

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

Projet de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Électronique

Thème :

**Étude et conception d'antennes imprimées
pour identification RFID**

Encadré par :

Pr: R. AKSAS

Réalisé par :

BOUTELDJA Hocine

ZIDANE Mohamed Amine

Promotion : Juin 2015

Remerciements

Nous remercions avant tout Dieu, le Tout Puissant, pour nous avoir donnés, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles qui se sont hissées au travers de notre chemin, tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à notre promoteur Pr : R. AKSAS pour les conseils qu'il nous a prodigués et pour nous avoir guidés tout au long de la réalisation de notre travail.

Nous adressons également, nos sincères remerciements à Monsieur TALEB Mohamed Bachir, un expert dans la fabrication et la mesure des antennes, pour nous avoir aidés à mesurer les paramètres de notre antenne réalisée.

Nous tenons à remercier aussi, l'ensemble de nos professeurs du département Électronique, pour nous avoir éclairés durant ces dernières trois années.

Nous remercions également, l'ensemble des employés de l'entreprise ALMITECH, pour nous avoir accueillis et pour leur disponibilité et leur contribution à la réalisation de ce travail.

Nous adressons aussi nos remerciements aux membres du jury, non seulement pour avoir accepté de consacrer du temps pour la lecture de ce document, mais également pour nous permettre de leur présenter le résultat de ce travail.

Et enfin nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À la mémoire de mon père,

À ma mère et ma sœur,

À mon oncle et ma grand-mère,

À toute ma famille et mes amis

Hocine

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, ma source de tendresse, tout en étant convaincu que mon succès est une récompense pour tous leurs sacrifices, qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus profonde gratitude,

À mes grands-parents,

À mes frères et sœur Sedik, Adel, Hamoud et Mouna,

À tous ceux qui m'aiment.

Mohamed Amine

Table des matières

Remerciements	I
Dédicaces	II
Table des matières	III
Table des figures	VI
Liste des tableaux	IX
Abréviations	X
Symboles	XI
Introduction Générale	1
1 Présentation de la technologie RFID	3
1.1 Introduction	3
1.2 Historique et développement de la RFID	4
1.3 Composition d'un système RFID	5
1.3.1 L'Étiquettes RFID	6
1.3.1.1 Étiquettes RFID sans puce	6
1.3.1.2 Étiquettes RFID avec puce	7
1.3.2 Le lecteur RFID	7
1.4 La puce RFID	8
1.5 L'antenne du Tag RFID	8
1.6 Classification des systèmes RFID	9
1.6.1 La fréquence de fonctionnement des systèmes RFID	9
1.6.2 Source d'alimentation du tag	11
1.6.2.1 Tag actif	11
1.6.2.2 Tag passif	12
1.6.3 Interaction lecteur-étiquette (Couplage)	13
1.6.3.1 Couplage magnétique	13
1.6.3.2 Couplage radiatif	14
1.6.4 Mode de fonctionnement du tag	15
1.6.4.1 Puce en lecture seule	15
1.6.4.2 Puce à lecture et écriture multiples	15
1.6.5 Principe de communication Tag/Lecteur (TTF, RTF)	16
1.6.5.1 Tag Talks First (TTF)	16
1.6.5.2 Reader Talks First (RTF)	16
1.6.6 Gestion de l'échange	16

1.7	Architecture d'une puce RFID et techniques de rétro-modulation	17
1.8	Applications de la RFID	19
1.9	Conclusion	20
2	Caractéristiques générales des antennes et Antennes Tag RFID	21
2.1	Introduction	21
2.2	Paramètres des antennes	21
2.2.1	Paramètres de rayonnement d'une antenne	21
2.2.1.1	Diagramme de rayonnement	21
2.2.1.2	Directivité	22
2.2.1.3	Gain d'une antenne	23
2.2.1.4	Polarisation	24
2.2.2	Paramètres circuits d'une antenne	25
2.2.2.1	L'impédance d'entrée	25
2.2.2.2	Coefficient de réflexion	25
2.2.2.3	Le TOS	26
2.2.2.4	Bande passante	26
2.2.2.5	Facteur de qualité	27
2.3	Antennes pour Tags RFID UHF passifs	27
2.3.1	les antennes IFA	27
2.3.2	les antennes patches	28
2.3.3	les antennes dipôles imprimés	31
2.3.4	les antennes à fentes imprimées	31
2.4	Modélisation électrique des puces RFID	31
2.5	Conclusion	32
3	Méthodes de conception et outils de simulation	33
3.1	Introduction	33
3.2	Les méthodes de miniaturisation de l'antenne	34
3.2.1	Repliement du dipôle (Meandering)	34
3.2.2	Utilisation des antennes fractales	35
3.3	Les méthodes d'adaptation d'impédance	36
3.3.1	Adaptation par un T (T-Match)	37
3.3.2	Adaptation avec une boucle à couplage inductif	38
3.3.3	Adaptation par utilisation des fentes	39
3.3.4	Adaptation par charges capacitives aux extrémités	39
3.3.5	Utilisation des méandres	40
3.4	La méthodologie de conception d'antenne du tag RFID	40
3.4.1	Méthodologie de conception	40
3.4.2	Les exigences de conception	40
3.5	Outils de simulation	42
3.5.0.1	Le logiciel IE3D	42
3.5.0.2	Le logiciel HFSS	42
3.5.0.3	Le logiciel CST MWS	42
3.6	Conclusion	44
4	Conception d'antennes de Tag RFID UHF passifs	45
4.1	Introduction	45
4.2	Antenne méandre	45
4.2.1	Géométrie d'antenne	45

4.2.2	Adaptation d'impédance	47
4.2.3	Coefficient de réflexion	48
4.2.4	Diagramme de rayonnement	48
4.2.5	Réalisation et mesure de l'antenne méandre	49
4.3	Antenne patch	51
4.3.1	Géométrie d'antenne	51
4.3.2	Adaptation d'impédance	52
4.3.3	Coefficient de réflexion	53
4.3.4	Diagramme de rayonnement	54
4.4	Antenne fractale	54
4.4.1	Géométrie d'antenne	55
4.4.2	Adaptation d'impédance	56
4.4.3	Coefficient de réflexion	57
4.4.4	Diagramme de rayonnement	57
4.5	Conclusion	58
	Conclusion générale	59
	A Présentation du CST MWS 2014	61
A.1	Présentation du logiciel	61
A.2	Méthode de conception d'une antenne pour Tag RFID sous CST	63
	B Méthode de Mesure de l'impédance des antennes de tags RFID	66
B.1	La mesure d'impédance à l'aide d'un balun	66
B.2	La mesure d'impédance sur un plan conducteur	67
B.3	Mesure de l'impédance d'entrée de l'antenne réalisée dans ce mémoire	68
B.4	Le calcul de S_{11} normalisé par rapport à Z_{puce}	70
	Bibliographie	71

Table des figures

1.1	Les éléments principaux d'un système RFID	5
1.2	Différents types de lecteurs	5
1.3	Fonctionnement d'un système RFID	6
1.4	Concept d'un système SAW RFID	7
1.5	Lecteur communicant avec le tag	7
1.6	Exemples d'antennes tag RFID	9
1.7	Fréquences couramment utilisées en RFID	10
1.8	Exemple de tag RFID UHF actif	11
1.9	Exemple de tag RFID UHF passif	12
1.10	Schémas de principe des étiquettes a) passives et b) actives	12
1.11	Schéma de principe d'un couplage magnétique en champ proche	13
1.12	Exemples de Tags RFID : (a) BF (b) HF	14
1.13	Représentation du couplage radiatif	14
1.14	Représentation schématique d'une communication RFID	16
1.15	Principales procédures de communication RFID	17
1.16	Schéma fonctionnel d'une puce RFID	17
1.17	Schéma bloc fonctionnel de la partie radio fréquence d'un tag RFID	18
1.18	Réflexion de l'onde incidente grâce à la technique de modulation de charge.	18
2.1	Illustration du diagramme de rayonnement d'une antenne	22
2.2	Puissance fournie à l'antenne et puissance rayonnée	23
2.3	Polarisations circulaire d'une onde et sa projection	24
2.4	Polarisation linéaire	24
2.5	Polarisation elliptique quelconque	24
2.6	Antenne en émission et son schéma électrique équivalent	25
2.7	Réponse fréquentielle du paramètre S_{11} et mesure de la bande passante	26
2.8	Géométrie d'une antenne IFA (coplanar IFA)	28
2.9	Différentes configurations d'antennes IFA	28
2.10	Géométrie d'une antenne patch	29
2.11	Différentes formes de l'élément rayonnant	29
2.12	Quelques techniques d'alimentation d'une antenne microruban	30
2.13	Alimentation symétrique d'une antenne patch	30
2.14	Géométrie de base d'une antenne dipôle	31
2.15	Géométrie de base d'une antenne à fente	31
2.16	Modèle équivalent de l'impédance d'entrée des puces RFID UHF	32
3.1	Géométrie de base d'une antenne méandre	34
3.2	Les paramètres décrivant la géométrie d'une antenne méandre	35
3.3	Processus de génération itérative des fractales	36
3.4	Adaptation en T et son circuit équivalent	37
3.5	Court-circuit formé par la ligne de transmission de deux conducteurs	37

3.6	Ligne de transmission a deux conducteurs	38
3.7	Adaptation par un couplage inductif et son circuit équivalent	38
3.8	Configuration d'une antenne adaptée par fente	39
3.9	Adaptation par charges capacitives aux extrémités	39
3.10	Adaptation par utilisation des méandres	40
3.11	Méthodologie de conception des antennes RFID	41
3.12	Méthodologie de simulation d'antenne	43
4.1	Géométrie de l'antenne méandre.	46
4.2	Conception de l'antenne méandre sous CST.	47
4.3	Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne méandre.	47
4.4	Partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne méandre.	47
4.5	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne méandre.	48
4.6	Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne méandre.	48
4.7	Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne méandre.	49
4.8	Réalisation de l'antenne méandre.	49
4.9	Comparaison entre la partie imaginaire mesurée et simulée de l'impédance d'entrée.	50
4.10	Comparaison entre la partie réelle mesurée et simulée de l'impédance d'entrée.	50
4.11	La connexion du connecteur SMA au point d'alimentation de l'antenne.	50
4.12	Coefficient de réflexion S11 simulé et mesuré de l'antenne méandre.	51
4.13	Géométrie de l'antenne patch.	52
4.14	Conception de l'antenne patch sous CST.	52
4.15	Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne patch.	53
4.16	Partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne patch.	53
4.17	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch.	53
4.18	Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch.	54
4.19	Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne patch	54
4.20	Antenne dipôle fractale de forme de Koch d'ordre 3	55
4.21	Adaptation d'une antenne fractale à l'impédance d'une puce RFID	55
4.22	Géométrie de l'antenne fractale.	55
4.23	Conception de l'antenne fractale sous CST.	56
4.24	Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne fractale.	56
4.25	Partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne fractale.	57
4.26	Coefficient de réflexion S11 de l'antenne fractale.	57
4.27	Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne fractale.	57
4.28	Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne fractale	58
A.1	L'interface principale de CST MWS 2014	61
A.2	Exemple de maillage d'une antenne sous CST	62
A.3	Signaux d'excitation sous CST	63
A.4	Choisir la plateforme convenable à notre projet	63
A.5	Choix du solveur et définition des unités	63
A.6	(a) Choix de la plage de fréquence. (b) Résumé de nos choix	64
A.7	Formes géométriques disponibles sous CST MWS.	64
A.8	Représentation sous CST MWS de la puce RFID.	65
A.9	Alimentation par un port complexe.	65
B.1	Une ligne de transmission asymétrique (câble coaxial) connecté à une an- tenne dipôle	67

B.2	Dispositif de mesure d'impédance sur un plan conducteur	67
B.3	Antenne dipôle connectée avec un connecteur SMA	68
B.4	Photos de la méthode adoptée dans plusieurs références	68
B.5	Méthode adoptée dans la mesure de l'antenne réalisée	69
B.6	Calibrage de l'analyseur de réseau vectoriel à l'aide de charges standards .	69
B.7	Banc de mesure de l'antenne réalisée	69
B.8	Utilisation de Matlab pour le calcul de S_{11} mesuré	70

Liste des tableaux

1.1	Fréquences autorisées pour les applications RFID	10
4.1	Paramètres géométriques de l'antenne méandre.	46
4.2	Paramètres géométriques de l'antenne patch	52
4.3	Paramètres géométriques de l'antenne fractale.	56

Abréviations

ASK	:Amplitude shift keying ;
BAP	:Battery Assisted Passive ;
BF	:Basses Fréquences ;
CST	:Computer Simulation Technology ;
EPC	:Electronic Product Code ;
FDX	:Full Duplex ;
FEM	:Finite Element Method ;
FIT	:Finite Integration Technique ;
FSK	:Frequency shift keying ;
HDX	:Half Duplex ;
HF	:Hautes Fréquences ;
HFSS	:High Frequency Structure Simulator ;
IC	:Integrated Circuit ;
IE3D	:Integrated Electromagnetic 3D ;
IFA	:Inverted F Antenna ;
IFF	:Identify, Friend or Foe ;
ISO	:International Standard Organisation ;
MIT	:Massachusetts Institute of Technology ;
MTP	:Multitimes Programmable ;
MWS	:Microwave Studio ;
PIFA	:Planar Inverted F Antenna ;
PSK	:Phase Shift Keying ;
RFID	:Radio Frequency IDentification ;
RTF	:Reader Talks First ;
SAW	:Surface Acoustique Wave ;
SHF	:Super-Hautes Fréquences ;
TTF	:Tag Talks First ;
UHF	:Ultra-Hautes Fréquences ;
WORM	:Write Once, Read Multiple.

Symboles

ε_r	:Permittivité relative ;
\vec{E}	:Vecteur champ électrique ;
\vec{H}	:Vecteur champ magnétique ;
λ	:Longueur d'onde ;
S_{11}	:Coefficient de réflexion (premier élément de la matrice chaîne) ;
$U(\theta, \varphi)$:Intensité de rayonnement ;
$G(\theta, \varphi)$:Gain ;
$D(\theta, \varphi)$:Directivité ;
Γ	:Coefficient de réflexion ;
P_{ray}	:Puissance rayonnée ;
η_{ray}	:Rendement de rayonnement ;
$B(\%)$:Bande passante ;
Q	:Facteur de qualité ;
f_r	:Fréquence de résonance.

Introduction Générale

Depuis la nuit de temps, il a toujours été une préoccupation pour l'homme d'identifier, de localiser et de suivre des objets en utilisant d'abord l'identification visuelle puis remplacée par des équipements électroniques. Plusieurs systèmes pratiques ont été utilisés au cours des années, de motifs uniques ont été placés sur des objets, et des appareils de reconnaissances pouvaient identifier ces codes et par la même voie l'objet sur lequel ils sont collés. De là, est né le système de codes à barres qui, pendant plusieurs années, a permis de réaliser ce rêve d'identification des objets.

Cependant, les codes à barres présentent plusieurs lacunes, notamment le manque de stockage de données, la nécessité de scanner, ...etc. Ces déficits ont continuellement poussé l'homme à la recherche d'une meilleure solution pour pallier à ce manque.

Les progrès, dans les domaines des télécommunications et de l'électronique, ont permis de donner corps à une idée assez ancienne : celle de l'identification à distance par radio fréquence. C'est une technologie de l'information et de communication, cette dernière joue un rôle fondamental dans notre société moderne, elle participe à sa transformation par différents effets sur les plans économiques et sociaux, l'introduction de ces technologies participe à la croissance économique et permet de faciliter l'échange et la diffusion d'information.

Les nouvelles technologies, dont la RFID (Radio Frequency IDentification), par leur plus grande souplesse, rendent l'échange d'information nettement plus rapide et efficace. Elle devrait remettre en question les structures de télécommunications existantes en ouvrant de nouvelles perspectives à des modèles de gestion inédits. En effet, leurs développements devraient bientôt permettre l'identification individuelle et unique des objets et mener à la création d'un « Internet des objets » : une prolongation de l'internet que nous connaissons au monde réel.

Bien que les premiers systèmes RFID, qui ont vu le jour, fonctionnent essentiellement dans des bandes de fréquences basses, ils ont ouvert la voie au développement d'une nouvelle technologie RFID plus performante et à faible cout, fonctionnant à des fréquences plus élevées : la technologie RFID UHF (Ultra High Frequency) passive. Cette dernière possède un mode de fonctionnement bien particulier.

La technologie RFID a pour objectif d'identifier et scanner des objets sans nécessité de contact physique ou visuel. Une simple étiquette RFID, collée sur n'importe quel objet, permet à cet objet de révéler son identifiant, ses déplacements, à tout lecteur RFID situé à proximité. Bien entendu, seules les étiquettes en activité peuvent répondre aux sollicitations des lecteurs.

Ce mémoire apporte une contribution sur l'optimisation de dimension du tag RFID en

utilisant certaines techniques pour miniaturiser les antennes du tag. Le but principal de notre mémoire est de faire la conception des antennes de tags RFID UHF passifs tout en gardant une bonne adaptation entre l'antenne et la puce. Des différentes structures miniaturisées d'antennes utilisées dans différentes applications RFID ont été proposées.

Ce travail est constitué de la présente introduction, de quatre chapitres et d'une conclusion.

Dans le premier chapitre, nous réalisons une présentation générale de la technologie RFID en parlant sur l'ABC de cette technologie.

Après un historique, nous décrivons les différents composants du système RFID et leur principe de fonctionnement, ensuite, on classe les systèmes RFID selon différents critères à savoir les systèmes RFID avec puce et sans puce, la fréquence d'utilisation, la source d'alimentation du tag. Nous énonçons aussi l'architecture des puces RFID et la technique de rétro-modulation.

Nous terminons ce chapitre par les applications et les domaines de la technologie RFID.

Le second chapitre est scindé en deux parties, la première partie est un rappel des différentes propriétés et caractéristiques des antennes, tandis que la seconde partie présente les différentes antennes utilisées sur les tags pour éclaircir celles qui correspondent bien à nos besoins.

Le troisième chapitre traite les méthodes d'adaptation et miniaturisation des antennes RFID ainsi que la méthodologie de conception utilisée.

Il existe plusieurs manières pour réduire les dimensions de l'antenne tout en gardant la même fréquence de résonance, de ce fait, nous présentons les méthodes les plus utilisées pour la miniaturisation.

Dans une deuxième partie de ce chapitre, nous traitons les méthodes d'adaptation d'antennes aux puces RFID. Ensuite, nous décrivons le processus et la méthodologie de conception d'antenne de tags RFID en exposant par la suite les outils utilisés pour la simulation électromagnétique des antennes.

Le quatrième chapitre est consacré à la conception et la réalisation d'antennes de tags RFID UHF passifs dans lequel on présente ce qu'on a proposé comme antennes.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale résumera le travail effectué dans cette thèse.

Chapitre 1

Présentation de la technologie RFID

1.1 Introduction

L'identification électronique se divise en deux branches : l'identification électronique « avec contact » et l'identification « sans contact » [30].

- L'identification avec contact s'effectue à l'aide de systèmes où la transmission de données est faite avec des contacts électriques comme les cartes à puces.
- L'identification sans contact présente plusieurs branches :
 - Les systèmes à vision optique qui nécessitent une visibilité directe et qui ont une distance de lecture de moins d'un mètre quel que soit le type de lecteur utilisé : œil, caméra, laser, scanner (avec éventuellement un logiciel de reconnaissance de caractères), etc. Les codes-barres en sont de bons exemples.
 - Les systèmes liaison infrarouge sont utilisés sur une distance allant du centimètre jusqu'à quelques mètres. Pour satisfaire ces distances avec un grand débit d'informations, le faisceau émis doit avoir une très forte directivité.
 - Les systèmes à liaisons en fréquence radio qui sont divisés en plusieurs branches dépendant des applications (distance d'utilisation) et des caractéristiques techniques (fréquences, etc.) désirées.

La technologie RFID (Radio Frequency IDentification) qui fait partie de l'identification électronique « sans contact » est une technologie d'identification automatique qui utilise le rayonnement radiofréquence. Elle sert à identifier des objets porteurs d'étiquettes lorsqu'ils passent à proximité d'un lecteur. Une communication s'établit, et les données contenues dans l'étiquette sont transférées vers le lecteur. Elles peuvent également être modifiées suite à une commande particulière.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la technologie RFID, on va parler sur l'historique de cette technologie, les composants d'un système RFID, le principe de fonction-

nement, Les différents classification de ce système ainsi que les domaines d'application de la technologie RFID.

1.2 Historique et développement 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 :

- 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. De nos jours, le contrôle du trafic aérien reste basé sur ce principe. La première étude obtenue sur le sujet est un travail de Harry Stockman, suivi notamment par les travaux de F. L. Vernon et ceux de D.B. Harris, articles qui sont considérés comme les fondements de la technologie RFID. Ils décrivent les principes qui sont toujours utilisés aujourd'hui.
- 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.
- 1970 : Durant les années 1969-1979, les systèmes RFID restent une technologie confidentielle, à usage militaire pour le contrôle d'accès aux sites sensibles, notamment dans le secteur du nucléaire.
- 1980 : A la fin des années 70, la technologie est transférée vers le secteur privé. Une des toutes premières applications commerciales est l'identification de bétail en Europe. 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. Les distances de lecture obtenues sont de quelques centimètres.
- 1990 : Début de la normalisation pour une interopérabilité des équipements RFID. De plus, la miniaturisation du système RFID permette son intégration dans une seule puce électrique par IBM.
- 1999 : Fondation par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) de l'Auto-ID center : centre de recherches spécialisé en identification automatique (entre autre RFID).
- 2004 : Le "Auto-ID Center" du MIT devient EPCglobal, une organisation dont le but est de promouvoir la norme EPC - sorte de super code barre stocké dans un tag

RFID -, élaborée par les universitaires et adoptée par l'industrie.

- A partir de 2005 : 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.
- 2009 : Création du Centre National de Référence RFID[34][35].

1.3 Composition d'un système RFID

Un système RFID, comme illustre la figure 1.1, 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 (figure 1.2).
- Un système hôte (contrôleur ou ordinateur) avec différents logiciels dépendants de l'application

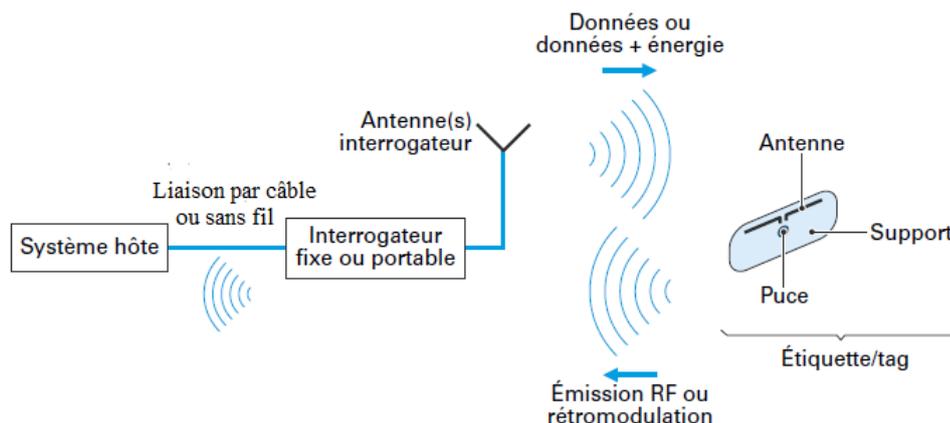


Figure 1.1 – Les éléments principaux d'un système RFID [3].

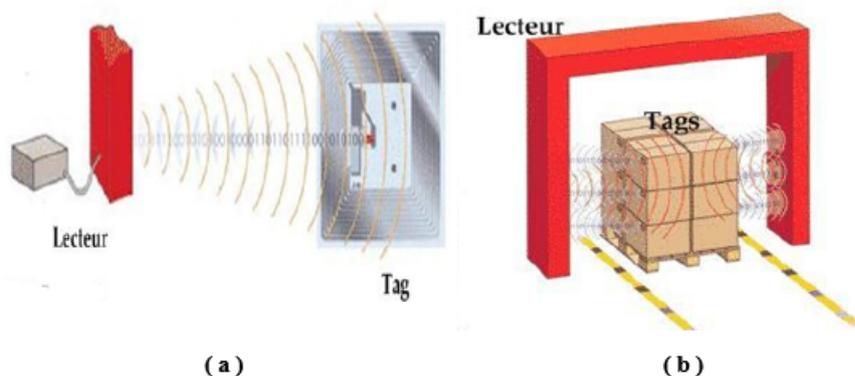


Figure 1.2 – Différents types de lecteurs : (a) portable (b) fixe [11].

L'étiquette RFID contient le plus souvent un circuit intégré (IC) sur lequel est enregistré un numéro d'identification qui identifie d'une manière unique un produit, ce circuit intégré est fixé à une antenne.

Comme illustre la figure 1.3, le lecteur RFID communique avec l'étiquette et lit son numéro d'identification. Le lecteur transmet ce numéro à un système hôte, qui le stocke dans sa base de données ou il renvoie des informations qui sont stockées dans sa base sur le produit identifié.

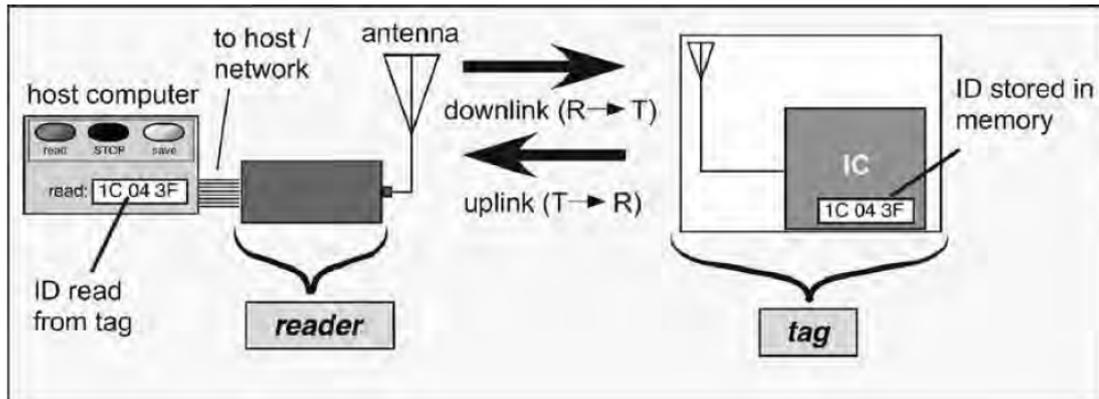


Figure 1.3 – Fonctionnement d'un système RFID [9].

1.3.1 L'Étiquettes 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 :

- 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.
- 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).

1.3.1.1 Étiquettes RFID sans puce

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. La figure 1.4 illustre le fonctionnement d'une telle étiquette. 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 capable de transformer les ondes radiofréquences en ondes acoustiques et vice-versa [4].

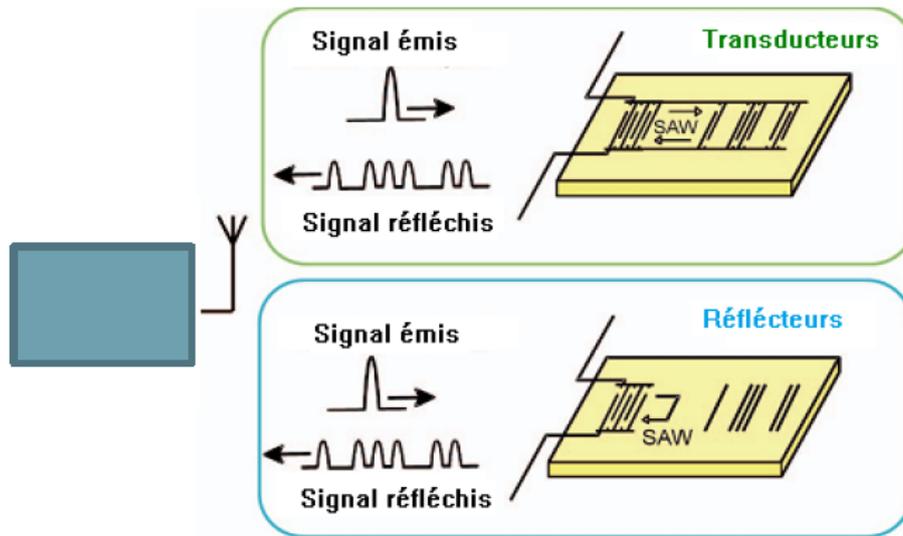


Figure 1.4 – Concept d'un système SAW RFID [4].

1.3.1.2 Étiquettes RFID avec puce

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.

1.3.2 Le lecteur RFID

Un lecteur RFID contient un module RF (transmetteur et récepteur), une unité de contrôle et un élément rayonnant (figure 1.5) permettant la communication sans fil vers le tag. De plus, de nombreux lecteurs sont reliés à une interface dans le but de transmettre les données reçues à un autre système (ordinateur, robot etc.)

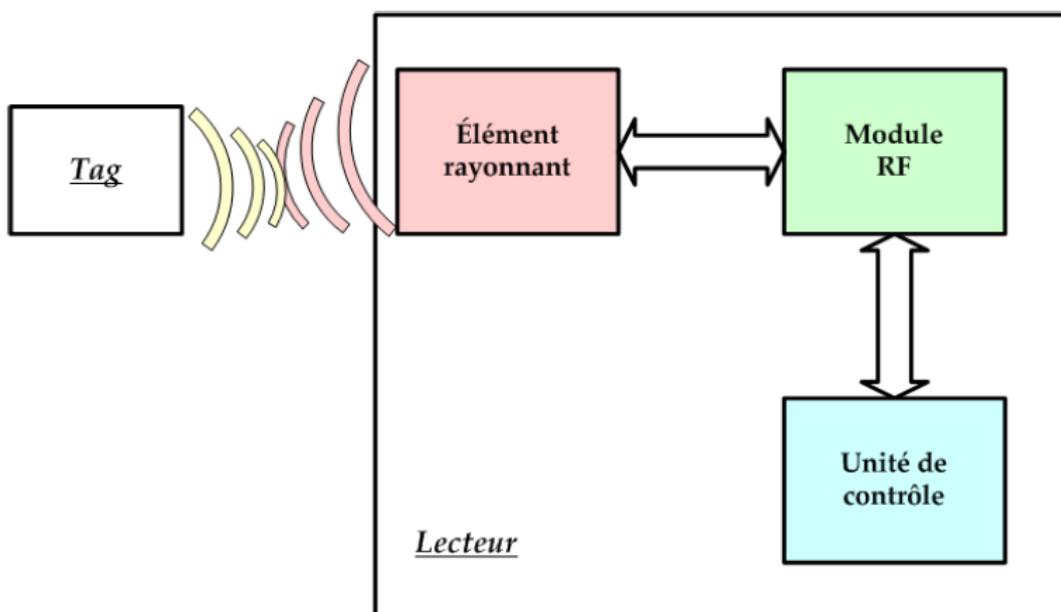


Figure 1.5 – Lecteur communiquant avec le tag [11].

Les principales fonctions du lecteur sont tout d'abord d'activer le tag, puis de structurer la séquence du signal communiqué à ce dernier élément et enfin de transférer les données du tag au logiciel de l'application. Les aspects de communication, comme la mise en place de la connexion ou la gestion des procédures d'anticollision et/ou d'authentification, sont entièrement assurés par le lecteur [11].

1.4 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 RF ID 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 RF ID 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[19].

1.5 L'antenne du Tag RFID

Pour les tag 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. 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.

Si par exemple, l'application désirée exige l'identification d'un objet quelle que soit sa position par rapport au lecteur le concepteur devra choisir une antenne omnidirectionnelle à intégrer dans le tag. Cependant, l'application peut exiger une portée plus longue, ce qui impose une directivité plus importante pour l'antenne. En ce qui concerne la nature de l'objet à identifier, s'il est métallique par exemple, les antennes patch ou en F-inversés sont adéquates parce qu'elles assurent une meilleure immunité face à l'influence du métal. D'autres applications exigent un substrat spécifique pour l'antenne elle-même, comme par exemple un substrat papier ou plastique. Aussi, il faut tenir compte du coût de fabrication et les dimensions des antennes.

Bien évidemment, il y a d'autres critères qu'il faut prendre en compte lors de la conception d'une antenne dédiée à une application spécifique, il s'agit bien des critères de performance pour choisir une antenne appropriée à un tag comme son impédance d'entrée sa bande passante et son diagramme de rayonnement[4].

La Figure 1.6 présente quelques exemples d'antennes de tag RFID UHF et micro-ondes.

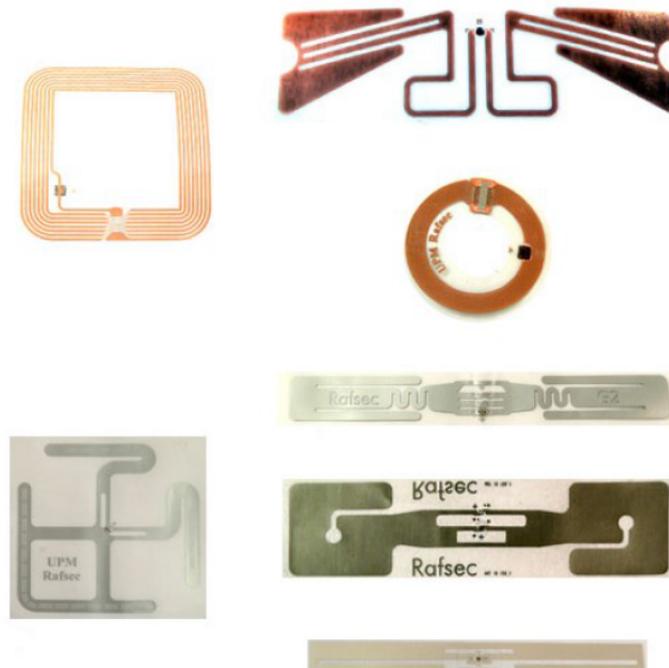


Figure 1.6 – Exemples d'antennes tag RFID [4].

1.6 Classification des systèmes RFID

Tous les tags ou étiquettes RFID ne fonctionnent pas de la même manière. Les systèmes RFID sont classifiés de plusieurs façons suivant des critères différents.

1.6.1 La fréquence de fonctionnement des systèmes 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 (modu-

lation de charge, rétrodiffusion) [5].

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.

- Basses fréquences : 100 à 500 KHz avec une distance de lecture courte de quelques centimètres au maximum ; fréquences particulièrement utilisées en milieu industriels ainsi que pour le suivi animalier.
- Fréquences moyennes : 10 à 15 MHz (une partie de la HF) avec une distance de lecture de 50 à 80 cm ; il s'agit de fréquences particulièrement utilisées en suivi de flux logistiques des bibliothèques et en contrôle d'accès. Ces fréquences permettent une lecture a moyenne distance (de l'ordre d'un mètre), mais elles sont sensibles aux présences proches des métaux ou des liquides.
- Fréquences hautes : de la gamme UHF (Bande allant de 850 à 950 MHz) à la bande SHF pour une distance de lecture de plusieurs mètres. Ces fréquences conviendront particulièrement au suivi des flux logistiques. Cette bande promet d'être intéressante grâce aux distances attendues (de l'ordre de quelques mètres) qu'elle peut atteindre.

La figure 1.7 ainsi que le tableau 1.1 détaillent les fréquences utilisées en RFID

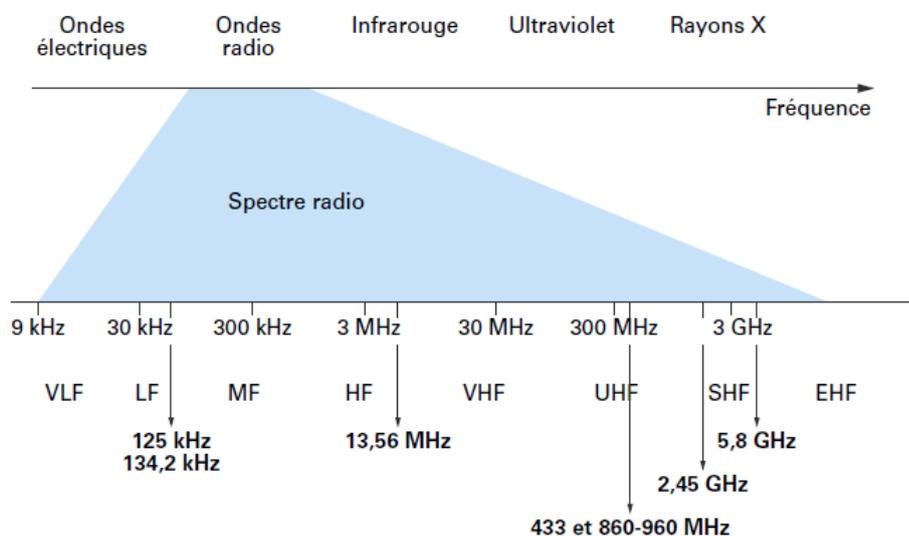


Figure 1.7 – Fréquences couramment utilisées en RFID [3].

Ondes radiofréquences		Fréquences retenues et/ou autorisées en RFID	
De 30 à 300 kHz	BF	Basses fréquences	≤ à 135 kHz
De 3 à 30 MHz	HF	Hautes fréquences	13,56 MHz
De 300 à 3 000 MHz	UHF	Ultra-hautes fréquences	433 MHz et de 860 à 960 MHz et 2,45 GHz
De 3 à 30 GHz	SHF	Super-hautes fréquences	5,8 GHz

Table 1.1 – Fréquences autorisées pour les applications RFID [6].

1.6.2 Source d'alimentation du tag

Une caractéristique très importante des systèmes RFID est la source d'alimentation (énergie) du tag. Ici nous distinguons deux types de tags : passifs et actifs. Les tags passifs ne disposent pas de leur propre source d'énergie, et donc toute la puissance requise pour le fonctionnement d'un tag passif doit être tirée du champ électromagnétique du lecteur. À l'inverse, les tags actifs incorporent une batterie qui fournit toute ou une partie de la puissance pour le fonctionnement du circuit intégré (puce) [5].

D'autres références [3] distinguent entre les tags actifs et les tags passifs suivant que le tag RFID possède un émetteur RF propre (on parle alors de RFID active) ou qu'elle ne fait que rétromoduler un signal RF issu de l'interrogateur (on parle alors de RFID passive) et disent que les termes actif et passif n'ont rien à voir avec le fait que l'étiquette embarque ou non une source d'énergie.

1.6.2.1 Tag actif

Dans les systèmes RFID actifs, l'étiquette possède une puce électronique ayant un émetteur RF.

Les tags actifs ont leur propre approvisionnement en énergie, par exemple, sous forme d'une batterie ou une pile solaire. La batterie d'un tag actif, cependant, ne fournit la puissance pour la transmission de données entre le transpondeur et le lecteur, mais sert uniquement à alimenter la puce électronique et pour la conservation des données stockées. La puissance du champ électromagnétique reçu par le lecteur est la seule puissance utilisée pour la transmission de données entre le transpondeur et le lecteur.

Le champ électromagnétique reçu par le lecteur est donc plus nécessaire pour l'alimentation de la puce. Cela signifie que le champ peut être beaucoup plus faible que le champ requis pour faire fonctionner un transpondeur passif.

Cette condition peut sensiblement augmenter la portée de communication si le transpondeur est capable de détecter le signal du lecteur le plus faible. Cependant, même un transpondeur RFID actif ne peut pas générer un signal à haute fréquence qui lui est propre, mais ne peut que moduler le champ du lecteur afin de transmettre des données entre le transpondeur et le lecteur, similaire à la procédure décrite dans transpondeurs passifs [5].

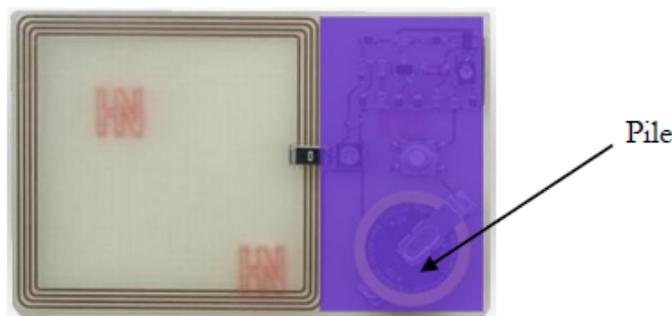


Figure 1.8 – Exemple de tag RFID UHF actif [4].

1.6.2.2 Tag passif

Les tags passifs n'ont aucune source d'alimentation ils n'ont pas leur propre émetteur radio. Grâce à l'antenne du transpondeur, le champ électromagnétique du lecteur fournit toute l'énergie nécessaire au fonctionnement du transpondeur [5].

Le principe de fonctionnement des systèmes RFID passifs repose sur la modulation de l'onde provenant de l'interrogateur et partiellement réfléchi par l'étiquette. Quels que soient les fréquences ou les modes de couplage, le moyen utilisé pour réaliser cette rétro-modulation, consiste à commuter une charge (impédance) placée en parallèle entre la puce électronique et l'antenne de l'étiquette[3]. Cela signifie que l'énergie émise par le lecteur est utilisée pour la transmission de données à la fois du lecteur vers le transpondeur et vers le lecteur. Le rapport entre la puissance du signal émis par l'interrogateur (pour alimenter la puce) et la puissance du signal rétro-modulé par l'étiquette peut atteindre 60 dB. Le lecteur doit donc présenter une bonne sensibilité pour détecter et décoder l'information issue de l'étiquette.

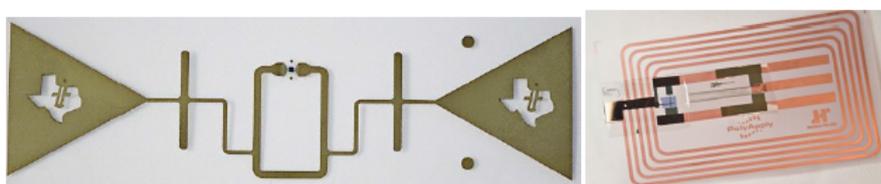


Figure 1.9 – Exemple de tag RFID UHF passif [4].

La figure 1.10 schématise les grandes différences entre tags actifs et passifs.

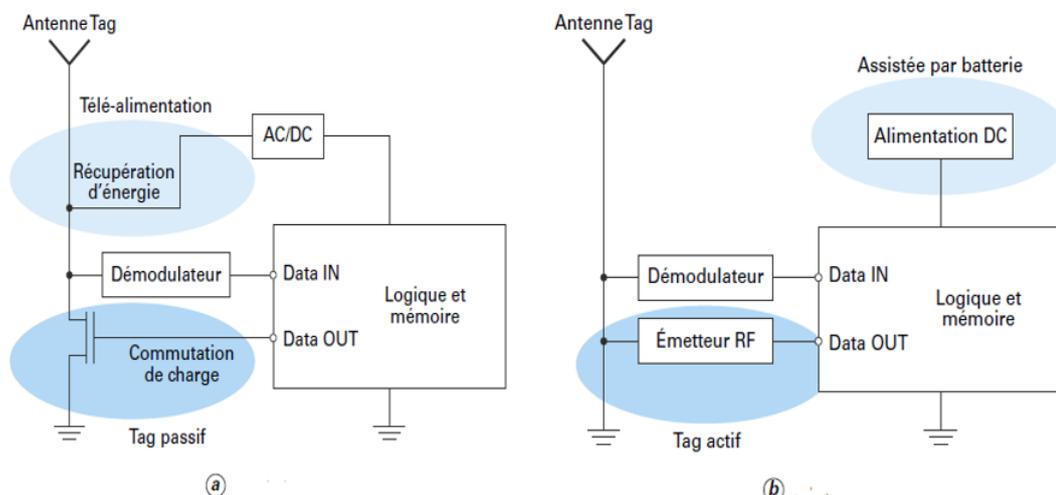


Figure 1.10 – Schémas de principe des étiquettes a) passives et b) actives [3].

Dans la majorité des cas, la distance de communication entre une étiquette passive et son lecteur est limitée par la distance de télé-alimentation. Une manière d'augmenter cette distance est d'ajouter à l'étiquette une source d'énergie propre. Cette source d'énergie va permettre d'alimenter le circuit de la puce électronique sans pour autant devoir capter l'énergie issue du signal RF transmis par le lecteur. Cette source d'énergie peut également

servir à alimenter d'autres systèmes électroniques associés à l'étiquette RFID comme des capteurs.

L'étiquette RFID peut alors récupérer de l'information issue de ces capteurs, la stocker dans une zone mémoire particulière de la puce électronique. Ces systèmes, appelés BAP (Battery Assisted Passive), se comportent comme des systèmes passifs sans source d'énergie une fois cette source épuisée. (Dans la littérature, ce type d'étiquette est souvent appelé **étiquettes semi passives**)

1.6.3 Interaction lecteur-étiquette (Couplage)

On distingue deux modes d'interaction fondamentalement différents entre le lecteur et l'étiquette :

- Le premier correspond à un couplage de nature inductive ou magnétique.
- Le deuxième à un couplage de nature radiative ou électro-magnétique.

1.6.3.1 Couplage magnétique

Tout circuit, et en particulier les antennes, rayonnent. A une distance maximale de l'ordre de la longueur d'onde une source émet un faisceau quasiment parallèle qui permet à la source d'entrer en résonance inductive avec un récepteur, comme les enroulements d'un transformateur. (figure 1.11)

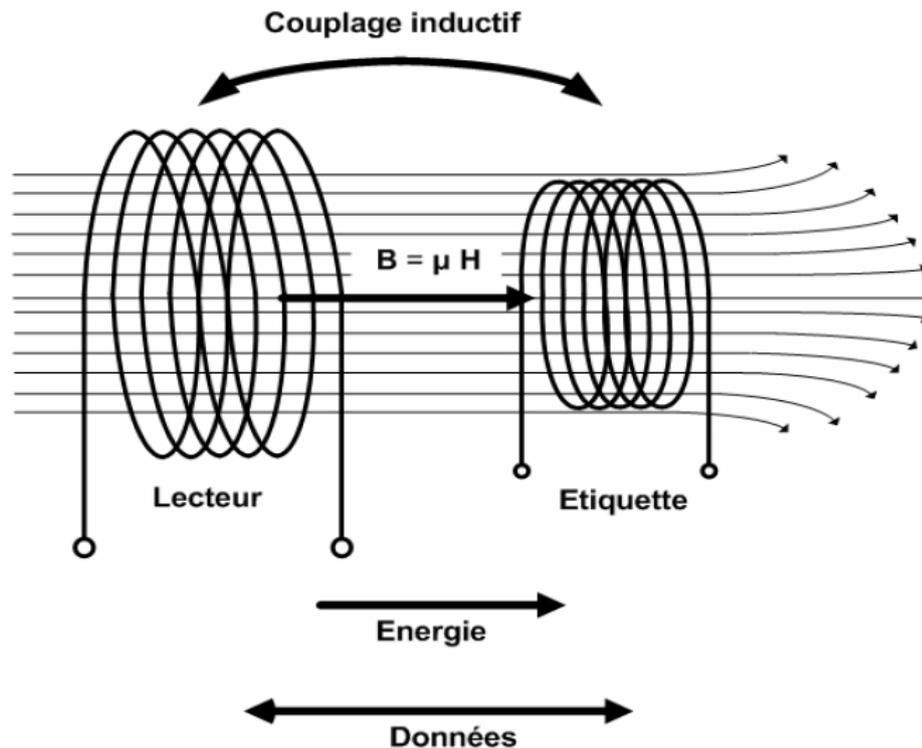


Figure 1.11 – Schéma de principe d'un couplage magnétique en champ proche [17].

Cette famille de système RFD 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 et enfin d'une capacité C permettant de faire résonner le circuit LC à la fréquence de travail.

Pour les systèmes BF, la distance d'opération est limitée à quelques centimètres, dans la boucle magnétique du lecteur. L'avantage principal vient de l'habilité des ondes BF à se propager à travers les tissus biologiques. Ces systèmes sont donc particulièrement appropriés pour des applications RFID médicale ou vétérinaire.

Les systèmes HF sont quant à eux, à l'heure actuelle, les systèmes de radio-identification les plus répandus. Cette bande de fréquences a l'avantage d'offrir une bonne pénétration du signal à travers les obstacles et un fonctionnement à une distance de l'ordre du mètre

La Fig 1.12 illustre deux tags RFID. Le premier est un tag RFID BF constitué d'une bobine en fil de cuivre connectée à un circuit, lui-même constitué d'une puce et d'une capacité. Le second est un tag RFID HF

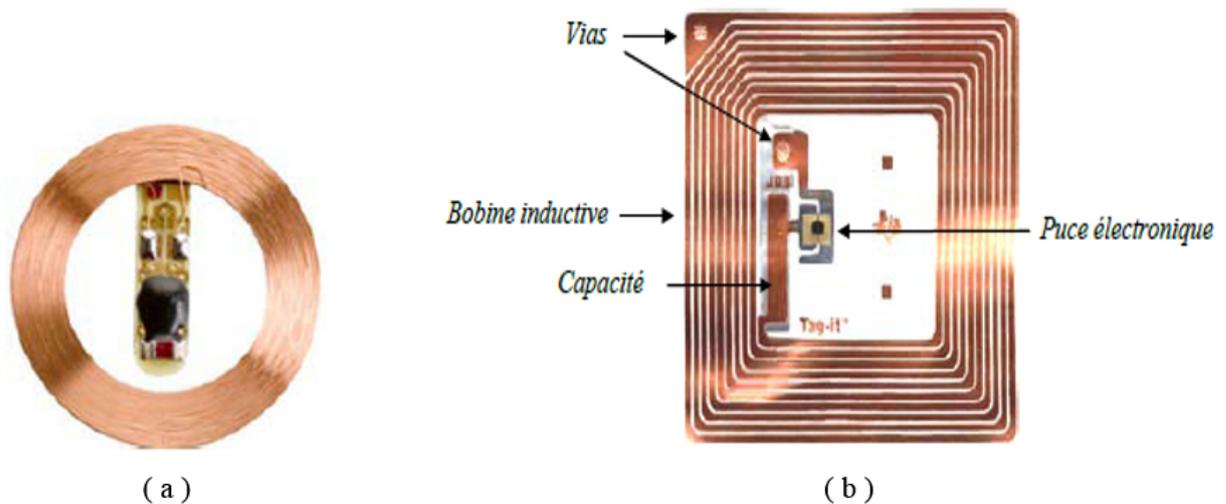


Figure 1.12 – Exemples de Tags RFID : (a) BF (b) HF [19].

1.6.3.2 Couplage radiatif

Dès lors que l'application impose de plus grandes distances de communication ou un plus grand débit d'échange d'information, les systèmes RFID fonctionnant en UHF et microondes sont préférés. Dans ce cas, les phénomènes de rayonnement n'obéissent plus aux lois du couplage, mais à ceux de la propagation; on dit que la communication se produit en champ lointain.

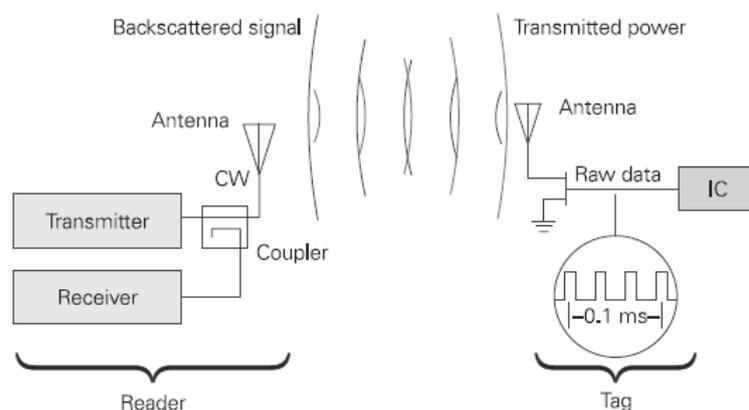


Figure 1.13 – Représentation du couplage radiatif [29].

Ainsi, l'amplitude du champ propagé décroît en $1/d$, d étant la distance entre le lecteur et le tag, au lieu d'une décroissance en $1/d^3$ pour le champ proche.

Quant à la communication descendante du tag vers le lecteur, elle est assurée par la technique de rétro-modulation ou « backscattering ». Cette technique est basée sur le principe de la réflexion d'une partie de l'onde électromagnétique envoyée par le lecteur (figure 1.13) [23].

Ce mode d'interaction permet de communiquer sur des distances plus grandes, de 10 mètres et plus, et de transmettre des débits de données plus importants. Les antennes, fonction de la longueur d'onde sont plus petites. En contrepartie, les systèmes sont plus complexes que les systèmes inductifs. La propagation des ondes est plus difficile à prévoir, parfois aléatoire et les phénomènes d'interférence sont plus délicats à traiter. Cependant, en opérant à des fréquences de 900 MHz il est possible de réduire fortement la taille des antennes ce qui contribue à la miniaturisation des équipements [17].

1.6.4 Mode de fonctionnement du tag

Cette classification des systèmes RFID peut se faire suivant que la puce embarquée sur l'étiquette soit en lecture seule ou que l'on puisse écrire (une fois ou plusieurs fois) de nouvelles informations via des commandes transmises par l'interrogateur.

1.6.4.1 Puce en lecture seule

On parle de ce mode dans le cas où on peut lire le contenu de la puce en supposant qu'elle contient quelque chose (numéro d'identification) que quelqu'un a écrit sur elle. On peut distinguer deux cas différents :

- La puce peut avoir été écrite à l'avance par le fabricant et qu'elle ne possède pas d'autre zone mémoire ; on parle donc de puce en lecture seule.
- Dans certains cas, le numéro unique gravé par le fondeur de la puce n'est pas suffisant pour l'application finale. On peut donc trouver des puces possédant une zone mémoire vierge sur laquelle on puisse écrire un numéro particulier propre à l'utilisateur final du système RFID. Une fois ce numéro écrit, il ne peut plus être modifié et l'étiquette devient « à lecture seule ». On parle alors de puce WORM (Write Once, Read Multiple)(Puce à écriture une fois et à multiples lectures).

1.6.4.2 Puce à lecture et écriture multiples

Dans ce mode de fonctionnement, la puce peut être réutilisée ou réécrite. Là encore, on distingue deux cas :

- mode de lecture Programmable (MTP, Multitimes Programmable) : Dans ce mode, une zone de mémoire donnée de la puce peut être réécrite seulement un nombre limité de fois (une centaine de fois, par exemple), ce qui permet certaines modifications du contenu tels que les mises à jour et versions de données, mais le but principal de l'étiquette est par la suite d'être lue.
- Mode Lecture/écriture- Read / Write Mode (R / W) : Dans ce mode, il n'y a pas de restrictions sur la réécriture multiple de l'étiquette [6].

1.6.5 Principe de communication Tag/Lecteur (TTF, RTF)

Cette classification peut se faire suivant le protocole de communication entre l'étiquette et l'interrogateur. L'étiquette, une fois présente dans le champ de l'interrogateur, attend une commande du lecteur pour transmettre des informations. On parle de protocole RTF (Reader Talks First). Dans d'autres cas, l'étiquette transmet des informations dès son activation dans le champ de l'interrogateur. On parle alors de protocole TTF (Tag Talks First).

1.6.5.1 Tag Talks First (TTF)

Cette première approche correspond au fait que dès qu'un tag entre dans la zone d'interrogation du lecteur et qu'il est alimenté après avoir effectué sa remise à zéro, il commence immédiatement à communiquer pour signaler sa présence, d'où l'appellation TTF ("Tag Talks First"). Ce type de déclenchement (TTF) fonctionne très bien si l'on est sûr qu'il n'y aura jamais plus d'un tag à la fois dans la zone d'influence de la station de base.

1.6.5.2 Reader Talks First (RTF)

Afin d'éviter, d'atténuer et de pouvoir gérer les problèmes de collisions de signaux, il est nécessaire de disposer de tags possédants un comportement spécifique. En effet, lors de leurs entrées dans la zone d'interrogation du lecteur, les tags effectuent leurs Reset Internes dans lequel ils doivent attendre patiemment un ordre particulier du lecteur pour répondre à celui-ci et lui signifier leur présences d'où l'appellation (Reader Talks First). Comparativement aux tags TTF, les tags RTF comportent à leurs bords une circuiterie logique supplémentaire leur permettant d'interpréter la commande de la requête [6].

1.6.6 Gestion de l'échange

L'échange d'informations entre le tag RFID et la station de base est soumis à des protocoles. En effet une communication consiste en un transfert de données associé à un transfert d'énergie. Les échanges de données ayant lieu entre une station de base (lecteur) et un tag sont de deux sortes comme montre la figure 1.14 :

- Liaisons montante (Forward link) : Il s'agit de la liaison allant du lecteur au tag RFID pour assurer le transport de l'énergie vers le tag et pour envoyer les données au tag.
- Liaisons descendantes (Return Link) : Il s'agit de la liaison allant du tag vers la station de base.

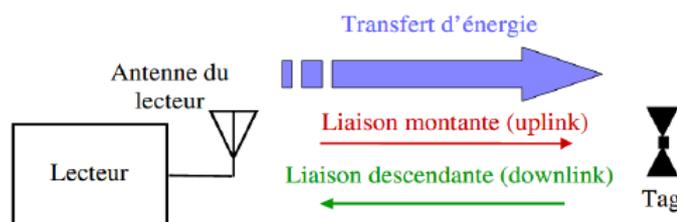


Figure 1.14 – Représentation schématique d'une communication RFID [23].

On distingue deux types de procédures de communication entre le lecteur et le tag celles qui utilisent un transfert continu d'énergie et celles qui le font de manière séquen-

tielle. Parmi, les procédures à transfert continu d'énergie, certains systèmes y associent un transfert de données bidirectionnel simultané (FDX, pour Full Duplex) et d'autres un transfert alterné (HDX pour Half Duplex). La figure 1.15 présente ces différentes procédures.

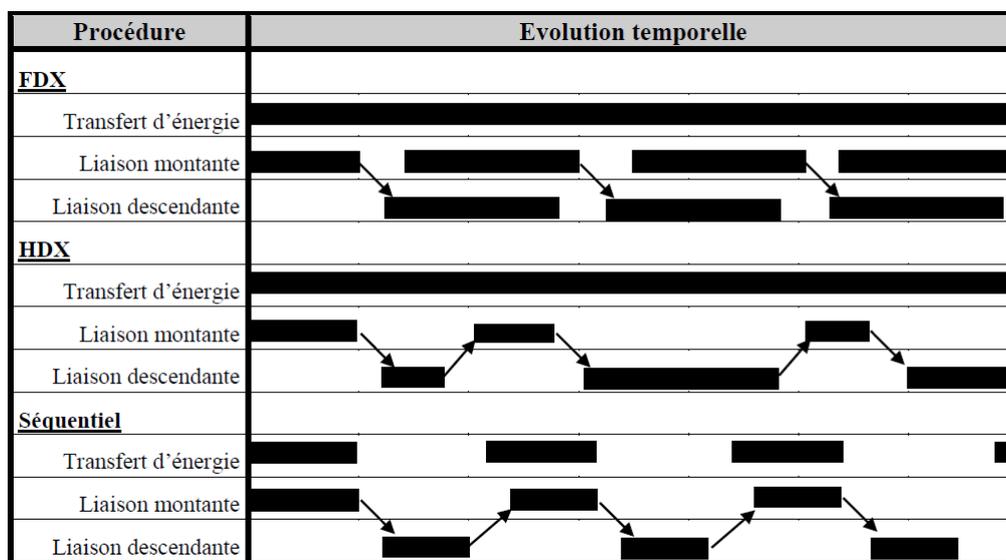


Figure 1.15 – Principales procédures de communication RFID [19].

1.7 Architecture d'une puce RFID et techniques de rétro-modulation

Une puce RFID est constituée de deux parties, une partie radio fréquence et une partie numérique comme le montre la figure 1.16.

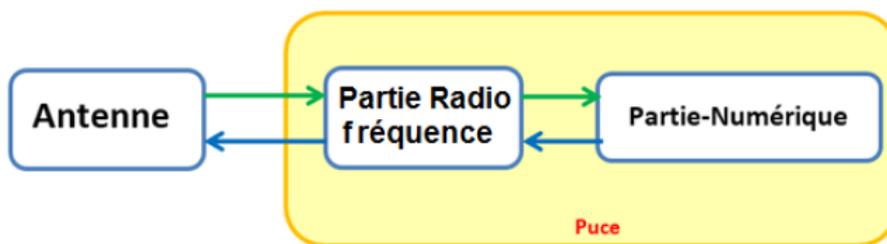


Figure 1.16 – Schéma fonctionnel d'une puce RFID [4].

La partie numérique a pour rôle d'analyser les instructions reçus, de coder/décoder les informations et de répondre en envoyant ces données à la partie radio fréquence. La partie radio fréquence à son tour a trois fonctions principales : la récupération de l'énergie, la réception du signal et la rétro-modulation (figure 1.17).

La fonction de récupération d'énergie est généralement assurée par un redresseur qui permet de récupérer une tension continue à partir de la porteuse radiofréquence reçue par l'antenne. C'est cette tension qui permet l'alimentation du tag.

La récupération des données transmises par le lecteur, est assurée par une chaîne de réception classique comprenant un démodulateur, un filtre en bande de base et un convertisseur analogique numérique. Le décodage et le traitement de l'information sont réalisés par la partie numérique.

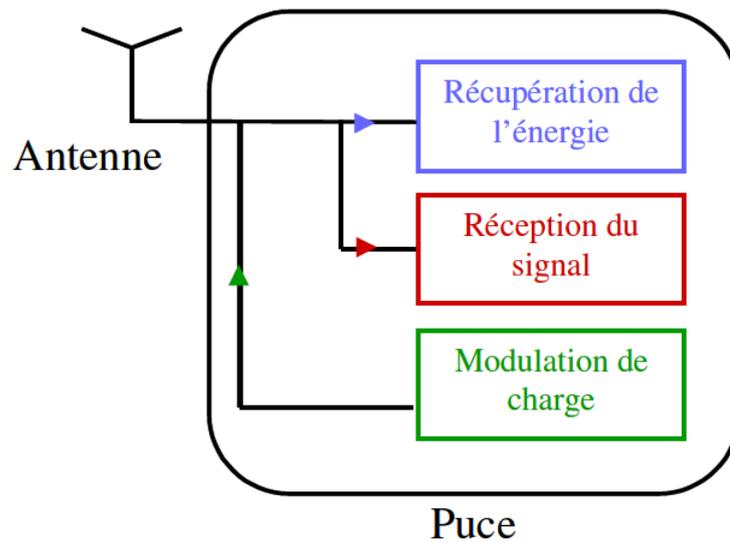


Figure 1.17 – Schéma bloc fonctionnel de la partie radio fréquence d'un tag RFID [23].

La fonction de rétro-modulation est assurée par un système de modulation de la charge à l'entrée de l'antenne. Cette dernière est commandée par la partie numérique du tag. La modulation de charge entraîne une variation du coefficient de réflexion au niveau de l'interface entre l'antenne du tag et la puce. En d'autres termes, elle consiste en une variation de l'impédance d'entrée de la puce créant ainsi une désadaptation d'impédance avec l'antenne. Il est possible de faire varier la partie réelle et/ou la partie imaginaire de cette impédance. Ainsi, en fonction du signal binaire qui commande la modulation de charge et en fonction du type de modulation, le signal incident est plus ou moins réfléchi comme indique la figure 1.18.

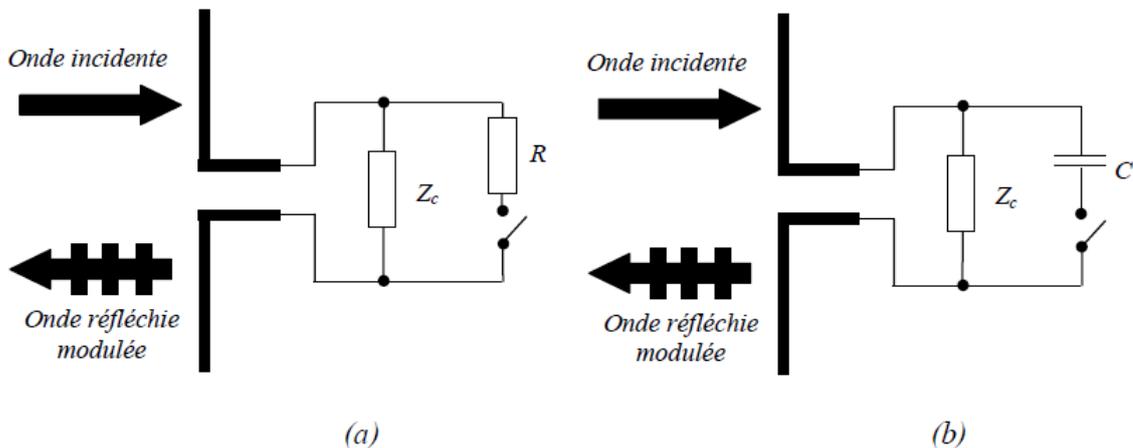


Figure 1.18 – Réflexion de l'onde incidente grâce à la technique de modulation de charge :

(a) modulation de la partie réelle.

(b) modulation de la partie imaginaire. [19].

Sur cette figure, l'impédance Z_c représente une charge adaptée à l'impédance de l'antenne. En modulant la partie réelle de la charge (Figure 1.18.a), on réalise une modulation de type ASK. En modulant la partie imaginaire (Figure 1.18.b), on réalise une modulation de type PSK (Phase Shift Keying).

Pour une modulation de type ASK, cela consiste à avoir une différence d'amplitude maximum entre l'état haut et l'état bas. On l'obtient, lorsque l'on passe de l'adaptation parfaite de la puce à l'antenne au cas où l'antenne est court-circuitée. Cependant ce dernier état implique une réflexion totale de l'onde incidente. La récupération d'énergie devient alors impossible. C'est pourquoi l'indice de la modulation est pris de manière à réaliser un compromis entre la récupération de l'énergie et la qualité de la transmission de données.

En ce qui concerne la modulation PSK, la qualité de la modulation dépend du déphasage que l'on peut obtenir. Cette technique présente l'avantage de pouvoir procurer la même quantité d'énergie au tag, quel que soit l'état binaire du signal modulant. Cependant, elle est plus difficile à détecter et entraîne donc un coût au niveau du lecteur plus important.

Les normes autorisent les deux types de modulation ASK et PSK pour la liaison descendante. La plus grande partie des tags RFID UHF existants réalisent une modulation mixte, en amplitude et en phase. Pour la grande majorité des tags UHF existants, le dispositif permettant de réaliser la rétro-modulation est basé sur la commande d'un interrupteur par le signal numérique modulant. Il existe également certaines architectures qui utilisent des dispositifs à base de capacités variables afin de réaliser la rétro-modulation.

1.8 Applications de la RFID

La technologie RFID offre plusieurs possibilités d'applications dans différents domaines de la vie de tous les jours [8] :

Sécurité

- Gestion du personnel.
- Vérification de l'authenticité des objets.
- Contrôle des accès.
- Prévention contre le vol [31].

Médical

- Gestion de collectes des déchets médicaux jusqu'à l'incinération.
- Tatouages électroniques pour animaux.
- Assistance aux handicapés : pour les aveugles ou malvoyants.
- Surveillance médicale : des bracelets donnés aux patients remplacent les feuilles de soins. Le numéro du médecin traitant ainsi que celui de l'infirmière y sont mémorisés.

Industrie

- Identification et suivi de vêtements.
- Blanchisserie industrielle.
- Identification et suivi des bouteilles de gaz.
- Système antivols dans le commerce de détail.
- Suivi de production sur les chaînes de montage.
- Suivi de produits sensibles (médicaux, explosifs).
- Identification des pneus de la fabrication jusqu'au rechapage.

- Suivi de la transformation du bois
- Installation et maintenance d'équipements.

Agroalimentaire

- Suivi de la chaîne du froid des produits alimentaires
- Suivi de la chaîne de fabrication des produits frais
- Suivi du bétail.

Véhicule

- Gestion de flotte de véhicule.
- Authentification de véhicule (vignette pare-brise).
- Paiement des carburants dans les stations-services.
- Antivol, antidémarrage, ouverture automatique des portes.
- Contrôle de pression des pneumatiques.

Logistique

- Suivi de bagages dans le transport aérien.
- Suivi de sacs postaux.
- Suivi et pistage de containers.
- Identification de produits palettisés.
- Contrôle d'accès (parking ...)

Loisirs

- Location de matériels.
- Bibliothèque (gestion rapide des entrées-sorties et inventaires, antivol) [12].
- Ticketing (remontées mécaniques dans les stations de sport d'hiver).
- Gestion des temps des coureurs de marathon.
- Maintenance des jeux dans les parcs publics.

Divers

- Location de vêtements-costumes-chaussures.
- Carte prépayée.
- Traçabilité de documents (contrats, dossiers sensibles).
- Gestion des stocks.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement la technologie RFID. Après avoir décrit l'histoire de la technologie RFID, nous avons exposé brièvement les différents éléments constituant un système complet RFID ainsi que leur principe de fonctionnement. Nous avons ensuite présenté la classification des systèmes RFID qui se fait selon différentes façons. On a introduit aussi la technique de rétro-modulation et l'architecture d'une puce RFID.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée aux nombreuses applications de la RFID.

Chapitre 2

Caractéristiques générales des antennes et Antennes Tag RFID

2.1 Introduction

Les antennes sont des éléments clés de tout système de communication sans fil. Ce sont des dispositifs qui permettent le transfert d'un signal dans l'espace par ondes électromagnétiques et qui peut être reçu par une autre antenne. L'antenne dans les systèmes RFID est un élément essentiel et l'interface entre la puce et le lecteur.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les principaux paramètres fondamentaux des antennes à savoir les paramètres de rayonnement et les paramètres circuits d'une antenne, nous allons présenter également les différentes antennes utilisés dans les tags RFID.

2.2 Paramètres des antennes

2.2.1 Paramètres de rayonnement d'une antenne

2.2.1.1 Diagramme de rayonnement

L'un des descripteurs les plus courants d'une antenne est son diagramme de rayonnement. Le diagramme de rayonnement d'une antenne est la distribution spatiale (3D) ou dans un plan (2D) d'une grandeur qui caractérise le champ électromagnétique rayonné par l'antenne. Cette distribution peut être exprimée sous forme d'une fonction ou d'une représentation graphique (figure 2.1) [1].

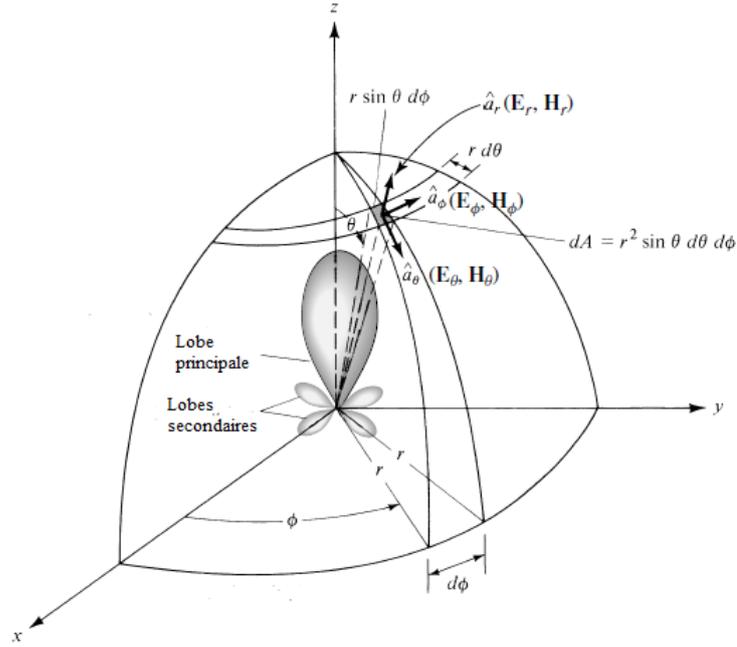


Figure 2.1 – Illustration du diagramme de rayonnement d'une antenne [2].

On peut définir un diagramme de rayonnement de deux manières :

- Diagramme de rayonnement en puissance : c'est la représentation spatiale de la fonction normalisée $r(\theta, \varphi)$ définie par :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0(\theta_0, \varphi_0)} \quad (2.1)$$

$U(\theta, \varphi)$, $U_0(\theta_0, \varphi_0)$ sont respectivement l'intensité de rayonnement d'une antenne dans une direction quelconque et la valeur maximale de cette grandeur dans une direction privilégiée.

- Diagramme de rayonnement en champ : c'est la représentation spatiale de la fonction caractéristique normalisée $f_n(\theta, \varphi)$ définie par :

$$f_n(\theta, \varphi) = \frac{|\vec{E}(r, \theta, \varphi)|}{|\vec{E}_0(r, \theta_0, \varphi_0)|} = \sqrt{r(\theta, \varphi)} \quad (2.2)$$

Le diagramme de rayonnement d'une antenne nous donne une information sur la direction du rayonnement maximal (Le lobe principal) et les directions de rayonnement secondaires (Les lobes secondaires) de sa puissance dans l'espace.

On dit qu'une antenne est directive lorsqu'elle rayonne plus dans certaines directions que dans d'autres, par contre, une antenne omnidirectionnelle est une antenne qui rayonne de façon identique dans un plan déterminé.

2.2.1.2 Directivité

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans des directions privilégiées. La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne, dans une direction donnée est le rapport de l'intensité de rayonnement $U(\theta, \varphi)$ dans cette direction à l'intensité de rayonnement d'une antenne de référence (source isotrope) :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{iso}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{ray}} \quad (2.3)$$

En général, lorsqu'on parle de directivité D sans spécifier de direction particulière, on sous-entend la directivité dans la direction du rayonnement maximum :

$$D = D_{max}(\theta, \varphi) = \frac{U_{max}}{U_{iso}} = 4\pi \frac{U_{max}}{P_{ray}} \quad (2.4)$$

La directivité est une grandeur sans dimension, il est généralement exprimé par sa valeur en décibels :

$$D_{dB} = 10\log_{10}(D) \quad (2.5)$$

2.2.1.3 Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne $G(\theta, \varphi)$ dans une direction donnée est le rapport de l'intensité rayonnée $U(\theta, \varphi)$ à la puissance par unité d'angle solide que rayonnerait l'antenne si elle émettait de manière isotrope et à condition que les puissances P_{in} admises dans l'antenne (figure 2.2) soient les mêmes.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (2.6)$$

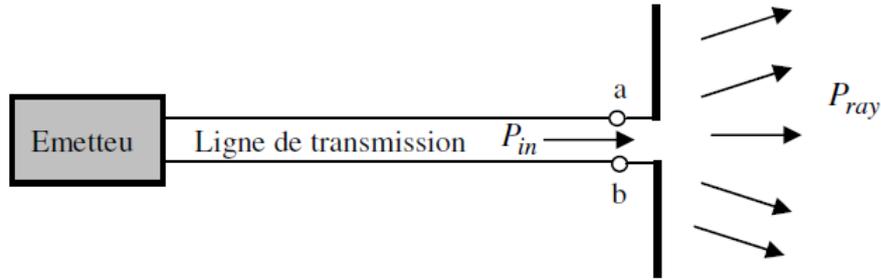


Figure 2.2 – Puissance fournie à l'antenne et puissance rayonnée [1].

La différence entre la puissance P_{in} disponible à l'entrée et la puissance rayonnée P_{ray} en sortie correspond aux différentes pertes (joules et diélectriques) dans l'antenne, que l'on peut caractériser par le rendement de rayonnement défini comme suit :

$$\eta_{ray} = \frac{P_{ray}}{P_{in}} \quad (2.7)$$

de sorte que le gain est relié à la directivité par la relation :

$$G(\theta, \varphi) = \eta_{ray} D(\theta, \varphi) \quad (2.8)$$

Lorsque on parle de gain sans spécifier la direction, on sousentend la valeur maximale du gain, noté G , et qui s'écrit :

$$G = G_{max}(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U_{max}}{P_{in}} = \eta_{ray} D \quad (2.9)$$

Comme la directivité, le gain est une grandeur sans dimension, donc on l'exprime généralement en décibels :

$$G_{dB} = 10\log_{10}(G) \quad (2.10)$$

2.2.1.4 Polarisation

La polarisation d'une antenne est la propriété décrivant la variation temporelle de la direction et du module du vecteur champ électrique \vec{E} rayonné par cette antenne. Elle est caractérisée par la courbe décrite dans le temps par l'extrémité de ce vecteur et observée à partir de la direction de propagation. (figure 2.3)

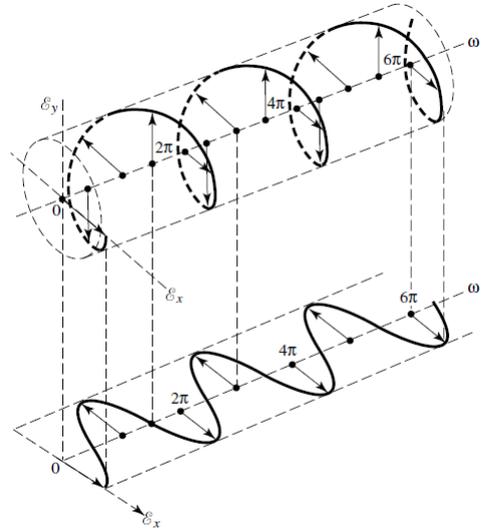


Figure 2.3 – Polarisation circulaire d'une onde et sa projection [2].

La polarisation peut être linéaire, circulaire ou elliptique. Si le vecteur champ électrique \vec{E} garde une direction constante (possédant donc une seule composante), la polarisation est dite linéaire ou rectiligne (figure 2.4). Dans le cas général, \vec{E} décrit une ellipse et la polarisation est alors dite elliptique. (figure 2.5)

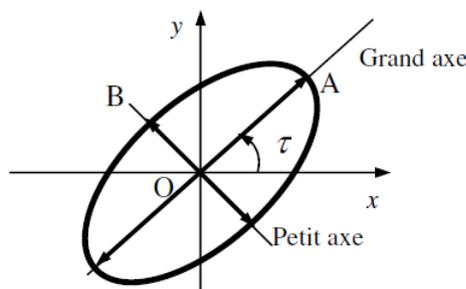


Figure 2.4 – Polarisation linéaire [1].

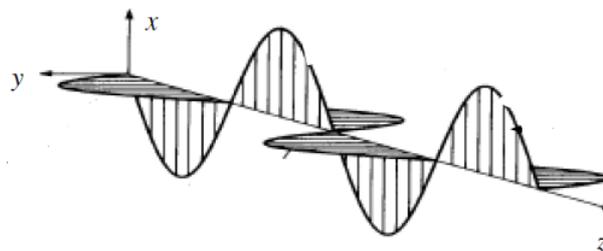


Figure 2.5 – Polarisation elliptique quelconque [1].

2.2.2 Paramètres circuits d'une antenne

Les paramètres qui traduisent le comportement de l'antenne comme circuit sont l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion, le TOS, et la bande passante.

2.2.2.1 L'impédance d'entrée

Une propriété particulièrement importante de l'antenne est son impédance d'entrée, elle caractérise la charge apportée par cette antenne au circuit d'excitation. En émission (figure 2.6), l'antenne est représentée comme une charge terminale, illustrée par une impédance Z_{in} qui se présente sous forme complexe :

$$Z_{in} = R_a + jX_a = (R_{ray} + R_{diss}) + jX_a \quad (2.11)$$

La partie réelle R_a correspond à la somme de deux résistances notées respectivement R_{ray} et R_{diss} (résistance de rayonnement et résistance de dissipation respectivement) et la partie imaginaire, illustrée par la réactance X_a , matérialise l'énergie réactive.

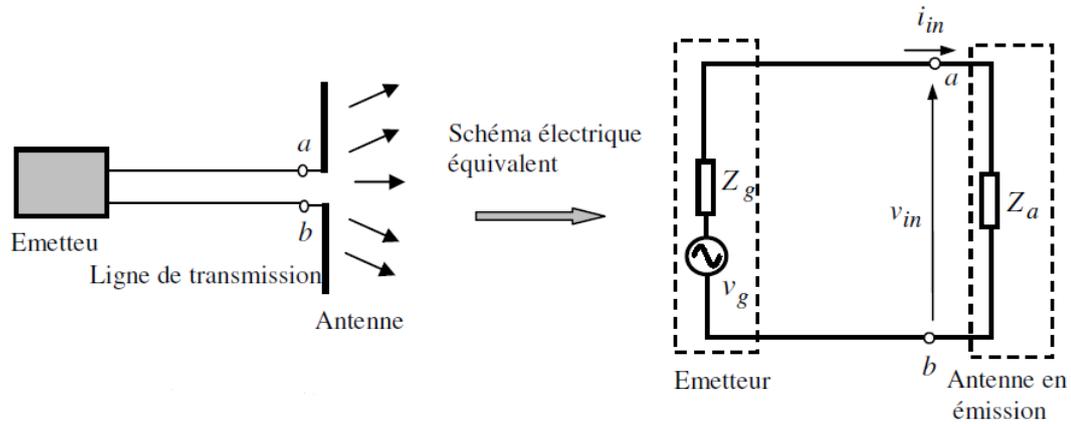


Figure 2.6 – Antenne en émission et son schéma électrique équivalent [1].

2.2.2.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion Γ d'une antenne est définie par :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (2.12)$$

Z_a , Z_0 sont respectivement l'impédance d'entrée de l'antenne et l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation ou la ligne de transmission (généralement 50Ω ou 75Ω).

Dans certains cas, il n'y aura pas de ligne de transmission et l'antenne sera liée directement à une charge Z_l , comme dans les Tags RFID, l'antenne est liée directement à la puce, et dans ce cas-là, l'impédance d'entrée de la puce qui est un nombre complexe représente la charge liée à l'antenne. On définit donc le coefficient de réflexion Γ^* par :

$$\Gamma^* = \frac{Z_l - Z_a^*}{Z_l + Z_a} \quad (2.13)$$

Γ^* représente le rapport entre la puissance réfléchiée par la charge et la puissance disponible qui pourrait lui être transmise.

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

$$S_{11} = 20 \log |\Gamma| \quad (2.14)$$

2.2.2.3 Le TOS

Le TOS, pour Taux d'Onde Stationnaire, est défini comme le rapport des valeurs maximales et minimales de l'amplitude du signal. Le TOS, ou VSWR pour Voltage Standing Wave Ratio en anglais, est directement relie au paramètre de réflexion complexe Γ donc à l'adaptation de l'antenne.

$$TOS = VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.15)$$

Le TOS informe de la qualité d'un composant microonde à transmettre un signal dans une bande passante souhaitée. Ainsi, plus le TOS est proche de l'unité (cas ou la réflexion est nulle), meilleure est la transmission. On considère qu'une antenne est correctement adaptée lorsqu'elle présente un TOS à la fréquence de résonance inférieure à 2. Ce dernier chiffre correspond à un S_{11} équivalent a -10dB.

2.2.2.4 Bande passante

D'une manière générale, la bande passante d'une antenne est la bande de fréquence pour laquelle les performances radioélectriques de cette antenne restent conformes à une norme imposée. La définition de la bande passante dépend de l'application. Pour le domaine de la RFID, la bande passante d'une antenne est définie comme étant la bande de fréquence pour laquelle 90% de la puissance incidente est transmise.(correspond à $S_{11} = -10dB$).

La figure 2.7 représente la réponse fréquentielle du paramètre S_{11} .

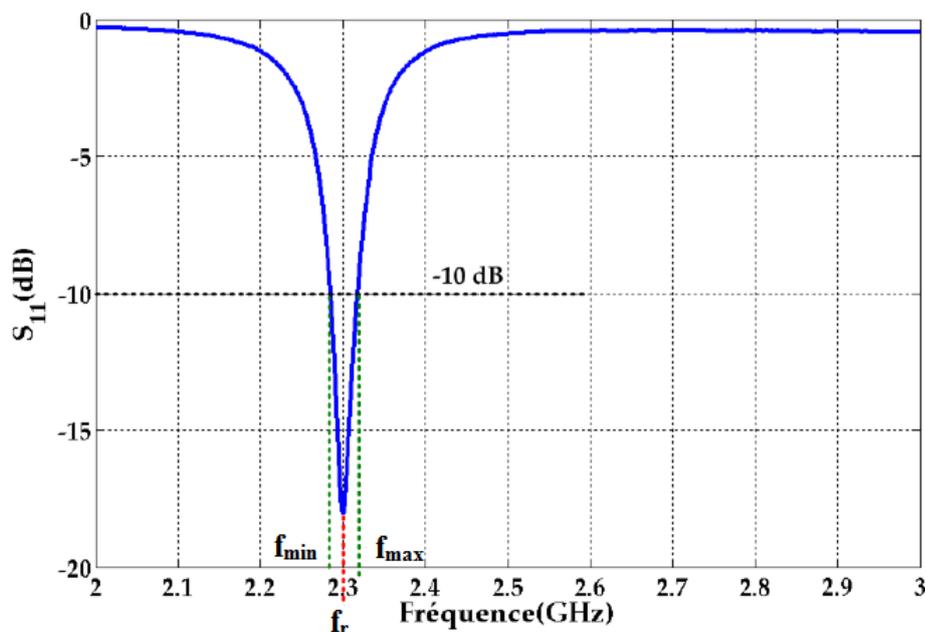


Figure 2.7 – Réponse fréquentielle du paramètre S_{11} et mesure de la bande passante [11].

On définit la bande passante par l'expression suivante :

$$B(\%) = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_r} \times 100 \quad (2.16)$$

avec f_r représente la fréquence de résonance de l'antenne approximativement égale à :

$$f_r = \frac{f_{max} + f_{min}}{2} \quad (2.17)$$

2.2.2.5 Facteur de qualité

Le facteur de qualité Q est généralement définie comme suit [19] :

$$Q = 2\pi \frac{\text{énergie stockée par cycle}}{\text{énergie rayonnée et dissipée par cycle}} \quad (2.18)$$

Q indique si une antenne est capable d'emmagasiner de l'énergie et détermine sa sélectivité en fréquence.

La bande passante B est inversement proportionnelle au facteur de qualité Q [5] :

$$B = \frac{f_r}{Q} \quad (2.19)$$

2.3 Antennes pour Tags RFID UHF passifs

Dans cette section, on va voir une présentation de certains types d'antennes pour les tags RFID UHF passifs.

Ces types d'antennes diffèrent en fonction de l'application envisagée. Il n'y a aucune antenne parfait pour toutes les applications, c'est l'application qui définit les spécifications de l'antenne. Par exemple, les antennes patches et les antennes F-inversés sont bien appropriées pour des objets métalliques.

Dans la littérature, il y a plusieurs types d'antennes qui sont mis en œuvre pour les tags RFID UHF passifs. Les 4 principaux types d'antennes utilisées sont :

- les antennes IFA (Inverted F Antenna) ;
- les antennes patches ;
- les antennes dipôles imprimés ;
- les antennes à fentes imprimées.

2.3.1 les antennes IFA

Les antennes IFA sont des antennes miniatures (leur grandeur est de l'ordre $L=\lambda/4$). Ces types d'antennes ont l'avantage de présenter un rayonnement quasi-isotrope souhaité dans des applications pour lesquelles l'orientation relative du tag par rapport au lecteur RFID est incertaine. La géométrie d'une telle antenne est présentée sur la figure 2.8.

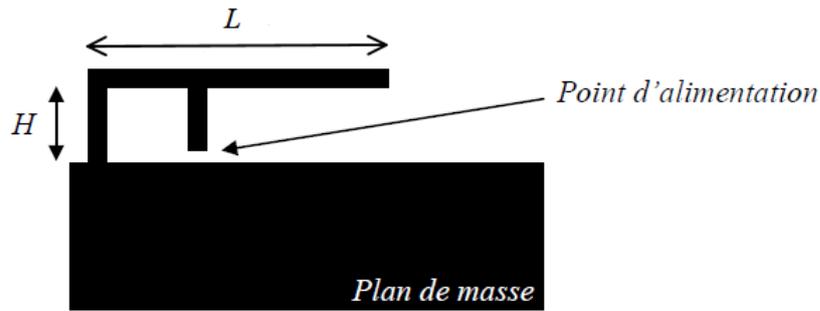


Figure 2.8 – Géométrie d'une antenne IFA (coplanar IFA) [19].

L'antenne IFA présente plusieurs géométries comme illustre la figure 2.9 :

1. L'antenne IFA qui est une antenne filaire.
2. L'antenne planaire IFA (PIFA : Planar IFA) qui est une antenne IFA filaire dont les fils sont remplacés par des larges bandes ce qui permet d'augmenter la bande passante de l'antenne [7]. Ce type d'antenne réalisé par emboutissage est particulièrement mis en œuvre dans les téléphones portables.
3. L'antenne coplanaire IFA (coplanar IFA)(figure 2.8), sa géométrie est de telle sorte que le F inversé et le plan de masse se trouvent sur la couche. Elle est utilisée dans le but de simplifier la fabrication et la connexion de la puce. Dans un tel cas, la géométrie qui en résulte peut être considérée comme un dipôle asymétrique, où les bras sont donnés par le F inversé et le plan de masse, et sa taille est d'environ un quart de longueur d'onde.

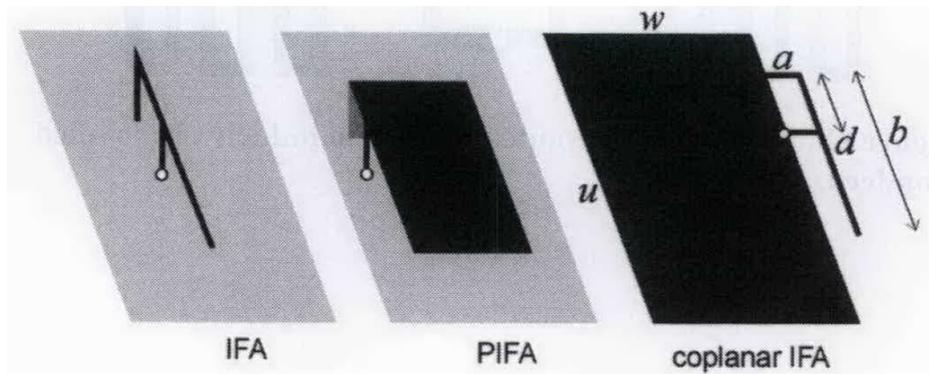


Figure 2.9 – Différentes configurations d'antennes IFA [7].

Les antennes IFA peuvent être particulièrement appropriées pour l'identification d'objet métallique, cependant l'existence d'un plan de masse assez conséquent les rend pas pratique.

2.3.2 les antennes patches

L'antenne patch est une antenne microruban (imprimée)(figure 2.10) constituée d'une couche métallique d'épaisseur t très fine, placée au-dessus d'un plan de masse à une hauteur h représente l'épaisseur du substrat, ce dernier est caractérisé par sa permittivité relative ϵ_r et ses pertes diélectriques représentées par le paramètre $\tan\delta$.

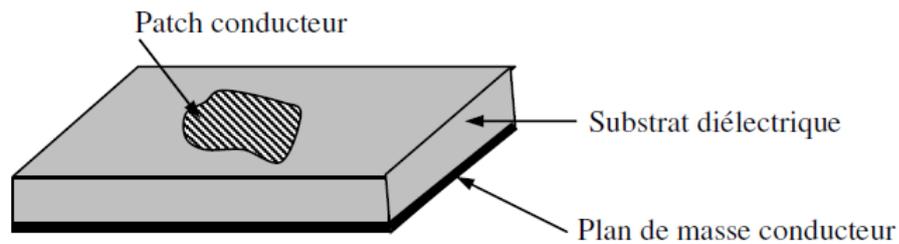


Figure 2.10 – Géométrie d'une antenne patch [1].

La couche métallique au-dessus de substrat représente l'élément rayonnant de l'antenne patch qui peut prendre plusieurs géométries : rectangulaire, circulaire, ovale... (Figure 2.11).

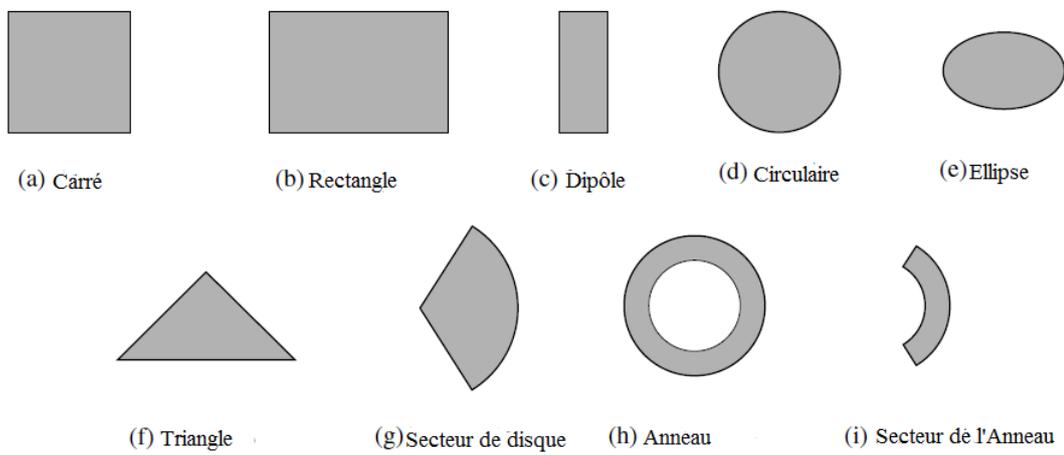


Figure 2.11 – Différentes formes de l'élément rayonnant [2].

Ce type d'antenne peut être analysé par plusieurs manières. Les méthodes les plus utilisées sont

- Le modèle de la Ligne de Transmission
- Le modèle de la Cavité
- Le modèle électromagnétique incluant les équations intégrales et la méthode des moments.

D'autres techniques numériques sont également utilisées pour analyser les antennes microruban. On peut citer la méthode des éléments finis (MEF) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Toutes ces techniques numériques ont donné lieu à des logiciels de conception très puissants à savoir CST MWS, HFSS, IE3D...

L'antenne patch permet d'avoir des polarisations circulaires ou linéaires en offrant un rayonnement directionnel. Les patches sont plus utilisés dans l'industrie en comparaison avec les antennes IFA pour des raisons de conceptions ainsi que pour des raisons économiques.

Il existe différentes techniques permettant l'alimentation de l'antenne patch. Une bonne alimentation doit prendre en considération quelques aspects pratiques (adaptation d'impédance, réduction des pertes d'insertion et des discontinuités responsables de

rayonnement indésirable...)[1]. Les types d'alimentation (figure 2.12) les plus couramment utilisés sont :

- Alimentation par ligne microruban.
- Alimentation par connecteur coaxial.
- Alimentation par couplage électromagnétique.

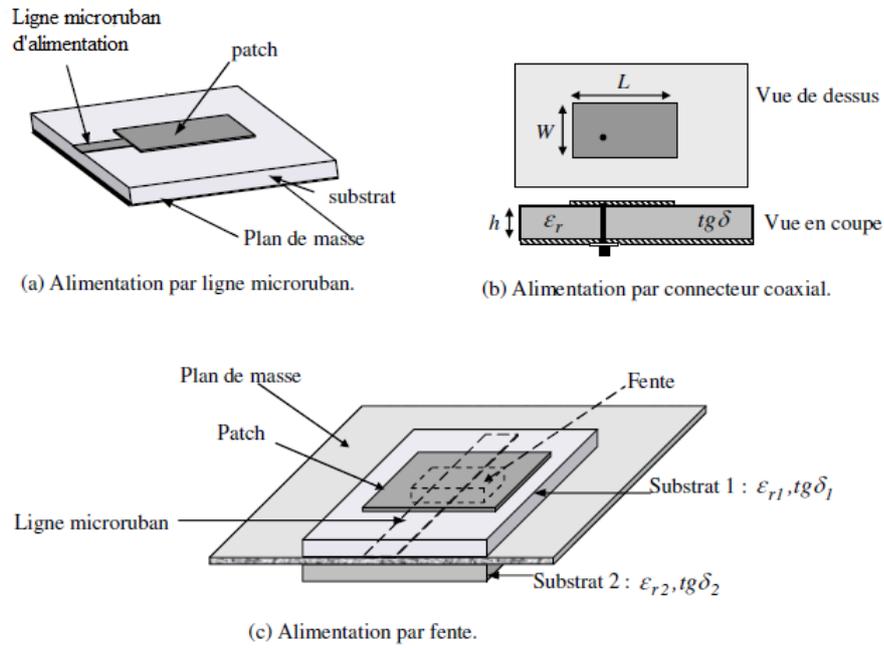


Figure 2.12 – Quelques techniques d'alimentation d'une antenne microruban [1].

Dans la majorité des cas, une alimentation asymétrique est mise en œuvre. Cependant il est également possible de réaliser l'alimentation par une alimentation symétrique (figure 2.13). L'avantage d'une alimentation symétrique est qu'elle permet de connecter une puce RFID symétrique sans faire intervenir de via coûteux. Une alimentation symétrique consiste en l'alimentation par deux signaux en opposition de phase en deux points positionnés symétriquement par rapport au centre du patch [19].

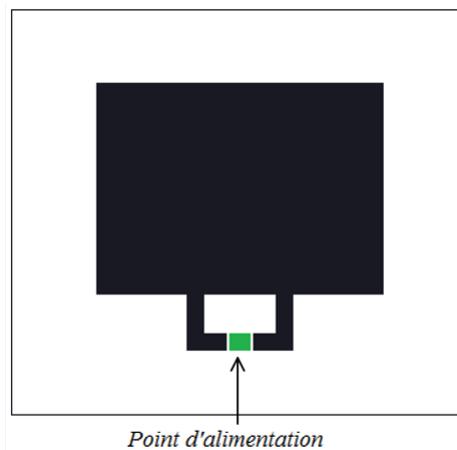


Figure 2.13 – Alimentation symétrique d'une antenne patch

Cette méthode d'alimentation de l'antenne patch, ainsi que l'adaptation d'impédance de cette antenne à l'impédance d'une puce RFID ont été introduites dans [20] et [21].

2.3.3 les antennes dipôles imprimés

Le dipôle imprimé est une antenne monocouche composée de deux branches conductrices écartées en directions opposés, imprimés sur un substrat diélectrique. Elle a une longueur totale d'une demi-longueur d'onde mais peut être réduits en utilisant des techniques de miniaturisation. L'alimentation de l'antenne est placée entre les deux branches (figure 2.14).

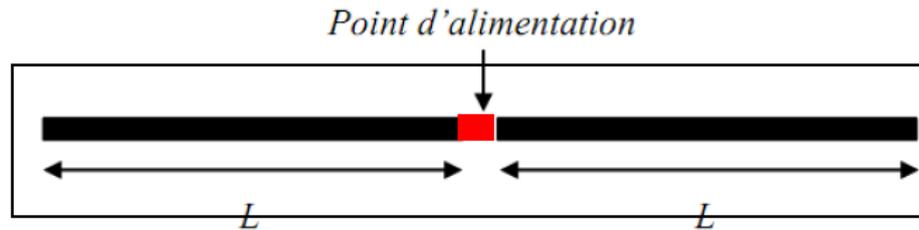


Figure 2.14 – Géométrie de base d'une antenne dipôle [4].

Ces antennes sont de loin les plus utilisées en RFID UHF passive, grâce à plusieurs caractéristiques, notamment leur symétrie leur facilité d'intégration et surtout leurs faibles coûts. Elles possèdent un rayonnement omnidirectionnel et une polarisation linéaire.

2.3.4 les antennes à fentes imprimées

Les antennes à fente imprimées contiennent une fente, théoriquement de n'importe quelle forme, dans le plan de masse, relié au substrat, ce sont des antennes monocouche. Elles peuvent être considérées comme les duales des antennes dipôles. La géométrie de ces antennes est présentée sur la figure 2.15

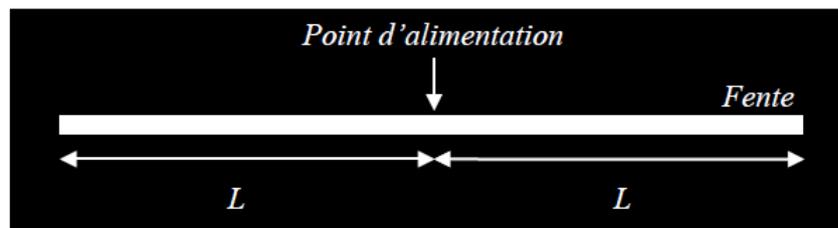


Figure 2.15 – Géométrie de base d'une antenne à fente [19].

Les antennes à fentes sont moins appréciées que les antennes de type dipôle pour leur grande quantité de matière conductrice et donc leur coût.

2.4 Modélisation électrique des puces RFID

La connaissance de la valeur de l'impédance d'entrée de l'antenne est primordiale lors de la conception des antennes RFID. Cette valeur devra être forcément égale au conjugué de la valeur de l'impédance de la puce, afin de pouvoir transmettre un maximum de

puissance à la puce pour l'activer.

L'impédance d'entrée Z_c des puces RFID UHF est à valeur complexe, leur partie réelle est comprise entre quelques ohms et plusieurs centaines d'ohms. Leur partie imaginaire est négative à cause de l'effet capacitif en entrée du redresseur qui assure la récupération d'énergie pour l'alimentation de la puce RFID [19].

Un modèle électrique équivalent de l'impédance d'entrée peut être modélisé par une résistance et une capacité, soit en parallèle par R_p et C_p (figure 2.16.a) soit en série par R_s et C_s (figure 2.16.b).

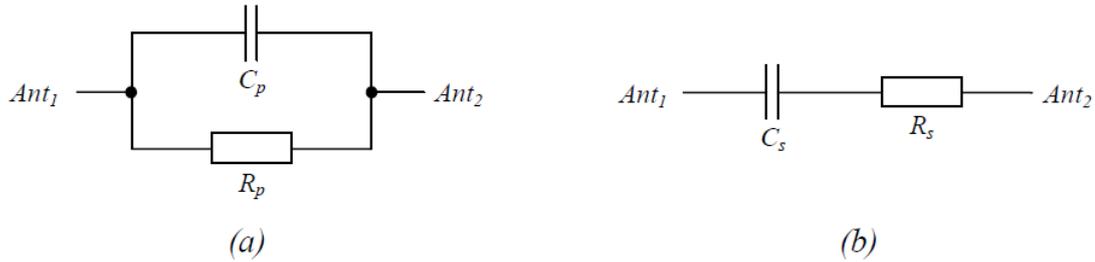


Figure 2.16 – Modèle équivalent de l'impédance d'entrée des puces RFID UHF.
(a) Circuit parallèle. (b) Circuit série [19].

Les deux modèles présentés sont équivalents. Les fabricants des puces RFID fournissent généralement soit l'impédance Z_c , l'admittance Y_c ou les valeurs des éléments d'un des deux modèles de la figure 2.16. Les équations (2.20) et (2.21) permettent d'obtenir la valeur de ces éléments en fonction de l'impédance d'entrée Z_c .

$$R_p = \frac{Re(Z_c)^2 + Im(Z_c)^2}{Re(Z_c)} \quad \text{et} \quad C_p = \frac{Im(Z_c)}{2\pi \cdot f \cdot (Re(Z_c)^2 + Im(Z_c)^2)} \quad (2.20)$$

$$R_s = Re(Z_c) \quad \text{et} \quad C_s = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot Im(Z_c)} \quad (2.21)$$

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

2.5 Conclusion

Nous avons tout d'abord présenté dans ce chapitre, les différents paramètres et caractéristiques relatifs aux antennes (gain, polarisation, coefficient de réflexion, bande passante...)

Dans une seconde partie de ce chapitre, nous avons introduit la famille des antennes mises en œuvre dans les systèmes RFID UHF passifs à savoir les antennes IFA, les antennes patches, les dipôles imprimés ainsi que les antennes à fente.

A la fin de ce chapitre, on a parlé sur la modélisation électrique des puce RFID, ce modèle qui nous aidera par la suite dans la simulation électromagnétique de l'antenne.

Chapitre 3

Méthodes de conception et outils de simulation

3.1 Introduction

En général, les étiquettes RFID passives sont constituées d'une puce RFID et une antenne. Les antennes des étiquettes RFID passives ne peuvent pas être prises directement à partir des antennes traditionnelles conçues pour d'autres applications et qui ont généralement une impédance d'entrée de $50/75 \Omega$. Puisque les puces RFID présentent une impédance d'entrée complexe, les antennes des étiquettes RFID doivent être conçues de manière à compenser l'impédance d'entrée de la puce en présentant une impédance d'entrée conjuguée à celle de la puce ($Z_{ant} = Z_{puce}^*$).

Pour concevoir une antenne RFID UHF passive on doit prendre en considération les choses suivantes :

- L'antenne doit être miniaturisé pour réduire la taille de l'étiquette et le coût.
- L'impédance de l'antenne conçue doit être adaptée à l'impédance d'entrée de la puce RFID pour assurer le transfert de puissance maximale qui est un facteur important dans la conception.
- Le gain de l'antenne doit être relativement élevé pour obtenir une distance de lecture élevée.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord énumérer les différentes méthodes permettant la miniaturisation des antennes de tag RFID, ainsi que quelques techniques permettant d'assurer l'adaptation entre une antenne tag RFID et la puce électrique qui lui est raccordée. Ensuite, on parle sur les méthodologies de conceptions des antennes de tag RFID. Finalement, on explore les différents logiciels de simulation électromagnétique en parlant beaucoup plus sur la méthodologie de simulation des antennes en utilisant le logiciel CST MWS.

3.2 Les méthodes 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.

3.2.1 Repliage du dipôle (Meandering)

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 3.1) 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 [9].

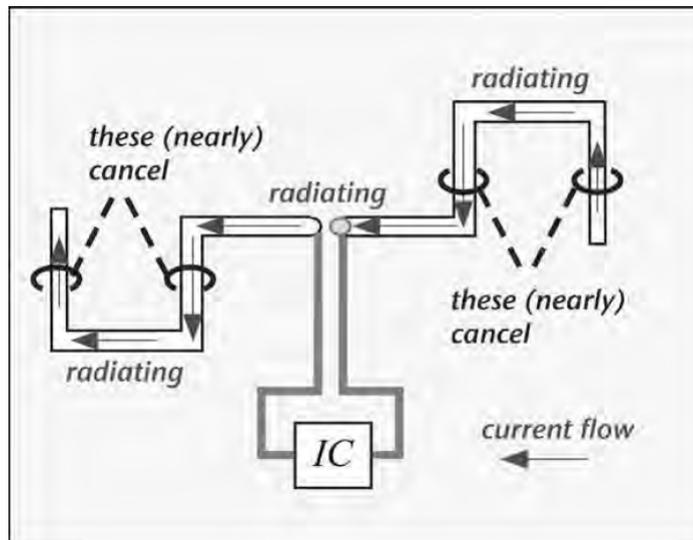


Figure 3.1 – Géométrie de base d'une antenne méandre [9].

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 3.2)

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) [4].

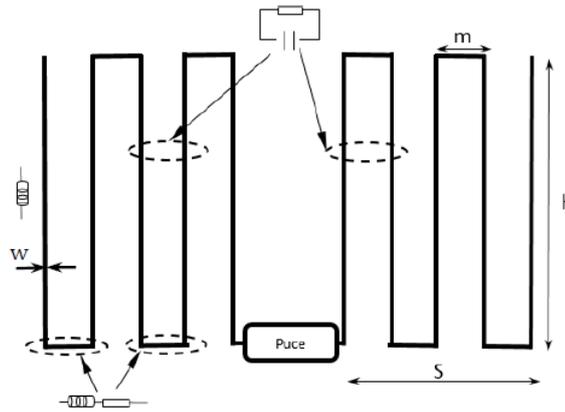


Figure 3.2 – Les paramètres décrivant la géométrie d'une antenne méandre [4].

3.2.2 Utilisation des antennes fractales

Les antennes fractales sont basées sur le concept d'une fractale, ce qui est une géométrie générée de manière récursive qui a des dimensions fractionnaires.

Le mot « fractale » est inspiré du mot latin « Fractus » qui signifie irrégulier ou brisé. Ce sont des objets possédant une structure géométrique répétitive et auto-similaire [14].

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 existant dans la nature peuvent être utilisées 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 [2].

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 utilisés 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 décrites et générées en utilisant un processus itératif qui conduit à des structures auto-similaires comme illustre la figure 3.3 [2].

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...

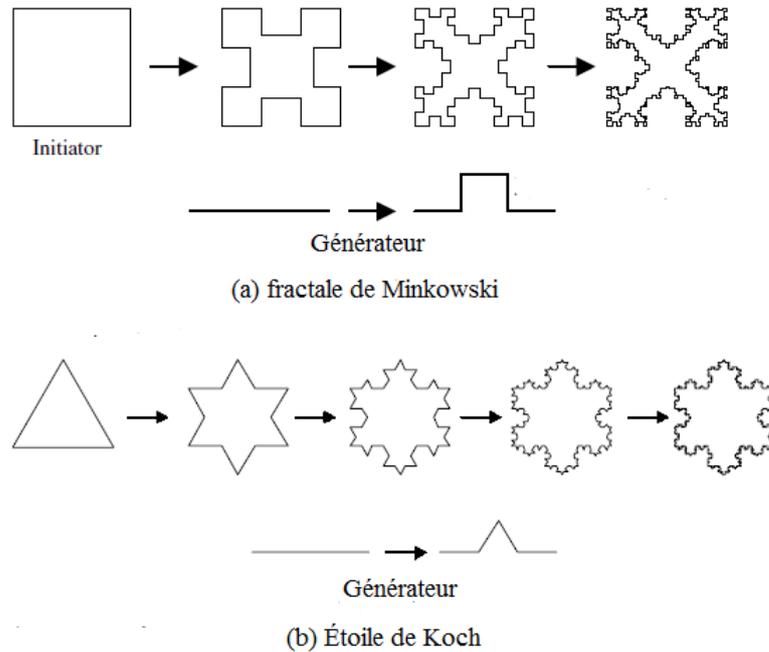


Figure 3.3 – Processus de génération itérative des fractales [2].

3.3 Les méthodes d'adaptation d'impédance

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 patchs 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.

3.3.1 Adaptation par un T (T-Match)

La T-match est une technique d'adaptation d'impédance des antennes dipôles [2]. 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 proche b à partir du premier dipôle comme illustre la figure suivante :

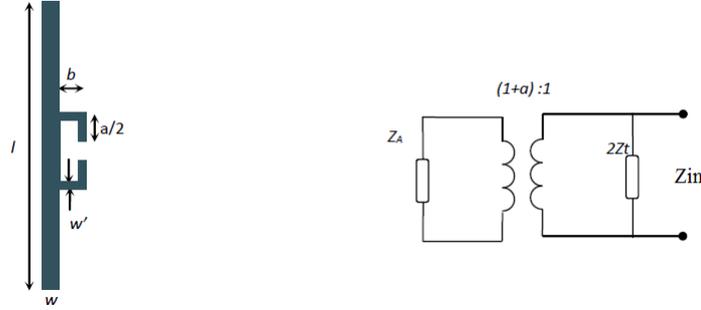


Figure 3.4 – Adaptation en T et son circuit équivalent [4].

L'impédance d'entrée Z_{in} au point d'alimentation est exprimée par la relation suivante [21] :

$$Z_{in} = \frac{2Z_t(1 + \alpha)^2 Z_A}{2Z_t + (1 + \alpha)^2 Z_A} \quad (3.1)$$

Avec :

- * Z_A est l'impédance de dipôle lorsque la liaison T-match est absente.
- * $\alpha = \frac{\ln(b/r'_e)}{\ln(b/r_e)}$ est le facteur de division du courant entre les deux conducteurs espacés de b , 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-circuité formé par la ligne de transmission de deux conducteurs de longueur $a/2$, de largeur w et w' et de la séparation b (figure 3.5), avec $ka = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde.
- * $Z_0 \cong 276 \log_{10}(b/\sqrt{r_e r'_e})$ est l'impédance caractéristique de la ligne de transmission de deux conducteurs de longueur $a/2$ (figure 3.6).

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}

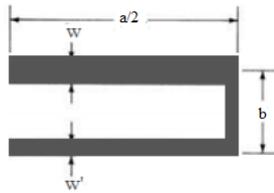


Figure 3.5 – Court-circuit formé par la ligne de transmission de deux conducteurs [22].

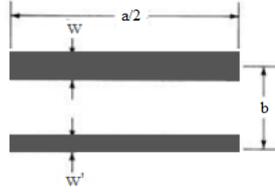


Figure 3.6 – Ligne de transmission a deux conducteurs [22].

3.3.2 Adaptation avec une boucle à couplage inductif

Une autre technique d'adaptation d'impédance des antennes est l'utilisation du 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 (figure 3.7).

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.

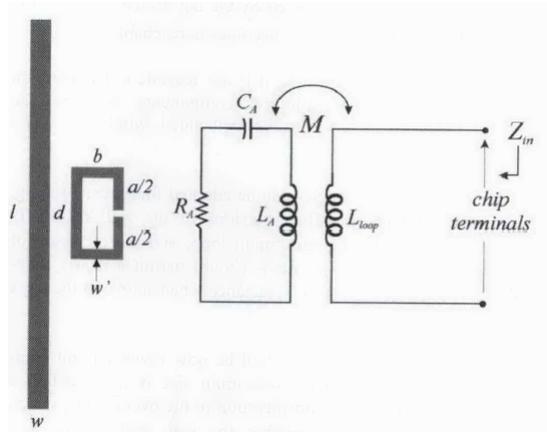


Figure 3.7 – Adaptation par un couplage inductif et son circuit équivalent [21].

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

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = Z_{boucle} + \frac{(2\pi f M)^2}{Z_A} \quad (3.2)$$

Avec :

* $Z_{boucle} = j2\pi f L_{boucle}$ est l'impédance d'entrée 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 (3.3)), tandis que la réactance d'entrée X_{in} ne dépend que de l'inductance propre de la boucle L_{boucle} (équation (3.4))[21].

$$R_{in}(f_0) = (2\pi f_0 M)^2 / R_A(f_0) \quad (3.3)$$

$$X_{in}(f_0) = 2\pi f_0 L_{boucle} \quad (3.4)$$

3.3.3 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 [21].

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 3.8)

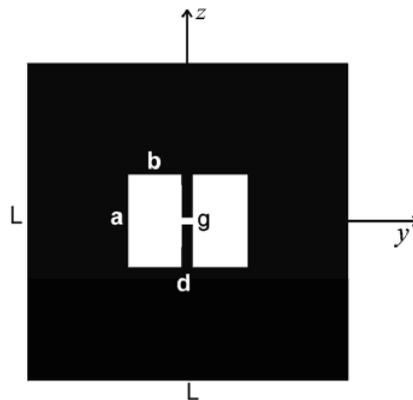


Figure 3.8 – Configuration d'une antenne adaptée par fente [10].

3.3.4 Adaptation par charges capacitives aux extrémités

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 3.9).

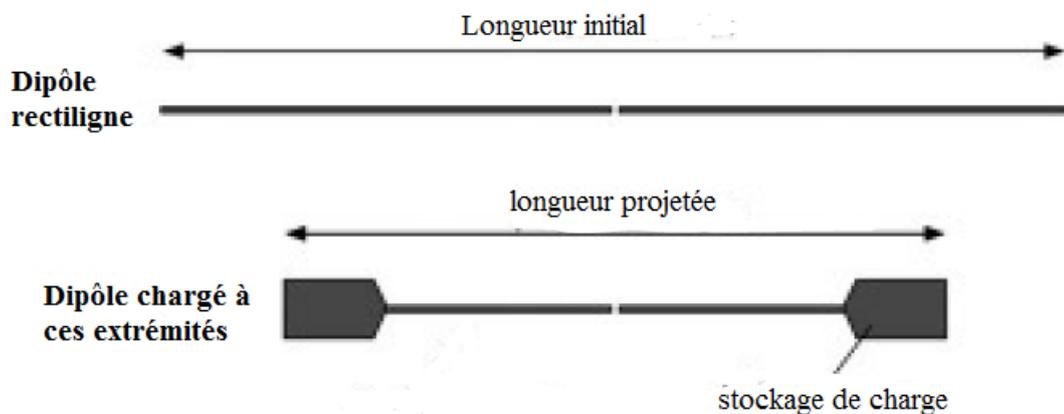


Figure 3.9 – Adaptation par charges capacitives aux extrémités [18].

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 [9].

3.3.5 Utilisation des méandres

Cette technique permet à la fois la miniaturisation de l'antenne (voir 3.2.1) et l'adaptation de l'impédance. Après le repliement du dipôle en plusieurs méandres (figure 3.10), 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.

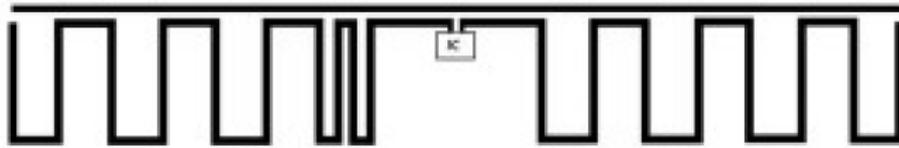


Figure 3.10 – Adaptation par utilisation des méandres [18].

3.4 La méthodologie de conception d'antenne du tag RFID

3.4.1 Méthodologie 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 [15][16].

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 3.11.

3.4.2 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

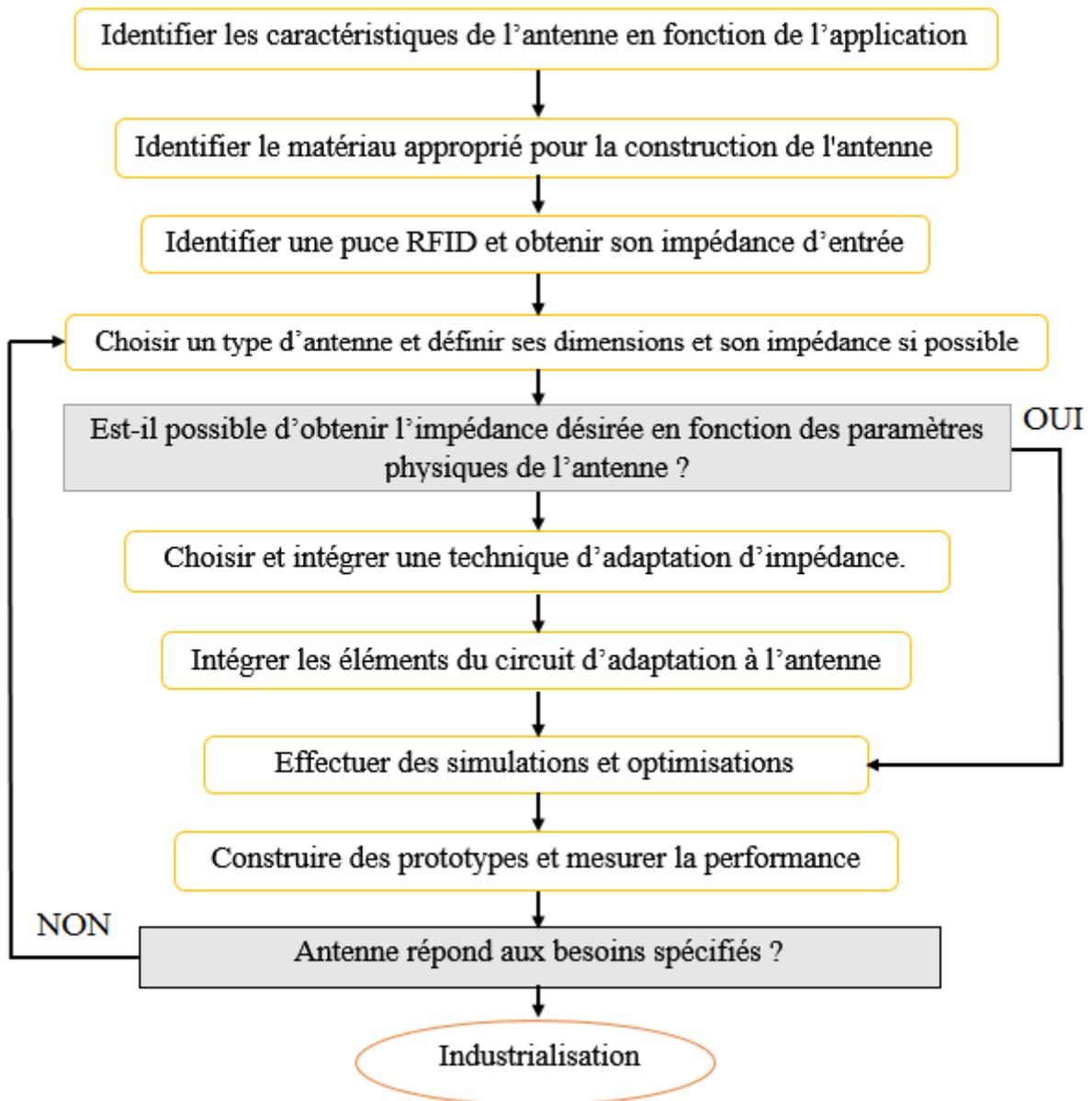


Figure 3.11 – Méthodologie de conception des antennes RFID [13].

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 [13].

3.5 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 HFSS (Ansoft), le Momentum (Agilent), le IE3D (Zeland Software) et le CST MWS.

3.5.0.1 Le logiciel IE3D

Le logiciel IE3D (Integrated Electromagnetic 3D), apparu en 1992 est un outil très performant développé par la compagnie Zeland Software. Il combine plusieurs modules de simulation, d'optimisation et d'affichage des résultats, en tenant compte de la présence et de l'influence des substrats diélectriques. La technique utilisée est la méthode des moments appliquée aux équations intégrales. La structure à étudier sera "maillée" (divisée) en éléments simples : triangles ou rectangles. Notant que la taille de ces éléments simples peut être modifiable, ce qui lui permet d'adapter les cellules à la géométrie de l'objet.

3.5.0.2 Le logiciel HFSS

Le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) apparu en 1990 est un simulateur 3D de haute performance développé par ANSOFT. Il intègre plusieurs fonctions ; la modélisation, la visualisation et la simulation et peut être utilisé pour calculer les champs, les paramètres d'antennes et d'autres plusieurs applications. Notant que ce dernier utilise la méthode des éléments finis (FEM).

3.5.0.3 Le logiciel CST MWS

Le logiciel CST Microwave Studio (Computer Simulation Technology) est un logiciel de conception électromagnétique, qui met en œuvre la méthode des intégrales finies (FIT) associées aux conditions aux limites pour résoudre un problème électromagnétique.

Dans ce mémoire, on a utilisé ce logiciel afin de simuler et d'optimiser les différentes structures d'antennes de tag RFID. L'utilisation d'un tel logiciel demande beaucoup d'expérience et de maîtrise afin d'optimiser le temps de conception. La méthodologie de conception mise en œuvre est illustrée sur la figure 3.12

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 microstrips ou coplanaires et les câbles coaxiaux, ainsi que le port discret adapté aux structures nécessitant des sources discrètes (dont les puces RFID).

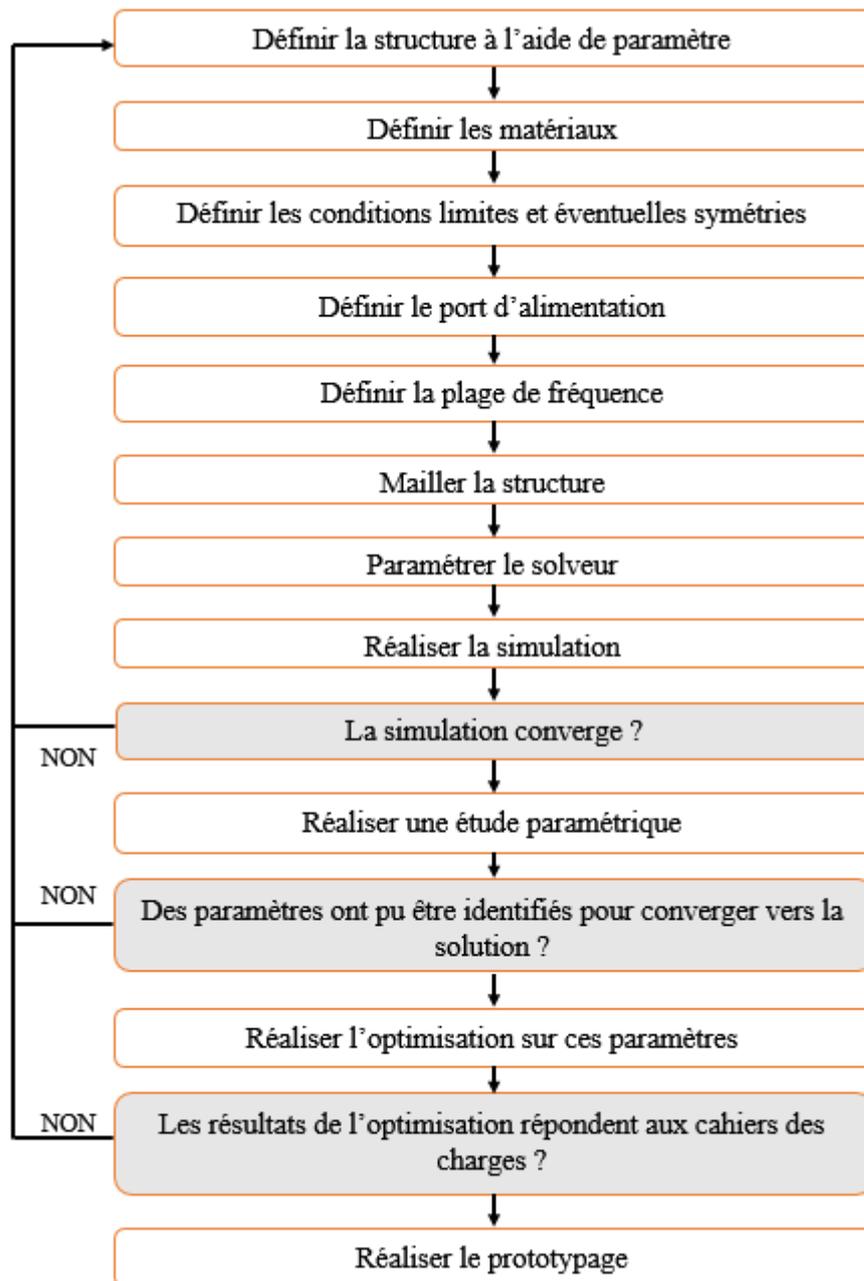


Figure 3.12 – Méthodologie de simulation d'antenne [19].

- 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.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposés les méthodes d’adaptation d’impédance et de miniaturisation des antennes pour tags RFID. On a présenté aussi une vue d’ensemble sur la conception d’antennes, à savoir la méthodologie et les exigences de conception.

Et pour finir, nous avons introduit les différents logiciels de simulation électromagnétiques utilisés pour la conception et la simulation des antennes et nous avons présenté l’outil « CSt MWS » que nous avons utilisé tout au long de ce travail.

Chapitre 4

Conception d'antennes de Tag RFID UHF passifs

4.1 Introduction

Ce chapitre est entièrement dédié à la conception des antennes pour tags RFID UHF passifs. Nous avons choisi dans ce mémoire, de concevoir trois types d'antennes en se basant sur les techniques d'adaptation et de miniaturisation vues dans le chapitre précédent.

Les antennes conçues sont :

- Une antenne dipôle (à ligne méandre).
- Une antenne patch (à alimentation symétrique)
- Une antenne dipôle fractale (à forme de Koch)

Ces antennes ont été simulées à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique CST MWS 2014, une présentation de ce logiciel ainsi que la méthode de son utilisation pour concevoir et simuler des antennes pour TAG RFID est expliquée dans l'annexe A.

4.2 Antenne méandre

Les antennes dipôles par leur structure en 2D sont les plus employés par les industriels dans le domaine de la RFID. L'antenne dipôle méandre est un choix naturel dans la conception des antennes de tag RFID UHF. Cette antenne de taille miniature fournit un rayonnement omnidirectionnel dans un plan perpendiculaire aux l'axe du dipôle.

4.2.1 Géométrie d'antenne

La géométrie de l'antenne est illustrée dans la figure 4.1. L'antenne a une taille de $55 \times 34 \text{ mm}^2$, elle a été conçue sur un substrat de type FR4 epoxy, ce dernier a une permittivité de $\varepsilon_r = 4.3$ et un coefficient de tangente de perte $\tan\delta=0.025$.

Cette antenne est conçue pour travailler à la fréquence $f=915 \text{ MHz}$.

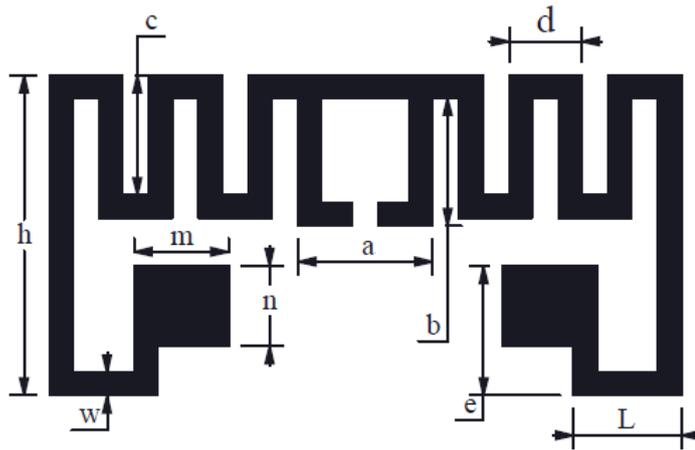


Figure 4.1 – Géométrie de l'antenne méandre.

La structure en méandres est formée en pliant les bras de l'antenne dipôle. L'augmentation du nombre de méandres tout en maintenant la dimension globale de l'antenne de l'étiquette, décale la fréquence de résonance à des fréquences inférieures.

Une autre méthode de miniaturisation est utilisée dans cette antenne qui est l'utilisation des charges à l'extrémité. Ces charges ont pour effet l'augmentation de la capacité de l'antenne qui contribue à la diminution de la fréquence de résonance.

Par conséquent, afin d'augmenter la fréquence de résonance de retour à proximité de la fréquence de fonctionnement, la taille de l'antenne doit être réduite.

Afin de faire adapter facilement l'impédance d'antenne et l'impédance de la puce, une courte ligne de transmission est reliée au dipôle (adaptation par un T. voir 3.3.1).

Le tableau 4.1 illustre les paramètres et les dimensions de l'antenne proposée, cette antenne est conçue pour être adaptée à une puce qui a une impédance d'entrée de $Z_{puce} = 30 - j144 \Omega$ à la fréquence de $f=915$ MHz.

Variables	Valeurs (mm)	f=915 MHz
a	10	$Z_{puce} = 30 - j144 \Omega$
b	9.6	
c	9	
d	5.4	
e	9.7	
L	8	
h	24	
n	6	
m	7	
w	1.7	

Table 4.1 – Paramètres géométriques de l'antenne méandre.

La figure 4.2 représente la conception de l'antenne dipôle méandre sous le logiciel CST

MWS ainsi que sa position dans le système de coordonnées cartésiennes.

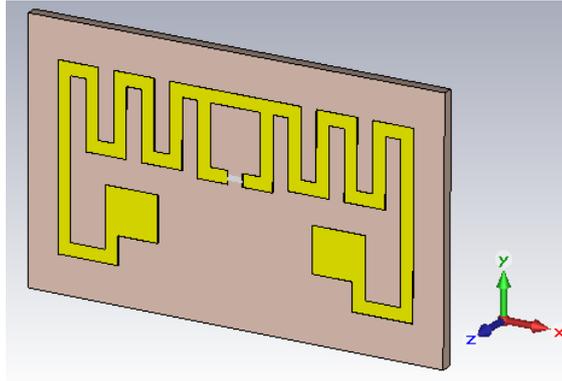


Figure 4.2 – Conception de l'antenne méandre sous CST.

4.2.2 Adaptation d'impédance

La figure 4.3 et la figure 4.4 montrent les résultats de simulation de l'impédance d'entrée de l'antenne proposée (variation de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence). A la fréquence de travail $f=915$ MHz, l'antenne présente une impédance d'entrée de $Z_{ant} = 30.73 + j143.67 \Omega$, ce qui permet d'avoir une bonne adaptation de cette impédance à l'impédance de la puce $Z_{puce} = 30 - j144 \Omega$.

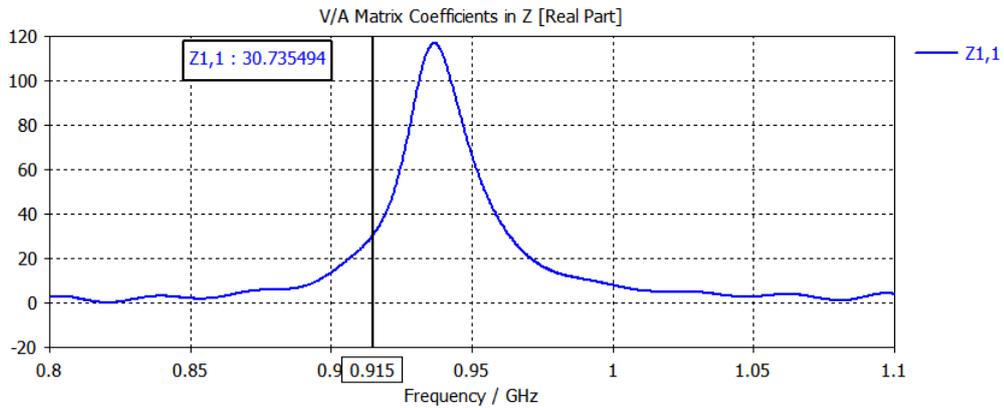


Figure 4.3 – Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne méandre.

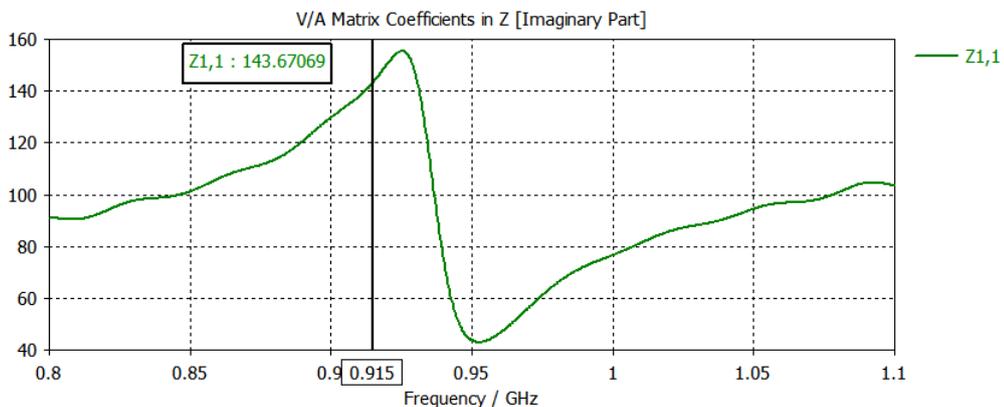


Figure 4.4 – Partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne méandre.

4.2.3 Coefficient de réflexion

La Figure 4.5 illustre le module du coefficient de réflexion $|S_{11}|$ de l'antenne dipôle méandre. Cette antenne résonne à la fréquence $f=915\text{MHz}$ avec un niveau de S_{11} de -47.39 dB ce qui prouve la bonne adaptation de l'impédance. La bande passante de cette antenne est étroite, elle est de 18 MHz [de 906 à 924 MHz].

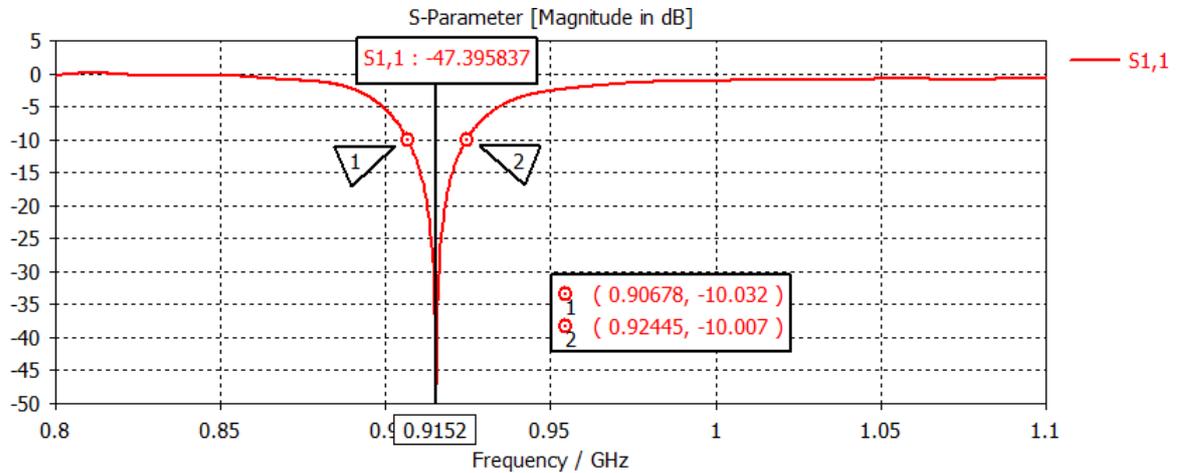


Figure 4.5 – Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne méandre.

4.2.4 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement 3D simulé de cette antenne est représenté sur la figure 4.6. L'antenne possède un diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans le plan $y-z$ ($\varphi = 90^\circ$). A la fréquence de 915 MHz , l'antenne présente un gain de 1.28 dB et une directivité de 1.82 dBi .

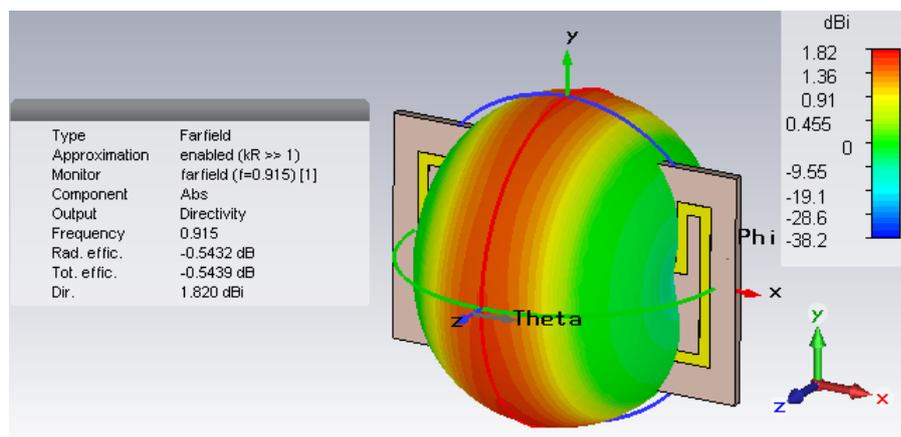


Figure 4.6 – Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne méandre.

La figure 4.7 illustre le diagramme de rayonnement 2D en coordonnées polaires simulé dans les deux plans $x-y$ et $y-z$. L'antenne dipôle méandre présente un rayonnement bidirectionnel dans le plan $x-y$ ($\theta = 90^\circ$) avec la présence des valeurs nulles dans les directions ($\varphi = 0, 180^\circ$), tandis que le rayonnement dans le plan $y-z$ ($\varphi = 90^\circ$) est omnidirectionnel.

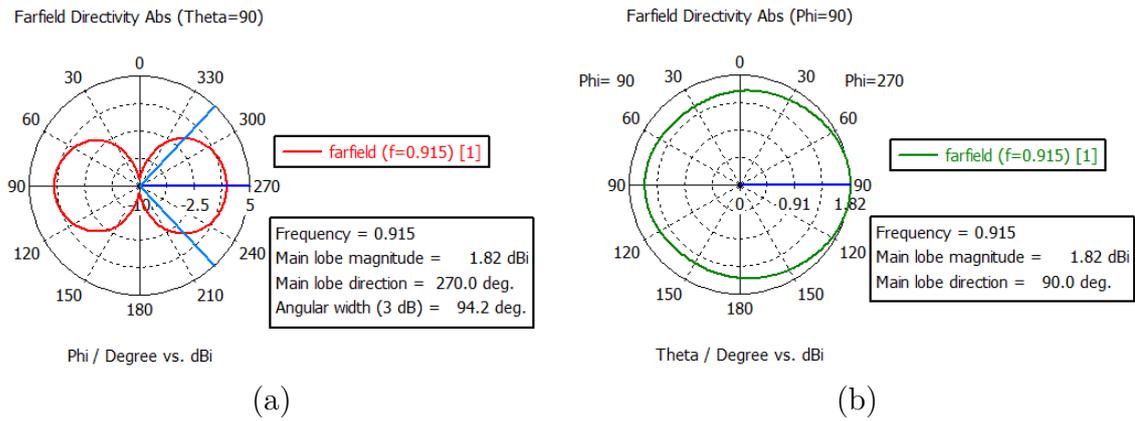


Figure 4.7 – Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne méandre
 (a) Plan horizontal ($\theta = 90^\circ$) (b) Plan vertical ($\varphi = 90^\circ$)

4.2.5 Réalisation et mesure de l'antenne méandre

La réalisation de cette antenne est représentée sur la figure 4.8. Le substrat utilisé est le FR4 epoxy, qui a une permittivité de 4,3 et une épaisseur de 1.52 mm.

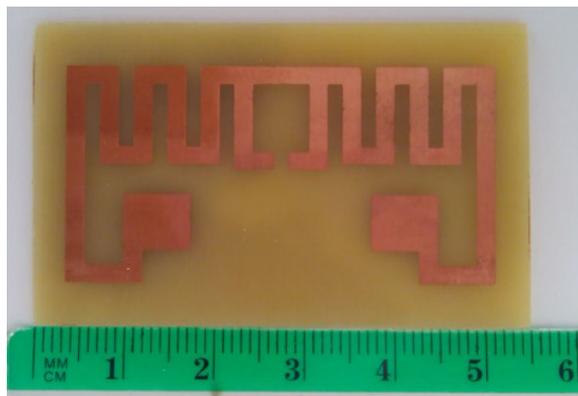


Figure 4.8 – Réalisation de l'antenne méandre.

Cette antenne a été réalisée dans le Laboratoire de Circuit imprimé de « Almitech », une société spécialisée dans la vente, la conception et la fabrication de matériel de sécurité électronique. Les mesures ont été faites chez « TALEB Mohamed Bachir », un expert dans la fabrication et les mesures d'antennes.

Les mesures sont faites à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel Anritsu S332E, d'un calibrage coaxial. La méthode de mesure est expliqué dans l'annexe B.

L'impédance d'entrée mesurée est montrée dans les figures 4.9 et 4.10, qui présentent une comparaison entre la mesure et la simulation de l'impédance d'entrée de l'antenne.

On observe un léger décalage entre la mesure et la simulation de l'impédance d'entrée de l'antenne.

A la fréquence de travail $f=915$ MHz, l'antenne présente une impédance d'entrée simulée de $Z_{ant\ simulée} = 30.73 + j143.67 \Omega$, alors que l'impédance d'entrée trouvée dans la mesure est de $Z_{ant\ mesurée} = 23,27 + j80,32 \Omega$, donc il ya un décalage de $Z \cong 7 + j63 \Omega$.

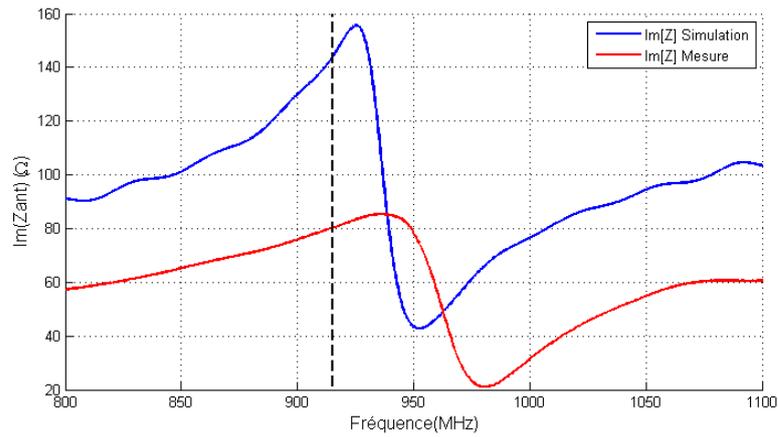


Figure 4.9 – Comparaison entre la partie imaginaire mesurée et simulée de l'impédance d'entrée.

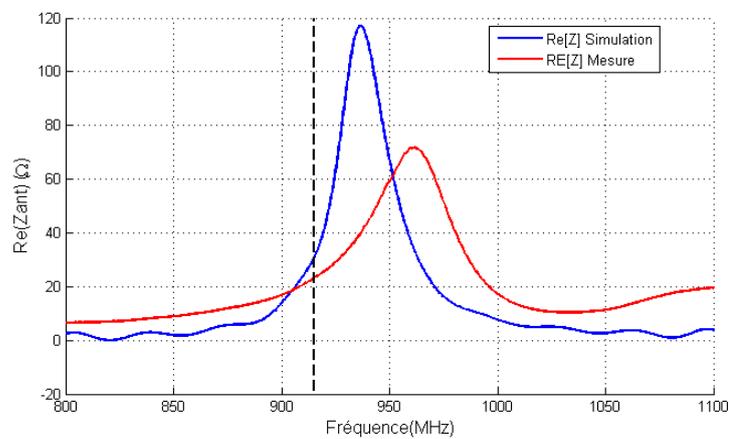


Figure 4.10 – Comparaison entre la partie réelle mesurée et simulée de l'impédance d'entrée.

Ce décalage entre la mesure et la simulation de l'antenne réalisée s'explique par l'incertitude des paramètres du substrat et du cuivre utilisés dans la réalisation. Il peut être également dû à l'incertitude sur la connexion du connecteur SMA au point d'alimentation de l'antenne et la qualité de la soudure (4.11). Aussi, d'après [24], le connecteur SMA peut modifier la réactance de l'antenne.

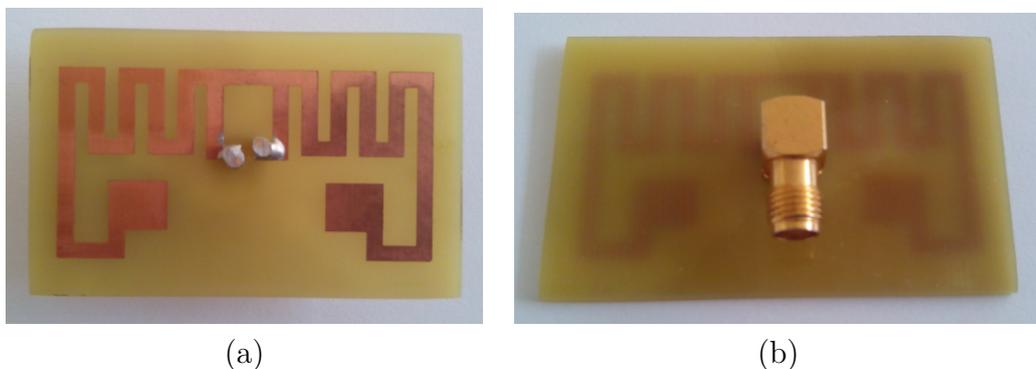


Figure 4.11 – La connexion du connecteur SMA au point d'alimentation de l'antenne.
 (a) vue de dessus (b) vue de dessous

Ce désaccord entre la mesure et la simulation de l'impédance d'entrée entraîne une désadaptation entre l'impédance d'entrée mesurée de l'antenne et l'impédance de la puce. La figure 4.12 illustre cette désadaptation par un mauvais coefficient de réflexion mesuré, sa valeur en module est de -5 dB avec un décalage en fréquence.

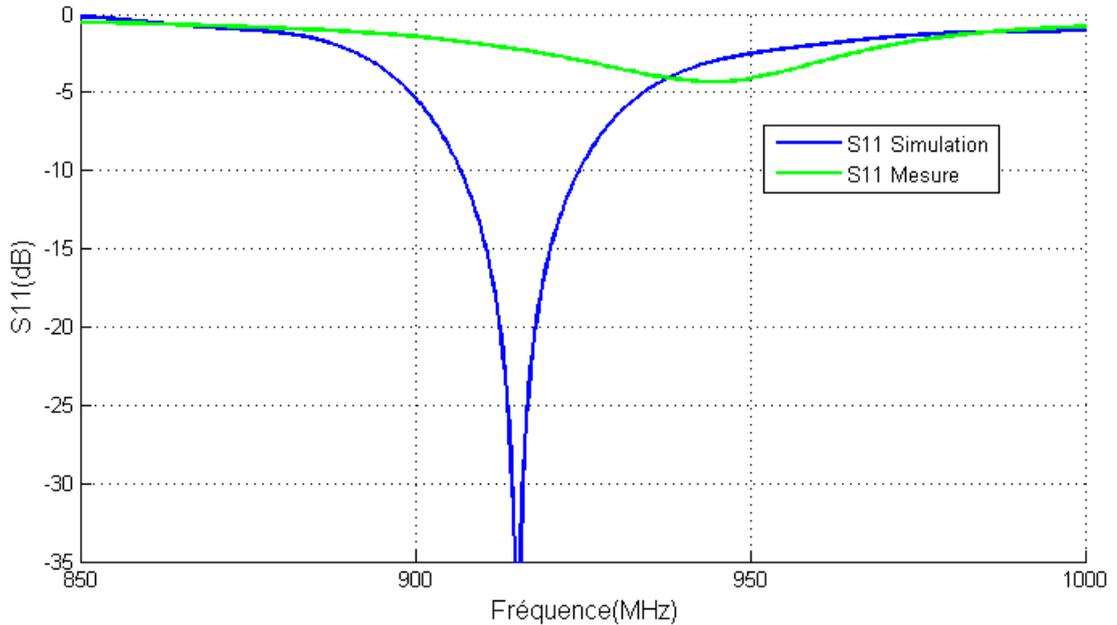


Figure 4.12 – Coefficient de réflexion S11 simulé et mesuré de l'antenne méandre.

4.3 Antenne patch

Il y a une forte demande dans de nombreux domaines industriels pour l'identification d'objet métallique (l'automobile, l'aéronautique, ...), cependant il existe une influence importante des matériaux et particulièrement des matériaux conducteurs situés dans le champ proche de l'antenne d'un tag RFID. Cette influence modifie les caractéristiques et les performances d'un tag. Le plan conducteur a pour effet de réduire l'impédance du tag [19].

Pour identifier des objets métalliques, ou ayant des surfaces conductrices, nous avons choisi de mettre en œuvre une antenne possédant un plan de masse, donc les caractéristiques de cette antennes ne seront pas modifiées par la présence des objets métalliques.

4.3.1 Géométrie d'antenne

La géométrie de l'antenne conçue est illustrée sur la figure 4.13. L'antenne a une taille $50 \times 50 \text{ mm}^2$.

Cette antenne est conçue pour travailler à la fréquence $f=2.45 \text{ GHz}$.

Les valeurs des paramètres utilisés dans la conception de cette antenne sont reportées dans le tableau 4.2. Cette antenne est conçue pour être adaptée à une puce qui a une impédance d'entrée $Z_{puce} = 30 - j206 \Omega$ à la fréquence de travaille $f=2.45 \text{ GHz}$.

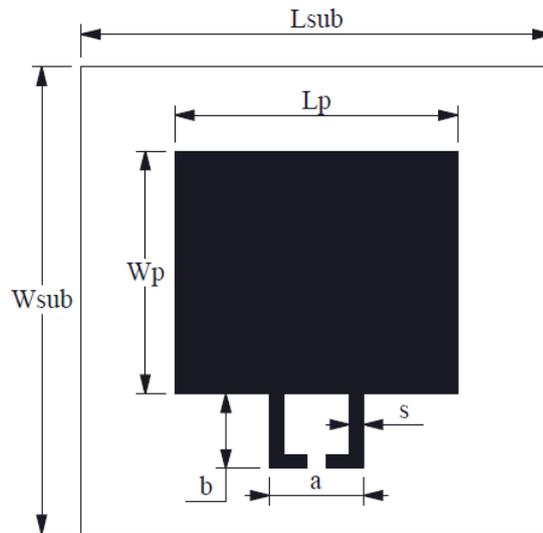


Figure 4.13 – Géométrie de l'antenne patch.

Variation	Valeurs (mm)	f=2.45 GHz
a	10	$Z_{puce} = 30 - j206 \Omega$
b	8	
s	1.5	
W_{stub}	50	
L_{stub}	50	
W_p	26	
L_p	30	

Table 4.2 – Paramètres géométriques de l'antenne patch

La figure 4.14 représente la conception de l'antenne patch sous le logiciel CST MWS ainsi que sa position dans le système de coordonnées cartésiennes.

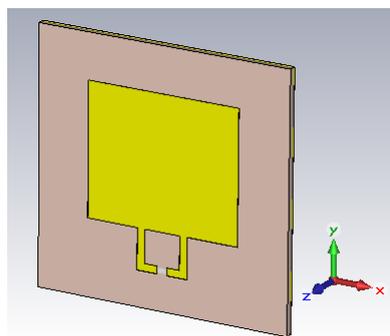


Figure 4.14 – Conception de l'antenne patch sous CST.

4.3.2 Adaptation d'impédance

Les variations de l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence de l'antenne patch sont représentées sur les figures 4.15 et 4.16 .

Pour $f=2.45$ GHz, cette antenne présente une impédance d'entrée $Z_{ant} = 30.03 + j206.13 \Omega$, donc elle est bien adaptée à l'impédance de la puce $Z_{puce} = 30 - j206 \Omega$

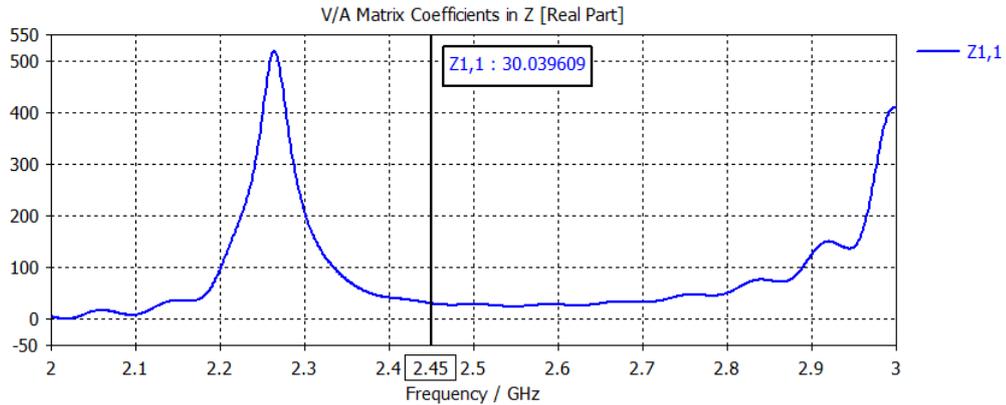


Figure 4.15 – Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne patch.

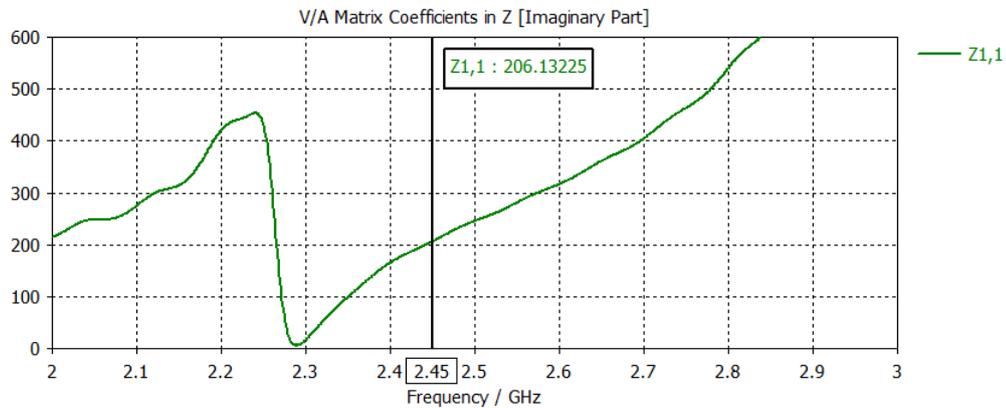


Figure 4.16 – Partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne patch.

4.3.3 Coefficient de réflexion

Le module du coefficient de réflexion de l'antenne patch est illustré dans la figure 4.17.

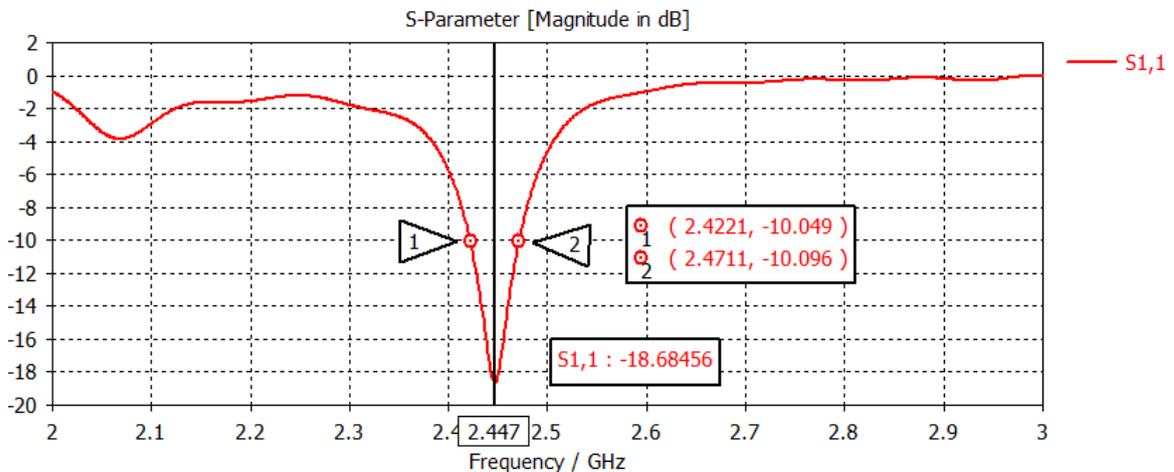


Figure 4.17 – Coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch.

Sa valeur à 915MHz est de -18 dB. La bande passante est de 49 MHz , allant de $f=2.422$ GHz à $f=2,471$ GHz.

4.3.4 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne simulé est montré dans la figure 4.18. Le diagramme de rayonnement obtenu est directif avec une directivité de 6.17 dBi. A la fréquence $f=2.45$ GHz, l'antenne présente et un gain de 3.88 dB.

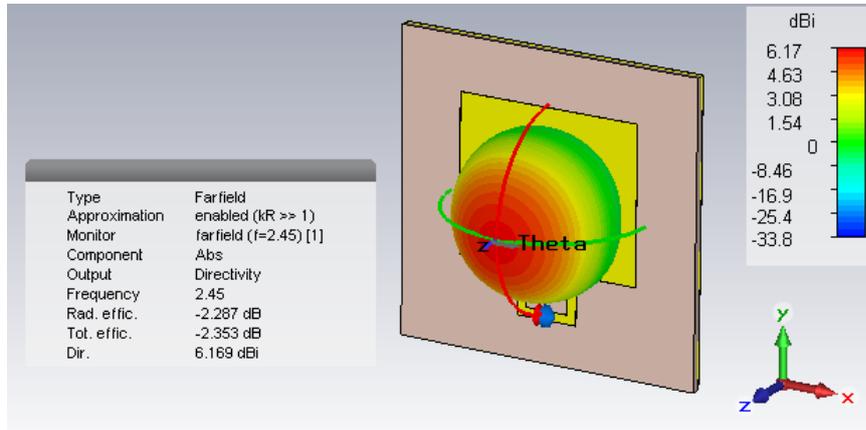


Figure 4.18 – Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne patch.

La figure 4.19 illustre le diagramme de rayonnement 2D en coordonnées polaires simulé dans les deux plans x-z et y-z.

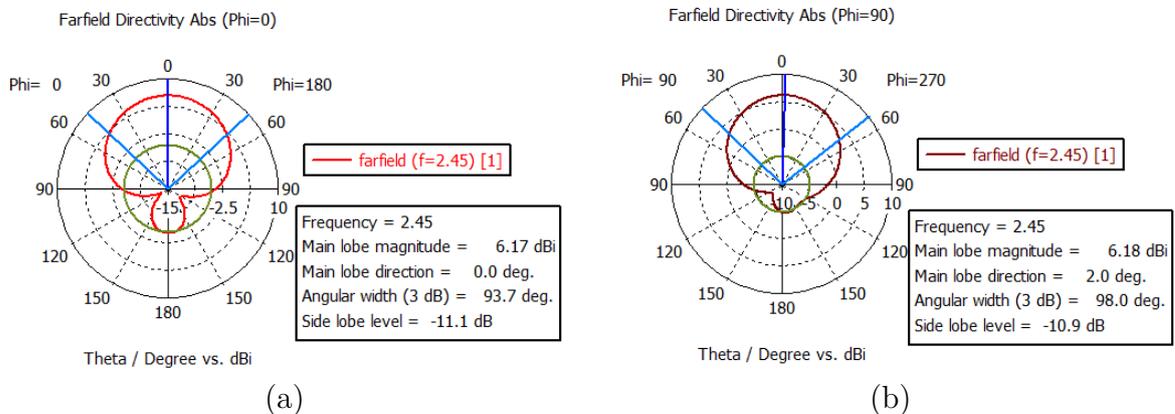


Figure 4.19 – Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne patch
 (a) Plan vertical ($\varphi = 0^\circ$) (b) Plan vertical ($\varphi = 90^\circ$)

L'antenne patch présente un rayonnement directif dans les deux plan x-z ($\varphi = 0^\circ$) et y-z avec un angle d'ouverture de 93.7° dans le plan x-z et 98° dans le plan y-z ($\varphi = 90^\circ$).

4.4 Antenne fractale

Les antennes fractales offrent une solution compacte, à faible coût pour une multitude d'applications RFID.

Pour les antennes dipôles, il y a beaucoup de géométries fractales qui peuvent être utilisées pour réduire la taille de l'antenne dont la forme de Koch.

4.4.1 Géométrie d'antenne

Une antenne dipôle fractale avec une géométrie de Koch d'ordre 3 appliquée sur les deux bras du dipôle est représentée sur la figure 4.20.



Figure 4.20 – Antenne dipôle fractale de forme de Koch d'ordre 3 [32].

Pour adapter cette antenne à l'impédance de la puce on peut utiliser le principe qui revient à positionner un élément conducteur en parallèle avec l'antenne fractale. En optimisant la distance entre cet élément et l'antenne, il est possible d'obtenir une adaptation à l'impédance complexe de la puce comme illustre la figure 4.21.

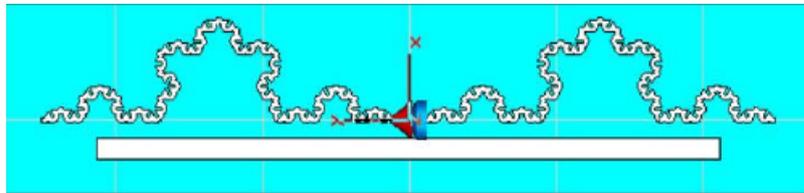


Figure 4.21 – Adaptation d'une antenne fractale à l'impédance d'une puce RFID [33].

Dans la conception de notre antenne, on a fait l'adaptation en déplaçant le point d'alimentation de l'antenne fractale par l'utilisation de deux bras verticaux. On a pu faire l'adaptation en optimisant la longueur de ces deux bras.

La géométrie de l'antenne conçue est illustrée sur la figure 4.22. L'antenne a une taille $48 \times 20 \text{ mm}^2$. Cette antenne est conçue pour travailler à la fréquence $f=2.45 \text{ GHz}$.

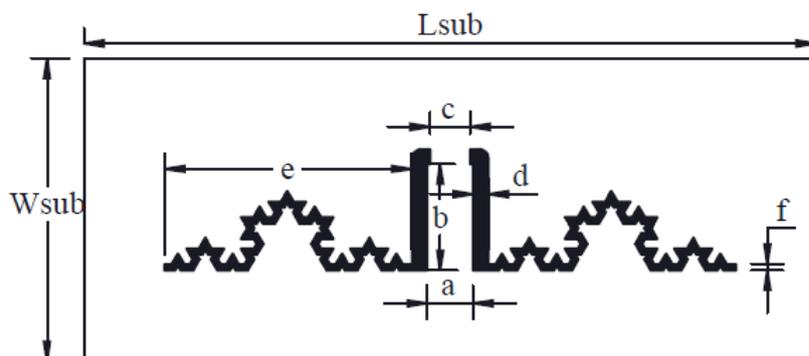


Figure 4.22 – Géométrie de l'antenne fractale.

Les valeurs des paramètres utilisés dans la conception de cette antenne sont reportées dans le tableau 4.3. Cette antenne est conçue pour être adaptée à une puce qui a une impédance d'entrée $Z_{puce} = 71 - j130 \Omega$ à la fréquence de travail $f=2.45 \text{ GHz}$.

Variables	Valeurs (mm)	f=2.45 GHz
a	3	$Z_{puce} = 71 - j130 \Omega$
b	7	
c	2.6	
d	1	
e	16.2	
f	0.4	
W_{sub}	20	
L_{sub}	48	

Table 4.3 – Paramètres géométriques de l'antenne fractale.

La figure 4.23 représente la conception de l'antenne Fracatle sous CST MWS ainsi que sa position dans le système de coordonnées cartésiennes.

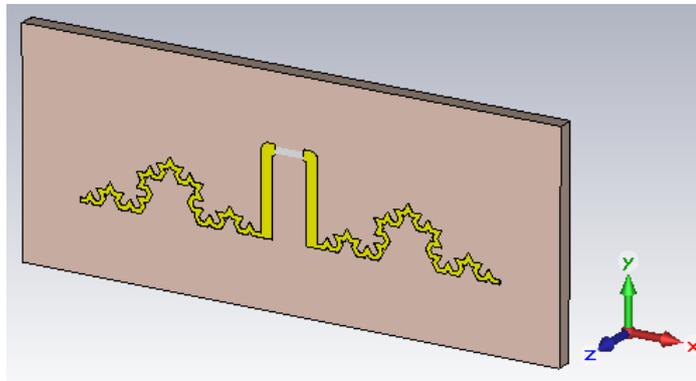


Figure 4.23 – Conception de l'antenne fractale sous CST.

4.4.2 Adaptation d'impédance

La variation de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence sont représentés dans la figure 4.24 et la figure 4.25 respectivement. L'antenne présente une impédance d'entrée $Z_{ant} = 71.85 + j131.29 \Omega$ pour $f=2.45$ GHz, donc elle est bien adapter à l'impédance de la puce $Z_{puce} = 71 - j130 \Omega$.

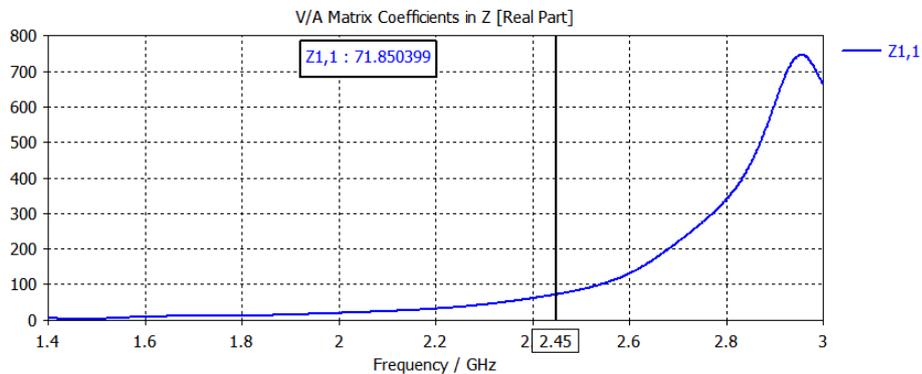


Figure 4.24 – Partie réelle de l'impédance d'entrée de l'antenne fractale.

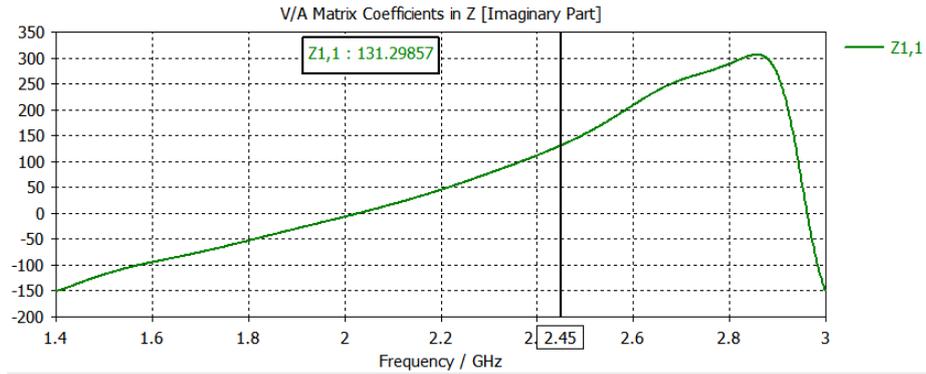


Figure 4.25 – Partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne fractale.

4.4.3 Coefficient de réflexion

Le module du coefficient de réflexion $|S_{11}|$ de l'antenne fractale est représenté sur la figure 4.26.

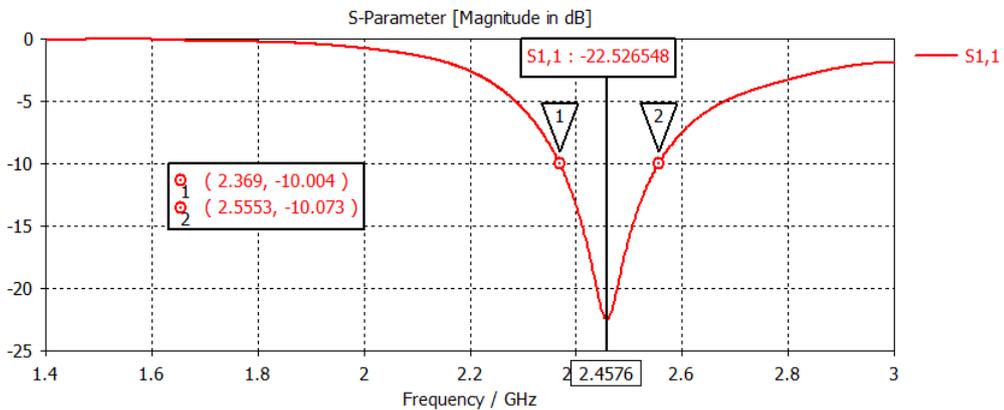


Figure 4.26 – Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne fractale.

On peut voir sur cette figure qu'une adaptation de -22 dB à la fréquence de 2.45 GHz est obtenue avec une bande passante relativement large de 186 MHz entre 2.369 GHz et 2.555 GHz.

4.4.4 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement 3D de cette antenne est illustré sur la figure 4.27. A la fréquence de 2.45 GHz, l'antenne présente un gain de 1.81 dB et une directivité de 2.07 dBi.

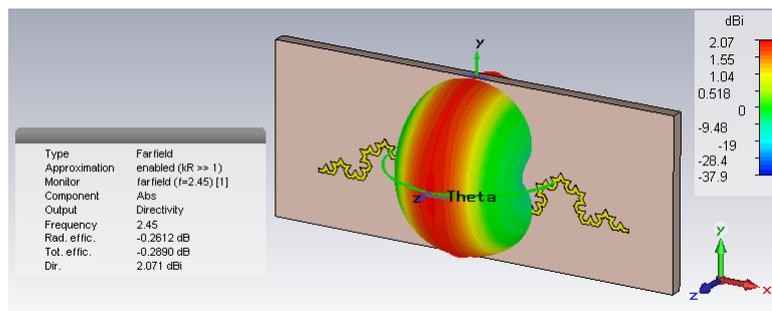


Figure 4.27 – Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne fractale.

La figure 4.28 illustre le diagramme de rayonnement en 2D et en coordonnées polaires simulé dans les deux plans x-y et y-z.

L'antenne fractale présente un rayonnement bidirectionnel dans le plan x-y ($\theta = 90^\circ$) et un rayonnement omnidirectionnel dans le plan y-z ($\varphi = 90^\circ$).

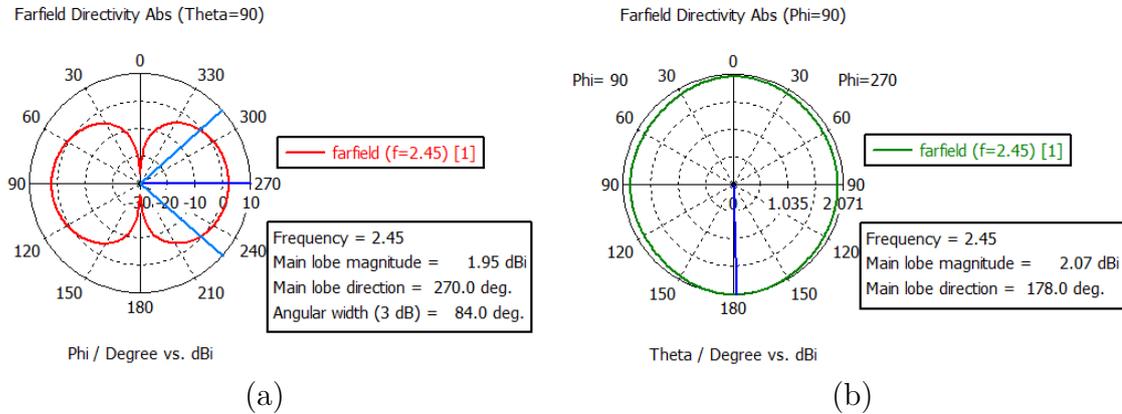


Figure 4.28 – Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne fractale
 (a) Plan horizontal ($\theta = 90^\circ$) (b) Plan vertical ($\varphi = 90^\circ$)

4.5 Conclusion

Ce dernier chapitre a été entièrement dédié à la conception d'antennes pour tags RFID UHF passifs. La conception de ces antennes est différente de la conception des antennes conventionnelles, ce sont des antennes adaptées à des puces qui ont des impédances d'entrée complexes passives.

On a présenté trois structures d'antennes, deux antennes dipôles; méandre et fractale caractérisées par leur diagramme de rayonnement omnidirectionnel; et une antenne patch caractérisé par son diagramme de rayonnement directif et son immunité face à l'influence des objets métalliques.

Nous avons présenté aussi la réalisation de l'antenne méandre et les résultats des mesures, en expliquant le désaccord des résultats entre la simulation et la mesure.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le contexte de l'identification Radiofréquence (RFID) dans la bande des Ultra Haute Fréquences UHF. L'objectif de ce mémoire consiste à étudier le fonctionnement d'un système RFID passif dans la bande UHF et de concevoir des antennes imprimées pour l'identification RFID.

La technologie RFID ou l'identification par radiofréquence est un sous domaine de l'ensemble des technologies d'identification et acquisition de données automatiques connue sous le vocable anglais AIDC (Automatic Identification Data Capture). Ces technologies sont des systèmes sans fil permettant une lecture d'information sans contact.

Le développement du marché de la RFID connaît un grand essor en UHF et microondes. Ces bandes de fréquences autorisent des distances de communication importantes de plusieurs mètres et la bande UHF semble s'imposer comme une référence.

La conception d'un tag RFID évolue à travers une étape d'intégration de l'antenne, fonctionnant en réflexion, à la puce électronique. Cela implique que l'antenne et la puce doivent être adaptées en impédance.

De plus, les fréquences de communication en UHF impliquent des longueurs d'antennes de l'ordre de 15 cm ($900\text{MHz} \Rightarrow \lambda/2 \cong 15\text{cm}$), taille trop grande pour une intégration dans une étiquette de petite taille. Il est donc nécessaire de miniaturiser la taille de l'antenne (qui occupe une grande partie de la surface du tag).

Il existe différentes méthodes de réduction de la taille d'antennes : géométries fractales, dipôles repliés... À ce jour, la configuration d'antenne repliée reste la plus performante en termes de réduction de taille.

On peut diviser ce travail qui nous a permis d'étudier l'état de l'art de la technologie RFID, ainsi que les différents travaux qui ont été réalisés dans ce domaine en deux parties :

- * Une première partie (chapitres 1,2 et 3) était consacrée à une présentation générale de la technologie RFID. Une étude détaillée sur les antennes intégrant cette technologie est exposée. On a introduit aussi les différentes méthodes de miniaturisation d'antennes et d'adaptation d'impédance.
- * L'étude que nous avons faite, nous a permis d'entamer une deuxième partie (chapitre 4), et de faire la conception et la simulation de quelques antennes miniatures pour les tags RFID UHF passifs.

Le problème rencontré dans ce projet est la manière dont on doit procéder pour mesurer les performances des antennes (l'impédance d'entrée et le coefficient de réflexion). On a utilisé une méthode simple qui consiste à connecter un connecteur SMA au point d'alimentation de l'antenne et faire des mesures avec un analyseur de réseau vectoriel après l'avoir calibré.

Une réalisation d'antenne a été faite afin de vérifier les résultats de simulation. Nous avons comparé la mesure et la simulation et avons remarqué un décalage entre les deux en ce qui concerne la mesure de l'impédance d'entrée. Nous avons mis en évidence les incertitudes de mesures et leur avons attribué ce décalage dans les résultats.

La technologie RFID promet de devenir omniprésente à l'avenir, par conséquent, plusieurs axes de recherches peuvent en découler :

- * La technologie RFID SHF.
- * La miniaturisation des antennes RFID.
- * Les tags multi-antennes.
- * La localisation avec la RFID.
- * L'intégration des capteurs dans les étiquettes RFID.
- * La RFID ULB.

Pour conclure, nous pouvons dire que les technologies du RFID se développent très rapidement en affectant de nouvelles applications. 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 radioélectriques.

Annexe A

Présentation du CST MWS 2014

A.1 Présentation du logiciel

CST MICROWAVE STUDIO est un logiciel complet pour l'analyse et la conception électromagnétique dans la gamme des hautes fréquences. Il simplifie la conception des structures en fournissant des solides 3D pour modéliser chaque élément (Figure A.1).

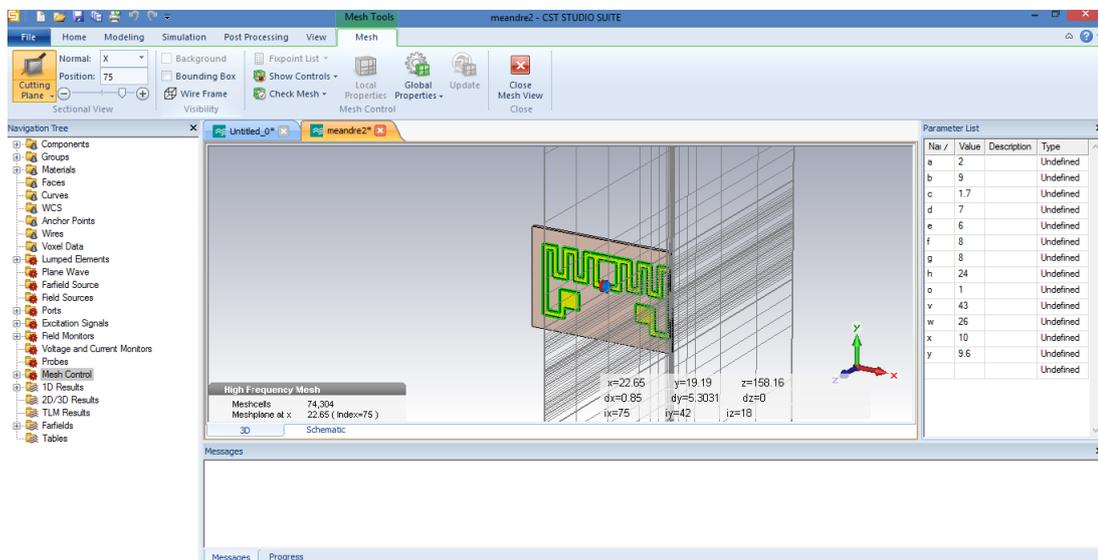


Figure A.1 – L'interface principale de CST MWS 2014

CST MWS fait partie de la suite CST Design Studio, il offre un certain nombre de solveurs différents, applicables sur une multitude de domaines. Etant donné qu'aucune des méthodes d'analyse ne fonctionne aussi bien dans tous les domaines d'applications, le logiciel contient six solveurs ou techniques de simulations différentes pour mieux répondre à ces applications particulières :

- Solveur temporel (Time Domain Solver) 
- Solveur fréquentiel (Frequency Domain Solver) 
- Solveur Integral (Integral Equation Solver) 
- Solveur eigenmode (Eigenmode Solver) 
- Solveur multicouche (Multilayer Solver) 
- Solveur asymptotique (Asymptotic Solver) 

Le solveur le plus flexible et le plus adapté aux antennes est le solveur temporel (Time Domain Solver) , permettant de faire la simulation d'une large bande de fréquences simultanément dans la même tentative de calcul. (Contrairement à un grand nombre de simulateurs ou solveurs qui utilisent l'approche par pas de fréquence). Il est basé sur la technique d'intégration finie (FIT).

Les points importants pour la réalisation d'une simulation exploitable sont principalement le réglage du maillage qui est déterminé par la maille élémentaire, le réglage de la précision de convergence du calcul ainsi que le choix des ports pour l'injection du signal d'excitation de la structure.

Le choix du maillage (figure A.2) est primordial et peut engendrer des résultats complètement erronées dans le cas où on le néglige. Plus le pas à considérer dans le maillage est petit, plus les résultats obtenus sont meilleurs au détriment d'un temps de calcul plus long.

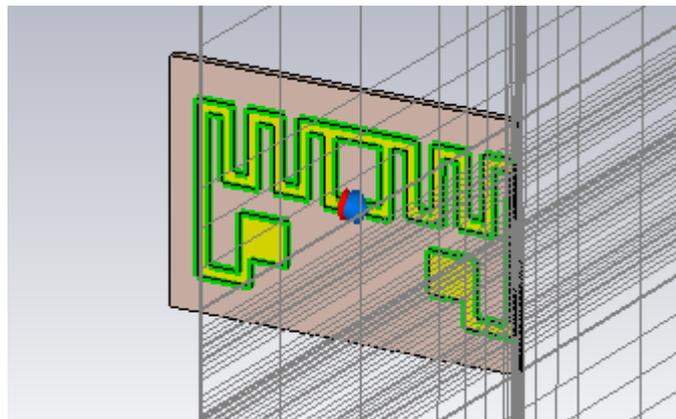


Figure A.2 – Exemple de maillage d'une antenne sous CST

Le signal d'excitation du CST simulé peut être injecté à travers deux types d'alimentation, une alimentation par onde électromagnétique à travers un guide d'onde dite «waveguide port», ou à travers une alimentation discrète dite «discrete port» (figure A.3).

Le port noté « wave guide » correspond à l'injection d'une onde électromagnétique. Quant à lui le port noté « discrete port » est semblable à une source de tension de courant ou plutôt d'impédance permettant l'injection d'un signal haute fréquence.

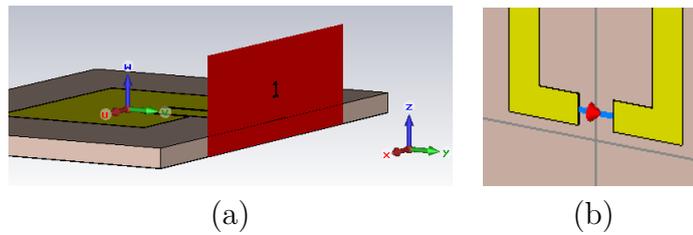


Figure A.3 – Signaux d'excitation sous CST : (a) Alimentation «waveguide port»
(b) Alimentation «discrete port»

A.2 Méthode de conception d'une antenne pour Tag RFID sous CST

Après avoir lancé le CST STUDIO SUITE, nous choisissons un nouveau projet (Create a new project). Nous serons invités à sélectionner une plateforme (figure A.4) pour une structure qui est la plus proche de notre but .

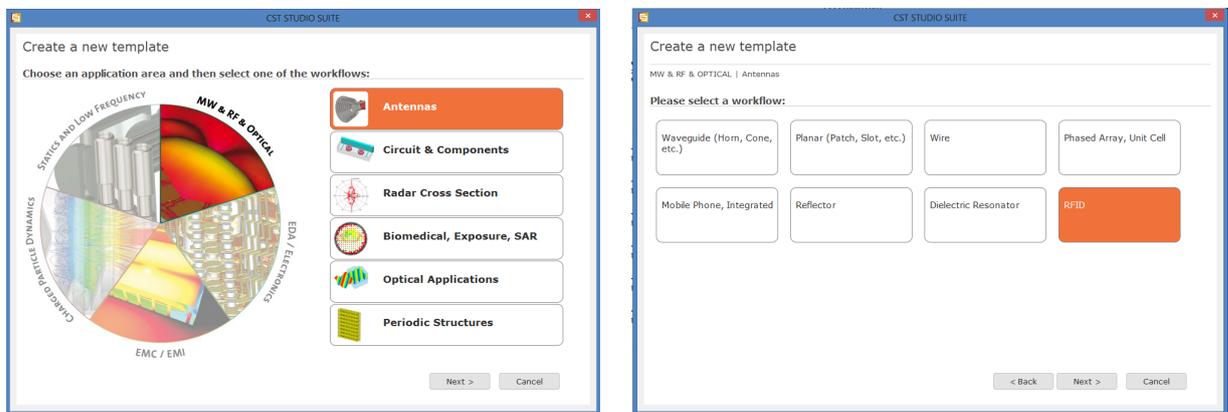


Figure A.4 – Choisir la plateforme convenable à notre projet

Puis on choisit le solveur qui convient à notre domaine, deux solveurs sont recommandés, le solveur fréquentiel et le solveur temporel, on choisit ce dernier. Ensuite, on définit les unités de l'ensemble des paramètres comme les dimensions, les fréquences, le temps et la température pour le problème à traiter (figure A.5).

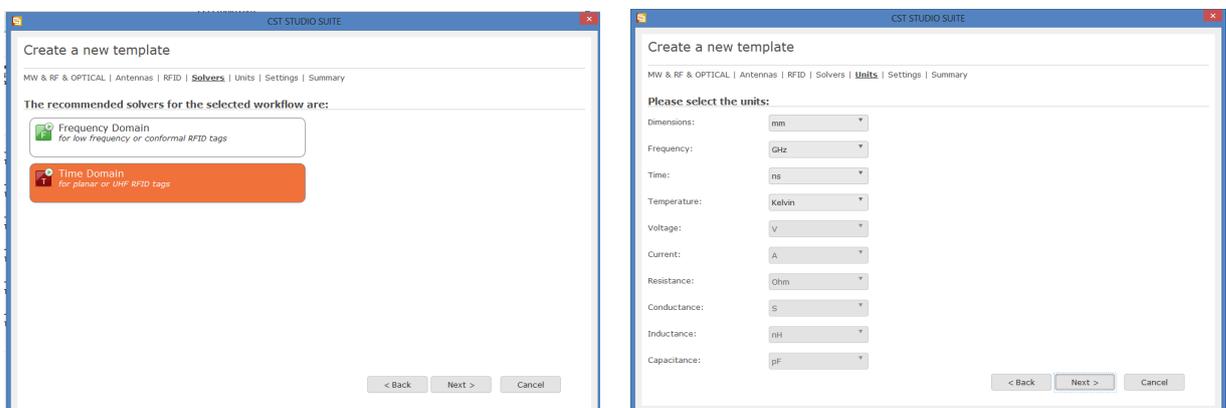


Figure A.5 – Choix du solveur et définition des unités

Par la suite, on doit choisir la bande de fréquence nécessaire afin d'optimiser le temps de calcul et pour que le générateur de maillage ajustera le raffinement du maillage selon la plage spécifiée (figure A.6.a). Un récapitulatif de nos choix apparaît par la suite (figure A.6.b).

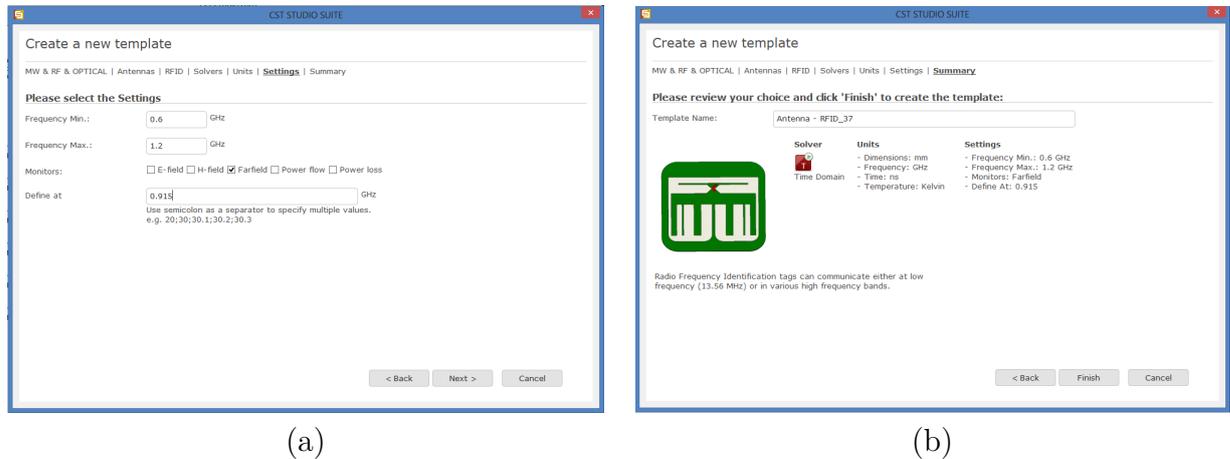


Figure A.6 – (a) Choix de la plage de fréquence. (b) Résumé de nos choix

Après l'apparition de l'interface de travail de CST MWS, on définit notre structure d'antenne et on la conçoit en utilisant plusieurs formes géométriques (figure A.7) qui sont mises à notre disposition (Les cubes, les cylindres, les sphères, etc).



Figure A.7 – Formes géométriques disponibles sous CST MWS.

Afin d'exciter notre antenne pour pouvoir analyser son comportement et obtenir les résultats de simulation, on fait appel au deuxième type d'alimentation qui est l'alimentation par port discret (voir figure A.3.b).

Dans les logiciels de simulation électromagnétiques tels que CST, le port d'alimentation ne peut avoir qu'une partie réelle, généralement elle est de 50Ω .

Après avoir défini tous les paramètres nécessaires, on lance notre simulation en utilisant le solveur temporel.

Nous pouvons accéder aux résultats des différents calculs et récupérer les données de sortie obtenues dans la partie « 1D Results ».

Pour voir les variations de l'impédance d'entrée de l'antenne simulée, on peut les trouver dans la partie 1D Results => Z Matrix, on aura les variations de la partie réelle et imaginaire de l'impédance d'entrée.

Pour avoir l'impédance d'entrée souhaitée pour une meilleure adaptation avec l'impédance de la puce, on fait varier les paramètres utilisés dans la conception de notre antenne et on simule à chaque fois jusqu'à l'obtention de l'impédance désirée $Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant}$ à

la fréquence de travail choisit.

Pour visualiser les variations du module du coefficient de réflexion $|S_{11}|$, il faut exciter l'antenne par un port discret complexe qui représente l'impédance d'entrée de la puce $Z_{puce} = R_{ant} - jX_{ant}$. Vu que le port d'alimentation ne peut avoir qu'une partie réelle R_{ant} , et pour pouvoir modéliser la partie imaginaire X_{ant} du port, on utilise un élément localisé représenté par un condensateur de capacité C_s en série avec le port discret comme illustre les figures A.8 et A.9. La valeur de C_s est calculée en utilisant la relation (2.20).

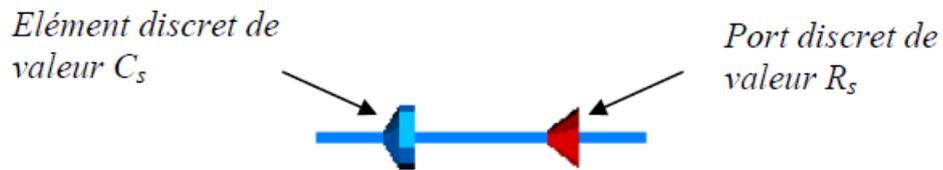


Figure A.8 – Représentation sous CST MWS de la puce RFID.

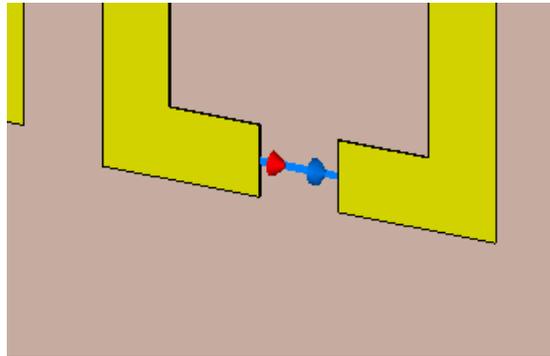


Figure A.9 – Alimentation par un port complexe.

Annexe B

Méthode de Mesure de l'impédance des antennes de tags RFID

Les performances d'un tag RFID UHF dépendent des performances de l'antenne, de la puce et surtout de l'adaptation d'impédance entre la puce et l'antenne. La conception d'une antenne nécessite donc la mesure de son impédance. Le problème majeur réside dans l'alimentation de l'antenne.

Pour la mesure de l'impédance de ces antennes, il existe plusieurs méthodes, les plus utilisées sont :

- La mesure d'impédance à l'aide d'un balun qui permet de résoudre le problème de symétrie lié à l'alimentation par un câble coaxial.
- La mesure d'impédance d'une demi-antenne sur un plan conducteur.

B.1 La mesure d'impédance à l'aide d'un balun

Un « balun » est un transformateur qui permet de transformer un mode asymétrique en un mode symétrique. Il est employé pour changer un signal référencé à une masse en un signal symétrique ayant des potentiels égaux par rapport à la masse mais opposés. Le problème posé par l'alimentation d'une antenne ayant un port symétrique par une alimentation asymétrique est illustré sur la figure B.1.

Sur cette figure, un câble coaxial est relié à une antenne dipôle. Pour qu'une antenne dipôle fonctionne correctement, les courants sur les deux bras du dipôle doit être égaux en amplitude. Cependant Lorsque'un câble coaxial est connecté directement à une antenne dipôle, les courants ne sont pas nécessairement égaux.

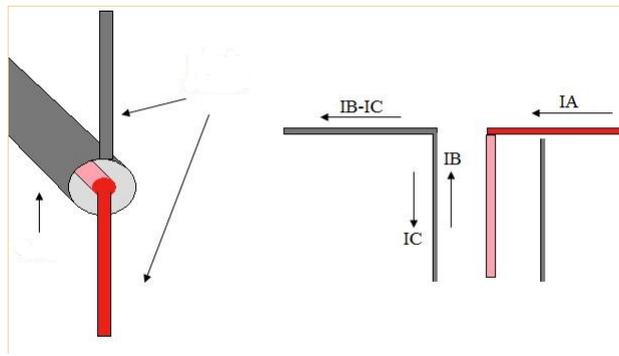


Figure B.1 – Une ligne de transmission asymétrique (câble coaxial) connecté à une antenne dipôle [36].

Le courant le long d'un câble coaxial est généralement de même ordre de grandeur sur les conducteurs interne et externe. Lorsqu'un câble coaxial est connecté à une antenne dipôle, le courant (I_A) sur le conducteur central va totalement circuler le long du bras de dipôle. Cependant, le courant qui se déplace le long de la face interne du conducteur externe (I_B) peut emprunter deux chemins différents : il peut se déplacer vers le deuxième bras de l'antenne dipôle, ou vers le côté externe du conducteur extérieur du câble coaxial (courant I_C). Idéalement, le courant I_C devrait être égal à zéro.

Le courant de fuite (I_C) peut être diminué en utilisant un balun. Il existe différents types de baluns permettant le passage d'une ligne de transmission asymétrique en une ligne de transmission symétrique.

B.2 La mesure d'impédance sur un plan conducteur

Cette méthode fait appel à la théorie des images. Le dispositif de mesure est illustré sur la figure B.2.

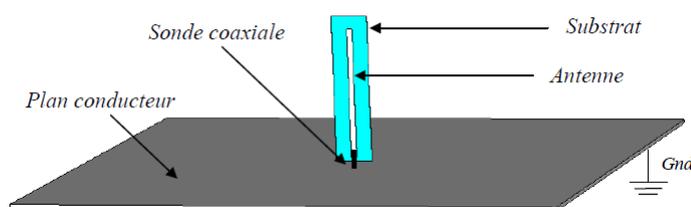


Figure B.2 – Dispositif de mesure d'impédance sur un plan conducteur[19].

Une moitié de l'antenne est connectée à un plan conducteur. Elle est alimentée par une sonde coaxiale à travers ce plan. D'après la théorie des images, pour un plan conducteur infini, l'impédance vue au niveau de la connexion de l'antenne est égale à la moitié de l'impédance de la structure totale.

L'un des principaux problèmes posé par cette méthode de mesure est le positionnement de l'antenne à la bonne hauteur par rapport au plan de masse.

B.3 Mesure de l'impédance d'entrée de l'antenne réalisée dans ce mémoire

Pour mesurer l'impédance de l'antenne réalisée dans ce mémoire, on a utilisé la méthode directe, qui consiste à connecter un connecteur SMA au point d'alimentation de l'antenne comme illustre la figure B.3

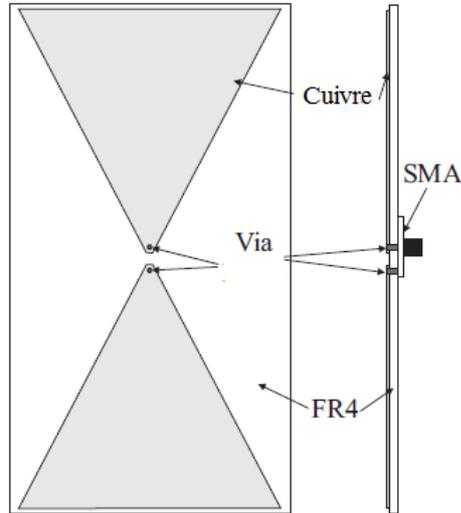
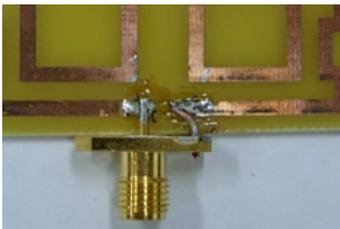


Figure B.3 – Antenne dipôle connectée avec un connecteur SMA [24].

Cette méthode a été adoptée dans plusieurs références [24],[26],[27] et [28](figure B.4). La figure B.5 montre l'utilisation de cette méthode pour la mesure de l'impédance d'entrée de l'antenne réalisée.

Une comparaison entre cette méthode et les deux autres méthodes qui consistent à utiliser un « balun » ou un plan conducteur a montré que la marge d'erreur de l'impédance d'entrée mesurée est relativement petite comme montre l'article [24] et [25].



[26]



[27]



[28]

Figure B.4 – Photos de la méthode adoptée dans plusieurs références

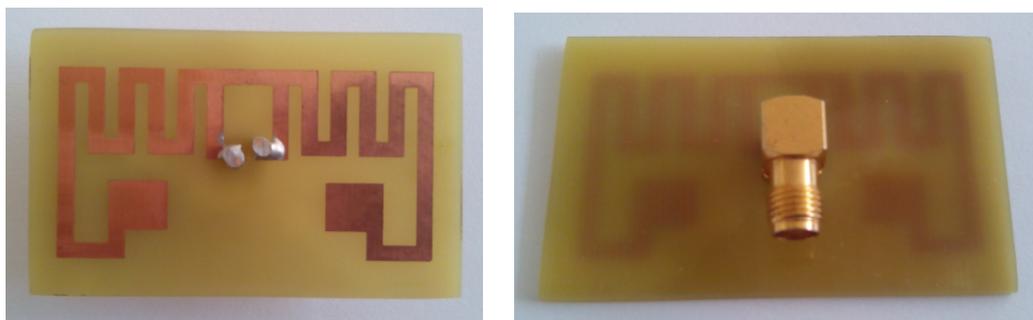


Figure B.5 – Méthode adoptée dans la mesure de l'antenne réalisée

La mesure de l'impédance d'une antenne peut donc être réalisée en calibrant l'analyseur de réseau vectoriel à l'aide de charges standards calibrées en sortie du câble coaxial afin de ramener le plan de référence au plan de mesure comme illustre la figure B.6



Figure B.6 – Calibrage de l'analyseur de réseau vectoriel à l'aide de charges standards

Le banc de mesure est illustré sur la figure B.7.



Figure B.7 – Banc de mesure de l'antenne réalisée

L'analyseur de réseau vectoriel permet de visualiser les résultats de mesure de l'impédance et du coefficient de réflexion de l'antenne à une fréquence désirée et aussi la visualisation de l'abaque de Smith de cette mesure normalisée par rapport à $Z_0 = 50 \Omega$.

Pour trouver les résultats de mesure adaptés par rapport à l'impédance de la puce Z_{puce} , on a utilisé le logiciel Matlab (figure B.8) en développant une application qui fait le calcul intermédiaire en utilisant l'équation (B.4).

B.4 Le calcul de S_{11} normalisé par rapport à Z_{puce}

Soit :

- S_{11} : Coefficient de réflexion normalisé par rapport à Z_{puce} .

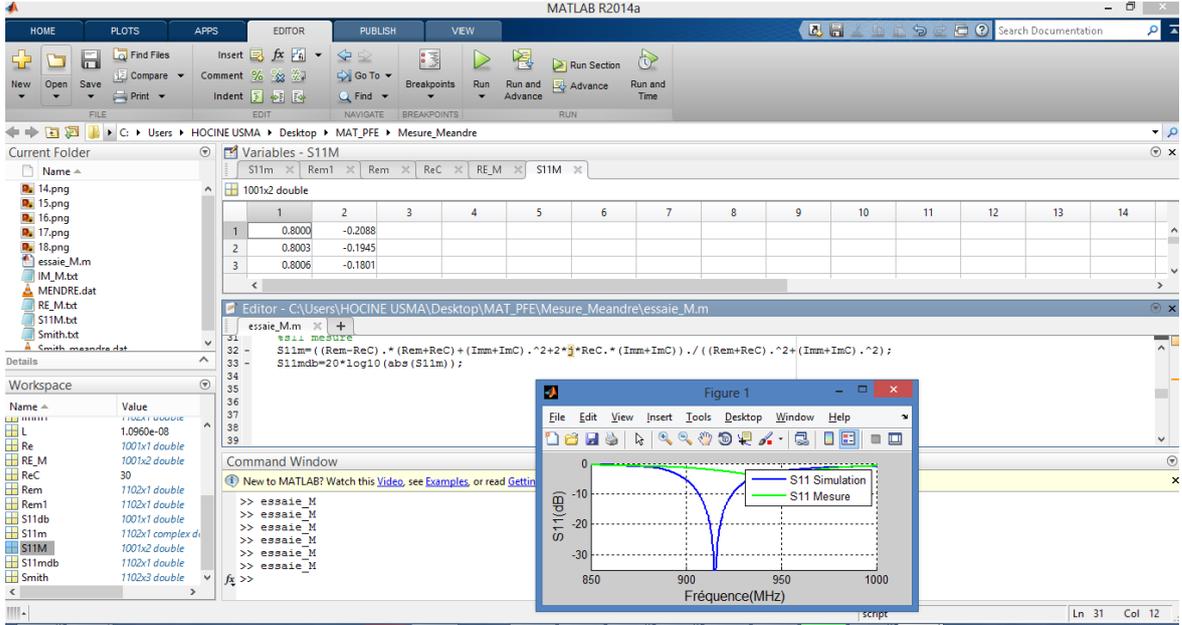


Figure B.8 – Utilisation de Matlab pour le calcul de S_{11} mesuré

On a :

$$S_{11} = \frac{Z_{ant} - Z_{puce}^*}{Z_{ant} + Z_{puce}} \quad (B.1)$$

Avec

- * Z_{ant} l'impédance d'entrée mesurée de l'antenne dipôle :

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} \quad (B.2)$$

- * Z_{puce} l'impédance de la puce :

$$Z_{puce} = R_{puce} + jX_{puce} \quad (B.3)$$

En remplaçant les équations (B.2) et (B.3) dans l'équation (B.1) on trouve :

$$S_{11} = \frac{[(R_{ant} - R_{puce})(R_{ant} + R_{puce}) + (X_{ant} + X_{puce})^2] + j[2.R_{puce}(X_{ant} + X_{puce})]}{(R_{ant} + R_{puce})^2 + (X_{ant} + X_{puce})^2} \quad (B.4)$$

Bibliographie

- [1] Rabia AkSAS." Télécommunications Antennes Théorie et Applications ", ELLIPSES, Novembre 2013.
- [2] Constantine A. Balanis." Antenna Theory Analysis And Design ".3rdEd, John Wiley & Sons, 2005.
- [3] Claude TETELIN ." Systèmes et techniques RFID ", Techniques de l'ingénieur, e1470, Novembre 2010.
- [4] Fatima Zahra MAROUF."Etude et conception d'Antennes imprimées pour identification Radio fréquences RFID UHF", thèse de doctorat.
- [5] Klaus Finkenzeller." RFID Handbook : Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication ", 3rd Edition, Wiley, June 2010.
- [6] Dominique Paret." RFID en ultra et super hautes fréquences UHF-SHF : Théorie et mise en oeuvre ", Dunod, Paris, 2008.
- [7] Gaetano Marrocco."The Art of UHF RFID Antenna Design : Impedance-Matching and Size-Reduction Techniques", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 50, N° 1, pp. 66-79 February 2008.
- [8] PAULIN ILUNGA KATAMBA." Technologie RFID (Radio Frequency Identification) : Concepts et Stratégie de Mise en Oeuvre ".
- [9] Daniel M. Dobkin ."The RF in RFID : Passive UHF RFID in Practice", Elsevier-Newnes - Second Edition 2012.
- [10] G. Marrocco, "RFID Antennas for the UHF Remote Monitoring of Human Subjects," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-55, 6, June 2007, pp. 1862-1870.
- [11] Delphine Béchevet." Contribution au développement de tag RFID UHF et Microondes sur matériaux plastiques ", thèse de doctorat.
- [12] Jacques Kergomard." RFID/Bibliothèques : Libérer la gestion des collections ", Décembre 2012.
- [13] SYED A.AHSON, MOHAMMAD ILYAS." RFID HANDBOOK, Applications, Technology, Security, and Privacy ".CRC Press, Mars 2008.
- [14] Josiane Lajoie, " La géométrie fractale ", mémoire présenté à l'université du Québec, Juin 2006.
- [15] R. F. Harrington." Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency ", J. Res. Nat. Bureau Standards, vol. 64D, pp. 1-12, Jan.-Feb.1960.

- [16] H. A. Wheeler, " Small antennas ", IEEE Trans. Antennas Propag. vol. AP-23, no. 4, pp. 462–469, Jul. 1975.
- [17] Jean-Pierre HAUET." L'Identification Par Radiofréquence (RFID) - Techniques et Perspective "
- [18] Debatosh Guha, Yahia M.M.Antar." MICROSTRIP AND PRINTED ANTENNAS NEW TRENDS, TECHNIQUES AND APPLICATIONS ", Wiley, November 2010.
- [19] Anthony GHIOTTO,"Conceptions d'antennes de tags RFID UHF : application a la réalisation par jet de matiere", thèse de doctorat.
- [20] M. B. Eunni, " A Novel Planar Microstrip Antenna Design for UHF RFID ", M.S. thesis, Madras University, India, May 2004.
- [21] A. Ghiotto, S. F. Cantalice, T. P. Vuong, A. Pouzin, G. Fontgalland, S. Tedjini, " Miniaturized Patch Antenna for the Radio Frequency Identification of Metallic Objects ", Oral, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2008), Atlanta, 15-20 June 2008.
- [22] Abdelhamid BOU-EL-HARMEL, Ali BENBASSOU, Jamal BELKADID. " Adaptation d'impédance d'antennes dipole planaire des tags RFID UHF par l'application de la technique T-match"
- [23] Rami KHOURI," Modélisation comportementale en VHDL-AMS du lien RF pour la simulation et l'optimisation des systèmes RFID UHF et micro-ondes ", thèse de doctorat.
- [24] Kin Seong Leong, Mun Leng Ng, Peter H. Cole, "Investigation of RF Cable Effect on RFID Tag Antenna Impedance Measurement", Antennas and Propagation international Symposium, 2007 IEEE, Honolulu, HI 9-15 June 2007, pp 573-577.
- [25] Cecilia Occhiuzzi, Stefano Cippitelli, and Gaetano Marrocco." Modeling, Design and Experimentation of Wearable RFID Sensor Tag ",IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 58, NO. 8,pp 2490-2498., AUGUST 2010.
- [26] Kyeong-Sik Min, Gun-Do Park, and Chul-Keun Park." Design for the Miniaturized RFID Tag Antenna in 910 MHz Band ",TENCON 2007 - 2007 IEEE Region 10 Conference.
- [27] Wei Lin, Qing-Xin Chu." A Novel RFID Tag Antenna for Matching Complex Impedances on 915MHz and 2.45GHz bands ",Microwave Conference Proceedings (APMC), 2010 Asia-Pacific. IEEE,pp 2248 - 2251, 7-10 Dec. 2010.
- [28] M. S. R. Bashri, M. I. Ibrahimy, S. M. A. Motakabber," A Planar Wideband Inductively Coupled Feed Patch Antenna for UHF RFID Tag ",Proceeding of the 2013 IEEE International Conference on RFID Technologies and Applications, 4 – 5 September, Johor Bahru, Malaysia.
- [29] Mark Brown, Sam Patadia, Sanjiv Dua.Mike Meyers," Comptia RFID+ Certification Passport ", McGraw-Hill Osborne Media ; 1 edition, May 11, 2007
- [30] Frédéric LETIENT." Etat de l'art et applications des RFID " ,UE ELE114 - Epreuve TEST. Travail d'Etude et de Synthèse Technique en ELECTRONIQUE.9 Juin 2008 à Grenoble.
- [31] Stéphane CREN, Alexandre VICAN.LA RFID," Le nouvel instrument de la lutte contre le vol ", EPC Lab, Septembre 2009.
- [32] Ahmed M. A. Sabaawi,Kaydar M. Quboa," Design and Fabrication of Miniaturized Fractal Antennas for Passive UHF RFID Tags ", University of Mosul, Mosul,Iraq.

- [33] Ibrahiem, A. ; Ghiotto, A. ; Tan-Phu Vuong ; Tedjini, S." Bi-band Fractal Antenna Design for RFID Applications at UHF ",IEEE Conference Publications, Antennas and Propagation. EuCAP 2006. First European Conference.
- [34] <http://www.centrenational-rfid.com/introduction-a-la-rfid-article-15-fr-ruid-17.html>
- [35] http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2012/RFID_Modbus/RFID/histoire.html
- [36] <http://www.antenna-theory.com/definitions/balun.php>

ملخص:

تحديد الهوية باستخدام موجات الراديو هي تكنولوجيا ناشئة تتعهد بانتشار كبير في العالم في المستقبل القريب، هذه التكنولوجيا تسمح بتحديد هوية الأشياء عن طريق تبادل البيانات والمعلومات من خلال موجات الراديو.

في هذا العمل، قمنا بدراسة بنية أنظمة تحديد الهوية باستخدام موجات الراديو، ولقد اهتمنا فقط بالتكنولوجيا الخاملة منها، تحديدا بتصنيع هوائيات مطبوعة خاصة ببطاقة تحديد الهوية باستخدام موجات الراديو.

هذه الهوائيات تقوم بتوفير الاتصال بين القارئ وشريحة الكترونية متصلة بها والتي تحتوي على البيانات المتعلقة بالشئ الحامل للبطاقة. انواع مختلفة من الهوائيات درست، صممت وحسنت. نموذج من الهوائيات المصممة انجز وفحص للتحقق من نتائج المحاكاة.

كلمات مفتاحية: تحديد الهوية باستخدام موجات الراديو، التكنولوجيا الخاملة، شريحة الكترونية، بطاقة تحديد الهوية باستخدام موجات الراديو، تصنيع هوائيات مطبوعة، محاكاة

Résumé :

L'identification par Radio Fréquence (RFID) est une technologie émergente qui promet d'être omniprésente dans un Futur proche, elle permet l'identification d'objets en échangeant des données à travers des signaux Radiofréquences.

Dans ce travail, nous avons étudié l'architecture des systèmes RFID, et nous avons intéressé uniquement à la technologie RFID UHF passive, plus particulièrement à la conception d'antennes imprimés de tags RFD. Ces antennes devront assurer la liaison entre un lecteur et une puce électronique qui leur est attachée et dans laquelle seront mémorisées les données concernant l'objet portant l'étiquette.

Différentes types d'antennes ont été étudiées, conçues et optimisées. Un prototype d'antenne a été réalisé afin de vérifier les résultats de la simulation.

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

Abstract :

The Radio Frequency Identification (RFID) is an emerging technology that promises to be omnipresent in the near future; it allows the identification of objects by exchanging data through Radio Frequency signals.

In this work, we studied the architecture of RFID systems, and we have interested only by passive UHF RFID technology, particularly in the design of printed antennas RFID tags. These antennas will have to assure the communication between a reader and an electronic chip's tag, which stores the labeled object's data.

Different types of antennas have been studied, designed and optimized. An antenna prototype was made to verify the simulation results.

Key words: Radio Frequency Identification (RFID), passive UHF RFID, electronic chip, RFID tags, design of printed antennas, simulation