 GHz, tandis que la seconde technique nous a aidés à adapter nos antennes aux puces RFID disponibles sur le marché, basée sur une étude paramétrique.

Les résultats de simulation ont montré que la première antenne, basée sur le fractal de Hilbert à l'itération 2, est adaptée à une puce de type Strap XRAG2, avec une impédance Z_{puce} de $27-j157 \Omega$ à la fréquence de 868 MHz. De même, la deuxième antenne, basée sur le fractal de Hilbert à l'itération 3, est adaptée à une puce de type Impinj Monza R6, avec une impédance Z_{puce} de $20-j144 \Omega$ à la fréquence de 915 MHz.

Le diagramme de rayonnement des deux antennes est similaire à celui d'un dipôle classique : bidirectionnel dans le plan E ($\Phi=0$) et omnidirectionnel dans le plan H ($\Phi=90$). En conclusion, La technologie RFID continuera à se positionner comme un potentiel évolutif qui constitue la base de la futur technologie « internet des objets » grâce à sa souplesse et sa diversité, Le problème qui se pose toujours sur les RFID est comment ces technologies peuvent être une menace contre l'individu. En effet, les champs électromagnétiques produits par ces puces peuvent engendrer des maladies telles que le cancer. Tout comme pour les régulations, il existe des recommandations internationales visant à établir des seuils d'exposition des individus (professionnels et grand public) aux champs électromagnétiques émis par tout équipement de télécommunication et installations radioélectrique.

Bibliographie

- [1] <http://www.centrenational-rfid.com/introduction-a-la-rfid-article-15-fr-ruid-17.html> Le 12/04/2024
- [2] <https://datascan.com/fr/rfid-basics-and-history/>, Histoire et bases de la technologie RFID - Datascan Le 12/04/2024
- [3] **ZIADA ABDENNOUR**, « Conception et Réalisation des Antennes RFID », Mémoire de Fin d'Etude Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2020/2021.
- [4] **Saisine Afsset N2015/013**, « Les Systèmes d'identification par radiofréquences (RFID) : Evaluation des impacts sanitaires », Maisons-Alfort, le 26 janvier 2009.
- [5] **Klaus Fin kenzelle**, "RFID Hand book: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification", John Wiley& Sons, Second Edition, 2003.
- [6] **Fatima Zahra MAROUF**. "Etude et conception d'Antennes imprimées pour identification Radio fréquences RFID UHF", thèse de doctorat en télécommunication, at the École Nationale Polytechnique (ENP) in Algeria, 2013
- [7] **Kerboub Marwen, Menidjel Karim**, «Simulation et réalisations des antennes imprimées pour des applications RFID», Mémoire de Fin d'Etude Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2020/2021.
- [8] <https://www.anfr.fr/liste-actualites/actualite/composants-frequences-usages-tout-savoirsur-la-technologie> 25/04/2024.
- [9] **Redjimi Manel, Zemouli Amine, Benamara Toubia, Riane Messelem Oussama**, «Conception et fabrication des différents produits utilisant la technologie RFID Application les antennes RFID», Mémoire de Fin d'Etude Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2022/2023.
- [10] **Fanny Schneider**, «RFID : services améliorés » Travail de Bachelor , haute école de gestion de Genève ,2020.
- [11] **Delphine Béchevet**. " Contribution au développement de tag RFID UHF et Microondes sur matériaux plastiques ", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2005. Français. NNT , Submitted on 12 Dec 2006

Bibliographie

- [12] **Anthony Ghiotto**, « Conception D'antenne De Tag RFID UHF, Application a réalisation par jet de matière », thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, novembre 2008.
- [13] **Klaus Fin kenneller**." RFID Hand book : Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication ", 3rd Edition, Wiley, June 2010.
- [14] **Claude TETELIN** ." Systèmes et techniques RFID ",Techniques de l'ingénieur, e1470, Novembre 2010.
- [15] **Dominique Paret**." RFID en ultra et super hautes fréquences UHF-SHF : Théorie et mise en oeuvre ",Dunod, Paris, 2008.
- [16] **Benoit Pascal**, Franchi Jean Christophe, « RFID et Service Haute Débit Wimax», Rapport d'étude, université de Nice, 2014.
- [17] **Kerboub Marwen, Menidjel Karim**, « Simulation et réalisations des antennes imprimées pour des applications RFID- UHF », Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2021.
- [18] **SanâaZangui** , «Détermination Et Modélisation Du Couplage En Champ Proche Magnétique Entre Systèmes Complexes», Ecole Doctorale d'Electronique, Electrotechnique, Automatique Thèse de l'Université de Lyon ,2011.
- [19] **M. Lecerf**, “Les petites et moyennes entreprises face à la mondialisation To cite this version : HAL Id : tel-00136530 D O C T E U R D E L “ U N I V E R S I T E D E P A R I S I Discipline : Sciences Economiques Marjorie Lecerf,” 2007.
- [20] **Dat-Son NGUYEN**, “Développement de Capteurs sans fil basés sur les Tags RFID UHF passifs, thèse de doctorat, université de Grenoble, « 27 Septembre 2013 »
- [21] J. Banks, M. Pachano, L. Thompson, and D. Hanny, RFID Applied. 2007.
- [22] **Paulin I. Katamba**, "TECHNOLOGIE RFID (RADIFREQUE NCYIDENTIFICATION) :CONCEPTS ET STRATÉGIE DE MISE EN OEUVRE", l'Université Laval, thèse de doctorat 2007.

Bibliographie

- [23] **Kahal kamel, Harichane moustafa**, « modélisation des antennes patch Stacked gap-coupled multi-resonator rectangular microstrip antennas », mémoire de fin d'études , Institut de Télécommunications Abdelhaffid BOUSSOUF , Oran, juin 2016.
- [24] **Alexandre Boyer** , « Support de cours 5eme Année Réseaux et telecom», Institut National des sciences Appliquée de Toulouse, Octobre 2011.
- [25] **Hebib Sami** , « Antennes » cours, université SAAD DAHILED BLIDA , 2017.
- [26] **CHOUTI LEILA** « Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage », Mémoire de fin d'études, Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [27] **BALANIS, C. A., Antennatheory : analysis and design**, John wiley& sons 2016.
- [28] **Trong Dus Nguyen** , « conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive », thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2006.
- [29] **Yassin Belaizi**. Etude et conception d'un capteur-RFID passif en bande UHF thèse de doctorat application à l'agroalimentaire. thèse de doctorat. Electronique. Université Montpellier, 2018..
- [30] **R.E. MUNSON**, «Conformal Microstrip antennas and Micros trip PhasedArrays" IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. AP 22, p. 74-78 (1974).
- [31] **Rao K V S, Nikitin P V, and Lam S F**, "Antenna design for UHF RFID tags: A review and a practical application," IEEE Trans. Antennas Propag., 53(12), p 3870–3876, 2005.
- [32] **Dipole RFID, Antennes RFID**, <https://www.dipolerfid.fr/Antennes-RFID>, date: 07/04/2024.
- [33] **M. T. Zhang, Y. C. Jiao, F. S. Zhang and W. T. Wang**, "Des ign of Antennas for RFID Application, Development and Implementation of RFID Technology ,Cristina Turcu (Ed.), ISBN: 978-3-902613-54-7, 2009.
- [34] **Benarradj Hanane**, Antennes UHF et antennes ULB pour des applications RFID passives, Mémoire de Master, université Abou BekrBelkaïd – Tlemcen, juin 2013.
- [35] **Daniel M. Dobkin** ."The RF in RFID : Passive UHF RFID in Practice",Elsevier-Newnes - Second Edition 2012.

Bibliographie

- [36] **Josiane Lajoie**, " La géométrie fractale ", mémoire présenté à l'université du Québec, Juin 2006.
- [37] **Constantine A. Balanis.**" Antenna Theory Analysis And Design ".3rdEd, John Wiley & Sons, 2005.
- [38] **G. Marrocco**, "The art of UHF RFID antenna design: impedance-matching and size reduction techniques," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 50, no.1, pp.66-79, 2008.
- [39] **A. Ghiotto, S. F. Cantalice, T. P. Vuong, A. Pouzin, G. Fontgalland, S. Tedjini**, " Minia- turized Patch Antenna for the Radio Frequency Identification of Metallic Objects ", Oral, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2008), Atlanta, 15-20 June 2008.
- [40] **W.xunxun**, Design of Passive UHF RFID Tag Antennas and Industry Application, ITB/Electronics, August, 2010.
- [41] **Debatosh Guha, Yahia M.M.Antar.**" MICROSTRIP AND PRINTED ANTENNAS NEW TRENDS, TECHNIQUES AND APPLICATIONS ", Wiley, November 2010.
- [42] **R. F. Harrington.**" Effect of antenna size on gain, bandwidth, and eciency ", J. Res. Nat. Bureau Standards, vol. 64D, pp. 1–12, Jan.-Feb.1960.
- [43] **H. A. Wheeler**, " Small antennas ", IEEE Trans. Antennas Propag. vol. AP-23, no. 4, pp. 462–469, Jul. 1975.
- [44] **A. M. Mod** , "Modélisation statistique d "antennes dans leurs environnements Amine Mellah Modélisation Statistique d " Antennes dans leurs Environnements,"thèse de doctorat , 2010.
- [45] **Mandelbrot, B**, "The Fractal Geometry of Nature", W.H. Freeman and Company, New York, 1983.