

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de **DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Télécommunications

Spécialité : Télécommunications

Par : GOURARI FATIMA ZOHRA

Sujet

Étude et Conception d'antennes RFID UHF - modèle électrique et miniaturisation

Soutenue publiquement, en Novembre 2018, devant le jury composé de :

M. Bendimerad Fethi Tarik	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. Meriah Sidi Mohammed	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M. Laheurte Jean-Marc	Professeur	Univ. Paris-Est	Co- Directeur de thèse
M. Hadj Abderrahmane Lahcene	Directeur de recherche	CDS. Oran	Examineur 1
M. Merad Lotfi	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examineur 2
M. Bousahla Miloud	MCB	Univ. Tlemcen	Invité

Remerciements

Je n'aurais jamais pu terminer ma thèse sans le soutien et les conseils de tous ceux qui m'ont aidé à chaque étape. Je suis reconnaissante de l'opportunité de compléter cette thèse et voudrais remercier quelques personnes qui méritent mes sincères remerciements.

J'offre mes plus sincères remerciements à mon directeur de thèse Mr Meriah Sidi Mohammed. Je suis reconnaissante pour tous ses conseils, son soutien, sa motivation et sa patience tout au long du processus de mon travail de recherche.

A mon Co-directeur de thèse Mr Jean-Marc Laheurte pour m'avoir donné l'opportunité de découvrir le monde de la recherche en m'ouvrant les portes du laboratoire ESYCOM. Son soutien très opportun et son savoir m'ont beaucoup aidé.

Je remercie Mr BENDIMERAD d'avoir accepté de présider le jury, je remercie également Mr HADJ ABDERAHMANE, Mr MERAD et Mr BOUSAHLA pour avoir accepté de nous prêter leur attention et évaluer notre travail.

Je remercie du fond du cœur Mr Merad Lotfi pour son aide, pour le temps qu'il m'a consacré, et pour sa gentillesse.

J'ai une mention très spéciale à Mr Bendimerad Fethi Tarik, pour son aide et son soutien.

A toute l'équipe du laboratoire LTT et ESYCOM qui pendant ces années a participé d'une façon ou d'une autre à ce projet, les maîtres de conférence, les ingénieurs, les techniciens et les doctorants.

Enfin, Je voudrais enfin dédier ce travail à mes parents, ma famille. Que ce travail soit une preuve de ma reconnaissance.

Résumé

Récemment, l'identification par radiofréquence (RFID) est apparue comme la prochaine vague de technologie qui révolutionnera de nombreux secteurs et applications industriels: contrôle d'accès, transport public contrôle de la bibliothèque et contrôle des bagages.

La performance des étiquettes commerciales d'identification par radiofréquence (RFID) est principalement limitée par les techniques actuelles utilisées dans la conception des antennes d'étiquettes. Actuellement, les techniques industrielles reposent sur le tag RFID et la construction de prototypes d'antennes de différentes configurations afin de satisfaire aux exigences de portée de lecture minimale.

Cependant, ces techniques n'ont pas de base électromagnétique et sont incapables de fournir une solution peu coûteuse au processus de conception de l'antenne d'étiquetage. Les caractéristiques de performance des tags RFID (distance de lecture, adaptation d'impédance antenne-puce), peuvent être très complexes, et une compréhension approfondie de la conception de l'antenne tag RFID peut être acquise par une approche électromagnétique afin de réduire la taille de l'antenne et le coût global du système RFID.

Cette thèse porte essentiellement sur l'étude du système UHF RFID passif, spécialement les techniques d'adaptation antenne puce, les différentes techniques de miniaturisation. Au cours de cette thèse, nous avons essayé de comparer les techniques d'adaptation les plus utilisées dans la conception des antennes tag RFID. Des résultats expérimentaux ont été obtenus mettant ainsi en exergue la validation des simulations et la modélisation analytique.

Mots-clés : Identification par radiofréquence (RFID), tags, Puces RFID, Adaptation d'impédances, T-match, Boucle à couplage inductif, Miniaturisation, RFID UHF passives.

Abstract

Recently, radio frequency identification (RFID) has emerged as the next wave of innovation that will reform numerous modern segments: library control, public transport, access control and baggage control.

The performance of commercial RFID tags is restricted by current techniques utilized in the design of tag antennas. Currently, industrial techniques depend on the RFID tag and the fabrication of antenna prototypes of different configurations to meet the lowest reading distance requirements.

Even though, these techniques have no electromagnetic premise and can't give a solution for to the design process. The performance characteristics of RFID tags can be extremely perplexing, and a careful comprehension of the design of the RFID tag antenna can be picked up by an electromagnetic approach to reduce the antenna size and the general cost of the RFID system.

This thesis focuses on the study of the UHF passive RFID system, especially the antenna chip adaptation techniques, the different techniques of miniaturization. During this thesis, we tried to compare the most used adaptation techniques in the design of RFID tag antennas. Experimental results have been obtained highlighting the validation of simulations and analytical modeling.

Keywords: Radio Frequency Identification (RFID), Tags, RFID chips, Impedance matching, T-match, Inductive coupling loop, Miniaturization, UHF passive RFID.

ملخص

في الأونة الأخيرة، برزت تحديد الترددات الراديوية (RFID) ، وموجة التكنولوجيا القادمة من شأنها أن تحدث ثورة في العديد من القطاعات الصناعية: التحكم في الوصول والتحكم في وسائل النقل العام للمكتبة والأمتعة.

يقتصر أداء العلامات التجارية لتحديد ترددات الراديو على التقنيات الحالية المستخدمة في تصميم هوائي العلامات. حالياً، والتكنولوجيا الصناعية القائمة على النماذج العلامة RFID وبناء الهوائيات من تكوينات مختلفة لتلبية الحد الأدنى من المتطلبات مسافة القراءة.

ومع ذلك ، فإن هذه التقنيات لا أساس لها الكهرومغناطيسية وغير قادرة على توفير حل أقل تكلفة لعملية التصميم. تتفاعل خصائص الأداء العلامات يمكن أن تكون معقدة جداً، وفهم دقيق لتصميم العلامة هوائي RFID يمكن الحصول عليها عن طريق نهج الكهرومغناطيسي للحد من حجم الهوائي والتكلفة الإجمالية للنظام RFID.

تركز هذه الرسالة على نظام RFID UHF السليبي ، وخاصة تقنيات التكيف مع شرائح الهوائي ، والتقنيات المختلفة للتصغير. خلال هذه الرسالة ، حاولنا مقارنة تقنيات التكيف الأكثر استخداماً في تصميم هوائيات بطاقة RFID. تم الحصول على نتائج تجريبية من خلال تسليط الضوء على التحقق من صحة المحاكاة والنمذجة التحليلية.

كلمات البحث: تحديد الهوية بترددات الراديو العلامات (RFID)، والعلامات RFID، ومطابقة مقاومة، T مجارة، حتى حلقة اقتران، التصغير، السليبي UHF RFID.

Table des Matières

REMERCIEMENTS	i
RESUME	ii
ABSTRACT	iii
ملخص	iv
TABLE DES MATIERES	v
TABLE DES ILLUSTRATIONS	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA TECHNOLOGIE RFID	3
I.1 Introduction	4
I.2 Histoire de la RFID	5
I.3 Comment ça marche	7
I.4 Composants du système RFID.....	8
I.4.1 Lecteur RFID.....	8
I.4.2 Middleware et Le système d'information	10
I.4.3 Tags	11
I.4.3.1 Tags passifs (Classes 0, 1 et 2)	13
I.4.3.2 Tags semi-passifs (classe 3).....	13
I.4.3.3 Tags actifs (classe 4).....	14
I.5 Fréquence de fonctionnement.....	14
I.6 Marché de la RFID.....	16
I.7 Domaine d'applications RFID	17
I.8 Normes RFID.....	19
I.9 Protocoles	20
I.10 Avantages de la RFID	21
I.11 Problèmes de sécurité dans les systèmes RFID.....	22
I.12 Conclusion	22
CHAPITRE II : SYSTEME RFID UHF	23

II.1 Introduction	24
II.2 Communication par étiquette RFID	24
II.2.1 Régions de champ	25
II.2.2 Mécanismes de couplage	26
II.3 Distance de lecture et l'hypothèse de puissance	28
II.4 Paramètres fondamentaux des antennes	29
II.4.1 Rapport d'ondes stationnaires de tension VSWR.....	29
II.4.2 Fréquence de Résonance.....	29
II.4.3 Facteur de Qualité	29
II.4.4 Directivité	30
II.4.5 Efficacité de L'antenne.....	31
II.4.6 Gain.....	32
II.4.7 Bande Passante.....	32
II.4.8 Impédance d'entrée.....	33
II.4.9 Diagramme de Rayonnement.....	33
II.4.10 Taille	35
II.4.11 Section Transversale Du Radar.....	35
II.4.12 Polarisation	36
II.4.13 Ouverture effective	37
II.5 Le système RFID UHF Passif	38
II.5.1 Fonctionnement des Etiquettes Passives.....	38
II.5.2 Transfert maximum de puissance	38
II.5.3 Equation de Friis	40
II.5.4 Caractéristiques Générales	40
II.5.5 Limitations de performance	41
II.6 Tags dans le Système RFID UHF	43
II.6.1 Types d'antennes	43
II.6.2 Les Puces dans RFID UHF	46
II.6.2.1 Sensibilité de la Puce.....	48
II.7 Conclusion	49

CHAPITRE III : CONCEPTION ET MINIATURISATION DES ANTENNES RFID.....	50
III.1 Introduction	51
III.2 Techniques de réduction de la taille	51
III.2.1 Dipôles à Méandres	51
III.2.2 Configurations F-inverted.....	53
III.2.3 Géométries de Fractale	54
III.2.4 Dipôles à Spiral	55
III.3 Processus de conception d'étiquette RFID.....	56
III.4 Résultats de Simulations	58
III.4.1 Dipôle à méandres alimenté Par Boucle à Couplage Inductif.....	59
III.4.2 Antenne spiral alimenté par T-match.....	66
III.5 Conclusion.....	72
CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ADAPTATION D'IMPEDANCE	73
IV.1 Introduction	74
IV.2 Techniques d'adaptation d'impedance	74
IV.2.1 Adaptation avec T-match	74
IV.2.2 Adaptation avec boucle à couplage inductif.....	76
IV.2.3 Configuration Tip-loading.....	77
IV.2.4 Méthodes utilisant des paramètres géométrique et des éléments parasites	77
IV.3 Comparaison de deux techniques d'adaptation pour les étiquettes RFID UHF	78
IV.3.1 La puce Monza 5	80
IV.3.1.1 Caractéristiques.....	81
IV.3.1.2 Paramètres d'impédance	81
IV.3.2 Comparaison des modèles analytiques.....	82
IV.3.3 Comparaison des simulations sous CST	86
IV.3.3.1 La robustesse de chaque tag par rapport à la présence de matière	90
IV.3.4 Résultats Expérimentaux.....	92
IV.3.4.1 Mesure d'impédance.....	92
IV.3.4.2 Mesure de la distance de lecture (Read Range)	95

IV.4 Conclusion	97
CONCLUSION GENERALE	98
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	99
ABREVIATIONS.....	105

Table des Illustrations

Chapitre I

Figures

Figure I.1 : Système RFID [8].....	7
Figure I.2 : Les composants du système RFID [9].....	8
Figure I.3 : (a) Lecteur portable avec port RFID, (b) Lecteur-poignée fixe pour un contrôle d'accès.	10
Figure I.4 : Étiquette de grippage par un Alien [16].	11
Figure I.5: Système RFID passif [20].	13
Figure I.6 : Système RFID semi-passif [20].	14
Figure I.7: Système RFID actif [20].....	14
Figure I.8. Gammes de fréquences, champ magnétique et puissance maximale autorisés pour les applications RFID [23].....	16
Figure I.9 : Applications de la RFID.....	19

Tableaux

Tableau I.1: Fréquences et applications de la RFID [2].....	5
Tableau I.2 : La décennie de la RFID [7].....	6
Tableau I.3 : Technologie RFID comparée aux codes à barres traditionnels [33].....	21

Chapitre II

Figures

Figure II.1 : Régions de champ d'antenne.	25
Figure II.2 : Antenne de champ proche [20].	26
Figure II.3 : Antenne à champ lointain.	26
Figure II.4 : Alimentation d'une étiquette couplée par induction à partir d'un champ alternatif magnétique généré par le lecteur [22].	27
Figure II.5 : Bornes de référence et les pertes d'une antenne.	31

Figure II.6 : diagramme de rayonnement d'un dipôle.	33
Figure II.7 : Antenne polarisée linéairement [44].	36
Figure II.8 : Antenne polarisée circulairement [44].	37
Figure II.9 : Modèle de circuit d'une étiquette RFID.	39
Figure II.10 : Dégradation qualitative des performances d'un dipôle UHF lorsqu'il est placé sur différents matériaux.....	42
Figure II.11 : Structure d'une antenne dipôle.	44
Figure II.12 : diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne dipôle.	44
Figure II.13 : Différentes formes d'antennes patch.	45
Figure II.14 : Antenne patch rectangulaire Microstrip avec les paramètres de conception.	45
Figure II.15 : Diagramme de rayonnement 3D d'une antenne patch (microruban).....	46
Figure II.16 : Circuit parallèle équivalent de la puce (chip).	47
Figure II.17. Circuit série équivalent de la puce.	48

Tableaux

Tableau II.1 : attributions de fréquence pour différents pays.	38
Tableau II.2 : Exemples des puces disponibles dans le commerce au cours de la dernière décennie.....	47

Chapitre III

Figures

Figure III.1 : Géométrie de l'antenne de la ligne méandre avec plusieurs tours inégaux.....	52
Figure III.2 : Antenne à méandres équidistantes ($f = 953$ MHz) avec l'alimentation T-match [65].	52
Figure III.3 : Antenne à méandres ($f = 915$ MHz) avec une alimentation en boucle à couplage inductif [66].....	52
Figure III.4 : Antenne à méandres ($f = 920$ MHz) avec une barre de chargement.	53
Figure III.5 : Antenne à plusieurs conducteurs ($f = 900$ MHz) avec un double schéma de couplage en T et un repliement en spirale.	53
Figure III.6 : Antennes pliées: les cercles indiquent la position où la puce est attachée [35].....	54

Figure III.7 : Cinq premières itérations de la courbe de Hilbert.	55
Figure III.8 : Cinq premières itérations de la courbe de Sierpinski.	55
Figure III.9 : Géométrie de l'antenne logarithmique spirale à deux bras.	56
Figure III.10 : Processus de conception d'une antenne d'étiquette RFID [14].	57
Figure III.11 : Géométrie de l'antenne dipôle à méandre.	60
Figure III.12 : Circuit équivalent de l'antenne proposée.	60
Figure III.13 : Variation de l'impédance d'entrée avec la longueur "gap", a) la partie réelle b) la partie imaginaire. La valeur nominale du gap est de 1 mm.	61
Figure III.14 : Variation de l'impédance d'entrée avec l'espacement "m", a) la partie réelle b) la partie imaginaire. La valeur nominale du "m" est de 0.6 mm.	62
Figure III.15 : Variation de l'impédance d'entrée avec la longueur de la barre verticale, a) la partie réelle b) la partie imaginaire. La valeur nominale du "h2" est de 5 mm.	63
Figure III.16 : Coefficient de réflexion S11 (dB) de l'antenne dipôle à Méandre.	64
Figure III.17 : Résultats de simulations de l'impédance d'entrée de l'antenne méandre.	65
Figure III.18 : Diagramme de rayonnement 3-D (Gain) à $f = 909$ MHz de l'antenne Méandre.	65
Figure III.19 : Géométrie de l'antenne spirale.	66
Figure III.20 : circuit équivalent de l'antenne proposée.	67
Figure III.21 : Variation de l'impédance d'entrée avec la longueur de T-Match a) Partie réelle b) Partie imaginaire. La valeur nominale du "a" est de 5.5 mm.	68
Figure III.22 : Variation de l'impédance d'entrée avec la longueur de T-Match a) Partie réelle b) Partie imaginaire. La valeur nominale du "s" est de 5 mm.	69
Figure III.23 : Variation de l'impédance d'entrée avec la largeur de T-Match a) Partie réelle b) Partie imaginaire. La valeur nominale du "x" est de 10 mm.	70
Figure III.24 : Coefficient de réflexion S11 (dB) de l'antenne spirale.	71
Figure III.25 : Résultats de simulations de l'impédance de l'antenne spirale.	71
Figure III.26 : Diagramme de rayonnement 3-D (Gain) à $f = 866$ MHz de l'antenne spirale.	72

Tableaux

Tableau III.1 : Paramètre d'antenne méandre proposée avec ses valeurs.	64
Tableau III.2 : Paramètre d'antenne proposé avec ses valeurs.	70

Chapitre IV

Figures

Figure IV-1 : Configuration T-match avec son circuit équivalent [35].	75
Figure IV.3 : Structure à couplage inductif et le circuit équivalent.	76
Figure IV.3 : Le dipôle raccourci par l'ajoutant des capacités aux bouts.	77
Figure IV.4 : Antenne à méandres avec un élément parasite.	75
Figure IV.5 : Circuits électriques équivalents, paramètres géométriques d'une antenne dipole droite correspondant à (a) une inductance série-shunt (SSI) (SSI) et (b) une boucle à couplage inductif (ICL). (c) Circuit équivalent alternatif de l'ICL utilisant un circuit en T du transformateur.	80
Figure IV.6 : Module Monza 5 [TAGSYS].	80
Figure IV.7 : Modèle RF linéarisé par puce d'étiquette	81
Figure IV.8 : Impédances des antennes et la puce.	84
Figure IV.9 : Coefficient de transmission calculé avec les modèles analytiques en utilisant $R_{dip} = 56 \Omega$, et $Q_{dip} = 10$. La fréquence centrale est fixée à $f_0 = 868 \text{ MHz}$.	85
Figure IV.10 : Coefficient de transmission de puissance pour le circuit d'adaptation SSI. L'influence de la largeur w_1 de l'inductance L_e (valeur nominale $w_1 = 1 \text{ mm}$).	87
Figure IV.11 : Coefficient de transmission de puissance pour le circuit d'adaptation ICL. Influence de la largeur de l'intervalle g (valeur nominale $g = 400 \mu\text{m}$)	88
Figure IV.12 : Antennes à alimentation différentielle des technique ICL et SSI.	89
Figure IV.13 : Tags SSI et ICL conçus sous CST avec une plaque diélectrique en dessous.	90
Figure IV.14 : Coefficient de transmission de puissance pour les circuits d'adaptations SSI et ICL. Influence de la permittivité de la plaque diélectrique en dessous.	91
Figure IV.15 : Antenne ICL conçue sous CST en inclut le câble coaxial.	92
Figure IV.16 : Conception approximative de la mesure.	93
Figure IV.17 : Mesure d'impédance des antennes dans la chambre anéchoïque de VERNON à l'aide d'un VNA.	94
Figure IV.18: Impédance d'entrée mesurée et simulée de l'antenne: (a) ICL et (b) SSI.	95
Figure IV.19 : Mesure de la distance de lecture à l'aide d'un tagformance (RFID measurement unit).	96
Figure IV.20 : Distance de lecture mesurée pour la technique d'adaptation ICL et SSI.	96

Tableaux

Tableau IV.1 : Impédances de port de module Monza 5 [86].....	82
---	----

Introduction Générale

Le domaine de l'identification automatique (auto-ID) est apparu depuis la seconde guerre mondiale avec le système identifiant ami ou ennemi (IFF). L'identification automatique comprend tous les moyens d'automatiser la tâche d'identification d'un objet, tels que le code à barres et la reconnaissance optique de caractères. Cependant, les techniques optiques nécessitent une visibilité directe et le stockage de plus de données nécessite plus d'espace.

Pour remédier à certaines des lacunes de l'identification optique, nous pouvons nous tourner vers une autre technique : l'identification par radiofréquence (RFID).

La RFID est une technologie émergente utilisée pour l'identification sans fil au moyen d'ondes radio. Plusieurs bandes de fréquences ont été normalisées pour cela. Les systèmes à basse fréquence (LF, 125-134 kHz) et à haute fréquence (HF, 13,56 MHz) sont les plus avancés. Les systèmes à très haute fréquence (UHF: 860-960 MHz) et micro-ondes (2,4 GHz et 5,8 GHz) sont la technologie émergente.

Un système RFID se compose de trois parties principales: une étiquette associée à l'objet à identifier, un lecteur utilisé pour extraire l'identifiant unique de l'objet de l'étiquette, et un système d'application.

L'étiquette comprend une antenne omnidirectionnelle directement adaptée à une puce, qui présente une impédance complexe. Dans les tags passifs, l'énergie nécessaire pour piloter la puce provient du lecteur. Ainsi, l'objectif de la conception est de réaliser l'adaptation d'impédance conjuguée antenne / puce requise et de miniaturiser la forme de l'antenne avec un coût minimum.

Le travail présenté dans cette thèse consiste en une contribution à la recherche sur les systèmes RFID UHF et ses technique d'adaptations, notamment sur :

- le développement et la conception de nouvelles antennes d'étiquettes passives planaires imprimées miniatures.
- l'analyse des performances des antennes conçues pour réaliser leurs prototypes.

Cette thèse est scindée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, la technologie d'identification par radiofréquence est introduite pour mettre en exergue sa configuration de base, son principe de fonctionnement, sa classification et ses applications.

Dans le deuxième chapitre, les caractéristiques détaillées concernant le système UHF RFID et leurs Performance et Limites seront présentés. Ensuite, quelques types d'antennes et puces RFID UHF commerciales seront citées.

Dans le troisième chapitre, différentes conceptions d'antennes compactes utilisant des configurations différentes sont explorées, et plusieurs techniques de réduction de la taille seront esquissées.

Le dernier chapitre est consacré à une comparaison de deux techniques d'adaptation puce tout en mettant l'accent sur l'étude analytique, la simulation et les mesures. D'autres techniques d'adaptation d'impédance conjuguée seront ainsi étudiées

Enfin, nous finalisons ce manuscrit par une conclusion générale et des perspectives englobant une synthèse sur le travail accompli et sa continuité et ses éventuelles améliorations.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LA TECHNOLOGIE RFID

I.1 Introduction

L'identification automatique, ou Auto-ID en abrégé, est le terme général donné à une foule de technologies qui sont utilisées pour aider les machines à identifier les objets, et qui est souvent associée à la capture automatique des données.

L'application de la technologie Auto-ID offre aux entreprises des gains significatifs en termes d'efficacité opérationnelle en permettant une vision en temps réel sans précédent de leurs actifs et de leurs stocks tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Bien que parfaitement adaptée aux applications de type gestion de la chaîne d'approvisionnement, la technologie Auto-ID a des applications dans tous les secteurs pouvant bénéficier d'un meilleur suivi, suivi et gestion des actifs.

L'identification par radiofréquence (RFID) est l'une des technologies les plus anciennes, mais pas très répandues, en ce qui concerne les technologies de capture automatique des données [1]. RFID est un terme générique utilisé pour décrire les systèmes qui peuvent transmettre et recevoir l'identité d'un objet ou d'une personne sans fil en utilisant des ondes radio.

Il existe plusieurs méthodes d'identification, mais la plus courante consiste à stocker un numéro de série, également connu sous le nom de code de produit électronique, qui identifie une personne ou un objet, et peut-être d'autres informations, sur une micro puce. Cette puce est attachée à une antenne et ensemble est appelé une "étiquette RFID" ou "Tag".

Le lecteur lit le contenu de la puce en utilisant la communication par ondes radio. Ainsi, le numéro stocké sur l'étiquette constitue la base de la technologie d'identification. Ce numéro est attaché au système d'information backend qui effectue le traitement requis sur les données attachées au numéro d'identification.

Le tableau I.1 décrit les différentes propriétés d'un système RFID pour différentes gammes de fréquences dans lesquelles il peut fonctionner [2] [3].

Classification	Bande de fréquence	Applications
LF	125/134 kHz	Contrôle d'accès, Identification des animaux
HF	13.56 MHz	Contrôle d'accès
UHF	303/433MHz	Transport
	860-960 MHz	Transport, inventaire Gestion de la chaîne d'approvisionnement
SHF	2.45 GHz	Transport
	5.8 GHz	En développement

Tableau I.1: Fréquences et applications de la RFID [2].

I.2 Histoire de la RFID

La technologie RFID remonte à la seconde guerre mondiale, où les avions britanniques ont été identifiés comme un «friend of foe» utilisant cette technologie. Sous la supervision du physicien écossais Sir Robert Alexander Watson-Watt, les britanniques ont développé le premier système d'identification active de l'ennemi (IFF) [3]. Un émetteur a été installé sur chaque avion britannique et le radar au sol serait en mesure d'identifier l'avion en fonction du signal reçu de l'émetteur.

En 1948, Harry Stockman a montré comment un lien de communication pouvait être établi en utilisant la puissance réfléchie [4], et en 1950 le premier brevet a été déposé pour des transpondeurs passifs. Cependant, le code à barres, un rival proche de la RFID, a été commercialisé dans les années 1960 et 1970.

En outre, la mise en œuvre peu coûteuse de codes à barres en a fait un énorme succès et est encore répandue dans la plupart des produits aujourd'hui (2018). Toutefois, en raison de la complexité et du volume d'affaires accrues, l'industrie a cherché des solutions de rechange au code à barres et a donc amorcé le voyage vers la RFID.

Jusqu'en 1979, la recherche RFID se limitait aux expériences de laboratoire. Cependant, la première utilisation commerciale de la RFID était dans le suivi des animaux aux États-Unis au début des années 1980. Cela a été suivi par la première collecte de péage automobile utilisant la RFID en Norvège en 1987 puis dans les wagons américains en 1994 [3].

En 1999, le centre auto-ID a été créé au Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) pour rechercher et développer des protocoles et des normes mondiales pour la technologie RFID. L'absence de technologies connexes et de normes mondiales a limité le développement initial de cette technique. Différents pays et même différentes entreprises ont utilisé la technologie RFID comme technologie propriétaire.

L'interopérabilité entre les différents acteurs était minimale. Ce problème a été résolu par UCC (Uniform Code Council) avec EAN (European Article Numbering) créer EPCglobal pour commercialiser la technique EPC (Electronic Product Code) [5].

EPCglobal a ratifié une norme Gen2 de deuxième génération en 2005, pour une large adoption de la RFID [6]. Cela a révolutionné l'industrie de la RFID en suscitant de nombreuses demandes de la part de géants de l'industrie comme Wal-Mart, le département américain de la Défense, Gillette, etc.

Le tableau I.2 montre les principaux jalons de la technologie RFID au fil des ans [7]

Décennie	L'événement
1940-1950	Avancement supplémentaire dans le radar; RFID inventé en 1948
1950-1960	Exploration précoce de la technologie RFID. Expériences de laboratoire
1960-1970	Développement de la théorie de la RFID. Début des essais sur le terrain des applications
1970-1980	Explosion du développement de la RFID. Les tests de la RFID accélèrent très tôt. Adopter la mise en œuvre de RFID.
1980-1990	Les applications commerciales de la RFID entrent dans le courant dominant
1990-2000	Emergence de normes. RFID largement déployée. RFID devient partie de la vie quotidienne.
2000-	L'explosion RFID continue

Tableau I.2: L'évolution de technologie la RFID [7].

I.3 Comment ça marche

Dans un système typique, les tags (étiquettes) sont attachés aux objets. Chaque tag a une certaine quantité de mémoire interne (EEPROM) dans laquelle elle stocke des informations sur l'objet, telles que son numéro d'identification (série) unique. Lorsque ces tags traversent un champ généré par un lecteur, elles transmettent cette information au lecteur, identifiant ainsi l'objet. Le processus de communication entre le lecteur et l'étiquette est géré et contrôlé par l'un de plusieurs protocoles, tels que l'ISO 15693 et l'ISO 18000 [8].

Fondamentalement, ce qui se passe est que lorsque le lecteur est allumé, il commence à émettre un signal sur la bande de fréquence sélectionnée. Toute étiquette correspondante à proximité du lecteur détectera le signal et utilisera l'énergie de celui-ci pour se réveiller et fournir de l'énergie de fonctionnement à ses circuits internes. Une fois que le Tag a décodé le signal comme valide, il répond au lecteur, et indique sa présence en modulant le champ du lecteur [8].

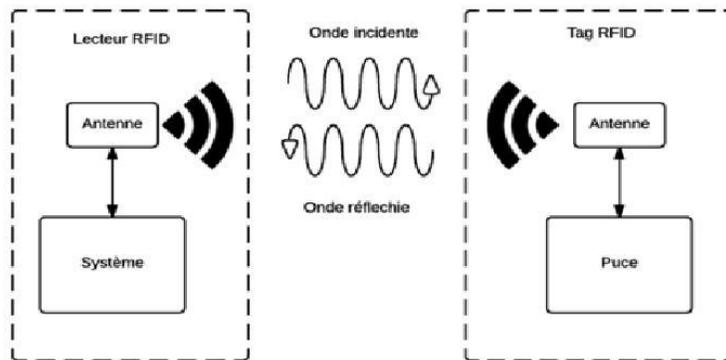


Figure I.1 : Système RFID [8].

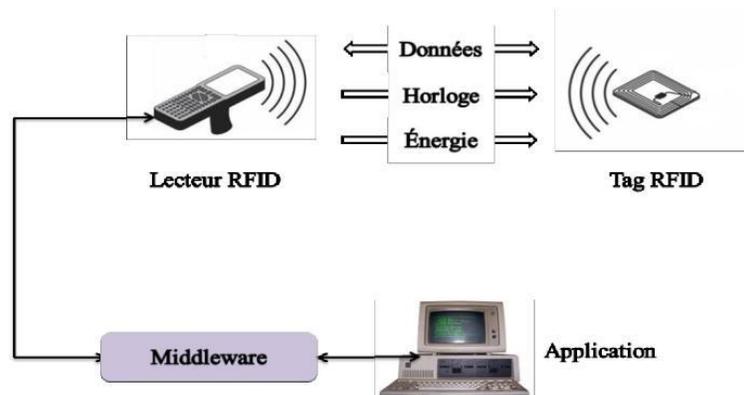
Si plus d'une étiquette valide est présente, alors toutes ces étiquettes répondront en même temps, ce qui provoque une collision de signaux à la fin du lecteur et est considérée comme une indication de plusieurs étiquettes. Le lecteur gère ce problème en utilisant un algorithme anti-collision conçu pour permettre le tri et la sélection individuelle des étiquettes.

Il existe différents types d'algorithmes (BinaryTree, Aloha, etc.) qui sont définis dans le cadre des normes de protocole. Une fois que l'étiquette appropriée est sélectionnée, le lecteur est alors autorisé à effectuer diverses opérations comme une lecture ou une opération de lecture / écriture [8].

I.4 Composants du système RFID

Le système RFID se compose de trois composants de base: transpondeurs (tag), lecteurs, système d'information (ordinateur) / middleware comme indiqué sur la Figure I.2.

Le transpondeur est attaché à l'élément à identifier ou à suivre, le lecteur est utilisé pour identifier les éléments, et le système d'informations qui peut également contenir des intergiciels traitent les données pour les rendre utiles. Middleware est essentiellement un pont entre les lecteurs ou un lecteur et le système d'information pour faciliter la communication [2].



FigureI.2 : Les composants du système RFID [9].

I.4.1 Lecteur RFID

Le lecteur est un émetteur-récepteur qui envoie le signal RF pour activer et établir la communication avec l'étiquette et reçoit également les données de l'étiquette à envoyer aux systèmes d'information.

Un lecteur RFID contient généralement un émetteur et récepteur, une unité de contrôle et une antenne [2][10]. L'objectif en tant qu'émetteur est d'envoyer une commande de requête pour activer les étiquettes passives et établir une communication avec d'autres étiquettes. L'unité de contrôle dans le lecteur module la fréquence ou la phase du signal RF et envoie les données modulées pour interroger l'étiquette.

Lorsque le lecteur agit en tant qu'émetteur, il doit prendre en compte la quantité de puissance qu'il transmet. La puissance délivrée par le lecteur est régie par des organismes de réglementation comme la Fédérale Communications Commission (FCC), l'Européen

Télécommunication Standards Institute (ETSI) et l'Union internationale des télécommunications (ITU) qui régissent les questions de sécurité, les normes et les spécifications d'attribution du spectre. FCC est l'autorité concernée aux États-Unis et l'ETSI en Europe [11].

Lorsque le lecteur fonctionne en tant que récepteur, il reçoit les données modulées de l'étiquette et l'envoie au système d'information via le middleware pour le traitement. Il y a diverses restrictions, comme un appareil radio fonctionnant dans la bande ISM (bande RFID UHF 902 - 928 MHz aux États-Unis) qui doit sauter toutes les 0.4 secondes, ce qui limite les performances du lecteur RFID et limite sa plage de fonctionnement maximale, pouvoir de dispersion arrière et force [12] [13].

Le lecteur RFID utilise des antennes pour communiquer avec la puce RFID. L'antenne joue le rôle vital de transmission et de réception des ondes électromagnétiques [14]. Le gain élevé et la directivité sont les caractéristiques souhaitées d'une antenne lecteur. Le rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction donnée de l'antenne à l'intensité du rayonnement dans toute la direction est appelé directivité [2].

L'antenne doit avoir une directivité élevée aussi bien pour la réception que pour la transmission. L'autre paramètre important est le gain qui mesure l'efficacité de l'antenne ainsi que ses capacités directionnelles. Les exigences du lecteur varient en fonction du type de tâche et d'application. Différents types de systèmes de lecture sont:

- Lecteurs portatifs qui agissent comme un scanner de code à barres portatif.
- Lecteurs intégrés dans les dispositifs de collecte de données mobiles.
- Les lecteurs fixes, qui sont montés pour lire automatiquement les étiquettes au fur et à mesure que les articles passent près d'eux.

D'autres facteurs importants qui affectent la performance du lecteur sont la polarisation d'antenne, efficacité de rayonnement et l'adaptation d'impédance.



(a)



(b)

Figure I.3 :(a) Lecteur portable avec port RFID, (b) Lecteur-poignée fixe pour un contrôle d'accès.

I.4.2 Middleware et le système d'information

Le système d'information et le middleware forment une partie très importante du système RFID. Sans le système d'information, les données collectées par le lecteur sont redondantes. Le rôle du système d'information est de traiter les données d'étiquette collectée par le lecteur et de les mettre sous forme utilisable [2].

Le Middleware est un sous-système qui prend en charge la collecte de données et réduit la redondance des données dans le système d'information. La gestion des données est une exigence très critique, et si elle n'est pas effectuée efficacement, elle augmentera le trafic de données.

Le rôle principal du middleware est de filtrer toutes les données indésirables, l'exploration de données et les données de tri. En plus de gérer les données, cela nous aide à acheminer les données vers un bon lecteur lorsque nous avons plusieurs lecteurs dans le réseau. Ainsi, le déploiement du lecteur RFID devient très facile grâce à l'utilisation de middleware.

I.4.3 Tags

Les tags ou transpondeurs sont le cœur d'un système RFID car ils stockent les informations qui décrivent l'objet suivi. Les transpondeurs RFID se composent d'une puce électronique (puce IC) et d'une antenne [2] [15]. La puce contrôle la fonctionnalité et possède également de la mémoire pour stocker l'identifiant d'étiquette ainsi que pour stocker les données envoyées par le lecteur.

L'antenne d'étiquette agit comme un élément de couplage et capte ces rayonnements électromagnétiques du lecteur pour alimenter l'étiquette (passive) et renvoie le numéro d'identification d'étiquette en modulant le signal RF reçu du lecteur.

La puissance transférée du lecteur à l'antenne et de l'antenne à l'étiquette dépend de l'efficacité de couplage de l'antenne. L'efficacité de couplage se rapporte à l'adaptation d'impédance et donc la puce IC et l'antenne doivent être correctement adaptées.

L'étiquette la plus largement utilisée est l'étiquette Alien (Figure I.4). Il a un substrat en plastique utilisé pour maintenir la puce et l'antenne. La puce a une mémoire qui stocke les données qui identifient de manière unique l'étiquette. Les données de l'étiquette sont sous la forme de 96 bits connus sous le nom de numéro EPC, qui est programmé dans l'étiquette pendant sa fabrication. La puissance de seuil minimum requise pour lire les données EPC est d'environ -10 dBm [16].



Figure I.4 : Étiquette RFID par Alien [16].

Le tag RFID peut être complètement passif [17], semi-passif [18] ou actif. L'étiquette RFID passive tire son énergie du signal électromagnétique d'interrogation généré par le lecteur et ne nécessite donc pas de batterie.

Basé sur sa fonctionnalité, le standard EPCglobal classe les tags RFID en quatre classes différentes [19]:

1. Classe 0 et 1:

- Étiquettes d'identité passives (portée de 3 mètres)
- Rétrodiffusion (l'interrogateur parle en premier)
- Coût le plus bas

2. Classe 2:

- Identité passive et étiquettes de mémoire (portée de 3 mètres)
- Programmable
- Rétrodiffusion (l'interrogateur parle en premier)
- Sécurité
- Coût le plus bas

3. Classe 3:

- Tags passifs à batterie
- Plus de fonctionnalités sur la puce - mémoire, capteurs, etc.
- Rétrodiffusion (l'interrogateur parle en premier)
- 100 mètres de portée
- Coût modéré

4. Classe 4:

- Tags de batterie actifs (étiquettes transmettent le porteur)
- Transmission active (permet les modes de fonctionnement tag parle en premier (tag-talks-first))
- 100 mètres de portée
- Coût élevé

I.4.3.1 Tags passifs (Classes 0, 1 et 2)

Ces types d'étiquettes n'ont pas de batterie et devraient extraire l'énergie de l'énergie RF transmise par le lecteur. Le signal RF reçu est rectifié et le composant RF est filtré pour obtenir une tension continue.

Le circuit de commande de puissance régule et alimente les circuits. Les données du lecteur sont également extraites dans le processus en utilisant un démodulateur et un décodeur. Ces balises utilisent la modulation de rétrodiffusion pour rendre compte au lecteur. La Figure I.5 montre le système RFID avec étiquette RFID passive.

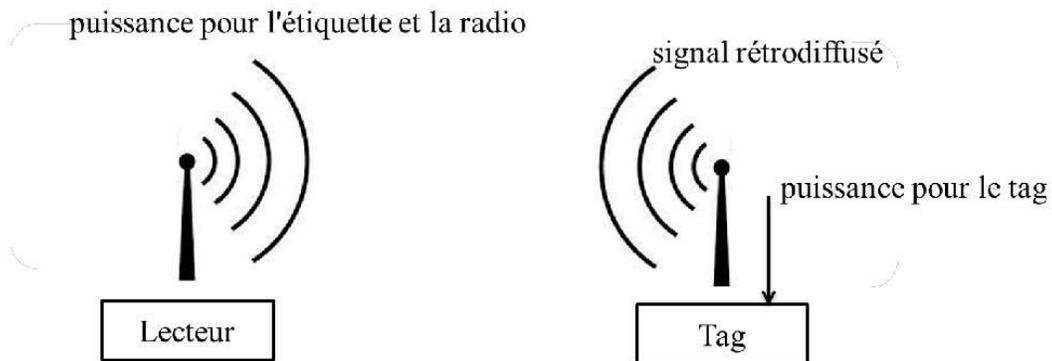


Figure I.5: Système RFID passif [20].

I.4.3.2 Tags semi-passifs (classe 3)

Ce type utilise la batterie pour alimenter le circuit de l'étiquette, et par conséquent le nom de batterie passive. Mais, il utilise toujours la communication de rétrodiffusion pour parler au lecteur.

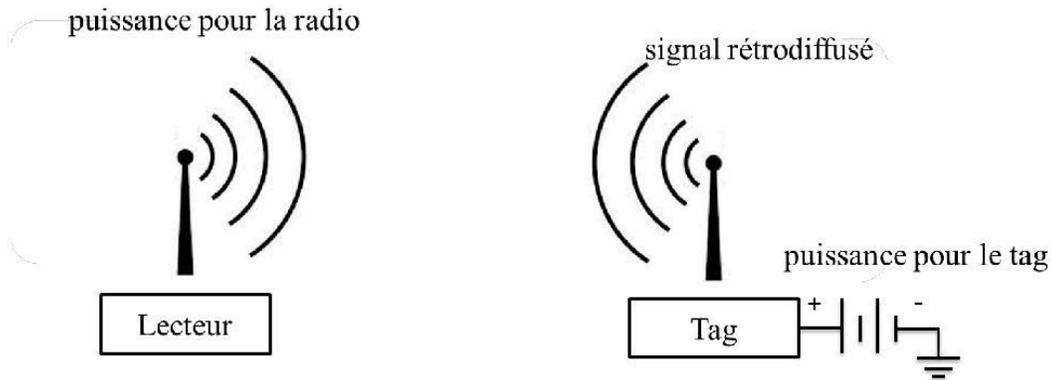


Figure I.6: Système RFID semi-passif [20].

I.4.3.3 Tags actifs (classe 4)

L'étiquette active fonctionne comme dans le système de communication radio bidirectionnel conventionnel. Il dispose d'une source d'alimentation locale, qui alimente également un émetteur.

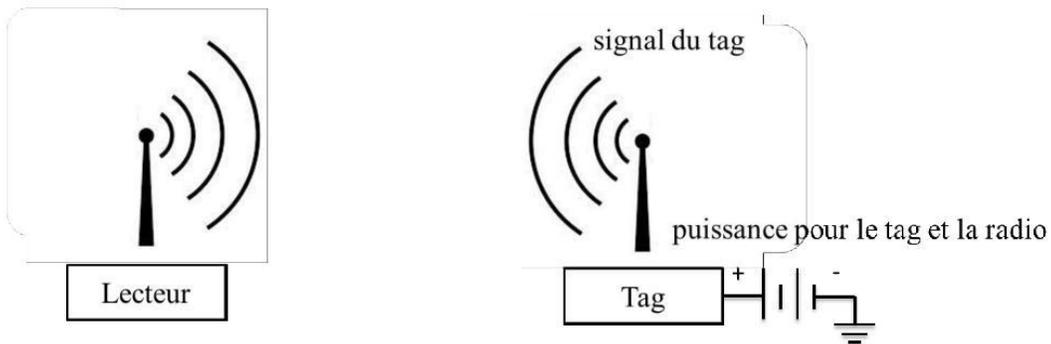


Figure I.7: Système RFID actif [20].

I.5 Fréquence de fonctionnement

Il existe plusieurs bandes de fréquences pour les étiquettes RFID, à savoir: basse fréquence 125-134 kHz (LF), haute fréquence 13,56 MHz (HF), ultra haute fréquence 400-960 MHz (UHF), et hyperfréquence 2,4 GHz et 5,8 GHz [21], [20] et [22].

Le fonctionnement de la fréquence RFID est réglementé par chaque pays. Par exemple, la fréquence RFID UHF en Amérique du Nord est de 915 MHz, mais pour la plus grande partie de l'Europe, elle est de 860 MHz.

De plus, les étiquettes RFID sont conçues pour répondre à ces spécifications de fréquence en fonction de l'application, telles qu'une longue portée de lecture, une sécurité améliorée, un meilleur taux de transfert de données, etc.

- **Les étiquettes basses fréquence (125-134 kHz):** ont été parmi les premières étiquettes à être déployées pour les applications RFID. Le principal avantage de ces étiquettes était qu'elles pouvaient être lues lorsqu'elles étaient attachées à des objets contenant de l'eau, des tissus animaux, du métal, du bois et des liquides [22].

Cependant, les étiquettes LF présentaient plusieurs inconvénients tels que l'utilisation dans des applications de proximité, une faible portée de lecture de quelques centimètres, une très faible capacité de stockage de données et aucune mesure anti-collision nécessaire si le lecteur nécessite plusieurs lectures simultanées.

- **Les étiquettes hautes fréquence (13,56 MHz):** sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie RFID. Les tags HF utilisent le couplage inductif comme source d'énergie pour communiquer avec les lecteurs [22].

Ces étiquettes ont plusieurs avantages, tels qu'une meilleure portée de lecture, généralement un demi-mètre, une capacité de stockage de données élevée, de bonnes mesures anticollision pour que les lecteurs puissent communiquer avec plusieurs étiquettes.

Toutes ces caractéristiques font des étiquettes HF un choix idéal pour les applications telles que les cartes de crédit, les étiquettes de livres de bibliothèque, les étiquettes de bagages des compagnies aériennes et le suivi des biens [22].

- **Les étiquettes ultra hautes fréquence (433 MHz et 860-960 MHz):** utilisent le couplage en champ lointain ou le couplage par rétrodiffusion pour communiquer entre elles [22]. Ces étiquettes UHF présentent plusieurs avantages tels qu'une bonne taille de mémoire pour les données, jusqu'à 240 bits, et une plage de lecture très longue, typiquement 20 mètres dans de bonnes conditions.

Cependant, le principal inconvénient des étiquettes UHF est que leur performance est sévèrement dégradée lorsqu'elles sont attachées à des objets contenant de l'eau, des tissus biologiques et des métaux. Certaines applications typiques des étiquettes UHF comprennent la chaîne d'approvisionnement, l'inventaire et la logistique, les vêtements et les bagages d'aviation.

- **Les étiquettes hyperfréquences (2,4 GHz et 5,8 GHz):** taux de transfert de données élevé permettant une communication très rapide entre les appareils [22]. Par conséquent, les étiquettes micro-ondes sont les plus appropriées pour l'application où le suivi des actifs en temps réel est nécessaire.

L'inconvénient principal de l'étiquette à micro-ondes est un coût plus élevé à développer et la plupart des étiquettes sont des étiquettes actives, c'est-à-dire qu'elles nécessitent une batterie externe pour alimenter la puce sur l'étiquette. Les applications typiques incluent le péage autoroutier, le système de localisation en temps réel, etc.

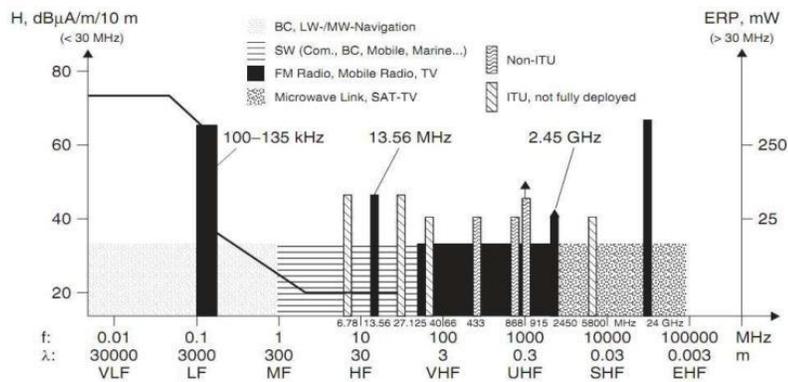


Figure I.8. Gammes de fréquences, champ magnétique et puissance maximale autorisés pour les applications RFID [23].

I.6 Marché de la RFID

La technologie d'identification par radiofréquence sans contact (RFID), l'un des secteurs de la procédure d'identification automatique (ID automatique) qui connaît la croissance la plus rapide, la RFID a été largement utilisée pour le suivi des actifs dans la gestion de la chaîne logistique.

De plus en plus de détaillants remplacent le code à barres traditionnel par une étiquette RFID pour économiser leur main-d'œuvre et leur coût. Il est également devenu une partie intégrante de notre vie. Il peut être utilisé pour suivre des animaux ou des livres de bibliothèque, contrôler l'entrée de bâtiments ou gérer la circulation.

Par rapport au système de code-barres, la RFID a l'avantage d'une plage de lecture beaucoup plus longue, est reprogrammable et possède une plus grande capacité de stockage d'informations.

Dans l'industrie des semi-conducteurs, avec une plus petite taille de caractéristique, un coût inférieur de la puce est prévu. Le coût unitaire d'une puce RFID a continuellement diminué. Comme on peut l'imaginer, lorsque le coût d'une étiquette RFID devient comparable à un code à barres, la RFID remplacerait complètement le code à barres par la suite. Selon ID TechEx, la tendance au remplacement du code à barres est maintenant apparue puisque le marché de la RFID devrait atteindre 21.9 milliards en 2020 d'après le portail de statistique [24].

I.7 Domaine d'applications RFID

La RFID devrait offrir d'énormes avantages aux fabricants en offrant les outils nécessaires pour mieux planifier la production et répondre plus rapidement à la demande du marché. L'utilisation d'étiquettes RFID permettra une gestion automatique des stocks dans les magasins et les entrepôts.

Les supermarchés et autres détaillants à travers le monde sont les pionniers des déploiements à grande échelle d'articles RFID dans les biens de consommation. Quelques exemples: Wal-Mart aux États-Unis, Marks & Spencer et Tesco au Royaume-Uni et Metro en Allemagne. En utilisant la technologie RFID pour suivre les ventes, les stocks et les commandes, ils visent à réduire les coûts opérationnels, ce qui a un impact sur les prix.

Le département de la Défense des États-Unis utilise des étiquettes actives pour réduire les coûts logistiques et améliorer la visibilité de la chaîne d'approvisionnement depuis plus de 15 ans. Le gouvernement américain envisage d'utiliser des étiquettes RFID dans les passeports pour réduire la contrefaçon et permettre la vérification automatique de l'identité. L'Union européenne prévoit d'incorporer des étiquettes RFID dans la monnaie-papier européenne afin de rendre les contrefaçons difficiles et d'assurer le suivi de leur utilisation.

La gestion des livres peut être automatisée en utilisant des bibliothèques RFID. Des étiquettes peuvent être insérées dans chaque volume, ce qui simplifie le travail de la bibliothèque et améliore l'expérience des utilisateurs. Les inventaires peuvent être réalisés sans retirer les livres des étagères, en détectant automatiquement les livres manquants ou mal classés, ou même en utilisant un trieur automatique pour les volumes retournés. Un exemple en est l'utilisation des étiquettes RFID dans la bibliothèque du Vatican à Rome pour identifier et gérer son livre extensif et sa collection de piles [25].

De nombreuses applications de contrôle d'accès utilisent également des étiquettes RFID. L'utilisation de cartes RFID ou les badges rendent le contrôle d'accès plus simple pour les gens car ils n'ont pas à manipuler leur carte d'identité. Il peut également être utilisé pour identifier des personnes ou pour des raisons de sécurité, par exemple lorsqu'un bâtiment doit être évacué. Le vol et le vandalisme sont également entravés.

Un autre exemple de contrôle d'accès est le système d'entrée sans clé et passif dans les voitures. Le propriétaire initie un échange d'informations sécurisé entre l'unité distante de la voiture et la voiture en appuyant sur un bouton de la télécommande, et la porte de la voiture se déverrouille automatiquement.

La technologie RFID est très utile dans la localisation, le suivi des animaux, les soins de santé, etc... Les exemples comprennent un système de détection de localisation pour localiser des objets à l'intérieur des bâtiments [23] et un système d'identification des personnes et des objets [26].

Les étiquettes RFID et les transpondeurs intelligents sont très répandus pour les communications entre véhicule et route, le péage routier et le contrôle d'accès des véhicules. Différents types de systèmes RFID sont développés pour prendre en charge tous les aspects du suivi, du tri et du rapprochement des bagages de l'aviation [27].

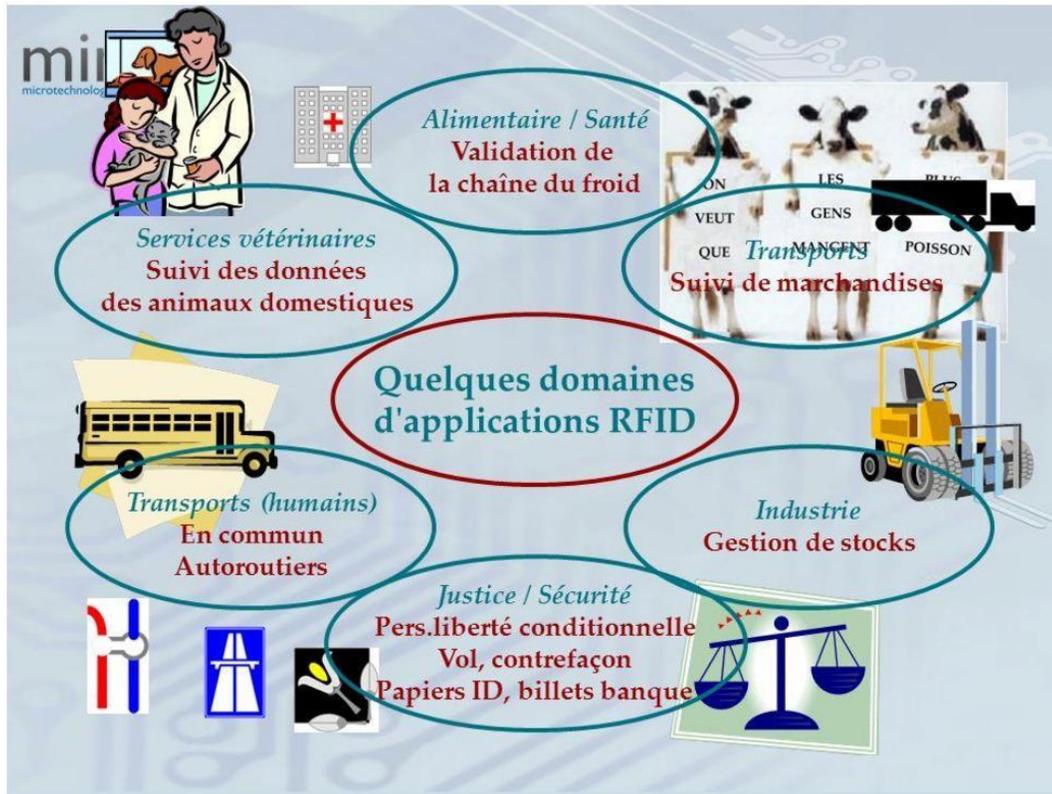


Figure I.9 : Applications de la RFID.

I.8 Normes RFID

Il existe un certain nombre de normes pour les systèmes RFID qui ont été publiées ou sont en cours d'élaboration. Les principales spécifications sont les normes ISO (Organisation internationale de normalisation [28]), les spécifications EPC (Electronic Product Code [29]) et ANSI (American National Standards Institute [30]).

La norme ISO active clé est 18000-7 [28], qui est une norme internationale définit l'interface radio pour les appareils RFID utilisés dans les applications de gestion d'articles. La norme définit les paramètres de liaison avant et arrière pour une interface radio RFID active à 433 MHz et le protocole de communication utilisée.

La norme ISO 18185 Partie 1 [31] est une norme internationale qui fournit un système pour l'identification unique et la présentation d'informations sur les scellés électroniques des conteneurs de fret. Il est utilisé en conjonction avec les autres parties de l'ISO 18185 telles

que la partie 4 qui spécifie la protection des données et la partie 7 qui spécifie le protocole de la couche physique.

Les spécifications EPC, établies par EPCGlobal, distinguent plusieurs classes d'étiquettes en fonction de leur fonction. La classe 1 correspond aux balises les plus simples, qui n'ont qu'un identifiant unique pour la balise par défaut. La classe 2 offre plus de mémoire et permet d'effectuer des fonctions d'authentification.

La classe 3 correspond aux étiquettes semi-passives et enfin la classe 4 correspond aux étiquettes actives, qui peuvent potentiellement communiquer entre elles. Parmi ceux-ci, la spécification UHF de Classe 1 Génération 2 (ou «Gen 2») est la plus utilisée [29]. Il a été intégré aux normes ISO en tant que norme passive 18000-6C [32]. L'ANSI / NCITS 256-2001 est la norme nationale américaine pour les dispositifs RFID [30]. Il est destiné à permettre la compatibilité et à encourager l'interopérabilité des produits pour le marché croissant de la RFID aux États-Unis.

I.9 Protocoles

Les protocoles sont un ensemble donné de codes «langage» qui permettent la communication entre l'étiquette et le lecteur. Il existe également des protocoles où un lecteur peut communiquer avec d'autres lecteurs à proximité. Les protocoles sont répartis dans les catégories suivantes:

Protocoles ouverts: Ils sont développés par des organismes de normalisation tels que ISO 18000-6 (A / B), ISO 14443 (A / B), etc. Les protocoles ouverts sont disponibles dans le monde entier et peuvent être utilisés par n'importe qui.

Protocoles exclusifs: Ils sont développés par les fabricants pour leur propre entreprise, comme «TI Tag-IT» de Texas Instrument, IntelliTag d'Intermec, etc. Les protocoles mentionnés ci-dessus peuvent être divisés en sous-sections où les lecteurs peuvent avoir besoin d'utiliser plusieurs protocoles pour des tags différents.

Ces types de protocoles sont mentionnés ci-dessous:

Protocoles d'interface aérienne: Ces protocoles dépendent de la façon dont l'étiquette et le lecteur communiquent basé sur la fréquence de fonctionnement, le débit, la modulation, les algorithmes anti-collision, etc.

Protocoles de contenu de données: Ces protocoles définissent la disposition de la structure de mémoire dans le CI. Par conséquent, ces protocoles facilitent la localisation de données spécifiques sur le CI de l'étiquette.

I.10 Avantages de la RFID

Bien que la technologie RFID soit devenue très populaire ces dernières années, le principal code-barres concurrent est encore répandu aujourd'hui. Ceci est largement dû au fait que les codes à barres ont l'avantage concurrentiel d'une technologie moins chère à employer pour les processus d'affaires.

Cependant, la RFID gagne du terrain et, avec la réduction des coûts des composants RFID (étiquettes, lecteurs, puces), l'écart se réduit. Certains des avantages et des inconvénients de la technologie RFID par rapport aux codes à barres sont mentionnés dans le Tableau I.3 ci-dessous.

RFID	Code à barre
1. L'identification des articles, des caisses et des palettes est possible.	1. Une seule identification de catégorie (articles, palettes).
2. Identification simultanée (lecture / écriture) possible.	2. Un seul élément peut être numérisé à la fois.
3. Haute capacité de données (16-64 Kilobytes).	3. Faible capacité de données (1 -100 octets).
4. Distance de lecture élevée (0-5m).	4. Distance de lecture inférieure (0-50cm).
5. L'usure a une influence minime.	5. Si l'encre du code-barres est tachée, il est impossible de numériser l'élément.
6. Le coût de l'étiquette est élevé.	6. Le code-barres peut être l'impression sur l'article, les coûts minimaux.
7. Les étiquettes RFID sont spécifiques à l'application; il faut donc du temps pour créer des étiquettes spécifiques afin de répondre aux exigences.	7. Le code-barres peut être imprimé sur des articles presque immédiatement.

Tableau I.3 : Technologie RFID comparée aux codes à barres traditionnels [33].

I.11 Problèmes de sécurité dans les systèmes RFID

Bien que les systèmes RFID puissent apparaître comme les technologies informatiques les plus répandues, certains problèmes de sécurité doivent encore être résolus. Comme les applications de la RFID ne cessent de se complexifier et de voir une utilisation plus large, la nécessité de mettre à jour les mesures de sécurité qui sont robustes mais qui répondent encore aux normes de travail simples de la RFID est également abondante.

L'un des principaux problèmes liés à la sécurité RFID est la confidentialité. Les tags révèlent des données sensibles lorsqu'ils sont interrogés par les lecteurs et ils le font sans discernement [34]. Tout auteur qui veut accéder à des données classifiées peut le faire, en interrogeant le tag, comme il est censé être. L'autre problème de sécurité le plus important dans l'utilisation de RFID est le suivi.

Les étiquettes permettent généralement à un tiers d'établir facilement une association entre une étiquette donnée et son détenteur ou propriétaire, en révélant l'emplacement à tout lecteur qui l'interroge [34].

En dehors de ces problèmes, un système RFID est toujours vulnérable aux attaques telles que l'usurpation d'adresse, le déni de service, l'écoute électronique, la contrefaçon et les attaques physiques.

Des recherches approfondies ont été menées dans le domaine de la sécurité RFID, car l'invasion de la technologie RFID dans tous les autres domaines attire l'attention, et un protocole de sécurité standardisé pour les systèmes RFID est envisageable dans un proche avenir.

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie RFID, nous avons discuté de l'histoire et le système RFID (principe de fonctionnement, les composants du système). Les différentes classes d'étiquettes RFID basées sur leurs critères tels que la puissance, les protocoles, la fréquence de fonctionnement ont été présentées.

Nous avons aussi cité les différentes applications de cette technologie. Enfin, nous avons décrit les avantages de la RFID et les problèmes de sécurité dans les systèmes RFID.

CHAPITRE II

SYSTEME RFID UHF

II.1 Introduction

La technologie RFID UHF passive a été largement utilisée pour le suivi des marchandises au niveau des palettes et des caisses. Le suivi des marchandises à chaque niveau peut améliorer l'efficacité et réduire les coûts de la chaîne d'approvisionnement. Avec les normes de code de produit électronique Gen 2 utilisées dans le monde entier, l'industrie dispose déjà de l'infrastructure pour la technologie en place. Les tags RFID passifs sont de plus en plus utilisés pour le suivi des actifs, qui a traditionnellement fait l'objet de tags RFID actifs à plus long terme, mais plus chers.

La communication est essentiellement le transfert de l'information c'est-à-dire envoyer des informations d'un endroit et de le recevoir à un autre. Dans le monde RF, ceci est accompli par le transfert d'énergie (qui contient l'information qui y est codée) à travers les ondes RF. Et les techniques de communication utilisées par les lecteurs RFID sont le couplage et la rétrodiffusion.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types de couplage de la RFID. Le principe de fonctionnement du système RFID UHF passif, ses caractéristiques, ses performances et ses limites seront étudiés. Dans un premier temps, nous allons énumérer les différents paramètres et caractéristiques des antennes utilisées dans la technologie RFID, ensuite des exemples des puces commerciales utilisées dans les tags RFID passifs seront présentés.

II.2 Communication par étiquette RFID

La communication entre l'étiquette RFID et le lecteur s'effectue soit par rayonnement électromagnétique, soit par couplage. Les bandes de fréquences standardisées les plus largement utilisées pour cette technologie sont les bandes basse fréquence (LF, 125-134 kHz), haute fréquence (HF, 13,56 MHz), ultra haute fréquence (UHF, 860-960 MHz) et micro-ondes (2,4 GHz et 5,8 GHz). Parmi ceux-ci, LF et HF sont basés sur le couplage de flux magnétique quasi statique entre les lecteurs et les bobines d'étiquettes.

Les systèmes UHF et hyperfréquences impliquent une interaction électromagnétique entre les vraies antennes et permettent des liaisons de communication plus longues [35]. L'antenne ainsi que la sensibilité de la puce sont les facteurs importants pour décider de la performance globale de l'étiquette RFID en termes de taille globale, de distance de lecture et de compatibilité avec les objets marqués.

II.2.1 Régions de champ

L'espace entourant l'antenne est divisé en trois régions, en fonction du comportement des champs [36]. Ces régions: le champ proche réactif, le champ proche rayonnant (ou Fresnel) et le champ lointain (ou Fraunhofer) sont représentés sur la Figure II.1, pour une antenne dont la plus grande dimension est D . La région réactive proche du champ est la région entourant l'antenne où les champs ne rayonnent pas principalement [37]. Pour une antenne petite, le rayon de cette sphère est noté $R_1 = \lambda/2\pi$ [37]. Pour les plus grandes antennes, cette région est désignée par [37]:

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (\text{II} - 1)$$

Les étiquettes aux fréquences LF et HF sont la plupart des boucles ou des antennes à bobines inductives et elles fonctionnent dans cette région [37].

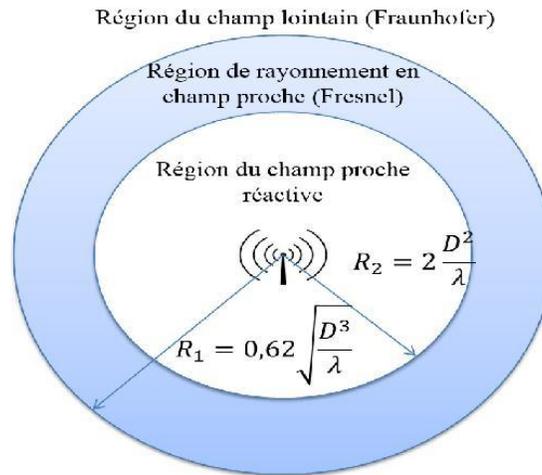


Figure II.1 : Régions de champ d'antenne.

➤ **Rayonnement par champ proche**, ou région de Fresnel, se situe entre la région de champ proche réactif et la région de champ lointain. Dans cette région, les champs rayonnent principalement et la distribution du champ angulaire dépend de la distance de l'antenne [37]. Si l'antenne est petite, cette région ne peut pas exister [37]. Pour les plus grandes antennes, le rayon intérieur de cette région sphérique est donné par (II-1) tandis que la région externe est donnée par [37]:

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (\text{II} - 2)$$

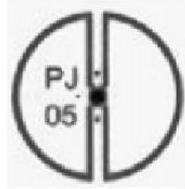


Figure II.2 : Antenne à champ proche [20].

➤ **La région lointaine, ou Fraunhofer**, est la région où rayonnent les champs et leur variation angulaire est essentiellement indépendante de la distance de l'antenne, les composantes des champs se situent essentiellement dans le plan transversal à la direction de propagation [37].

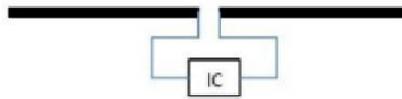


Figure II.3 : Antenne à champ lointain.

II.2.2 Mécanismes de couplage

Les mécanismes de couplage de différentes classes d'étiquettes sont importants en ce qui concerne les caractéristiques de fonctionnement telles que la distance de lecture et la puissance de fonctionnement. Les mécanismes de couplage associés aux étiquettes RFID peuvent être divisés en deux catégories, à savoir le couplage en champ proche (couplage inductif) et le couplage en champ lointain (rétrodiffusion modulée). Cette section traitera ces types de mécanismes de couplage.

➤ **Couplage par champ proche:** Il s'agit de l'espace tridimensionnel entourant l'antenne. Les étiquettes basse fréquence (LF), haute fréquence (HF) et NFC (Near-Field Communication) utilisent ce type de mécanisme de couplage. L'antenne utilisée pour ce type de couplage est appelée « transformateur » [4] et a une forme de « bobine inductive ». Étant donné que la distance de lecture est limitée à quelques centimètres, les applications typiques pour ce type de couplage comprennent l'étiquetage des animaux, les cartes de proximité, les

paiements sans contact, etc. L'opération de couplage inductif entre le lecteur et l'étiquette est représentée sur la Figure II.4.

➤ **Couplage par champ lointain:** Il s'agit de l'espace tridimensionnel au-delà du champ proche et englobe le lecteur ainsi que l'étiquette. L'énergie électromagnétique est rayonnée de manière radiale dans le champ lointain, la puissance diminue avec l'augmentation de la distance. L'énergie EM rayonnée par l'antenne du lecteur est réfléchiée ou absorbée par l'antenne de l'étiquette en fonction de la section radar de l'antenne de l'étiquette (RCS). Le circuit intégré de l'étiquette commute entre une charge et un court-circuit et il est donc capable de contrôler l'onde EM réfléchiée. L'onde EM réfléchiée est captée par l'antenne du lecteur, est amplifiée et décodée pour extraire les données envoyées. Ce type de couplage est utilisé dans l'étiquette ultra haute fréquence (UHF) et les étiquettes hyperfréquences.

Etant donné que la distance de lecture est de plusieurs mètres (20 mètres, [37]), les applications typiques de ce type de couplage comprennent les processus de chaîne logistique, pharmaceutiques, de santé, etc.

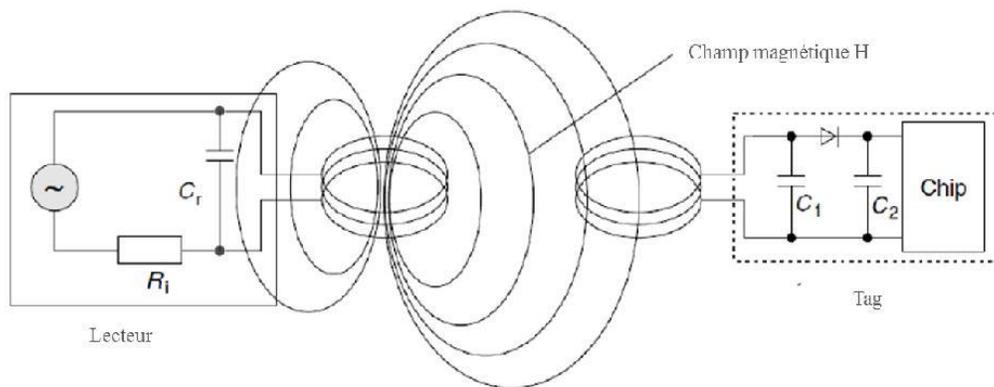


Figure II.4 : Alimentation d'une étiquette couplée par induction à partir d'un champ alternatif magnétique généré par le lecteur [22].

II.3 Distance de lecture et l'hypothèse de puissance

La distance de lecture est la distance maximale que l'interrogateur RFID et le transpondeur peuvent communiquer entre eux [38]. La plage de lecture est une spécification et une caractéristique importantes d'un système RFID. Les transpondeurs RFID actifs ont des plages de lecture plus longues que celles des transpondeurs RFID passifs qui sont entièrement alimentés par l'énergie RF reçue. La plage de lecture réelle dépend de la fréquence, à la fois des conceptions d'antenne et de la puissance isotrope rayonnée effective (EIRP) [14][39]. Dans cette plage de lecture, les transpondeurs RFID reçoivent suffisamment d'énergie RF et alimentent le circuit intégré pour rétrodiffuser le signal modulé au lecteur [15]. Les systèmes RFID LF et HF sont basés sur un couplage inductif, tel que le TI-RFID fonctionnant à 13,56 MHz. La portée de lecture de ce type de système RFID ne dépasse pas quelques centimètres.

Les plages de lecture des systèmes RFID UHF, par exemple 915 MHz, sont supérieures à plusieurs pieds, basés sur le couplage par rétrodiffusion électromagnétique. Ce système est également appelé système à longue portée par rapport au système à courte portée [2]. Il y a deux façons d'augmenter la plage de lecture. L'un est d'augmenter la puissance d'émission et l'autre est de diminuer le seuil minimum de puissance de fonctionnement requis par le transpondeur [15]. Récemment, la technologie a diminué la puissance de fonctionnement minimale requise à la gamme de 0,5-1 mW, et même plus bas [40], par conséquent, la puissance minimale requise pour le circuit intégré d'étiquette (IC) est d'environ 0,1-0,2 mW. L'antenne peut rayonner de l'énergie jusqu'à 4 watts d'EIRP dans la plage UHF [41].

La plage de lecture théorique est plus longue que la plage de lecture réelle. La plage de lecture peut être calculée en utilisant la formule d'espace libre de Friis, notez qu'il est supposé que la plage de lecture est dans l'espace libre :

$$r_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{\text{th}}}} \quad (\text{II} - 3)$$

Où λ est la longueur d'onde, P_t est la puissance transmise par le lecteur, G_t est le gain de l'antenne d'émission, G_r est le gain d'antenne de l'étiquette, P_{th} est la puissance de seuil minimum pour alimenter l'étiquette, et τ est le coefficient de transmission de puissance à la fréquence de résonance de l'étiquette. $P_t G_t$ est la PIRE [42]. Le gain de puissance ou de courant peut être exprimé en décibel (dB).

II.4 Paramètres fondamentaux des antennes

Dans cette section, certains paramètres d'antenne majeurs et les plus courants seront discuté

II.4.1 Rapport d'ondes stationnaires de tension VSWR

Il représente le rapport d'onde stationnaire de tension et il est lié au coefficient de réflexion de l'antenne, comme indiqué par l'équation (II-4). Un VSWR plus petit correspond à une transmission de puissance plus efficace, ainsi, une antenne ayant un VSWR plus petit (moins de 2) est souhaitable pour les applications RFID. Le VSWR d'une antenne dépend de la fréquence et il est le plus petit à la fréquence de résonance.

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{II} - 4)$$

L'équation (II-4) révèle que le VSWR d'une antenne est toujours supérieur ou égal à 1, l'un étant la condition parfaite lorsque toute la puissance du signal circulant dans le port d'antenne est rayonnée dans l'espace.

II.4.2 Fréquence de résonance

Toute antenne émet ou reçoit des ondes électromagnétiques de manière efficace à une ou plusieurs fréquences, en fonction des considérations de conception et d'adaptation liées à l'équation de Friis. Ces fréquences dans le contexte RFID sont appelées fréquence de résonance [22].

Pour les tags RFID, la fréquence de résonance f_0 est définie comme la fréquence où la tension aux bornes de la puce RFID atteint son maximum. C'est la tension d'intérêt car elle est cruciale pour l'alimentation en tension de la puce RFID.

II.4.3 Facteur de qualité

Il est courant d'évaluer la qualité d'un élément réactif, tel qu'un condensateur ou une inductance, par le facteur de qualité, ou Q. Généralement, $Q = \omega \frac{\text{Énergie stockée}}{\text{Puissance dissipée}}$ pour les antennes, Q est une métrique importante car elle est inversement proportionnelle à la bande passante. Officiellement $BW = \frac{f_0}{Q}$ où f_0 est la fréquence de résonance de l'antenne et BW est la plage de fréquences sur laquelle l'énergie stockée dans le système est au moins la moitié de l'énergie stockée à la fréquence de résonance. L'énergie est stockée dans une antenne à travers

la capacité et l'inductance des éléments de l'antenne. L'énergie peut être dissipée soit par rayonnement, soit par d'autres pertes, telles que les pertes ohmiques sur les conducteurs et les pertes diélectriques.

II.4.4 Directivité

La directivité d'une antenne est définie comme le rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction donnée de l'antenne à l'intensité du rayonnement moyennée dans toutes les directions. L'intensité de rayonnement moyenne est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par 4π [37].

La directivité d'une source non isotrope est égale au rapport de son intensité de rayonnement dans une direction donnée sur celle d'une source isotrope. En l'exprimant sous une forme mathématique, nous devons commencer par définir l'intensité du rayonnement (U) d'une antenne, et l'intensité du rayonnement d'une antenne isotrope (U_0) comme dans l'équation (II-5) et (II-6). L'équation (II-7) exprime la directivité si la direction est spécifiée tandis que l'équation (II-8) exprime la directivité maximale si la direction n'est pas spécifiée.

$$U = r^2 W_{\text{rad}} \quad (\text{II} - 5)$$

$$U_0 = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi} \quad (\text{II} - 6)$$

U : l'intensité du rayonnement

r : la distance

W_{rad} : la densité de rayonnement

U_0 : l'intensité de rayonnement d'une source isotrope

P_{rad} : la puissance totale rayonnée

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} \quad (\text{II} - 7)$$

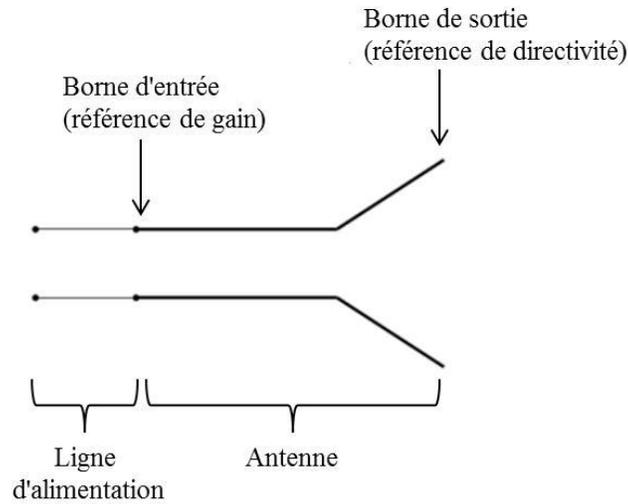
$$D_{\text{max}} = D_0 = \frac{U_{\text{max}}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} \quad (\text{II} - 8)$$

D : la directivité

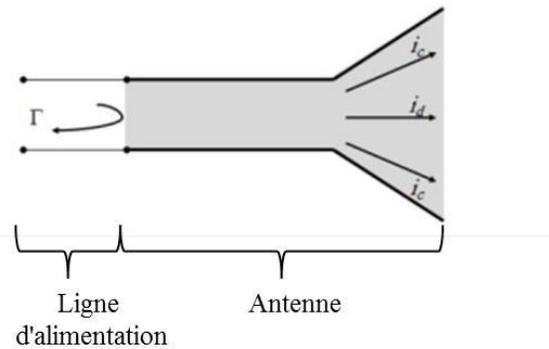
D_0 : la directivité maximale

II.4.5 Efficacité de l'antenne

L'efficacité globale d'une antenne se compose d'un certain nombre de sous-efficacités qui sont illustrées à la Figure II.5. L'efficacité totale de l'antenne e_0 est utilisée pour prendre en compte les pertes aux bornes d'entrée et dans la structure de l'antenne.



a) bornes de référence d'antenne.



b) réflexions, conduction et pertes diélectriques.

Figure II.5 : Bornes de référence et les pertes d'une antenne.

De telles pertes peuvent être dues à des réflexions provoquées par la désadaptation entre la ligne d'alimentation et l'antenne, ou à des pertes causées par le conducteur ou le matériau diélectrique de l'antenne. L'efficacité globale, ou l'efficacité totale, peut être écrite comme dans (II-9).

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (\text{II} - 9)$$

Où

e_0 : efficacité totale

e_r : réflexion (incompatibilité) efficacité = $(1 - |\Gamma|^2)$

e_c : l'efficacité de la conduction

e_d : l'efficacité diélectrique

II.4.6 Gain

Le gain d'une antenne est utilisé pour caractériser les performances d'une antenne. Bien que le gain de l'antenne soit étroitement lié à la directivité, c'est une mesure qui prend en compte l'efficacité de l'antenne ainsi que ses capacités directionnelles, tandis que la directivité est un paramètre qui ne décrit que les propriétés directionnelles de l'antenne. Donc contrôlé uniquement par le diagramme de rayonnement.

Le gain d'une antenne dans une direction donnée est défini comme le rapport de l'intensité dans la direction donnée à l'intensité de rayonnement qui serait obtenue si la puissance était rayonnée isotrope. L'intensité du rayonnement correspondant à la puissance isotrope rayonnée est égale à la puissance captée par l'antenne divisée par 4π [37]. Cela peut être exprimé dans l'équation (II-10)

$$\text{Gain} = \frac{4\pi U}{P_{in}} \quad (\text{II} - 10)$$

U : intensité du rayonnement

P_{in} : puissance d'entrée totale de l'antenne

II.4.7 Bande passante

La bande passante est considérée comme la gamme de fréquences pour laquelle le diagramme et l'impédance se situent dans une limite acceptable de la forme et des valeurs déterminées à la fréquence centrale [37].

Il existe une distinction entre la largeur de bande de diagramme de rayonnement et la largeur de bande d'impédance, car ces deux caractéristiques ne varient pas de la même manière. Par exemple, le diagramme de rayonnement d'un dipôle linéaire de longueur totale inférieure à une demi-longueur d'onde ($l < \lambda/2$) est insensible à la fréquence [37]. Néanmoins, le gain, la polarisation, l'impédance et la bande passante sont liés.

II.4.8 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée est définie comme l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ou le rapport de la tension au courant à une paire de bornes ou le rapport des composants appropriés des champs électriques aux champs magnétiques à un point.

Le rapport entre la tension et le courant à ces bornes, sans charge attachée, définit l'impédance de l'antenne comme $Z_A = R_A + j X_A$ où.

Z_A : l'impédance d'antenne aux bornes d'entrée d'antenne

R_A : la résistance de l'antenne aux bornes d'entrée de l'antenne

X_A : la réactance d'antenne aux bornes d'entrée de l'antenne

II.4.9 Diagramme de rayonnement

Une antenne ne rayonne pas d'énergie uniformément dans toutes les directions. Cette caractéristique de la variation spatiale de la densité de puissance le long d'un rayon constant est appelée un diagramme de rayonnement. Dans la plupart des cas, le diagramme de rayonnement est déterminé dans la région du champ lointain et est représenté en fonction des coordonnées directionnelles [37].

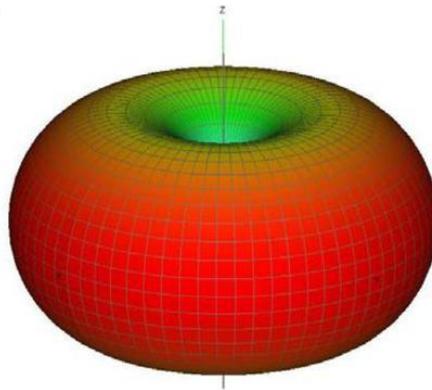


Figure II.6 : diagramme de rayonnement d'un dipôle

A titre d'exemple, la figure II.6 illustre le diagramme de rayonnement d'une antenne dipôle.

L'espace entourant une antenne est généralement subdivisé en trois régions:

(a) champ proche réactif $0 < r < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$.

(b) rayonnant en champ proche (Fresnel) $0.62\sqrt{D^3/\lambda} < r < \frac{2D^2}{\lambda}$.

(c) champ lointain (Fraunhofer) $\frac{2D^2}{\lambda} < r < \infty$.

Où r est le rayon du champ, D est la plus grande dimension de l'antenne et λ est la longueur d'onde.

Lorsque la distance varie du champ proche réactif au champ lointain, le diagramme de rayonnement d'une antenne change de forme en raison des variations de ces champs.

Le vecteur moyen de Poynting peut s'écrire $W_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} * \mathbf{H}^*]$ (W/m²) et représente la partie réelle du vecteur Poynting instantané. Cette quantité est la densité de puissance moyenne associée aux champs électromagnétiques d'une antenne dans sa région de champ lointain.

La partie imaginaire du vecteur instantané de Poynting représente la densité de puissance réactive (stockée).

La puissance moyenne totale rayonnée par une antenne peut s'écrire

$$P_{\text{rad}} = P_{\text{av}} = \oint_S \mathbf{W}_{\text{av}} \cdot d\mathbf{s} \quad (\text{II} - 11)$$

L'intensité du rayonnement dans une direction donnée est définie comme la puissance rayonnée d'une antenne par unité d'angle solide. Sous forme mathématique, il peut être exprimé comme $U = r^2 \cdot W_{\text{av}}$

Par conséquent, une autre expression pour la puissance rayonnée peut être écrite comme :

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (\text{II} - 12)$$

Cette expression ci-dessus permettra l'introduction de l'intensité de rayonnement pour une source isotropique, qui est uniforme dans toutes les directions.

$$U_0 = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi} \quad (\text{II} - 13)$$

Dans le cas du dipôle fonctionnant dans l'air, placé sur l'axe vertical et centré sur l'origine, l'intensité du rayonnement est trouvée :

$$U = r^2 W_{av} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]^2 \quad (\text{II} - 14)$$

Où l est la longueur du dipôle, $k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde dans l'air, $n = 377$ ohm est l'impédance intrinsèque de l'air, I_0 est l'amplitude du courant dans l'antenne avec une distribution sinusoïdale, θ est l'élévation mesurée à partir de la verticale.

Habituellement, le diagramme de rayonnement est normalisé par rapport à sa valeur maximale et tracé sur une échelle logarithmique (dB).

II.4.10 Taille

La taille d'une antenne signifie le volume géométrique occupé par l'antenne. Parce que la taille et le coût d'une étiquette sont associés à la taille de l'antenne, il est souhaitable d'avoir une taille plus petite pour un ensemble défini de paramètres. Habituellement, les antennes planaires sont utilisées pour l'application RFID limitant la taille à la zone géométrique de l'antenne.

II.4.11 Section transversale du radar

La section radar, généralement appelée RCS, est un paramètre de champ lointain qui est utilisé pour caractériser les propriétés de diffusion d'une cible radar [37]. En général, la RCS d'une cible est fonction de la polarisation de l'onde incidente, de l'angle d'incidence, de l'angle d'observation, de la géométrie de la cible, des propriétés électriques de la cible et de la fréquence de fonctionnement. Les unités de la RCS des cibles tridimensionnelles sont des mètres carrés ou, pour des valeurs normalisées, des décibels par mètre carré (dBsm).

Pour une cible, il y a RCS monostatique ou rétrodiffusé lorsque l'émetteur et le récepteur sont au même endroit. Pour simplifier, si les antennes sont identiques et sont polarisées, la section radar totale de l'antenne pour la rétrodiffusion peut être écrite comme suit:

$$\sigma = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} G_0^2 |A - \Gamma^*|^2 \quad (\text{II} - 15)$$

G_0 est le gain pour la directivité maximale et A est un paramètre complexe indépendant de la charge. Si l'antenne est un dipôle mince, alors $A \cong 1$ et l'expression se réduit à :

$$\sigma = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} G_0^2 |1 - \Gamma^*|^2 \quad (\text{II} - 16)$$

II.4.12 Polarisation

La polarisation de l'antenne est définie comme l'orientation du champ électrique d'une onde électromagnétique, c'est-à-dire la direction des oscillations dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation [37]. Les antennes peuvent être classées en fonction de la polarisation du rayonnement émis.

➤ **Antenne polarisée linéairement:** en polarisation linéaire, le vecteur du champ électrique oscille en ligne droite. Le champ oscillant peut être exprimé comme la somme des vecteurs polarisés horizontalement et polarisés verticalement. Les ondes polarisées horizontalement oscillent parallèlement à la surface de la Terre, tandis que les ondes polarisées verticalement oscillent perpendiculairement à la surface de la Terre [43].

Comme le montre la Figure II.7 les antennes polarisées linéairement sont sensibles à l'orientation des étiquettes car les performances des étiquettes dépendent de son orientation par rapport à l'antenne.

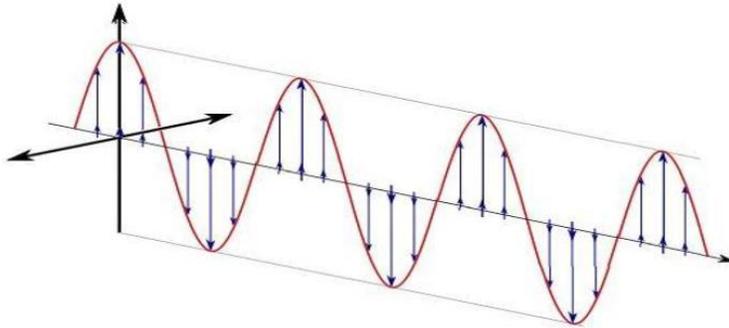


Figure II.7 : Antenne polarisée linéairement [44].

➤ **Antenne polarisée circulairement:** Dans le cas d'un rayonnement polarisé circulairement, la direction du vecteur du champ électrique tourne dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Le champ de rayonnement d'une antenne polarisée circulaire n'est pas sensible à l'orientation de l'étiquette. C'est parce que le

rayonnement polarisé circulairement contient des quantités égales de composantes horizontales et verticales de la polarisation linéaire.

Par conséquent, avec une antenne polarisée circulairement, l'orientation de l'étiquette n'est pas critique. En outre, les effets multi-trajets peuvent être réduits avec des antennes polarisées circulairement car ils émettent / reçoivent des signaux dans tout le plan et peuvent distinguer le signal en visibilité directe des autres signaux réfléchis avec polarisation opposée tandis que les antennes polarisées linéairement sont plus sensibles aux effets à une possibilité accrue d'avoir des signaux réfléchis [45].

La polarisation est l'un des choix dans la mise en œuvre du système RF à sélectionner en fonction de la fréquence, de la plage de lecture requise par les applications et d'autres facteurs environnementaux.

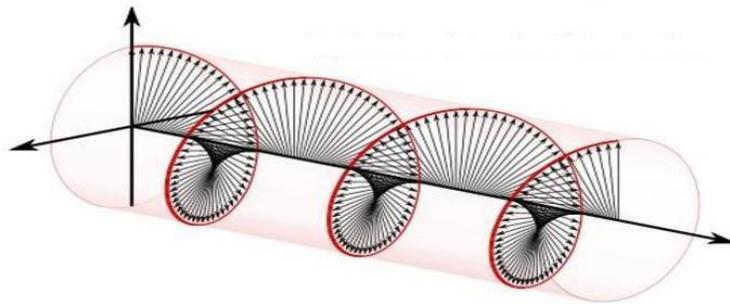


Figure II.8 : Antenne polarisée circulairement [44].

II.4.13 Ouverture effective

Ce paramètre décrit la caractéristique de capture de puissance de l'antenne, quand la vague l'atteint. Dans le cas d'une onde plane entrante avec une densité de puissance S , l'ouverture effective A_e relie S à la puissance maximale reçue qui peut être tirée d'une antenne, étant donné l'alignement et la polarisation correcte :

$$P_e = A_e \cdot S \quad (\text{II. 17})$$

II.5 Le système RFID UHF passif

II.5.1 Fonctionnement des étiquettes RFID passives

Une caractéristique très importante des systèmes RFID est l'alimentation électrique du transpondeur. Les étiquettes passives n'ont pas leur propre source d'alimentation et par conséquent, toute la puissance requise pour leur fonctionnement doit être tirée du champ du lecteur [46]. Les étiquettes UHF passives fonctionnent dans la bande UHF de 860 MHz à 960 MHz. Différents sous-ensembles de cette gamme sont utilisés dans différentes régions du monde. Le Tableau II.1 montre la fréquence attribuée aux différents pays [47].

Dans les systèmes RFID UHF passifs, le lecteur transmet l'énergie RF pour détecter l'étiquette constituée d'une antenne adaptée et d'une puce qui agit comme charge. L'étiquette peut être dans le champ proche ou dans le champ lointain de l'émetteur. La zone située après le point où le champ électromagnétique s'est complètement formé s'appelle le champ lointain de l'antenne.

Pays	Fréquence
L'Europe	865-869 MHz
États-Unis et Canada	902-928 MHz
Corée	910-914 MHz
Corée et Singapour	923-925 MHz
Hong Kong	920-925 MHz
Japon	952-954 MHz

Tableau II.1 : attributions de fréquence pour différents pays.

L'antenne reçoit cette énergie et s'il y a suffisamment d'énergie pour alimenter la puce, l'étiquette répond au lecteur. L'énergie RF du lecteur vers l'étiquette (liaison directe) est rétrodiffusée depuis l'étiquette vers le lecteur (liaison retour) avec les données de la puce RFID.

II.5.2 Transfert maximum de puissance

Les étiquettes RFID UHF communiquent avec le lecteur en utilisant le principe de rétrodiffusion. La puce de l'étiquette récupère la puissance RF transmise par le lecteur afin de fournir l'alimentation électrique de la puce. La puce utilise cette puissance pour basculer entre deux états d'impédance [48]. Ce changement d'état d'impédance module le signal rétrodiffusé

par l'antenne d'étiquette RFID et l'étiquette l'utilise pour communiquer avec le lecteur. La puce utilise des diodes afin de récolter la puissance RF et a donc une impédance d'entrée complexe. L'antenne d'étiquette RFID UHF qui est directement connectée à la puce devrait donc avoir une impédance d'adaptation conjuguée à celle de la puce afin d'avoir une efficacité de transfert de puissance maximale [20][48].

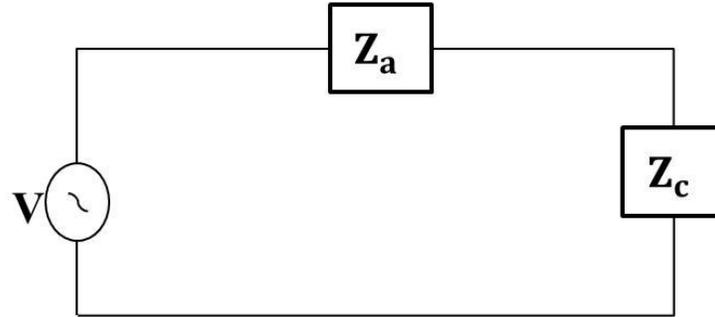


Figure II.9: Modèle de circuit d'une étiquette RFID.

La Figure II.9 montre le circuit pour une étiquette RFID passive. Soit $Z_a = R_a + jX_a$ et $Z_c = R_c - jX_c$ l'impédance de l'antenne et de la puce respectivement. Le transfert de puissance maximum se produit lorsque $Z_a = Z_c^*$.

Comme nous avons des impédances de source et de charge complexes, le coefficient de réflexion S_{11} n'est pas la métrique appropriée pour le transfert de puissance. Le transfert de puissance est régi par le coefficient de transmission de puissance ' τ ' donnée par l'expression suivante [15].

$$\tau = \frac{4 \cdot R_a R_c}{|Z_a + Z_c|^2} \quad 0 < \tau < 1 \quad (\text{II} - 18)$$

Le coefficient de réflexion d'onde de puissance peut être défini comme :

$$S_{11} = \frac{Z_a - Z_c^*}{Z_a + Z_c^*} \quad 0 < |S_{11}|^2 < 1 \quad (\text{II} - 19)$$

Donc on peut définir aussi $\tau = 1 - |S_{11}|^2$.

En outre, où $\tau = 1$, la puissance maximale est transférée et l'antenne est dite être parfaitement adaptée à la puce à une fréquence particulière.

II.5.3 Equation de Friis

En supposant que le système RFID fonctionne dans un environnement de canal idéal, les équations de Friis [37][49] peuvent être utilisées pour déterminer la puissance reçue du lecteur à l'étiquette pour une distance donnée. Par conséquent, si l'antenne de l'étiquette est l'antenne de réception, et que l'antenne du lecteur est l'antenne d'émission, et que les deux antennes sont séparées par une distance 'r', alors la puissance reçue est définie par :

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi r)^2} \quad (\text{II} - 20)$$

Où P_r est la puissance reçue de l'antenne du lecteur à l'antenne de l'étiquette. P_t est la puissance transmise par le lecteur. Les gains d'antenne du lecteur et de l'étiquette sont donnés par G_t et G_r respectivement. Cependant, il peut y avoir un désaccord de polarisation (ρ) entre le lecteur et les antennes de l'étiquette, et toute la puissance absorbée par le récepteur n'est pas disponible pour la charge en raison de la différence d'impédance (r). Compte tenu de ces facteurs, l'équation de Friis modifiée est écrite comme indiqué dans l'équation suivante:

$$P_r = \rho \tau \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi r)^2} \quad (\text{II} - 21)$$

La puissance reçue est utilisée pour alimenter la puce RFID et re-rayonner vers le lecteur.

II.5.4 Caractéristiques générales

Les performances des étiquettes RFID varient en fonction des conditions dans lesquelles elles sont utilisées. Les caractéristiques générales des étiquettes RFID UHF passives disponibles dans le commerce et basées sur des repères de performance pour les étiquettes RFID UHF passives de [50] sont résumées ci-dessous.

- **Performance dans l'espace libre:** la mesure de performance d'une étiquette est mesurée en termes de nombre de fois qu'une étiquette répond au lecteur, et est détectée ou lue par elle. Le nombre de lectures réussies par unité de temps est défini comme taux de lecture ou taux de réponse. La plupart des étiquettes fonctionnent bien lorsqu'elles sont mesurées dans l'espace libre. Le taux de lecture diminue à mesure que l'on s'éloigne de la distance, car l'atténuation augmente. La diminution du taux de lecture dépend des équations de transmission de Friis. Une autre mesure de performance est la sensibilité d'orientation des étiquettes. Les étiquettes dipolaires simples sont plus sensibles à l'orientation que les

conceptions dipolaires doubles en raison de la différence dans les diagrammes de rayonnement.

- **Variance dans les étiquettes:** généralement, les étiquettes présentent une variance considérable dans les performances. La variance la plus faible mesurée par [50] était près de 3dB.

- **Taux de lecture:** différents protocoles entraînent des réponses de lecture différentes dans l'isolement et dans la population. Lorsque l'isolement est défini comme une condition dans laquelle une seule étiquette est présente dans le champ RF du lecteur et des moyens de population lorsqu'un certain nombre d'étiquettes sont toutes présentes simultanément dans le champ RF du lecteur.

- **Performance à proximité du métal:** les étiquettes subissent une dégradation sévère des performances lorsqu'elles sont placées devant le métal. Il a été observé que toutes les étiquettes testées seraient lues à une séparation de 2,5 mm du métal [50]. Comme la séparation augmente la performance s'améliore.

- **Performance près de l'eau:** la plupart des étiquettes sont désaccordées devant l'eau. Les étiquettes qui fonctionnent bien dans l'espace libre fonctionnent nécessairement bien à proximité de l'eau. Selon [50] toutes les étiquettes testées seraient lues à une séparation de 2,5 mm du métal. Comme la séparation augmente la performance est améliorée.

Les études ci-dessus [50] montrent que les performances des étiquettes RFID passives sont limitées en fonction de facteurs externes tels que la distance, l'orientation et les propriétés des matériaux marqués.

II.5.5 Limitations de performance

Nous avons noté dans la section précédente que la plupart des étiquettes RFID fonctionnent bien dans l'espace libre, mais subissent une dégradation des performances lorsqu'elles sont attachées à différents matériaux. Cette perte de performance est due au fait que les caractéristiques du matériau affectent les propriétés critiques de l'antenne telles que la constante diélectrique du substrat et la tangente de perte, l'efficacité du rayonnement, le diagramme de rayonnement et l'impédance de rayonnement.

Les matériaux diélectriques et à pertes élevées tels que l'eau désaccordent l'étiquette et réduisent l'efficacité du rayonnement. La proximité des métaux entraîne une augmentation importante de la résistance de rayonnement de l'antenne, ce qui empêche un transfert de

puissance efficace entre l'antenne et la puce RFID. Puisque le métal et l'eau sont des matériaux courants que la RFID est couramment utilisée pour suivre, nous appelons cela le problème eau-métal. L'utilisation de matériaux à faible diélectrique tels que la mousse et les plastiques pour séparer les métaux peut améliorer les performances des étiquettes, mais augmente également les coûts d'épaisseur et de fabrication de manière significative [50].

La Figure II.10 montre l'effet de différents matériaux sur l'efficacité du rayonnement dipolaire en champ lointain.

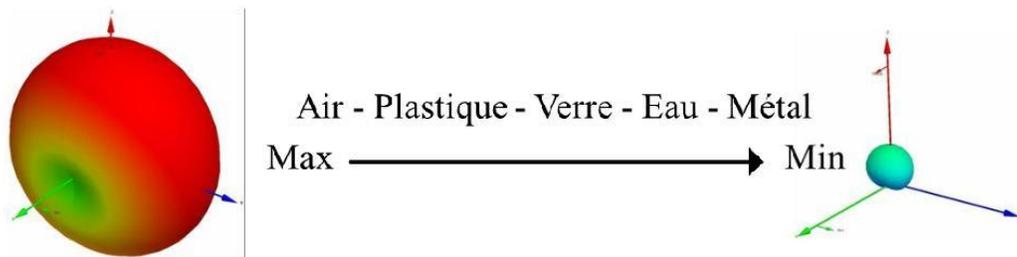


Figure II.10 : Dégradation qualitative des performances d'un dipôle UHF lorsqu'il est placé sur différents matériaux.

La tendance des étiquettes RFID à perdre de la performance lorsqu'elles sont attachées à certains matériaux limite son application aux matériaux d'étiquetage qui ont presque des propriétés d'espace libre. Malheureusement, la plupart des objets sont fabriqués en métal, sont emballés dans des conteneurs en plastique ou des conteneurs en métal. Par conséquent, il existe un besoin immédiat de développer des étiquettes RFID qui auront des caractéristiques de performance constantes quel que soit le matériau auquel elles sont attachées.

Alors que plusieurs tentatives [51] [52] [53] ont été faites pour créer des étiquettes qui fonctionnent bien lorsqu'elles sont attachées au métal ou aux plastiques. Il s'agit principalement de modèles spécifiques pré-adaptés pour travailler sur différents matériaux [52] [53]. Par exemple, une étiquette conçue pour bien fonctionner près du métal sera encore désadaptée lorsqu'elle est placée sur du plastique ou près de l'eau. Ou ce sont des dipôles ordinaires ou certaine variation de celui-ci enfermé dans des boîtiers en plastique robuste pour protéger contre les effets du métal et de l'eau.

Une façon d'obtenir des performances uniformes avec différents matériaux consiste à concevoir une antenne séparée électriquement du matériau. Les antennes Microstrip ont une couche d'antenne supérieure, un substrat et un plan de masse. Le plan de masse sépare

l'antenne à microbande du matériau auquel elle est attachée. Les antennes Microstrip offrent donc un potentiel de problème métal-eau de la RFID UHF passive.

II.6 Tags dans le système RFID UHF

La combinaison d'une puce et antenne est appelée transpondeur ou plus communément étiquette. L'antenne attachée à la puce est chargée de transmettre des informations de la puce au lecteur, en utilisant des ondes radio. Généralement, plus l'antenne est grande, plus la distance de lecture est longue.

II.6.1 Types d'antennes

Les types d'antennes peuvent différer selon la forme physique, les dimensions, la méthode d'alimentation, le gain, la bande passante, l'impédance et d'autres facteurs.

Les antennes d'étiquette RFID UHF sont généralement mises en œuvre en tant que dipôles imprimés modifiés ou patch [22] pour obtenir la réactance d'entrée inductive souhaitée requise pour l'adaptation d'impédance conjuguée de puce électronique et pour réduire la taille de l'antenne.

Les principales considérations lors du choix de l'antenne pour la conception sont mentionnées ci-dessous.

- Doit être assez petite pour s'attacher à l'objet [54].
- Avoir un diagramme de rayonnement omnidirectionnel afin que l'étiquette puisse être lue dans n'importe quelle direction.
- Avoir une impédance excitante minimale pour la puce.
- Très robuste et bon marché

➤ Antenne dipôle

Les antennes dipôles sont l'un des types d'antennes les plus simples et les moins chères. Une antenne dipôle est une antenne radio qui peut être faite d'un fil simple avec un élément entraîné central. Il se compose de deux fils conducteurs métalliques orientés en parallèle et colinéaires l'un à l'autre, avec un petit espace entre eux.

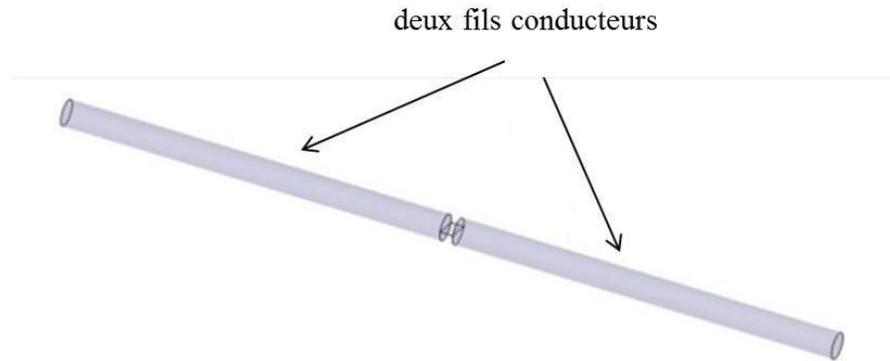


Figure II.11 : Structure d'une antenne dipôle.

Le signal de radiofréquence est appliqué à l'antenne au centre, entre les deux conducteurs. Il existe différents types d'antennes dipôles, chacun fournissant un gain donné. En général, une antenne dipôle fournit un gain d'antenne compris entre 1,5 et 2,15 dB avec un diagramme typique illustré dans la Figure II.12.

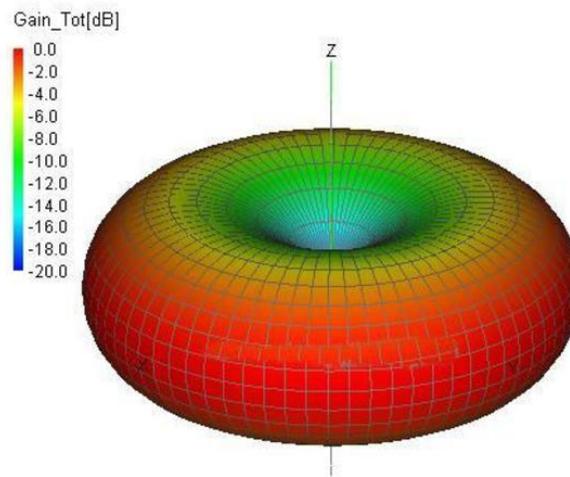


Figure II.12 : diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne dipôle.

➤ Antenne Patch (Microstrip)

Lors de la conception d'une antenne pour une application où la taille, le poids, le coût, la performance et la facilité d'installation est un facteur, l'antenne microruban est le choix parfait. Ces antennes sont à profil bas, conformes à des surfaces planes et non planes, simples et économiques à fabriquer en utilisant une technologie de circuit imprimé moderne. Elles sont mécaniquement robustes lorsqu'elles sont montées sur des surfaces rigides.

Les antennes patch ont un facteur de qualité Q élevé, ce qui leur confère un profil de bande passante étroite, ce qui est souhaitable dans les applications à bande étroite. Les Patch antennes, se composent d'une fine couche d'une bande métallique (patch) montée au-dessus d'un matériau dialectique, également connu comme le substrat, qui sépare le patch du plan de masse. Il existe différentes formes d'antennes patch, en fonction des propriétés requises et de la méthode d'alimentation, comme illustré dans la Figure II.13.

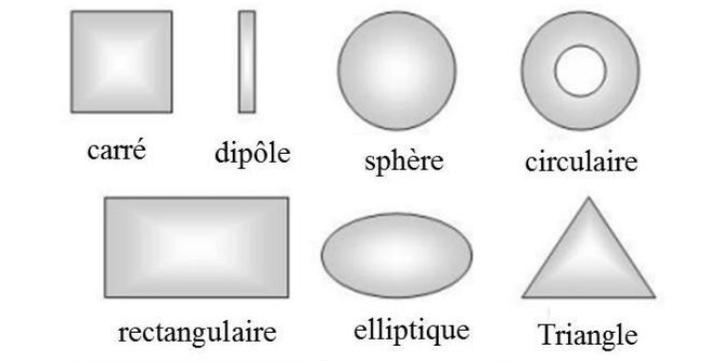


Figure II.13 : Différentes formes d'antennes patch.

L'antenne patch la plus utilisée est l'antenne patch rectangulaire qui est conçue principalement en contrôlant deux paramètres la longueur (L) et la largeur (W). Le paramètre (L) contrôle la fréquence de résonance et (W) a un impact important sur l'impédance d'entrée la Figure II.14.

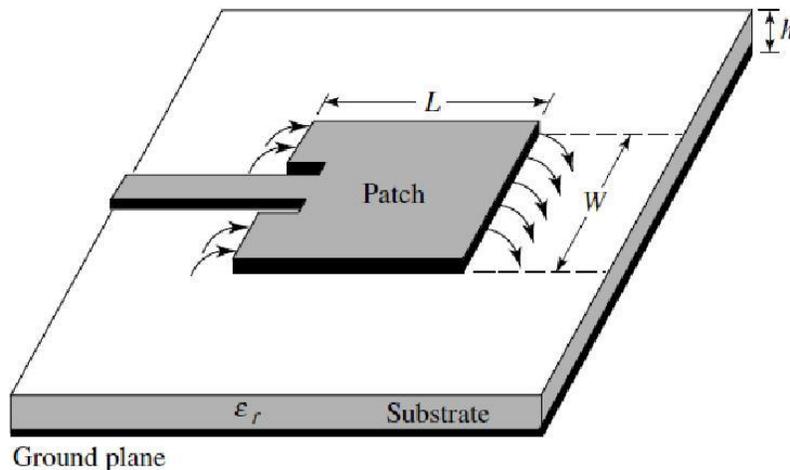


Figure II.14 : Antenne patch rectangulaire Microstrip avec les paramètres de conception.

Une antenne à plaquette rectangulaire fournit un gain élevé qui atteint généralement 5dBi à 7dBi, tout en conservant un diagramme de rayonnement plus orienté dans une direction, perpendiculaire à la surface du patch, comme le montre la Figure II.15.

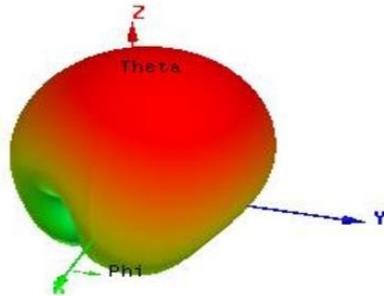


Figure II.15 : Diagramme de rayonnement 3D d'une antenne patch (microruban).

II.6.2 Les puces pour les systèmes RFID UHF

La puce, généralement en silicium, contient des informations sur l'objet auquel s'est attaché. Les puces utilisées par les fabricants pour identifier les biens de consommation peuvent contenir un code de produit électronique («EPC»)[55]. L'EPC RFID est l'équivalent du code produit universel connu («UPC»), ou code à barres, actuellement imprimé sur de nombreux produits. Les codes à barres doivent faire l'objet d'un balayage optique et ne contiennent que des informations génériques sur le produit. En revanche, les puces EPC sont cryptées avec un code de produit unique qui identifie le produit individuel auquel il est attaché, et peut être lu en utilisant la fréquence radio. Ces codes contiennent le type de données que les fabricants de produits et les détaillants utiliseront pour suivre l'authenticité et l'emplacement des marchandises tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

Il existe de nombreuses puces disponibles dans le commerce. Le Tableau II.2 montre un certain nombre de puces que les fabricants de RFID ont produits au cours de la dernière décennie, ainsi que leurs impédances et sensibilités. Le tableau n'est pas une liste exhaustive de toutes les puces. Au contraire, il est destiné à fournir quelques exemples et montrer la variété et la gamme d'impédances et de valeurs sensibilités disponibles auprès des puces commerciales qui ont été conçus pour les étiquettes RFID.

Puce IC	Bande passante (MHz)	Sensibilité P_{th} (dBm)	Résistance R_{in} (Ω)	Capacitance (pF)
Monza [56]	860-960	-9	415	1.4
Alien Higgs-3 [57]	860-960	-18	1500	0.85
Monza 3 [58]	860-960	-15	1350	1.2
Alien Higgs-2 [59]	860-960	-14	1500	1.2
Monza 4 [60]	860-960	-14.6	1000	2.48
EM4324 [61]	860-960	-9	6012	0.71
XRAG2 [62]	860-960	-15	5800	0.88

Tableau II.2 : Exemples des puces disponibles dans le commerce au cours de la dernière décennie.

Une puce RFID (ou chip RFID) peut être modélisée électriquement par un circuit série ou parallèle comme représenté par la Figure II.16.

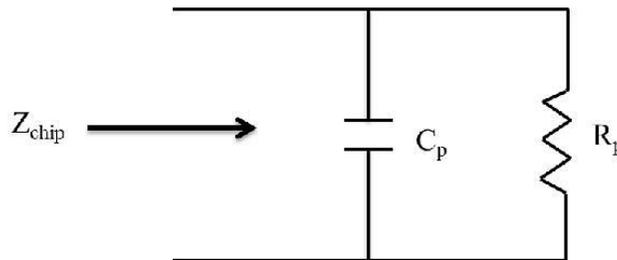


Figure II.16 : Circuit parallèle équivalent de la puce (chip).

La transformation du circuit parallèle en un circuit série permet une analyse plus simple de l'adaptation de l'antenne au chip en fonction de la fréquence. La Figure II.17 illustre le circuit série associé constitué d'une résistance R_s en série avec un condensateur C_s .

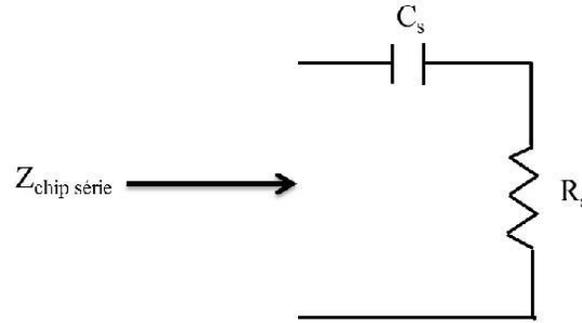


Figure II.17. Circuit série équivalent de la puce.

L'impédance Z_{chip} (Z_{puce}) calculée avec les éléments parallèle de la Figure II-17 est donnée par l'équation suivante :

$$Z_{\text{chip}} = \frac{R_p}{1 + (R_p C_p \omega)^2} (1 - j C_p R_p) \quad (\text{II} - 22)$$

D'où on extrait l'expression de la résistance série R_s et la réactance série X_s du chip:

$$R_s = \text{Re}(Z_{\text{chip}}) = \frac{R_p}{1 + (R_p C_p \omega)^2} \quad (\text{II} - 23)$$

$$X_s = \text{Im}(Z_{\text{chip}}) = \frac{-j}{C_s \omega} = \frac{-j C_p R_p^2}{1 + (R_p C_p \omega)^2} \quad (\text{II} - 24)$$

II.6.2.1 Sensibilité de la puce RFID

Les limites les plus importantes des étiquettes dans la caractéristique de performance du système RFID sont la plage d'étiquettes qui est la distance maximale à partir de laquelle l'étiquette peut être détectée, et le seuil de sensibilité de la puce. C'est la puissance RF reçue minimale nécessaire pour allumer la puce RFID. Plus elle est basse, plus la distance à laquelle l'étiquette peut être détectée est longue. La sensibilité de la puce est principalement déterminée par l'architecture frontale RF et le processus de fabrication [63].

La sensibilité du signal reflète à quel point une puce RFID détecte les signaux diffusés par les lecteurs à proximité, plus la sensibilité de la puce aux signaux RF est élevée, plus le signal du lecteur doit être faible pour que l'étiquette soit activée. Une sensibilité élevée entraîne donc de meilleurs taux de lecture, car l'étiquette peut commencer à fonctionner à une plus grande distance de l'antenne du lecteur.

Au fur et à mesure que la sensibilité de lecture de la puce augmente, la quantité d'énergie requise pour qu'elle fonctionne diminue. En d'autres termes, la sensibilité est une mesure de la capacité d'une étiquette à convertir l'énergie RF à la puissance dont l'étiquette a besoin pour fonctionner [64]. Il n'existe pas de méthode normalisée pour mesurer la sensibilité de la puce d'étiquetage qui a un impact direct sur la possibilité d'effectuer des lectures en codant / décodant rapidement des signaux et en lisant une grande population d'étiquettes. Les fabricants d'étiquettes mesurent la sensibilité en unités de puissance, spécifiée en dBm, qui est une valeur en décibels avec référence à un niveau de puissance de 1 mW.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de couplage du système RFID UHF et les paramètres fondamentaux des antennes, en mettant l'accent sur quelques paramètres importants des systèmes RFID passifs à savoir : le diagramme de rayonnement, le gain, la directivité. Ensuite, nous avons dédié la seconde partie aux systèmes RFID UHF passifs et dont nous avons étudié leurs caractéristiques de performance et leurs limites. A la fin du chapitre, quelques types de puces RFID UHF commerciales ont été présentés.

CHAPITRE III

CONCEPTION ET MINIATURISATION DES ANTENNES RFID

III.1 Introduction

Le but de la miniaturisation d'antenne est de faire fonctionner l'antenne à des fréquences plus basses en augmentant efficacement sa taille électrique sans augmenter sa taille physique. Autrement dit, une antenne qui est physiquement trop petite pour fonctionner à une fréquence donnée peut le faire si elle est miniaturisée.

Plusieurs méthodes pour y parvenir tels que les configurations à méandres, F-inversées, spiral et les antennes fractales. Les 3 premières configurations nécessitent un pliage unique ou multiple du corps rayonnant afin de s'adapter à la longueur nécessaire pour obtenir une résonance à une fréquence particulière [35].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les techniques de miniaturisation des antennes RFID UHF, ainsi que la conception d'une antenne miniature destinée pour ce type d'application.

III.2 Techniques de réduction de la taille

III.2.1 Dipôles à méandres

Les bras de l'antenne dipôle sont pliés le long d'un chemin sinueux comme proposé par [35] et montré sur la Figure III.1. La configuration de fil produite a distribué présente une réactance capacitive et inductive qui affecte l'impédance d'entrée globale de l'antenne. Les courants de ligne de transmission n'apportent pas une contribution précieuse à la puissance rayonnée, mais produisent plutôt des pertes. Les résonances sont obtenues à des fréquences plus basses que les dipôles droits. En outre, la bande passante est réduite avec une faible efficacité.

La forme du dipôle méandre peut être optimisée pour adapter à l'impédance de la puce. Comme on le voit sur les Figures III.1 à III.5, la longueur totale de l'antenne à méandres augmente avec la réactance, et la hauteur du segment à méandres contrôle la résistance [35].

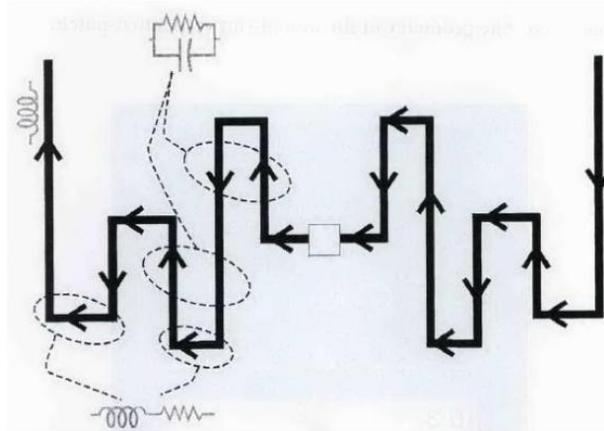


Figure III.1 : Géométrie de l'antenne de la ligne méandre avec plusieurs tours inégaux.

Les lignes horizontales contrôlent la résistance de rayonnement, les lignes verticales adjacentes agissent comme des éléments de stockage d'énergie et la longueur globale du conducteur affecte l'inductance [35].

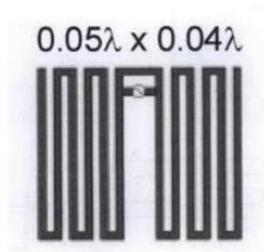


Figure III.2 : Antenne à méandres équidistants ($f = 953$ MHz) avec l'alimentation en T (T-match) [65].

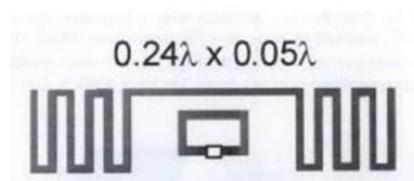


Figure III.3 : Antenne à méandres ($f = 915$ MHz) avec une alimentation en boucle à couplage inductif [66].

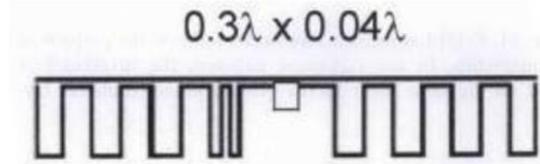


Figure III.4 : Antenne à méandres ($f = 920$ MHz) avec une barre de chargement.

La réactance et la résistance de l'antenne peuvent être contrôlées en ajustant la ligne méandre d'antenne et la barre en perçant des trous [66].

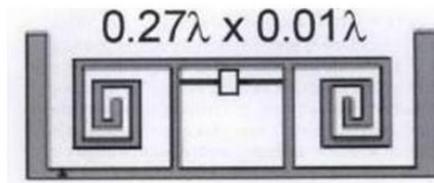


Figure III.5 : Antenne à plusieurs conducteurs ($f = 900$ MHz) avec un double schéma de couplage en T et un repliement en spirale.

Le repliement en spirale utilisé pour obtenir l'inductance requise, le matériau supplémentaire à la fin permet d'augmenter la bande passante de l'antenne [67].

III.2.2 Configurations F-inversée

Les antennes IFA sont des antennes miniatures (leur grandeur est de l'ordre de $\lambda/4$), leur atout réside dans un rayonnement quasi-isotrope, convoité dans certaines applications RFID pour lesquelles l'orientation du tag par rapport au lecteur est inconnue [35]. La bande passante de ces antennes peut être améliorée davantage en remplaçant les fils de l'antenne IFA avec de larges bandes, on obtient ainsi des antennes planaires en F inversée dites PIFA. Les géométries primaires de telles antennes, sont représentées sur la Figure III.6.

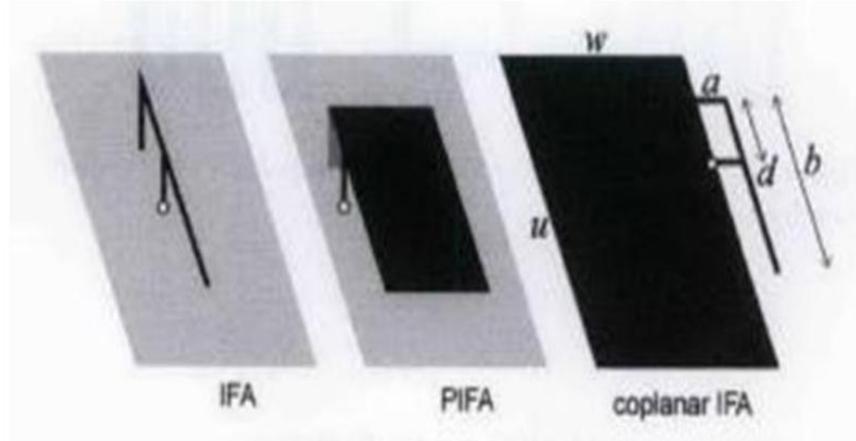


Figure III.6 : Antennes pliées: les cercles indiquent la position où la puce est attachée [35].

Dans le cas de la géométrie F-inversée, considérée comme un dipôle asymétrique comme le montre la Figure III.6, une grande variété d'impédances d'entrée peut être obtenue en faisant varier les paramètres $\{a, b, d\}$.

III.2.3 Géométries de fractale

Les géométries fractales sont des courbes de remplissage d'espace auto-similaires (ou auto-répliquatives) qui ont été traditionnellement utilisées pour modéliser des objets complexes trouvés dans la nature tels que les nuages et les côtes. Ces contours peuvent ajouter une quantité significative de longueur électrique dans un plus petit volume en raison de leurs propriétés itératives mathématiquement uniques.

Les longueurs électriques jouent un rôle important dans la conception des antennes et, par conséquent, ces capacités d'emballage efficaces des fractales peuvent être utilisées pour la miniaturisation des antennes.

Les courbes fractales ont fait l'objet de recherches approfondies [68] et son application dans la conception d'antennes a suscité beaucoup d'intérêt au cours de la dernière décennie. Les propriétés mathématiques et électromagnétiques des fractales ont été discutées en détail [69].

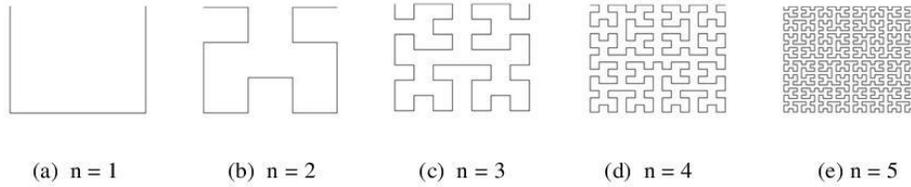


Figure III.7 : Cinq premières itérations de la courbe de Hilbert.

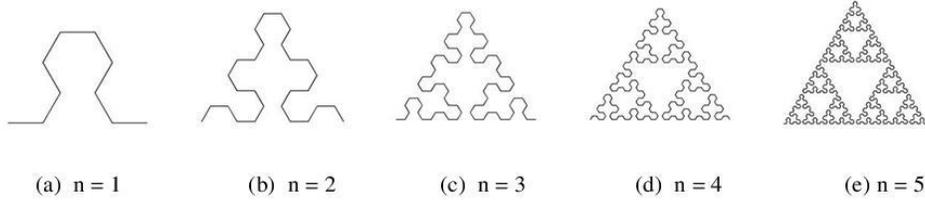


Figure III.8 : Cinq premières itérations de la courbe de Sierpinski.

III.2.4 Dipôles spiral

Les deux types d'antennes spirales les plus courants sont les logarithmiques et les archimédiens. Bien que la spirale d'Archimède soit une antenne à large bande [70], [44].

Cependant, une spirale d'Archimède est tout aussi large qu'une spirale logarithmique tant qu'elle est suffisamment serrée pour qu'elle soit proche de la log-spirale [70]. La performance des deux types de spirale est principalement déterminée par deux paramètres qui sont le rapport d'expansion r et l'angle de rotation angulaire δ . Le reste de cette section définira ces paramètres. Pour la log-spirale, l'équation qui définit un bord de la courbe log-spirale en coordonnées polaires est :

$$r = r_0 e^{a\psi} \quad \text{III - 1}$$

Où r_0 détermine le rayon initial et a est la croissance qui est définie en utilisant l'angle de tangage « ψ » comme suit (voir Figure III.9)

$$\tan \psi = 1/a \quad \text{III - 2}$$

Le taux d'expansion r est le facteur d'augmentation de rayon pour un tour de la spirale et est défini comme le rapport OA / OB comme indiqué dans la Figure III.9. Il peut également être défini en utilisant l'angle de tangage comme suit :

$$r = e^{-2\pi|a|} = e^{-\left(\frac{2\pi}{|\tan\psi|}\right)} \quad \text{III - 3}$$

La valeur de r est toujours inférieure à 1 .

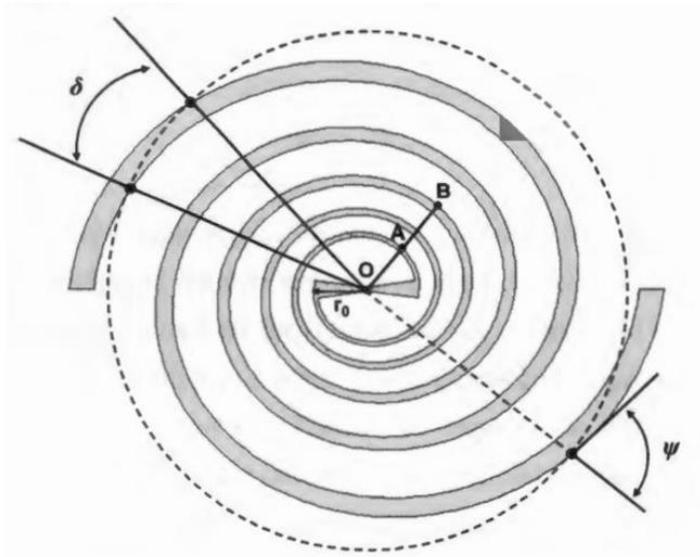


Figure III.9 : Géométrie de l'antenne logarithmique spirale à deux bras.

III.3 Processus de conception d'étiquette RFID

Dans cette section, le processus de conception de l'antenne d'étiquette RFID sera brièvement mentionné. La chaîne globale des étapes à suivre dans la réalisation réussie de l'étiquette RFID est illustrée à la Figure III.10 qui est explicite. Cependant, chaque section de la Figure III.10 sera brièvement abordée pour plus de clarté.

1. **Sélectionnez l'application et définissez les exigences de l'étiquette:** c'est peut-être l'étape la plus importante. Le concepteur doit déterminer au préalable plusieurs exigences d'étiquette telles que la bande de fréquence (915 MHz ou 868 MHz), la taille de l'étiquette, la portée de lecture maximale, l'environnement d'exploitation (métaux, eau, etc.), l'orientation (polarisation de l'étiquette).

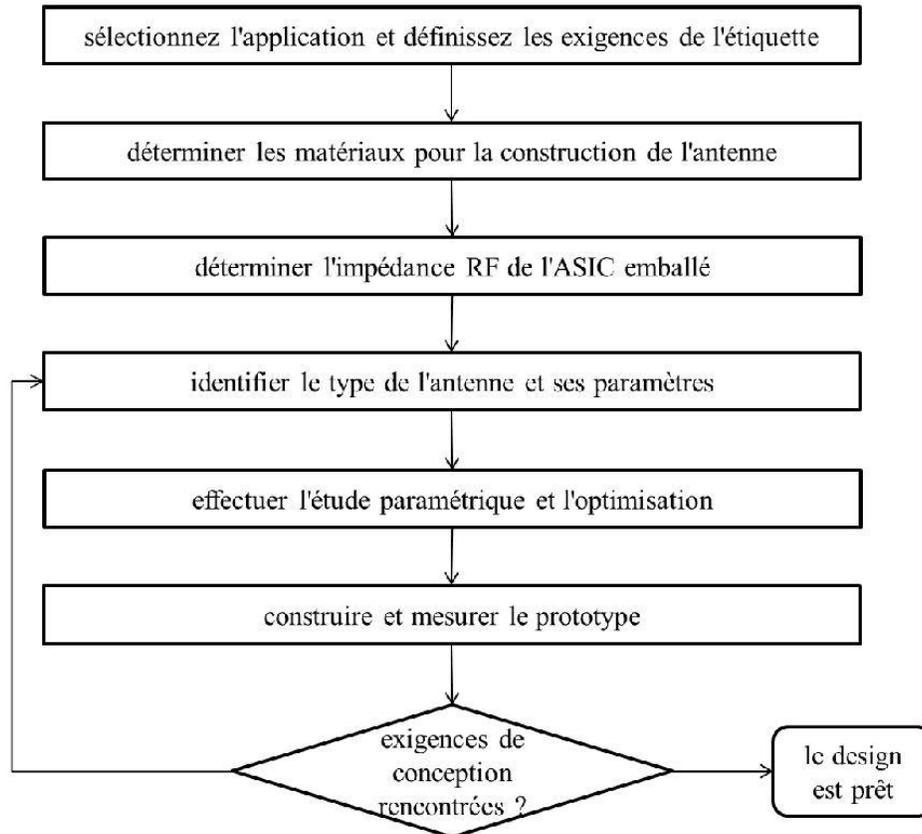


Figure III.10 : Processus de conception d'une antenne d'étiquette RFID [14].

2. Sélectionnez les matériaux pour la construction de l'antenne: Ce processus est directement lié au coût global de l'étiquette. Le concepteur doit prendre en compte le matériau utilisé pour l'antenne (cuivre, argent, etc.) ainsi que le substrat (PVC, FR-4, etc.) afin de s'assurer que le coût global de production de l'étiquette (du point de vue du fabricant) est minimale. De plus, les propriétés physiques des matériaux (effets environnementaux) devraient être étudiées par le concepteur. Par exemple, le substrat pourrait ne pas résister à des environnements difficiles (étiquettes de bagage d'aéroport).

3. Déterminer l'impédance RF de l'ASIC emballé: cette étape est relativement facile car la puce fournie par les fabricants de puces (semi-conducteurs NXP, instruments Texas, etc.) vient généralement avec la fiche technique qui inclut les valeurs d'impédance des puces. Dans la plupart des cas, le concepteur fait confiance à cette valeur d'impédance de la puce parce que pour mesurer l'impédance exacte de la puce, il faut d'autres configurations de mesure et augmenter le coût global.

4. Identifier le type d'antenne et ses paramètres: cette étape est importante car il existe une gamme de formes et de tailles d'antennes que les concepteurs utilisent pour les tags RFID tels que les dipôles méandres, les dipôles pliés, les dipôles chargés capacitifs [35][71]. Ainsi, le concepteur doit savoir comment les formes d'antenne affectent la performance globale de l'étiquette.

5. Effectuer une étude et une optimisation paramétriques: cette étape consiste généralement à analyser les antennes d'étiquettes avec des outils de modélisation et de simulation électromagnétiques (EM) tels que la méthode des moments (MoM), la méthode des éléments finis (FEM) ou le domaine temporel à différences finies (FDTD).

Les outils d'analyse EM rapides tels que CST microwave studio sont très importants pour la conception efficace d'étiquettes. Par exemple, les paramètres géométriques (hauteur, largeur) d'une antenne dipôle à méandres conçue en utilisant CST peuvent être étudiés pour voir comment les changements incrémentiels affectent la performance de l'étiquette (impédance, fréquence, etc.).

6. Construire et mesurer des prototypes: c'est la dernière étape du processus de conception. Les antennes fabriquées sur la base de résultats de simulation doivent être vérifiées pour l'adaptation d'impédance en utilisant un analyseur de réseau vectoriel et la mesure de distance de lecture dans une chambre anéchoïque. Si les résultats sont en accord avec les résultats de la simulation, la conception est prête. Sinon, le concepteur doit revenir à l'étape 5 et modifier la configuration de la simulation.

III.4 Résultats de simulations

Les antennes d'étiquettes jouent un rôle clé dans les facteurs de performance globaux du système RFID. La plupart des antennes pour les étiquettes omnidirectionnelles UHF passives sont couramment fabriquées sous forme de dipôles imprimés modifiés [35]. Le but de la conception est de réaliser la réactance d'entrée inductive requise pour que l'impédance conjuguée de la puce électronique transmette la puissance maximale à la puce de l'étiquette et miniaturise la forme de l'antenne [72]. L'une des techniques les plus importantes qui satisfont à ces deux exigences est le méandre [73] [74], qui nécessite un pliage unique ou même multiple du corps rayonnant.

Les antennes à méandres sont couramment utilisées pour les applications d'étiquettes UHF, en raison des caractéristiques de gain acceptable, diagramme de rayonnement omnidirectionnel et de taille de surface relativement petite [75].

Dans cette section, plusieurs conceptions d'antennes d'étiquettes qui ont été étudiées dans cette recherche sont présentées, y compris certaines structures entièrement nouvelles. Ces antennes sont: un dipôle à méandre, un dipôle spiral. Une étude géométrique a été réalisée pour chaque structure afin de répondre aux exigences RFID.

III.4.1 Dipôle à méandres alimenté par boucle à couplage inductif

Plusieurs articles ont été publiés sur une antenne dipôle à méandres: une antenne dipôle à méandre asymétrique [75], une antenne dipôle pliée avec deux fils pliés [76], une antenne dipôle à extrémités repliées ouvertes [77], deux bras carrés en spiral avec deux stubs [78], une antenne à boucle carrée utilisant une ligne méandre [37]. L'effet de miniaturisation des méandres a été confirmé dans toutes ces études.

❖ Conception de l'antenne

La géométrie de l'antenne dipôle à méandre proposée, avec des annotations dimensionnelles, est représentée dans la Figure III.11. Pour mieux contrôler l'impédance de l'antenne, une barre (stub) de la même largeur que la trace de méandre de 1 mm est ajoutée. Pour fournir une meilleure adaptation pour l'impédance capacitive de la puce, des barres verticales ont été en outre ajoutés pour obtenir une inductance supplémentaire. Le port d'entrée de l'antenne d'étiquette, où la puce est attachée, est situé au centre de la boucle inductive.

L'espace entre la boucle inductive et le dipôle, la distance entre le dipôle et le stub et les longueurs des barres verticales peuvent être modifiés pour obtenir une réactance et une adaptation de résistance optimales comme vérifié dans l'étude paramétrique suivante.

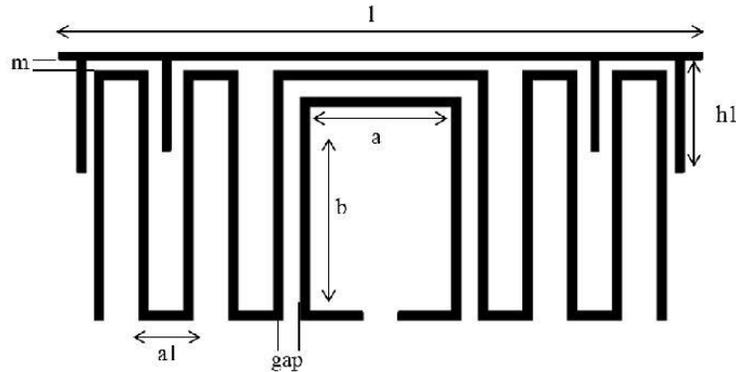


Figure III.11: Géométrie de l'antenne dipôle à méandre.

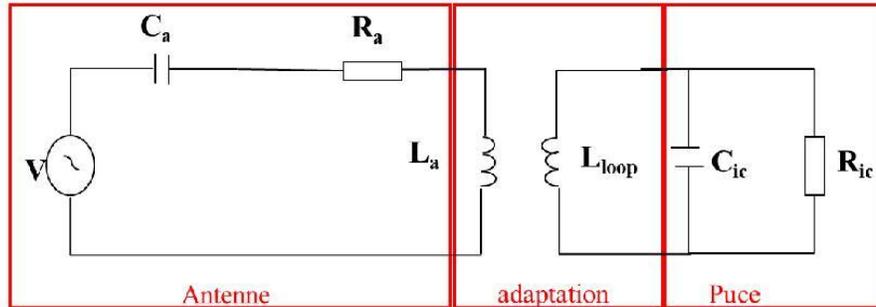


Figure III.12: Circuit équivalent de l'antenne proposée.

❖ Étude paramétrique

Cette antenne a plusieurs paramètres clés: l'espacement entre la boucle et le dipôle à méandre "gap", l'espacement entre le dipôle à méandre et le stub "m" et la longueur de la barre verticale "h1". Ces paramètres influencent l'impédance de l'antenne qui détermine la résonance de l'étiquette. On fixe les valeurs nominales des paramètres pour avoir le conjugué de la puce utilisée.

L'étude paramétrique est réalisée à l'aide d'un simulateur électromagnétique, basé sur la méthode des moments (CST), en considérant le substrat époxy FR4 avec une permittivité diélectrique de 4.32, une épaisseur de 1.56 mm et une tangente de perte de 0.018. L'antenne occupe une surface de 40 x 15 mm. La trace de l'antenne supérieure est en cuivre et a une épaisseur de 0,035 mm. La puce utilisée est la Strap XRAG2 [62] d'impédance $Z_c = 28 - j148$ à la fréquence 909 Mhz.

➤ Effet de l'espacement entre la boucle et le dipôle à méandre "gap" :

L'espacement entre la boucle et le dipôle peut varier pour obtenir une réactance et une résistance optimale et l'adaptation est faite en faisant varier le paramètre « gap ».

Comme nous pouvons le voir sur la Figure III.13, l'impédance de l'antenne d'étiquette varie remarquablement lorsque le gap diminue de 1 à 0.5, la partie réelle de l'impédance augmente rapidement de 10 Ω à 70 Ω .

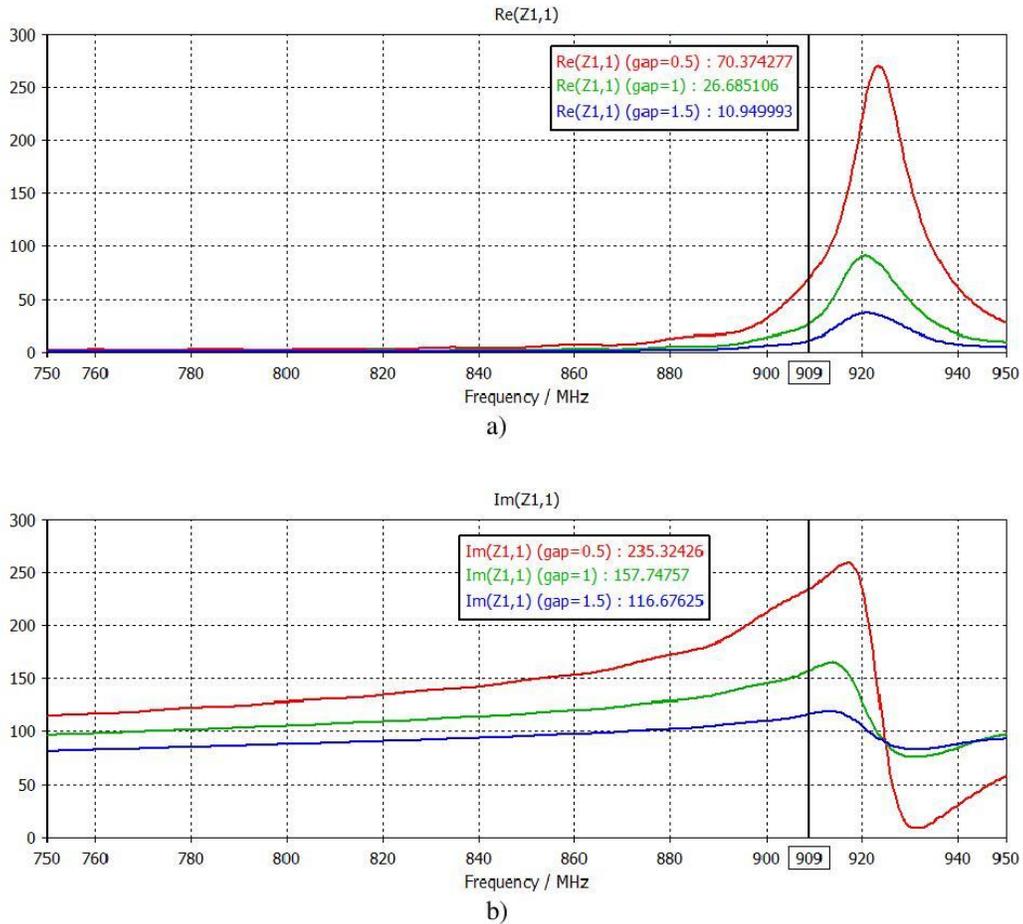
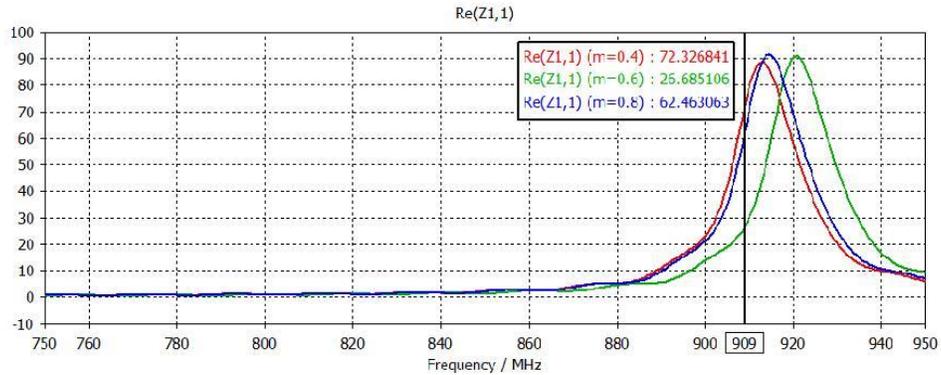


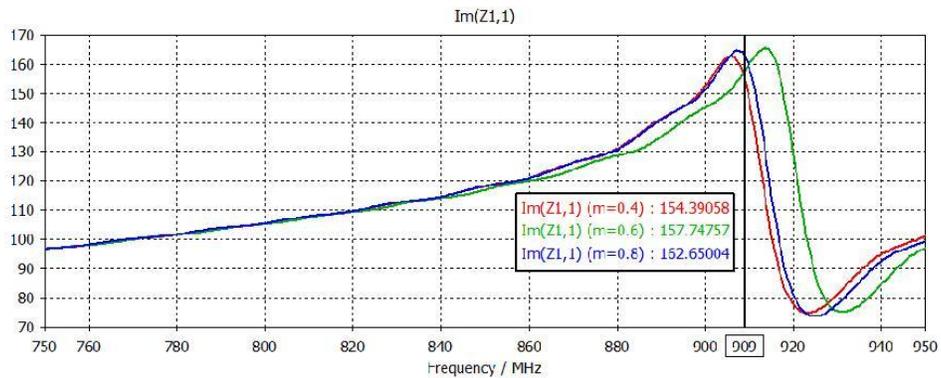
Figure III.13: Variation de l'impédance d'entrée avec le "gap", a) la partie réelle b) la partie imaginaire. La valeur nominale du "gap" est de 1 mm.

➤ Effet de la distance entre le stub et le dipôle à méandre "m" :

Ce paramètre peut être modifié pour améliorer l'adaptation de l'impédance conjuguée. Comme la montre la Figure III.14 la distance entre le stub et le dipôle "m" varie de 0.4 mm à 0.8 mm, nous observons ainsi, que lorsque "m" augmente, la partie réelle de l'impédance varie de 26 Ω à 72 Ω et la partie imaginaire varie légèrement de 154 Ω à 162 Ω .



a)

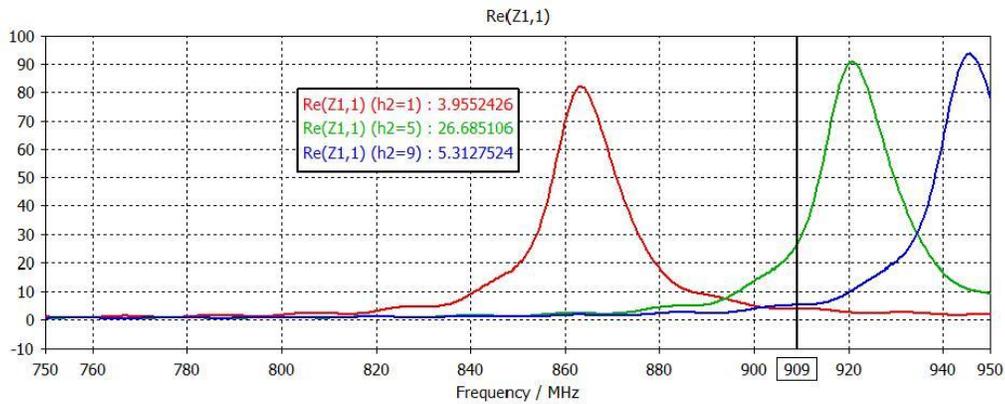


b)

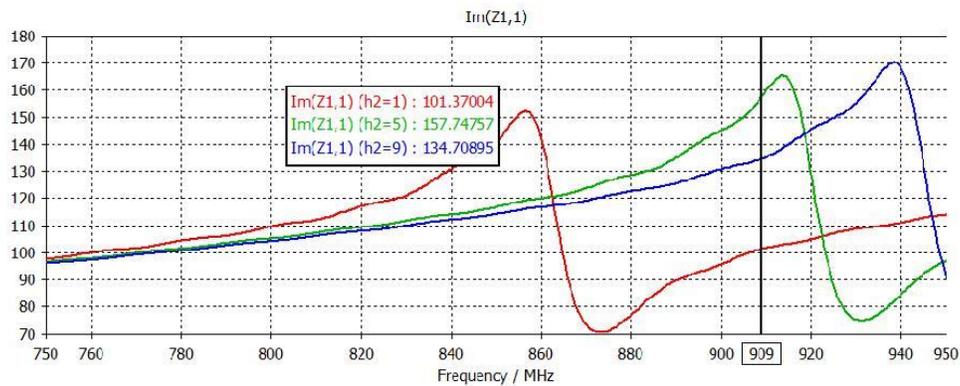
Figure III.14: Variation de l'impédance d'entrée avec l'espacement "m", a) la partie réelle b) la partie imaginaire. La valeur nominale du "m" est de 0.6 mm.

➤ Effet de la longueur de la barre verticale "h2" :

Les utilisations des stubs permettent un meilleur contrôle de l'exigence d'adaptation. Comme le montre la Figure III.15, On observe qu'une grande variation de ± 4 mm autour de la valeur nominale $h2 = 5$ mm ce qui déplace l'impédance vers des fréquences plus élevées.



a)



b)

Figure III.15: Variation de l'impédance d'entrée avec la longueur de la barre verticale, a) la partie réelle b) la partie imaginaire. La valeur nominale du "h2" est de 5 mm.

Finalement, les paramètres géométriques de cette antenne après optimisation en (mm) sont résumés dans le tableau III.1.

Paramètre	l	m	a	b	h1	a1	gap
Valeur (mm)	35	0.6	8	11	8	3	1

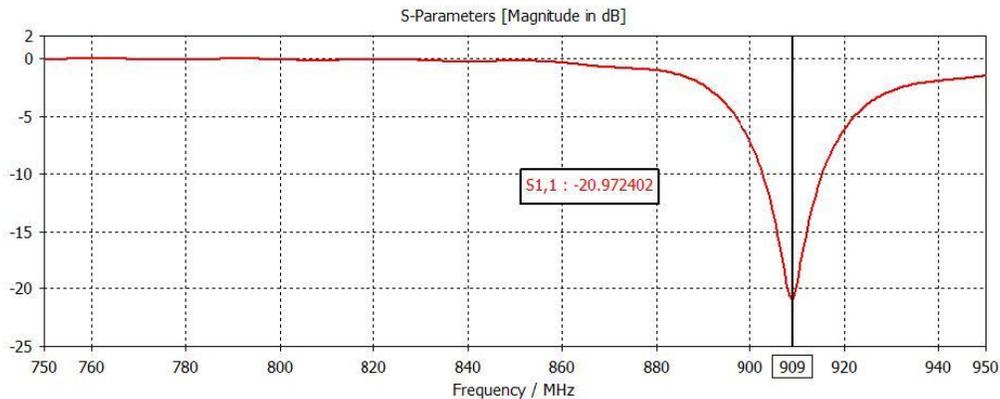
Tableau III.1: Paramètre d'antenne méandre proposée avec ses valeurs.

L'adaptation d'impédance conjuguée entre l'antenne et la puce est d'une importance primordiale dans la conception d'une antenne RFID.

Pour l'antenne proposée, et à partir des résultats précédents, il peut être établi que le paramètre de longueur de la barre verticale influence fortement à la fois la résistance et la réactance de l'impédance d'entrée de la même manière, la même chose pour la distance entre la boucle et l'antenne (gap). Pour le paramètre géométrique l'espacement du stub et l'antenne est telle que lorsque cette distance augmente, on remarque que la valeur de l'impédance varie légèrement.

Donc, pour concevoir ce type d'antenne pour une puce désirée, nous devons commencer avec des paramètres de longueur variable de barres pour approcher l'impédance désirée, et quand cela est atteint, l'espacement barre-méandre est modifié pour ajuster la conjugaison.

Pour l'antenne tag proposée, la combinaison de ces trois paramètres géométriques permet d'avoir une bonne adaptation. Le tracé du module du coefficient de réflexion, en fonction de la fréquence est représenté dans la Figure III-16. Nous avons atteint une bonne adaptation $S_{11} \approx -21$ dB à notre fréquence de travail (909 MHz).

Figure III-16 : Coefficient de réflexion S_{11} (dB) de l'antenne dipôle à Méandre.

Les parties réelle et imaginaire de l'antenne sont montrées dans la Figure III.17, l'impédance est de $26.68 + j 157.74 \Omega$ à la fréquence 909 MHz, ce qui est très proche du conjugué de celle de la puce.

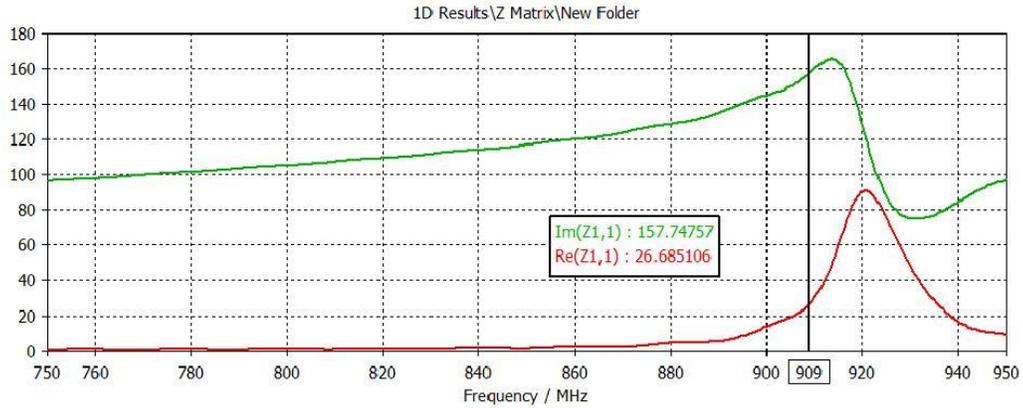


Figure III.17 : Résultats de simulations de l'impédance d'entrée de l'antenne méandre.

La représentation de diagramme de rayonnement en 3-D pour cette conception, est représentée dans la Figure III-17. Ce diagramme est omnidirectionnel, cette antenne se comporte comme une antenne dipôle. La valeur absolue du gain de cette antenne est de 2.28 dB à la fréquence 909MHz.

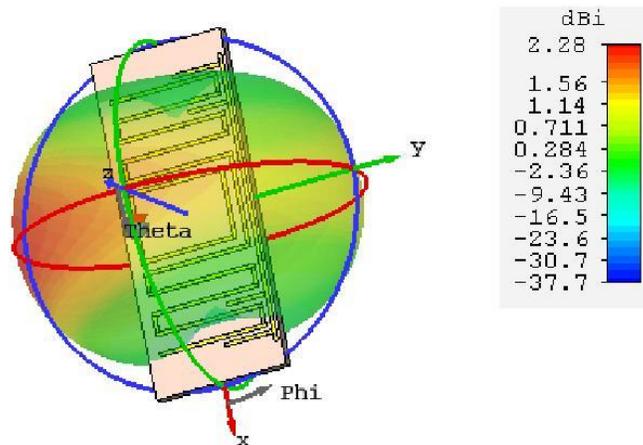


Figure III-18 : Diagramme de rayonnement 3-D (Gain) à $f = 909$ MHz de l'antenne méandre.

III.4.2 Antenne spiral adapté en T (T-match)

La structure d'adaptation en T permet de contrôler l'impédance d'entrée de l'antenne en changeant ses dimensions. De nombreuses configurations d'étiquettes utilisant cette technique peuvent être trouvées dans des articles scientifiques. Une antenne à spirale a été utilisée pour obtenir l'inductance requise, est rapporté dans [79]. Dans cette section, nous avons développé une nouvelle antenne miniature à spirale basée sur la structure T-match.

❖ Conception d'antenne

La nouvelle configuration de conception d'antenne, avec des annotations dimensionnelles, est illustrée à la Figure III.19. Elle est symétrique par rapport à l'axe orthogonal du point d'alimentation, et composés de dipôle spiral, d'une largeur de 1 mm, associés à une structure d'adaptation en T (T-match). Le port d'entrée de l'antenne, où la puce est placée est situé à l'intersection de l'axe de symétrie d'un côté de la T-match. Les dimensions T-match avec la longueur de spiral sont variées pour contrôler l'impédance comme examiné dans l'étude paramétrique.

Cette antenne miniature de taille (40*20) mm est conçu sur un substrat ($\epsilon_r = 4,32$, $\tan\delta = 0,0018$, épaisseur 1,56 mm). La puce RFID UHF est Alien Higgs-2 Chip [59] dont la sensibilité est $P_{th} = -14$ dB met l'impédance d'entrée est $15-j151$.

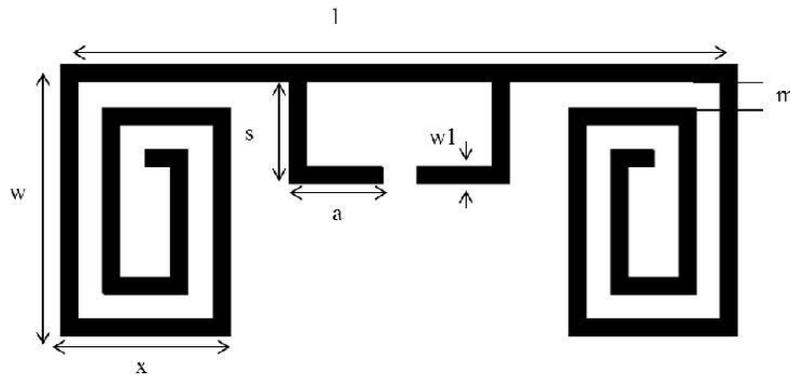


Figure III.19: Géométrie de l'antenne spirale.

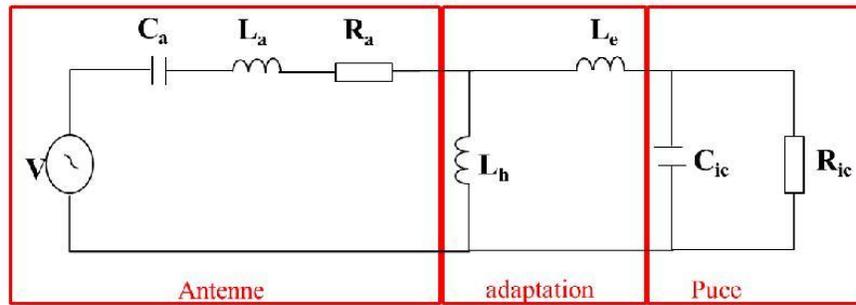


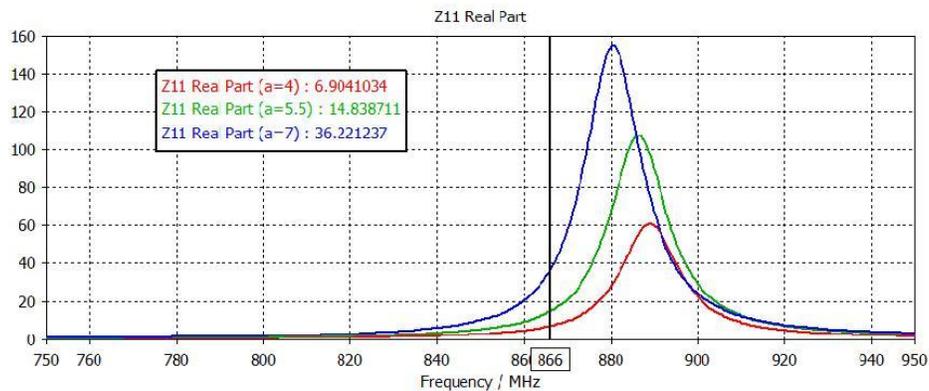
Figure III.20: circuit équivalent de l'antenne proposée.

❖ Étude paramétrique

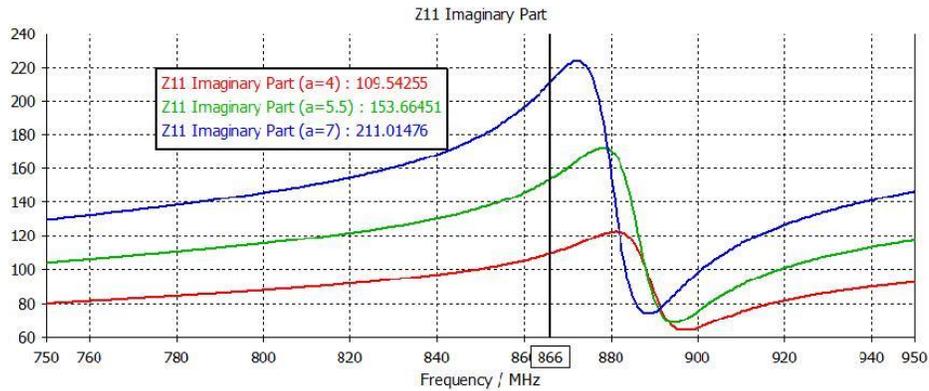
Cette antenne contient certains paramètres clés: longueur "a" et largeur "s" de la configuration T-match et longueur de la ligne spirale "x". Ces paramètres agissent sur l'impédance d'entrée de l'antenne pour assurer l'adaptation du conjugué.

- Effet de la longueur d'inductance série de la T-Match "a" :

Les dimensions de la structure de T-match peuvent être modifiées pour obtenir une adaptation conjuguée en faisant varier sa longueur "a". Comme la montre la Figure III.21, nous avons remarqué que la partie réelle de l'impédance augmente significativement de 6Ω à 36Ω et la partie imaginaire de 109Ω à 211Ω .



a)

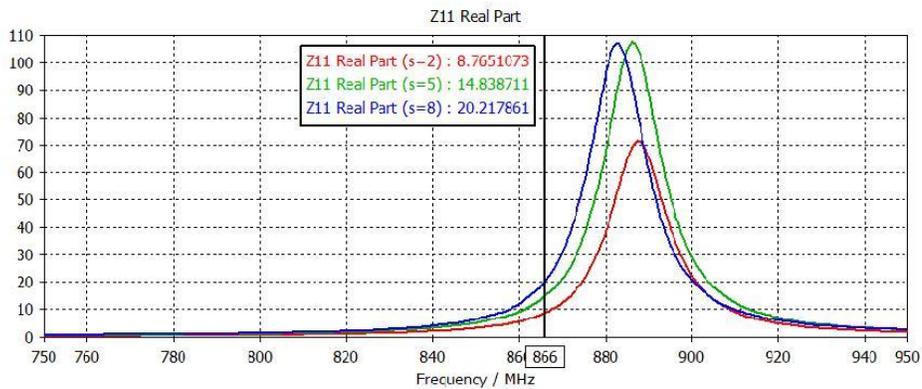


b)

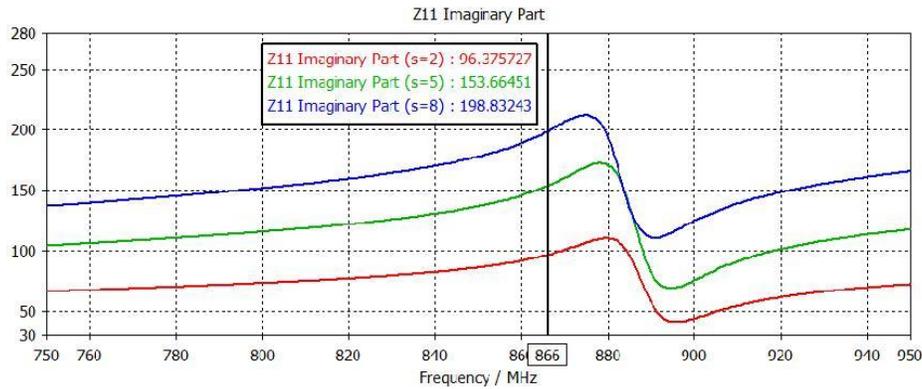
Figure III.21 : Variation de l'impédance d'entrée avec la longueur de T-Match a) Partie réelle
b) Partie imaginaire. La valeur nominale du "a" est de 5.5 mm.

➤ Effet de la largeur de T-match "s" :

La largeur de la structure de la T-match "s" est modifiée pour assurer l'adaptation conjuguée, La largeur de T-match "h" est augmentée de 2 mm à 8 mm. A partir du résultat montré sur la Figure III.22, il est noté que la partie réelle de l'impédance augmente légèrement de 8Ω à 20Ω et la partie imaginaire varie fortement de 96Ω à 198Ω .



a)

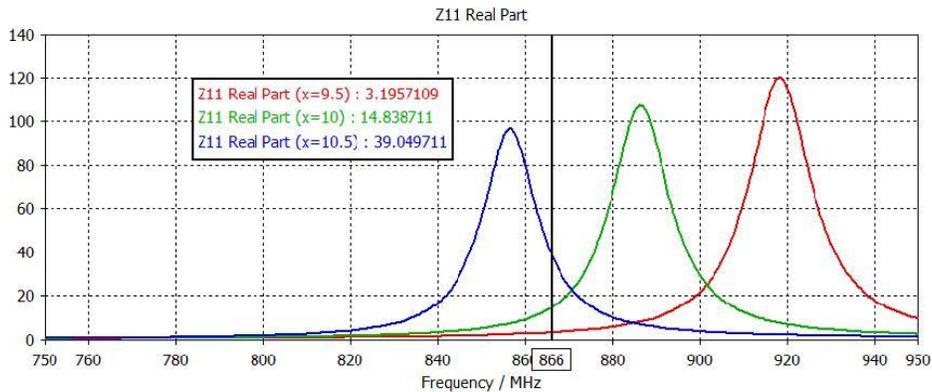


b)

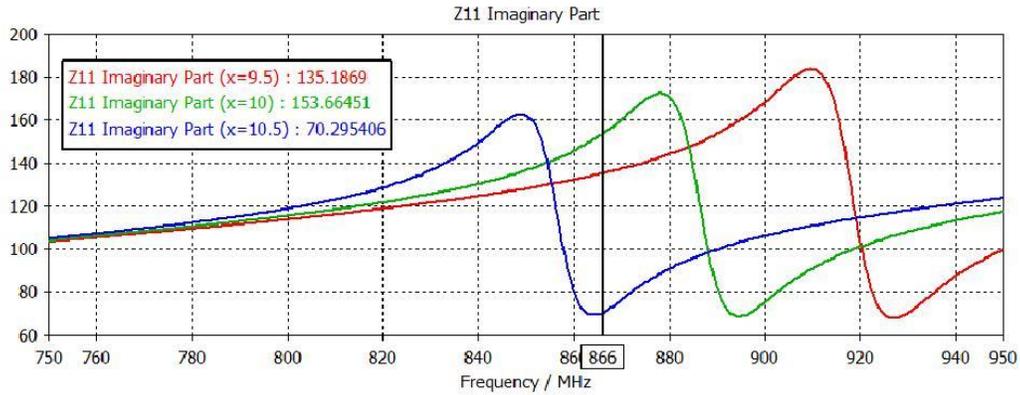
Figure III.22 : Variation de l'impédance d'entrée avec la largeur de T-Match a) Partie réelle b) Partie imaginaire. La valeur nominale du "s" est de 5 mm.

➤ Effet de la longueur de la ligne spirale "x"

La longueur de la ligne spirale peut être modifiée pour obtenir une réactance et une résistance optimales en faisant varier le paramètre "x". Comme la montre la Figure III.22, lorsque la longueur du spirale "x" varie de 9,5 mm à 10,5 mm, nous en déduisons que la partie réelle de l'impédance augmente de 3 Ω à 39 Ω et la partie imaginaire diminue de 135 Ω à 70 Ω.



a)



b)

Figure III.23 : Variation de l'impédance d'entrée avec la longueur de la ligne spirale, a) Partie réelle b) Partie imaginaire. La valeur nominale du "x" est de 10 mm.

Finalement, les paramètres géométriques de cette antenne après optimisation en (mm) sont résumés dans le tableau suivant :

Paramètre	l	w	s	a	w1	m	x
Valeur (mm)	35	15	5	5.5	0.5	1.5	10

Tableau III.2: Paramètre d'antenne méandre proposée avec ses valeurs.

Pour l'antenne d'étiquette proposée, et à partir des résultats précédents, il peut être noté que la structure d'adaptation en T influence fortement à la fois la résistance et la réactance de l'impédance d'entrée. Pour le paramètre de la largeur de la T-match, nous avons remarqué que la réactance est plus affectée que la résistance. Et pour le paramètre de la longueur de la ligne spirale, nous avons remarqués un changement significatif sur l'impédance.

Ainsi, pour réaliser une adaptation conjuguée de l'antenne à une puce spécifique, les optimisations de conception doivent commencer par les dimensions de la ligne spirale, puis, lorsque l'impédance d'entrée conjuguée de la puce est approchée, les dimensions de la T-match sont modifiées pour l'améliorer. Ainsi de suite jusqu'à ce que l'impédance d'entrée désirée soit atteinte.

Pour l'antenne tag proposée, la combinaison de ces trois paramètres géométriques permet d'avoir une conjugué de l'impédance de la puce.

Le tracé du module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence est représenté dans la Figure III.24. Nous avons atteint une impédance d'entrée de l'antenne.

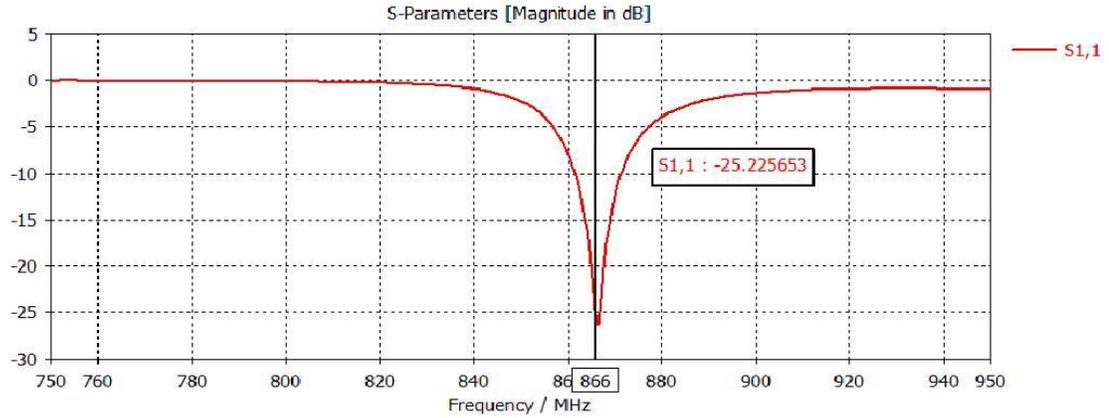


Figure III.24 : Coefficient de réflexion S11 (dB) de l'antenne spirale.

Les parties réelle et imaginaire de l'antenne sont montrées dans la Figure III.25, l'impédance est de $14.83 + j 153.66 \Omega$ à la fréquence 866 MHz, ce qui est très proche du conjugué de celle de la puce.

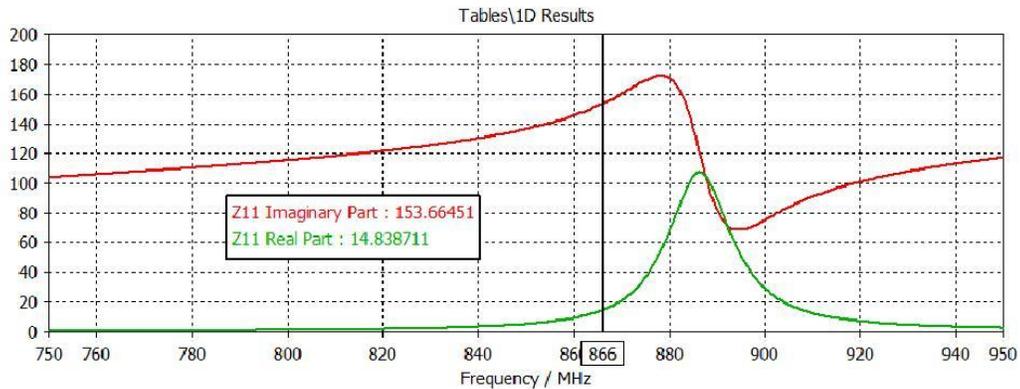


Figure III.25 : Résultats de simulations de l'impédance d'entrée de l'antenne spirale.

Nous représentons le diagramme de rayonnement de l'antenne dans les Figure III.26. De même, le diagramme de rayonnement obtenu est un diagramme omnidirectionnel, avec un gain de 1.76 dBi.

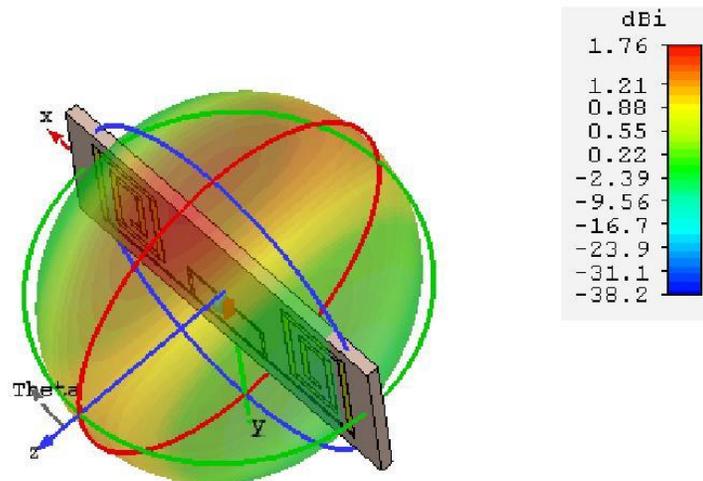


Figure III.26 : Diagramme de rayonnement 3-D (Gain) à $f = 866$ MHz de l'antenne spirale.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié différentes configurations d'antennes RFID UHF dipôles (Méandre et spirale). Deux nouvelles étiquettes antennes géométries ont été conçues, simulées et optimisées. Ces types de balises antennes utilisent des techniques de méandres et spirales pour la miniaturisation et différentes techniques d'adaptation entre la structure de l'antenne et la puce associée.

Les antennes d'étiquettes conçues sont de taille relativement compacte, ont un faible coût et peuvent être utilisées dans une variété d'applications RFID.

CHAPITRE IV

**TECHNIQUES D'ADAPTATION
D'IMPEDANCE**

IV.1 Introduction

En raison du dispositif intégré de stockage d'énergie sur puce, la plupart des puces IC RFID passives disponibles présentent une réactance d'entrée comprise entre -100Ω et -400Ω [35], tandis que la partie réelle est d'environ un ordre de grandeur plus petit. L'impédance de l'antenne de l'étiquette doit être inductive afin d'obtenir une adaptation conjuguée. Pour obtenir des périphériques à faible coût, il n'est pas possible d'utiliser des réseaux d'adaptation externes impliquant des composants localisés. Par conséquent, les mécanismes d'adaptation doivent être intégrés dans la disposition de l'antenne de l'étiquette.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes techniques d'adaptation antenne-puce, avec une étude et comparaison des deux techniques les plus couramment utilisées.

IV.2 Techniques d'adaptation d'impédance

Plusieurs stratégies d'alimentation peuvent être adoptées pour le réglage d'antenne. Les plus utilisées sont les versions modifiées de la structure en T (T-match), le couplage à boucle inductive. Des configurations utiles devraient permettre un réglage quasi indépendant de la résistance et de la réactance en agissant sur les paramètres géométriques de l'étiquette.

IV.2.1 Adaptation avec T-match

Le circuit équivalent d'une structure d'adaptation en T (T-match) est illustré à la Figure IV.1. L'impédance d'entrée d'un dipôle de longueur « l » peut être modifiée en utilisant un stub court-circuit comme expliqué en détail au paragraphe 9.7.3 de [37]. La source d'antenne est connectée au second dipôle de longueur $a < l$ et placée à une distance b séparant les deux dipôles. Le courant électrique distribue le long des brins du dipôle principal en fonction de la taille.

L'impédance d'entrée vue par la source est exprimée dans l'équation (IV-1) ci-dessous tirée de [35].

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

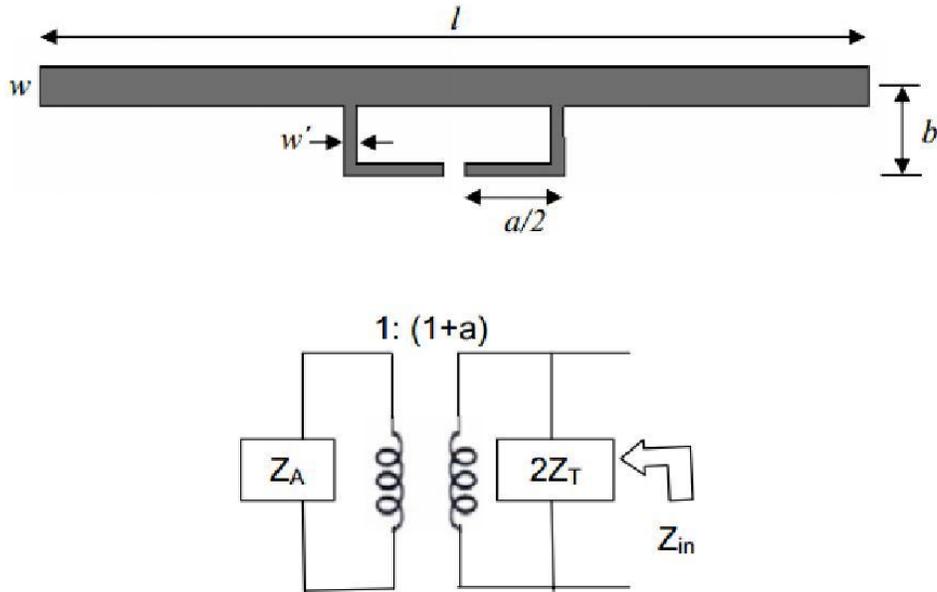


Figure IV-1 : Configuration T-match avec son circuit équivalent [35].

Z_T est l'impédance d'entrée des stubs court-circuités et Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne de transmission à deux conducteurs avec l'espacement b . Ils sont donnés par les relations suivantes.

$$Z_t = jZ_0 \tan ka/2 \quad (\text{IV} - 2)$$

$$Z_0 \cong 276 \log_{10} \left(\frac{b}{\sqrt{r_e r'_e}} \right) \quad (\text{IV} - 3)$$

avec $r_e = 0,25w$ et $r'_e = 8,25w'$ sont les rayons équivalents du dipôle et du stub d'adaptations respectivement. $\alpha = \ln(b/r'_e) / \ln(b/r_e)$ est le facteur de division actuel entre les deux conducteurs.

Les paramètres géométriques a , b et w' peuvent être ajustés pour adapter à l'impédance de la puce complexe Z_{chip} . Pour les dipôles à demi-longueur d'onde, le port T-match est inductif et pour les dipôles à plus petite longueur d'onde, cette impédance peut être à la fois inductive et capacitive [35].

IV.2.2 Adaptation avec boucle à couplage inductif

Comme la montre la Figure IV.2, une petite boucle à couplage inductif, placée à proximité du dipôle principal. Les bornes de la boucle sont directement connectées à la puce. Cette disposition ajoute une inductance équivalente dans l'antenne [35]. La réactance est contrôlée en faisant varier la distance de la boucle par rapport au dipôle principal.

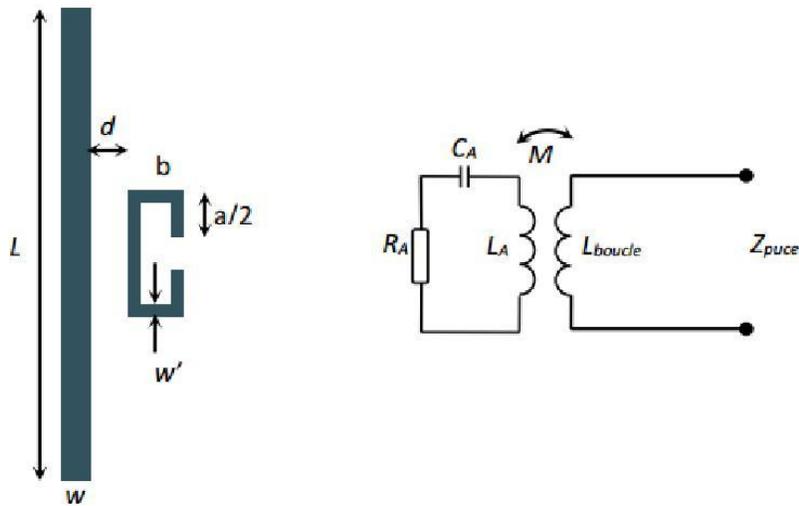


Figure IV.2 : Structure à couplage inductif et son circuit équivalent.

Le couplage inductif peut être modélisé par un transformateur. L'impédance résultante vue des bornes de la boucle est donnée par [35].

$$Z_{in} = Z_{loop} + \frac{(2\pi f M)^2}{Z_A} \quad (IV - 4)$$

Dans l'équation ci-dessus, $Z_{loop} = j2\pi f L_{loop}$ est l'impédance d'entrée de la boucle. Que le dipôle soit à la résonance ou non, l'impédance d'entrée totale dépend de l'inductance de la boucle, L_{loop} . La résistance est liée à l'inductance mutuelle du transformateur (ou facteur de couplage) M comme indiqué ci-dessous [35].

$$R_{in}(f_0) = \frac{(2\pi f_0 M)^2}{R_A(f_0)} \quad (IV - 5)$$

$$X_{in}(f_0) = (2\pi f_0 L_{loop}) \quad (IV - 6)$$

Dans les équations (IV-5) et (III-6), R_A représente la résistance d'impédance de l'antenne, f_0 est la fréquence de résonance, M est le facteur de couplage du transformateur et L_{loop} est l'inductance de la boucle. La résistance totale d'entrée dépend de la forme de la boucle et de la distance dipôle-boucle [35].

IV.2.3 Configuration Tip-loading

Une autre méthode consiste à utiliser une antenne plus courte avec une impédance convenable puis de lui ajouter une structure de grande taille à ses extrémités. Cette grande structure est connue comme le « Tip-loading capacitive » [20] et a globalement un effet capacitif. Un dipôle Tip-loading semble plus inductif qu'un dipôle conventionnel de la même longueur et est donc plus facile à adapter.

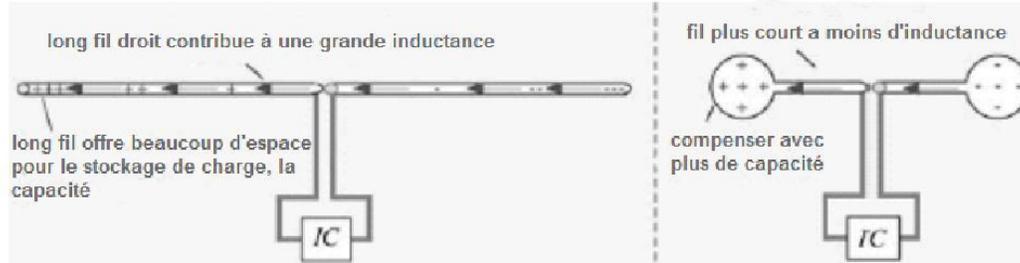


Figure IV.3: Le dipôle raccourci par l'ajoutant des capacités aux bouts.

IV.2.4 Méthode utilisant des paramètres géométriques et des éléments parasites

Une autre approche consiste à utiliser les paramètres géométriques intrinsèques, comme pour rendre le fil d'antenne plus long que la résonance, tout en conservant la même longueur projetée, comme le montre la figure IV.4. La barre droite supplémentaire au sommet de la structure agit comme un peu de capacité de shunt, aidant à réduire la résistance de rayonnement à la résistance d'entrée de la puce d'étiquette. La résistance augmente lorsque la distance de la ligne à méandres est réduite.

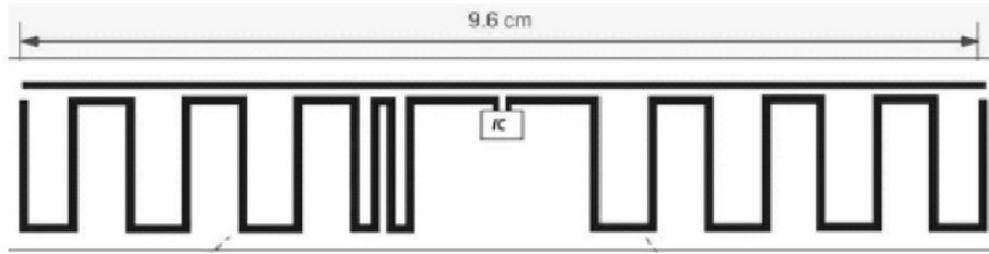


Figure IV.4: Antenne à méandres avec un élément parasite.

IV.3 Comparaison de deux techniques d'adaptation pour les étiquettes RFID UHF

Les concepteurs d'étiquettes RFID UHF doivent faire face à des défis uniques tels que la miniaturisation des antennes sur des matériaux peu coûteux, la sensibilité de l'étiquette à l'environnement et l'adaptation d'impédance à large bande de l'antenne avec la puce RFID [20] [54].

Les deux topologies d'adaptations imprimées les plus populaires sont d'abord le circuit d'inductance série shunt (SSI) et en second lieu la boucle à couplage inductif (ICL) [35]

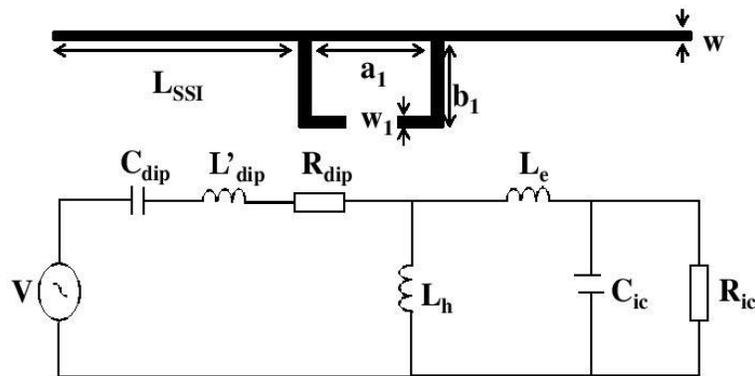
La résistance typique en série des puces R_{ic} et la réactance en série X_{ic} de l'ordre de 5 à 30 Ω et de -100 à -400 Ω sont respectivement dans la bande de fréquences RFID UHF (860-960MHz). Cette gamme de valeurs rend les deux topologies appropriées pour adapter l'impédance de la puce à la gamme habituelle d'impédances d'antennes à bande dipolaire de type résonnant utilisées dans les étiquettes RFID (réactance nulle ou légèrement capacitive et résistance modérée de quelques dizaines d'ohms).

En négligeant le couplage mutuel entre les traces métalliques, l'adaptation SSI (préférée ici au terme T-match [80]) peut être modélisée par le simple L-matching de deux inductances de la Figure IV.5.a. L'optimisation de l'adaptation SSI dans sa version double-tuning donne une augmentation de la bande passante de fréquence d'un facteur de 2 à 3 par rapport à une adaptation optimale à une seule fréquence [81]. Ceci est vérifié lorsque le facteur Q de l'antenne est du même ordre que le facteur Q de la puce (généralement compris entre 10 et 20), ce qui est facilement réalisable si l'antenne n'est pas fortement miniaturisée avec de nombreux méandres.

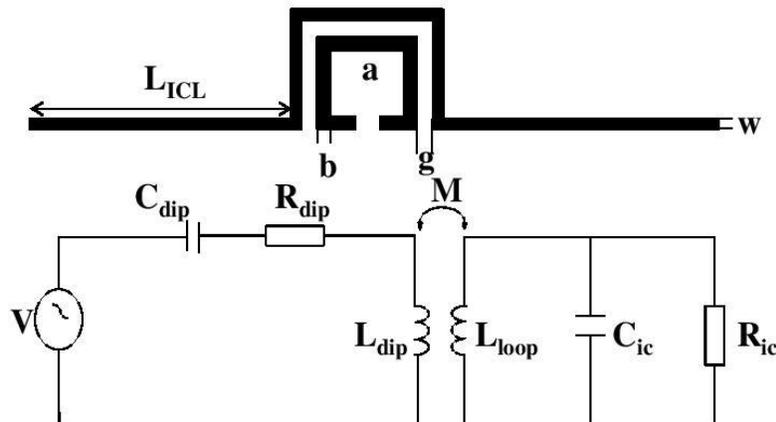
La technique d'adaptation ICL a été explorée dans [82] pour la conception des étiquettes RFID UHF. L'idée était d'utiliser une boucle carrée comme l'excitation primaire d'une antenne de type dipôle résonnant par couplage magnétique. Depuis lors, les modules combinant une boucle et une puce RFID ont été commercialisés avec succès grâce à leur connexion facile à l'étiquette quelle que soit sa nature (textile, papier, plastique, Kapton) et la nature de l'antenne (traces d'argent sur PET, fils inoxydables) [83][84].

Comme représentée sur la Figure IV.5.b, la partie centrale du dipôle cercle la boucle permet d'augmenter le couplage mutuel et améliorer la résistance de rayonnement de l'antenne [85].

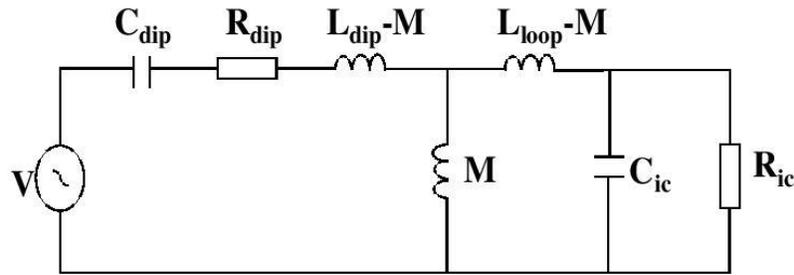
À ce jour, aucune tentative n'a été faite pour comparer les avantages et les inconvénients des deux techniques d'adaptation. C'est le but de cette section pour aborder ce problème.



a)



b)



c)

Figure IV.5: Circuits électriques équivalents, paramètres géométriques d'une antenne dipôle droite correspondant à (a) une inductance série shunt (SSI) et (b) une boucle à couplage inductif (ICL). (c) Circuit équivalent de l'ICL utilisant un circuit en T du transformateur.

IV.3.1 La puce Monza 5

Fabriqué par la société **IMPINJ**, la puce RFID Monza5 UHF est optimisée pour la sérialisation d'articles tels que les vêtements, l'électronique, les cosmétiques, les documents et les bijoux. Elle offre une fiabilité de lecture inégalée pour des systèmes d'entreprise RFID efficaces et des performances d'encodage record pour permettre le coût d'étiquette appliqué le plus bas [81].

La puce Monza 5 vient s'ajouter à la famille de puces Monza, considérée comme un leader de l'industrie en matière de fiabilité, de cohérence, de flexibilité et de conformité Gen 2 et ISO-18000-6C.



Figure IV.6 : Module Monza 5 [TAGSYS].

IV.3.1.1 Caractéristiques

Une sensibilité de lecture supérieure jusqu'à -20 dBm avec une antenne dipôle, combinée à une excellente réjection des interférences, offre une fiabilité de lecture exceptionnelle. Une sensibilité d'écriture de pointe jusqu'à -16 dBm avec une antenne dipôle pour une fiabilité de codage inégalée.

La vitesse d'écriture de la mémoire, à la pointe de l'industrie, permet des taux d'encodage de plus de 3 000 étiquettes / minute et un faible coût d'étiquetage appliqué, jusqu'à 128 bits de mémoire EPC avec 32 bits de mémoire utilisateur et 48 bits de TID sérialisé, conforme aux normes EPCglobal et ISO 18000-63, et compatible avec Gen2V2 [86].

Gamme de température étendue (-40 degrés C à +85 degrés C) pour une fiabilité dans des conditions difficiles.

IV.3.1.2 Paramètres d'impédance

Afin de réaliser le plein potentiel de performances de la puce d'étiquette Monza 5, il est impératif que l'antenne présente une impédance appropriée à ses bornes. La nature non linéaire des circuits de gestion d'énergie de la puce complique l'effort pour trouver l'impédance de source optimale. Heureusement, il est possible de procéder à une conception d'antenne basée sur un modèle d'éléments linéaires et localisé de la puce. Le modèle d'impédance de la puce Monza-5 est illustré à la Figure IV.7

Les valeurs des éléments localisés sont listées dans le Tableau IV.1, où C_{mount} est la capacité parasite due au chevauchement des traces d'antenne avec la surface de la puce, C_p apparaît aux bornes de la puce et est intrinsèque à la puce, et R_p représente la conversion d'énergie et l'énergie absorption des circuits RF.

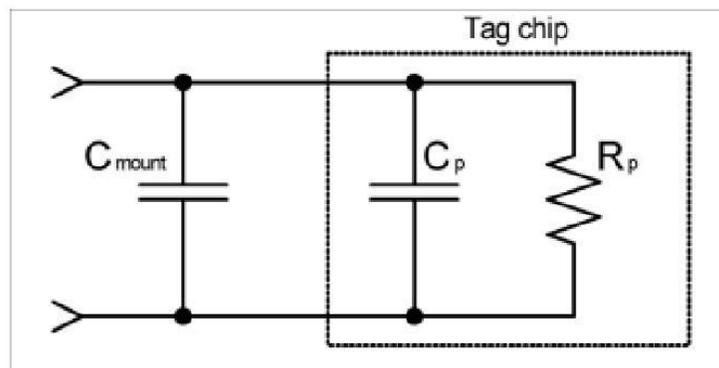


Figure IV.7 : Modèle RF linéarisé par puce d'étiquette.

Le Tableau IV.1 montre les valeurs du modèle de port de puce pour la puce d'étiquette Monza 5, qui s'appliquent à toutes les fréquences des régions d'exploitation primaires (Amérique du Nord, Europe et Japon).

Paramètre	Valeur Typique	Commentaires
C_p	0.825 pF	Capacité de la puce intrinsèque.
R_p	1.8 kOhm	Représente la conversion d'énergie et l'énergie absorption du circuit RF.
C_{mount}	0.245 pF	Capacité typique due à l'adhésif et aux parasites de montage d'antenne. La capacité de charge totale présentée à l'antenne est $C_p + C_{mount}$.
Sensibilité à la lecture de la puce	-17.8 dBm	
Sensibilité à l'écriture des puces	- 13.75 dBm	

Tableau IV.1 : Impédances de port de module Monza 5 [86].

IV.3.2 Comparaison des modèles analytiques

Appelons $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ l'impédance d'entrée de l'antenne, c'est-à-dire l'impédance aux bornes du circuit d'adaptation où la puce est connectée. La puce RFID UHF est de type l'Impinj Monza 5 dont la sensibilité est $P_{th} = -17.8$ dBm et l'impédance d'entrée est $1.8k\Omega // 1.07pF$ [85].

Il est commode de modéliser la puce avec son impédance série équivalente $Z_{ic}=R_{ic} - jX_{ic}$ ce qui donne la définition suivante du coefficient de transmission de puissance (PTC) τ entre l'antenne et la puce RFID [17]:

$$\tau = \frac{4R_{ic} \cdot R_{in}}{(R_{ic} + R_{in})^2 + (X_{ic} + X_{in})^2} \quad (\text{III} - 7)$$

La largeur de bande de fréquence sera définie comme la bande de fréquence pour laquelle τ est supérieure à 0,75 ou, de manière équivalente, le coefficient de réflexion est meilleure que 6 dB. Autour de sa résonance en série, l'impédance d'entrée Z_{dip} du dipôle est donnée par:

$$Z_{\text{dip}} = R_{\text{dip}} \left(1 + jR_{\text{dip}} \left(\frac{f}{f_{\text{dip}}} - \frac{f_{\text{dip}}}{f} \right) \right) \quad (\text{III} - 8)$$

Avec f_{dip} la fréquence de résonance du dipôle, f la fréquence de travail, R_{dip} la résistance dipôle, Q_{dip} facteur de qualité du dipôle.

Nous concevons d'abord la boucle en utilisant la technique ICL. L'impédance de la boucle est donnée par:

$$Z_{\text{loop}} = R_{\text{loop}} + j2\pi f L_{\text{loop}} \quad (\text{III} - 9)$$

Où R_{loop} est la somme des résistances de rayonnement et de perte de la boucle. Définissant M comme le facteur de couplage du transformateur modélisant le couplage inductif entre la boucle et le dipôle, Z_{in} peut être exprimée comme [82]:

$$Z_{\text{in}} = Z_{\text{loop}} + \frac{(M\omega)^2}{Z_{\text{dip}}} \quad (\text{III} - 10)$$

L_{loop} est calculée de telle sorte que la boucle résonne avec la capacité de la puce à $f_0 = 868$ MHz (centre de la bande de fréquence ciblée). On trouve $L_{\text{loop}} = 32$ nH, c'est-à-dire $X_{\text{loop}} = 174 \Omega$. R_{loop} est supposé négligeable. Les caractéristiques dipolaires sont arbitrairement fixées de sorte que $R_{\text{dip}} = 56 \Omega$ et $Q_{\text{dip}} = 10$.

La procédure d'optimisation consiste à accorder M dans (III – 10) pour obtenir la plus grande bande passante de fréquence avec $f_{\text{dip}} = f_0 = 868$ MHz. On trouve $M = 9,5$ nH et $L_{\text{dip}} = Q_{\text{dip}}R_{\text{dip}} / 2\pi f_{\text{dip}} = 103$ nH (Figure IV.8).

Concevons maintenant la technique d'adaptation SSI en supposant à nouveau que $R_{\text{dip}} = 56 \Omega$ et $Q_{\text{dip}} = 10$. Les autres paramètres d'antenne f'_{dip} et l'inductance dipôle L'_{dip} sont liés par $Q_{\text{dip}} = 2\pi f'_{\text{dip}} L'_{\text{dip}} / R_{\text{dip}}$.

En suivant la procédure décrite dans [87] pour atteindre la largeur de bande de fréquence maximale réalisable pour des valeurs appropriées de L_e et L_h , f'_{dip} est d'abord fixé à une valeur initiale supérieure à f_0 . [87] indique que R_{in} est maximale à la fréquence f_{max} :

$$f_{\max} = \frac{f_{\text{dip}}}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q_{\text{dip}}^2} + \frac{L_h}{L'_{\text{dip}}}}} \quad (\text{III} - 11)$$

et que R_{in} et X_{in} à $f = f_{\max}$ peuvent être formulés par :

$$R_{\text{in}}(f = f_{\max}) = \frac{R_{\text{dip}}}{\left(1 + \frac{L'_{\text{dip}}}{L_h}\right)^2 - \left(1 - \frac{1}{(2Q_{\text{dip}})^2}\right) \frac{L'_{\text{dip}}}{L_h} + 1)^2} \quad (\text{III} - 12)$$

$$X_{\text{in}}(f = f_{\max}) \approx 2\pi f_{\max}(L_e + L_h) \quad (\text{III} - 13)$$

On a d'abord adaptée L_h pour faire $f_{\max} \approx f_0$. Donc, $R_{\text{in}}(f = f_{\max})$ devient fixe par rapport à (III-12) et L_e peut être ajusté dans (III-13) pour que $X_{\text{in}}(f = f_{\max})$ se rapproche du conjugué de la réactance de la puce.

Enfin, le calcul de τ révèle si la spécification PTC minimale (ici $\tau > 0.75$) est satisfaite à $f = f_0$. Sinon, f_{dip} et L'_{dip} doivent être modifiés et la procédure répétée. Les inductances optimales sont $L_e = 22$ nH et $L_h = 9,5$ nH avec $f_{\text{dip}} = 907$ MHz donnant l'immersion = $Q_{\text{dip}}R_{\text{dip}} / 2\pi f_{\text{dip}} = 98$ nH (Figure IV.8).

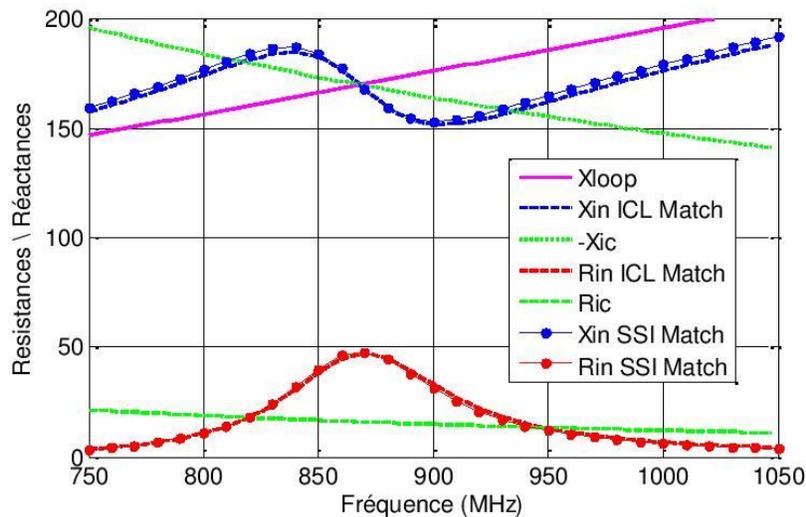


Figure IV.8 : Impédances des antennes et la puce.

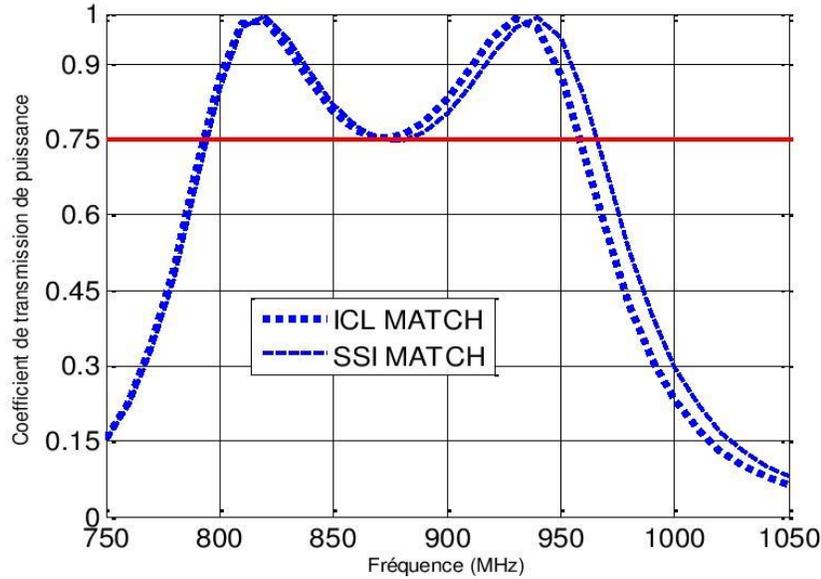


Figure IV.9 : Coefficient de transmission calculé avec les modèles analytiques en utilisant

$R_{dip} = 56 \Omega$, et $Q_{dip} = 10$. La fréquence centrale est fixée à $f_0 = 868$ MHz.

----- Adaptation par ICL ($f_{dip}=868$ MHz, $M=9.5$ nH, $L_{loop}=32$ nH)

. Adaptation par SSI ($f_{dip}=907$ MHz, $L_e=22$ nH, $L_h=9.5$ nH)

La Figure IV.8 et IV.9 montre que des courbes d'impédance et des largeurs de bande de fréquences similaires sont obtenues de 795 MHz à 965 MHz pour la ligne ICL et de 793 MHz à 958 MHz pour la SSI. Ceci démontre l'équivalence formelle entre les modèles électriques des deux circuits d'adaptation à condition que la fréquence de résonance du dipôle soit décalée vers le haut pour l'adaptation SSI.

Cette équivalence formelle peut également être démontrée avec le circuit équivalent du T-modèle du transformateur (Figure IV.5.c). En comparant les Figure IV.5.a et IV.5.c, on devrait avoir $L_h = M$ et $L_e = L_{loop} - M$ ce qui est confirmé par les valeurs obtenues par les procédures d'optimisation indépendantes précédentes comme $L_h = M = 9.5$ nH et $L_e = 22$ nH $\approx L_{loop} - M = 22,5$ nH.

En revanche, nous devrions avoir $L_{dip} - M = L'_{dip}$ qui est partiellement vérifiée (93,5 nH et 98 nH respectivement). Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1/ la T-match du circuit ICL optimisé donne presque les mêmes paramètres que le circuit d'adaptation SSI optimisé.

2/ les deux degrés de liberté M et L_{loop} dans les ICL permettent la même flexibilité de conception que L_c et L_h dans le SSI. Cette affirmation est également valable pour les antennes miniatures de type dipôle utilisant des méandres ou des tip-loading capacitifs et présentant des facteurs Q plus élevés.

IV.3.3 Comparaison des simulations sous Cst

Nous avons conçu les deux étiquettes calculées en section IV.3.2 en utilisant le simulateur électromagnétique CST Microwave Studio sur un substrat FR4 ($\epsilon_r = 4,25$, $\tan\delta = 0,002$, épaisseur 1,6 mm). La longueur et la largeur dipolaires droites sont d'abord accordées pour obtenir $R_{dip} = 56 \Omega$, $Q_{dip} = 10$, $f_{dip} = 868$ MHz pour l'ICL et $R_{dip} = 56 \Omega$, $Q_{dip} = 10$, $f_{dip} = 907$ MHz pour le SSI. Q_{dip} est estimé à partir de la pente de la réactance simulée selon l'équation suivante :

$$Q_{dip} = \frac{f_{dip}}{R_{dip}} \cdot \left(\frac{dX_{dip}}{df} \right)_{f=f_{dip}} \quad (\text{III} - 14)$$

Pour le SSI, a_1 , b_1 et w_1 sur la Figure IV.5a sont d'abord ajustés en utilisant des modèles analytiques d'inductances microruban pour synthétiser L_c et L_h . Pour l'ICL, les dimensions de boucle initiales a et b de la Figure IV.5b sont ajustées à partir des formules analytiques pour obtenir $L_{loop} = 32$ nH donnant $R_{loop} = 0,3 \Omega$ pour une boucle en cuivre ($\sigma = 5,8 \times 10^7$ S / m).

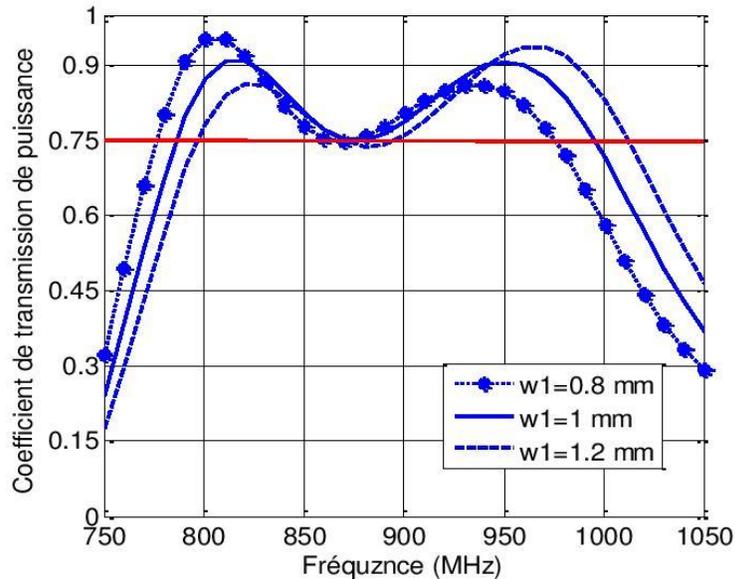


Figure IV.10 : Coefficient de transmission de puissance pour le circuit d'adaptation SSI.

Influence de la largeur w_1 de l'inductance L_e (valeur nominale $w_1 = 1$ mm).

L'optimisation sous CST est traitée pour les deux circuits d'adaptation afin d'obtenir la plus grande bande passante possible avec les dimensions géométriques initiales déterminées précédemment.

Les dimensions des étiquettes optimisées sont $a = 12$ mm, $b = 1$ mm, $L_{ICL} = 55$ mm, $g = 0,4$ mm, $L_{SSI} = 57$ mm, $w = 3$ mm, $a_1 = 22$ mm, $b_1 = 5$ mm, $w_1 = 1$ mm pour une taille d'étiquette totale de (144×26) mm². Les Coefficient de transmission de puissance (PTC) calculées sont représentés sur les Figure IV.10 et Figure IV.11 pour ces valeurs nominales. Des bandes passantes de PTC presque identiques, de 786 MHz à 988 MHz pour l'ICL et de 787 MHz à 997 MHz pour le SSI, sont à nouveau observées à condition que les longueurs des dipôles respectives soient réglées correctement.

Pour le SSI (Figure IV.10), une étude de sensibilité est effectuée pour un paramètre clé, la largeur w_1 de l'inductance série L_e . On observe qu'une grande variation de $\pm 0,2$ mm autour de la valeur nominale $w_1 = 1$ mm déplace légèrement la bande passante vers des fréquences plus élevées pour une variation positive et des fréquences plus basses pour une variation négative. Cependant, le PTC est maintenu au-dessus de 0,75 pour une opération mondiale dans les bandes UHF RFID (860-960 MHz).

Ces variations de largeur en grande partie dépassent les tolérances de fraisage ($<1 \mu\text{m}$) de la machine à graver mécanique **Protomat LPKF S100** utilisée dans la section IV.3.4 pour fabriquer les étiquettes. Une autre solution de fabrication repose sur des équipements d'impression à jet d'encre de haute qualité et onéreux comme le **Dimatix DMP-2800** [88] avec des encres nano particulières à base d'argent nécessitant des traitements de frittage thermique ou post-dépôt laser. L'épaisseur minimale ou la taille de l'espace des traces et des lignes imprimées serait de $\pm 25 \mu\text{m}$ sur le papier [88] et légèrement plus sur les substrats en bois ou en carton [89]. Ces tolérances sont encore beaucoup plus faibles que la variation de $\pm 0,2 \text{ mm}$ utilisée ici.

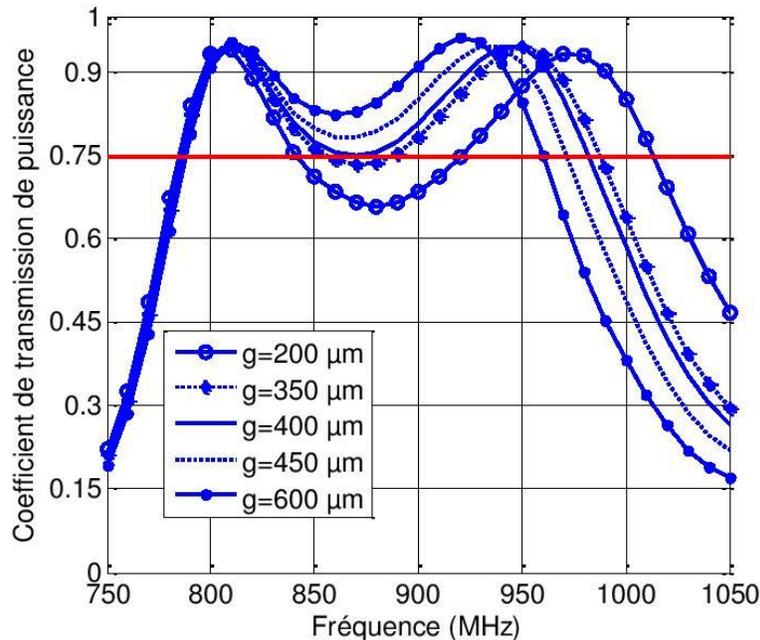


Figure IV.11 : Coefficient de transmission de puissance pour le circuit d'adaptation ICL.

Influence de la largeur de l'intervalle g (valeur nominale $g = 400 \mu\text{m}$).

Pour l'ICL (Figure IV.11), l'étude de sensibilité est réalisée sur l'intervalle g autour d'une valeur nominale $g = 400 \mu\text{m}$. Pour une variation de $50 \mu\text{m}$ autour de $400 \mu\text{m}$, la variation de PTC est négligeable, ce qui indique que les techniques de gravure mécanique et d'impression à jet d'encre de haute qualité mentionnées ci-dessus sont adéquates. Si la largeur de l'intervalle est réduite à $200 \mu\text{m}$, le fort couplage entre la boucle et le dipôle écarte les résonances, ce qui entraîne une chute de PTC inférieure à $0,75$ dans la bande ($860\text{-}960 \text{ MHz}$).

Par conséquent, les imprimantes à jet d'encre à auto-frittage à faible coût devraient être évitées pour ICL, car un espacement minimal d'environ $300\ \mu\text{m}$ et une largeur de ligne minimale de $1\ \text{mm}$ sont conseillés [90] en raison de la résolution d'impression limitée à $6000 \times 1200\ \text{dpi}$. Inversement, une augmentation de l'écart à $g = 600\ \mu\text{m}$ est moins préjudiciable, réduisant la partie supérieure de la bande passante à $960\ \text{MHz}$.

Nous concluons que les problèmes de tolérance de fabrication ne devraient pas motiver le choix entre les deux topologies correspondantes, sauf lorsque des imprimantes à jet d'encre bon marché sont utilisées avec des largeurs d'espace inférieures à $400\ \mu\text{m}$. Dans ce cas, SSI doit être préféré.

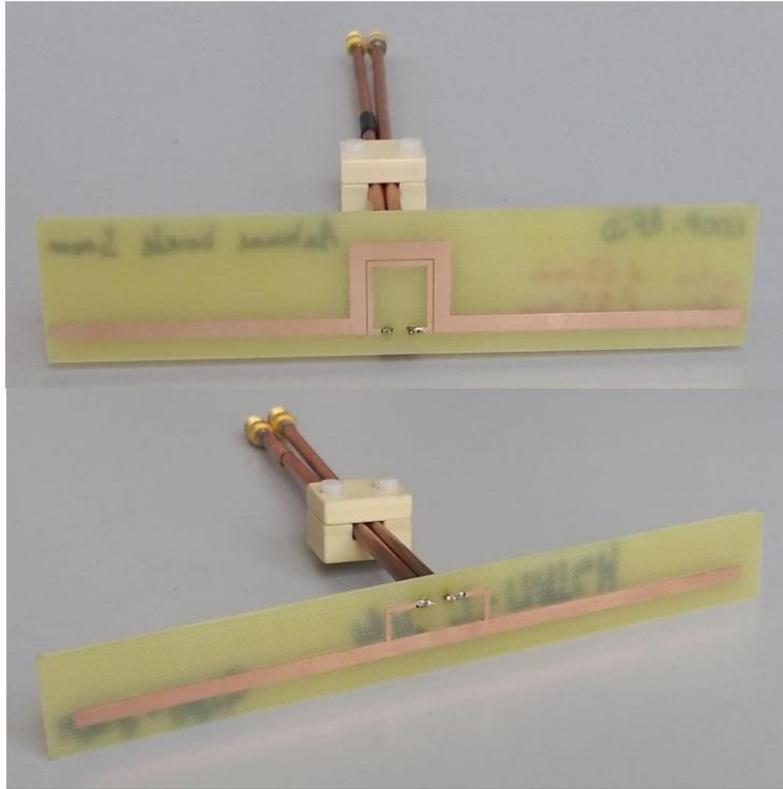


Figure IV.12 : Antennes à alimentation différentielle des technique ICL et SSI.

IV.3.3.1 la robustesse de chaque tag par rapport à la présence de matière

Nous avons étudié la sensibilité de chaque tag ICL et SSI par rapport à la présence de matière (plastique, carton etc..), alors nous avons rajoutés une plaque diélectrique de 5 mm (Figure IV.13) sur chacun des tags avec une permittivité de 1.1 puis 1.5 puis 2 et voir l'impact sur les caractéristiques.

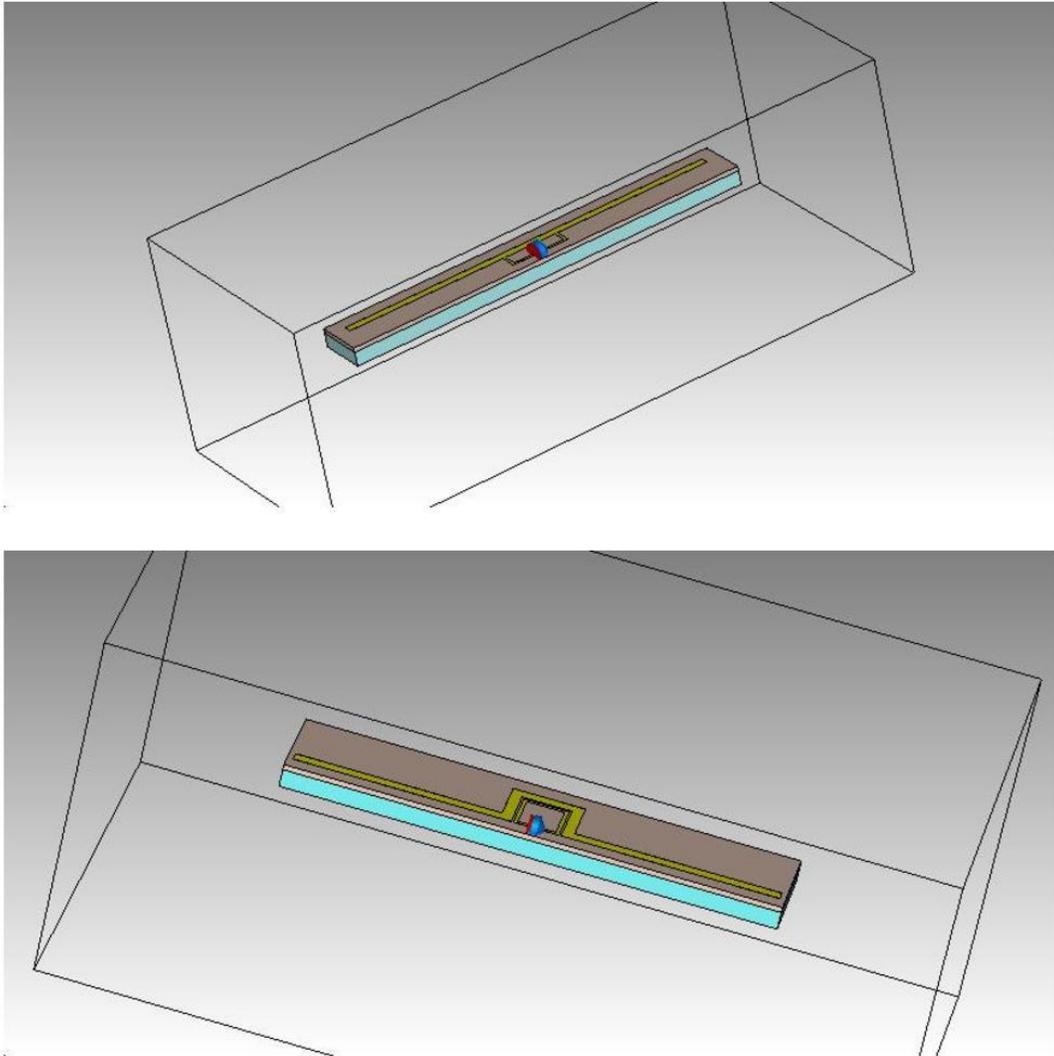


Figure IV.13 : Tags SSI et ICL conçus sous Cst avec une plaque diélectrique en dessous.

Les résultats que nous avons obtenus sont présentés dans la Figure IV.14.

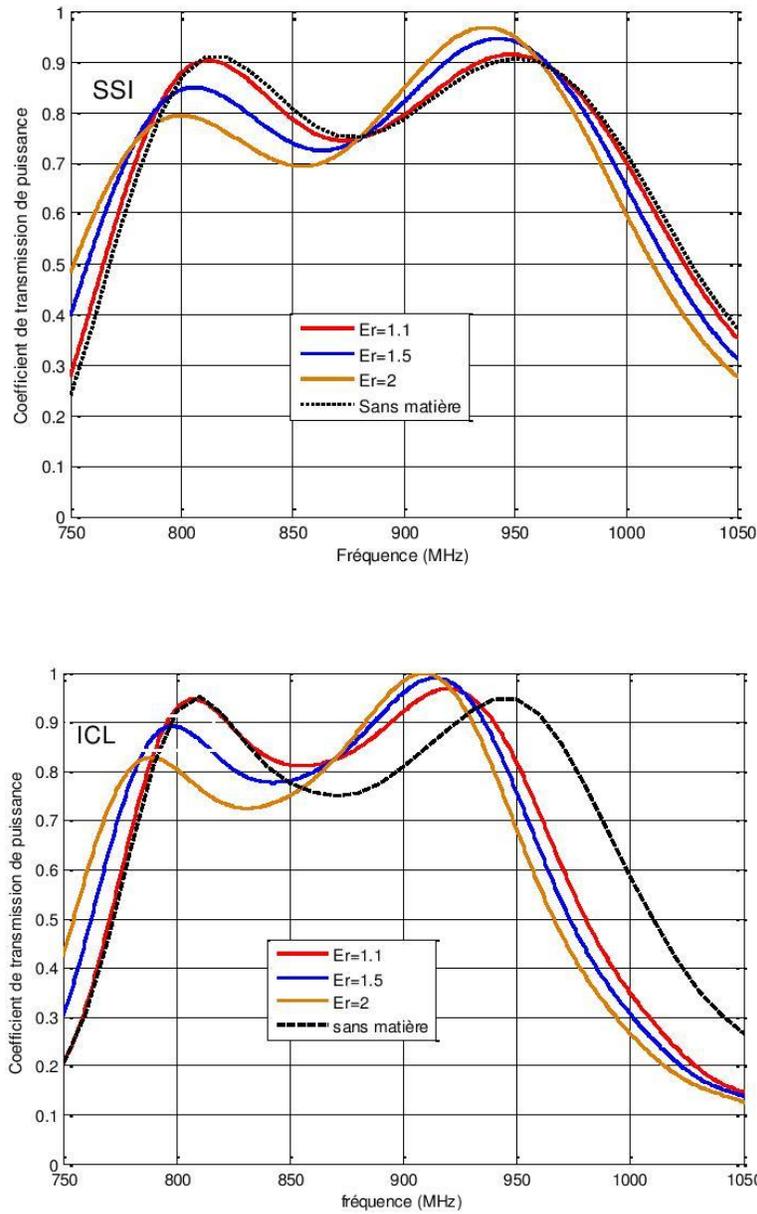


Figure IV.14: Coefficient de transmission de puissance pour les circuits d'adaptations SSI et ICL. Influence de la permittivité de la plaque diélectrique en dessous

Nous pouvons conclure d'après les résultats que l'adaptation ICL est plus sensible que La SSI.

IV.3.4 Résultats expérimentaux

IV.3.4.1 Mesure d'impédance

L'impédance d'entrée de l'antenne est mesurée à l'aide d'une sonde différentielle (Figure IV.12) avec traitement de données comme indiqué dans [91]. Les sondes coaxiales sont incluses dans la simulation CST pour les deux étiquettes (Figure IV.15) afin de prendre en compte le couplage du champ proche dipolaire avec le câble coaxial. Les impédances d'antenne mesurées et simulées sont représentées sur la Figure IV.18.

La comparaison est relativement bonne pour les deux circuits d'adaptation, ce qui permet de passer à la dernière étape, c'est-à-dire l'insertion de la puce dans les étiquettes.

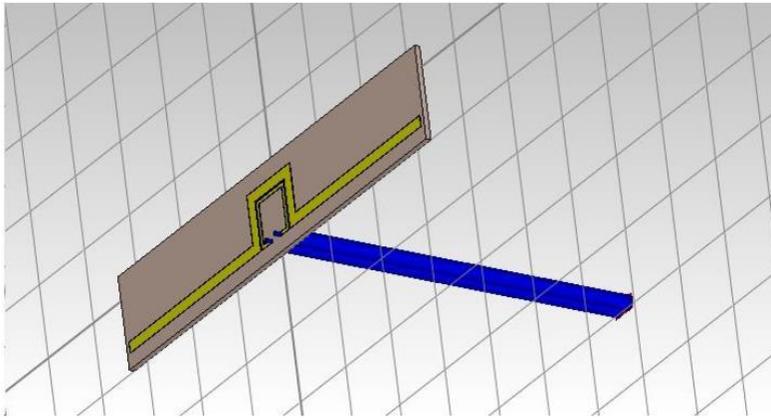


Figure IV.15 : Antenne ICL conçue sous CST en inclut le câble coaxial.

➤ Synthèse de la mesure

L'analyseur permet l'excitation (son alimentation) de l'antenne en mode commun via un accès coaxial avec un connecteur N-SMA. Pour permettre une mesure différentielle de l'antenne, un dispositif de mesure inspiré par l'article [92] a été mise en œuvre.

On ne retiendra que le dispositif qui transforme une mesure prise en mode commun en une mesure en mode différentielle. Le kit de mesure référencé « CoaxComDif » est composé du kit coaxial, du kit de calibrage et du logiciel de de-embedding.

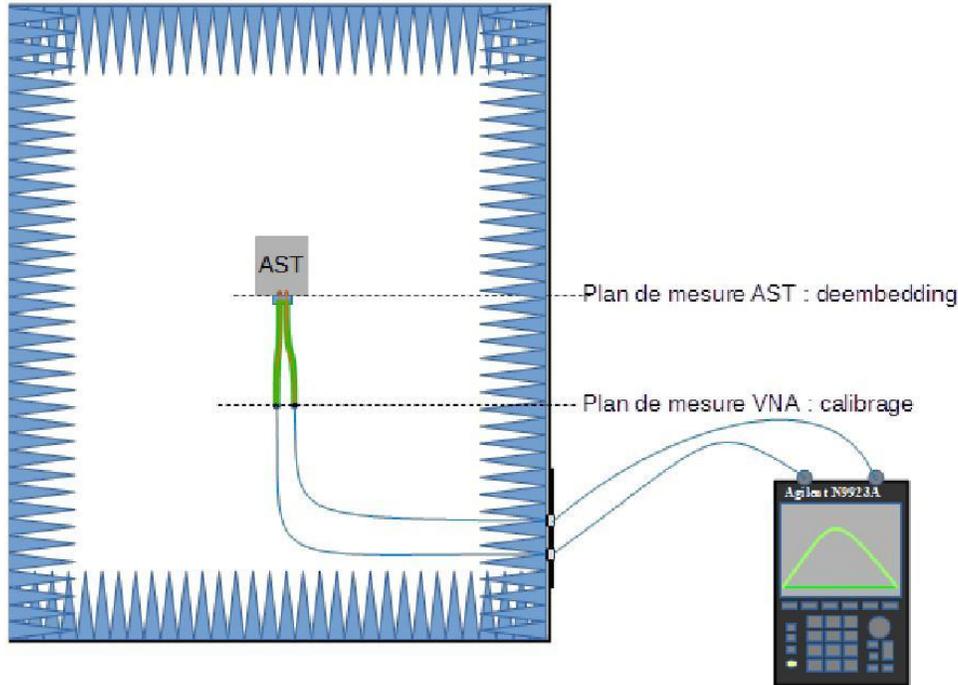


Figure IV.16 : Conception approximative de la mesure.

Pour obtenir la mesure intrinsèque de l'antenne appelée [AST], il faut extraire de la mesure [MES] l'influence du kit coaxial [COAX]. La mesure peut-être modélisée par l'association d'une chaîne de matrice de transfert qui associe le quadripôle AST et de deux demi-coaxiaux semi-rigides de dimensions identiques.

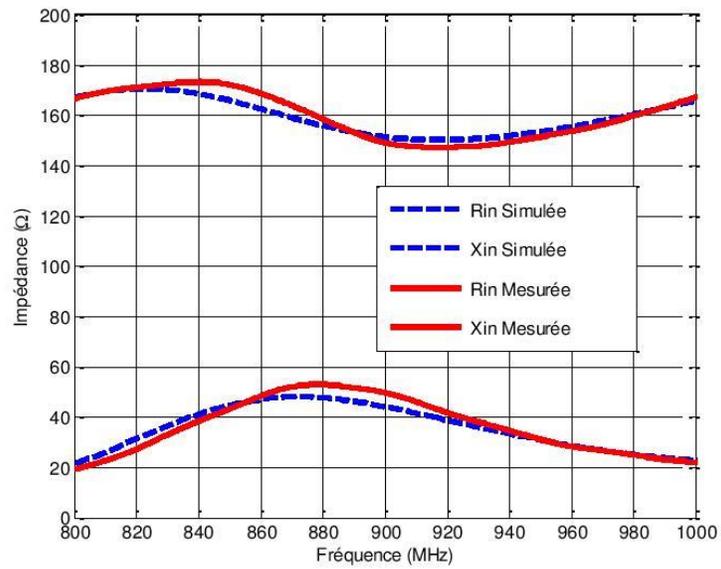
Ensuite, l'écriture matricielle de cette distribution de quadripôle permet d'extraire la matrice de transfert de l'AST [92].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_{11}^{COAX} & T_{12}^{COAX} \\ T_{21}^{COAX} & T_{22}^{COAX} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{11}^{AST} & T_{12}^{AST} \\ T_{21}^{AST} & T_{22}^{AST} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{11}^{COAX} & T_{12}^{COAX} \\ T_{21}^{COAX} & T_{22}^{COAX} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} T_{11}^{MES} & T_{12}^{MES} \\ T_{21}^{MES} & T_{22}^{MES} \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \begin{bmatrix} T_{11}^{AST} & T_{12}^{AST} \\ T_{21}^{AST} & T_{22}^{AST} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} T_{11}^{COAX} & T_{12}^{COAX} \\ T_{21}^{COAX} & T_{22}^{COAX} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_{11}^{MES} & T_{12}^{MES} \\ T_{21}^{MES} & T_{22}^{MES} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{11}^{COAX} & T_{12}^{COAX} \\ T_{21}^{COAX} & T_{22}^{COAX} \end{bmatrix}^{-1} \end{aligned}$$

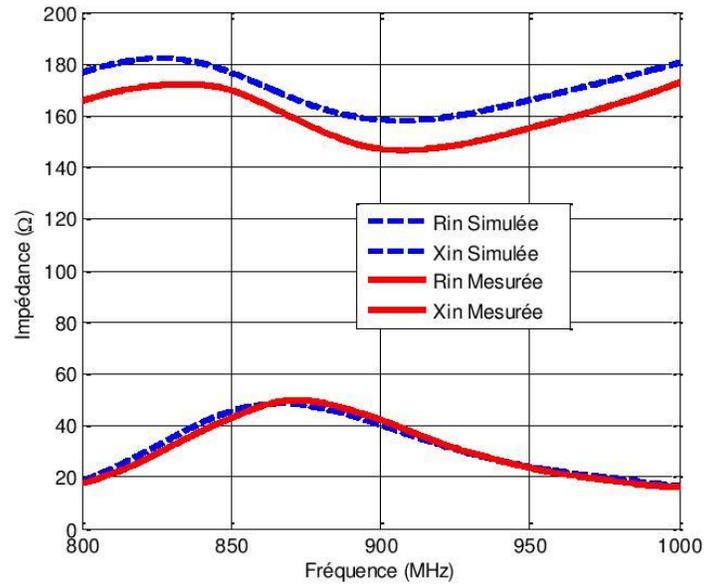
Pour rendre compte du comportement du quadripôle dans le domaine des radio-fréquences, c'est la connaissance des paramètres de la matrice de répartition qui a son importance. De même que c'est la matrice S de répartition qui est mesurée pour obtenir les caractéristiques de chacun des demi-câbles. La matrice de fluence permet de visualiser la propagation des signaux dans un système radio-fréquence.



Figure IV.17 : Mesure d'impédance des antennes dans la chambre anéchoïque de VERNON à l'aide d'un VNA.



a)



b)

Figure IV.18: Impédance d'entrée mesurée et simulée de l'antenne: (a) ICL et (b) SSI.

IV.3.4.2 Mesure de la distance de lecture (Read Range)

La puce RFID est retirée d'un module de boucle commerciale Monza5 où elle est connectée à des bandes métalliques externes et protégée par un revêtement de résine époxy [93]. Il est ensuite attaché à l'étiquette en utilisant de la pâte d'argent. La comparaison expérimentale est réalisée avec l'armoire de mesure Tagformance (Figure IV.19), une armoire compacte, blindée et anéchoïque pour la mesure des étiquettes RFID et des antennes [94].

Les plages de lecture expérimentales représentées sur la Figure IV.20 sont clairement équivalentes pour les deux types de circuits d'adaptation.



Figure IV.19 : Mesure de la distance de lecture à l'aide d'un tagformance (Unité de mesure RFID).

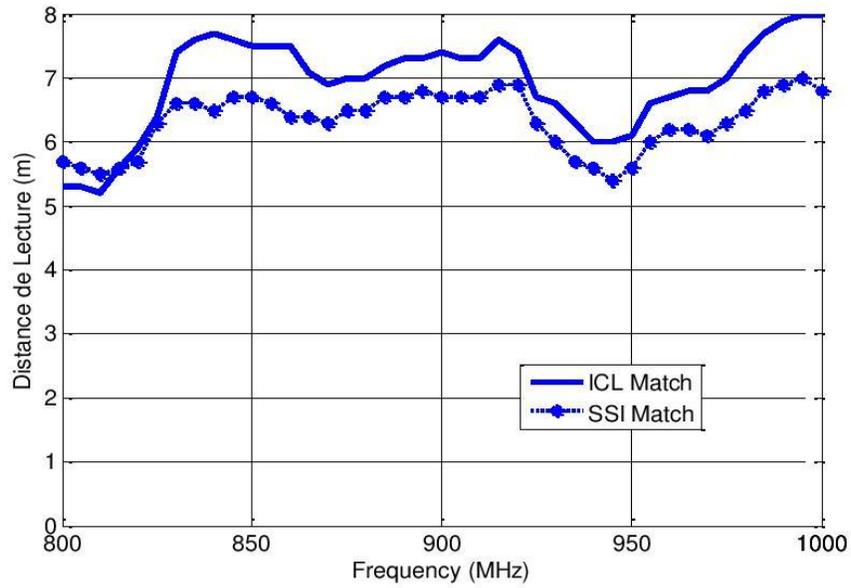


Figure IV.20 : Distance de lecture mesurée pour la technique d'adaptation ICL et SSI.

IV.4 CONCLUSION

Basé sur des modèles électriques simplifiés et des simulateurs électromagnétiques, dans ce chapitre on a démontré que les deux circuits d'appariement RFID UHF les plus populaires sont largement équivalents. Cette équivalence a été confirmée par des mesures d'impédance et de distance de lecture.

Il semble que le choix du circuit d'adaptation effectué pour les étiquettes commerciales ne soit pas dicté par des objectifs de tolérance ou de robustesse, mais principalement par les habitudes du concepteur, car deux degrés de liberté présentant des propriétés de réglage similaires sont disponibles dans les deux cas. Le seul cas dans lequel le circuit à inductance série shunt devrait être préféré à la boucle à couplage inductif est celui où l'impression par jet d'encre à faible coût par encre auto-frittage est utilisée pour la réalisation d'espaces très étroits.

Conclusion Générale

La technologie RFID (Radio Frequency IDentification) utilise des signaux RF pour identifier automatiquement les objets. Il devient une technologie d'identification automatique en développement rapide et ses applications comprennent la collecte électronique des péages, l'identification des biens, la gestion des articles au détail, le contrôle d'accès, la sécurité des véhicules, etc.

Le système RFID se compose d'étiquettes de radiofréquence, d'un lecteur et d'un ordinateur hôte. Une étiquette RFID typique consiste en une antenne et un circuit intégré (puce). La puce est généralement placée au centre de l'antenne de l'étiquette. Les antennes d'étiquette et les puces ont une impédance complexe. La partie imaginaire de l'impédance de la puce est généralement négative et la valeur de la partie imaginaire est généralement beaucoup plus grande que celle de la partie réelle. Au cours de la conception de l'antenne d'étiquette RFID, la conjugaison inductive conjuguée entre l'antenne et la puce est l'un des facteurs importants qui déterminent les performances du système RFID. La condition d'adaptation affecte directement la distance maximale à laquelle un lecteur RFID peut détecter le signal rétrodiffusé à partir de l'étiquette. La règle du match rapide entre l'antenne et sa puce est toujours un objectif important pour les chercheurs et les concepteurs.

La première partie de cette thèse était consacrée à une présentation générale de la technologie RFID en montrant l'intérêt de la technologie passive. Une étude détaillée sur le système UHF RFID est exposée, quelques définitions importantes des paramètres d'antennes sont exposées.

Dans la deuxième partie, Les différentes exigences et spécifications relatives aux antennes d'étiquettes ont été données et le processus de conception avec les techniques d'adaptation et de miniaturisation a été examiné. Enfin, les mesures d'antenne d'étiquette et les méthodes d'essai ont été démontrées.

Perspectives

En perspectives, nous envisageons de passer à la conception des antennes lecteur RFID, avec différentes polarisation. Aussi concevoir le système RFID global et étudier en particulier la partie récupération d'énergie.

Références Bibliographiques

- [1] R. Want, "An introduction to RFID technology. IEEE Pervasive Computing," 5(1), pp. 25-33. 2006.
- [2] K. Finkenzerler, "RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification," 2003.
- [3] R. Mark, "The History of RFID Technology [Online], Available: <http://www.rfidjournal.Com/article/view/1338/1>," accessed 20 February 2012.
- [4] H. Stockman, "Communication by Means of Reflected Power", Proc. of the IRE, vol. 36, pp.1196-1204, Octobre September 2006.
- [5] "EPC Global Home Page [Online]," Available, <http://www.gs1.org/epcglobal>, accessed 20 February 2012.
- [6] Class 1 Generation 2 UHF Air Interface Protocol Standard. <http://www.epcglobalinc.org/standards/>. Accessed Nov 10, 2011.
- [7] J. Landt, "The history of RFID," IEEE Potentials, vol. 24, pp. 8-11, Oct.-Nov 2005.
- [8] "A Basic Introduction to RFID Technology and its use in the supply chain Laran RFID white paper," <http://www.primtronix.com/library/assets/public/case-studies/rfid-laran-white-paperenglish.pdf>.
- [9] J. Hanson, "An introduction to RFID development. DevX.Com Online Report," 2006.
- [10] B. Glover, H. Bhatt, "RFID Essentials (Theory in Practice (O'Reilly)," 2006.
- [11] N. Wu, M. Nystrom, T. Lin and H. Yu, "Challenges to global RFID adoption. Technovation," 26(12), pp. 1317-1323, 2006.
- [12] S. L. Garfinkel, A. Juels and R. Pappu, "RFID privacy: An overview of problems and proposed solutions," IEEE Security & Privacy ,pp. 34-43, 2005.
- [13] T. Phillips, T. Karygiannis and R. Kuhn, "Security standards for the RFID market," IEEE Security & Privacy pp. 85-89, 2005.
- [14] K. V. S. Rao, P. V. Nikitin and S. F. Lam, "Antenna design for UHF RFID tags: A review and a practical application," IEEE Transactions on Antennas and Propagation , 53(12), pp. 3870-3876, 2005.
- [15] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, S. F. Lam, V. Pillai, R. Martinez and H. Heinrich, "Power reflection coefficient analysis for complex impedances in RFID tag design," IEEE Trans, Microwave Theory Tech, 53(9), pp. 2721-2725,2005.

- [16] Nikhil Ayer, "Evaluation Of Iso 18000-6 Type-C Class 1 Generation 2 Rfid Protocol Artifacts," Master's Thesis, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 2008.
- [17] G. De Vita, G. Iannaccone, "Design criteria for the RF section of UHF and microwave passive RFID transponders," *IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech.*, vol. 53(9), pp. 2978-2990, Sept. 2005.
- [18] G. De Vita, G. Iannaccone, "Ultra low power RF section of a passive microwave RFID transponder in 0.35 μm BiCMOS," in *IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, vol. 5, pp. 5075-5078, 2005.
- [19] EPCglobal Inc. EPC radio frequency identification protocols class 1 99 generation 2 UHF RFID protocol for communications at 860 MHz- 960 MHz. Standard Specification version 1.2.0, October ,2008.
- [20] D. Dobkin, "The RF in RFID, Passive UHF RFID in practice: Elsevier," 2008.
- [21] D. Dobkin, T. Wandinger, "A Radio-Oriented Introduction to Radio Frequency Identification," *High Frequency Electronics*, pp. 46-51, 2005.
- [22] N.C. Karmakar, "Handbook of smart antennas for RFID systems," John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, 2010.
- [23] L. M. Ni, Y. Liu, Y. C. Lau, and A. P. Patil, "LANDMARC: indoor location sensing using active RFID," *Wireless Networks*, vol. 10, November 2004.
- [24] "<http://www.idtechex.com/research/articles/>," April, 2005.
- [25] Texas Instruments, "Texas instruments' RFID technology streamlines management of vatican library's treasured collections," 2004,www.ti.com/tiris/docs/news/news_releases/2004/rel07-07-04.shtml.
- [26] C. Li, L. Liu, S. Chen, C. C. Wu, C. Huang, and X. Chen, "Mobile healthcare service system using RFID," in *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, vol. 2, 2004.
- [27] A. Cerino, W. P. Walsh, "Research and application of radio frequency identification (RFID) technology to enhance aviation security," in *Proc.s IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, 2000.
- [28] International Standards Organization, "ISO/IEC FDIS 18000-7:2004(e)," Standard Specification, 2004.
- [29] "EPC Radio-Frequency Identity Protocols: Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz - 960 MHz," Version 1.0.9 ed, EPCglobal, Inc, January2005.
- [30] American National Standards I nstitute, "ANSI NCI TS 236:2001," Standard Specification, 2002.

- [31] International Standards Organization, "ISO/IEC FDIS 18185-1:2006," Standard Specification, 2006.
- [32] "ISO/IEC FDIS 18000-6:2004/amd 1:2006(e)," Standard Specification, 2006.
- [33] D. C. Wyld, "RFID: The right frequency for the government. A research monograph from the IBM Center for the Business of Government," 2005.
- [34] P. P. Lopez, J. C. Hernandez-Castro, J. M. Estevez-Tapiador, and A. Ribagorda "RFID Systems: A Survey on Security Threats and Proposed Solutions," Pw06, vol 4217, pp, 159-170, September 2006.
- [35] G. Marrocco, "The art of UHF RFID antenna design: Impedance-matching and size reduction techniques," IEEE Antennas Propagat. Mag, no. 1, vol. 50, Feb. 2008.
- [36] L.J. Chu, "Physical limitations of omni-directional antennas," J. Applied Physics, vol. 19, pp. 1163–1175. 1948.
- [37] C. Balanis, "Antenna Theory," 3rd edn. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [38] R. Clarke, Tazelaar, Twede, and Boyer, "Radio Frequency Identification (RFID) Performance: The Effect of Tag Orientation and Package Contents," Packaging Technology and Science, vol. 19, pp. 45-54, 2005.
- [39] Y. Lee, "RFID Coil Design," Microchip Technology Inc, vol. AN678, 1998.
- [40] Matrics Inc, "Passive RFID- A primer for New RF regulations," <http://www.matrics.com>, 2004.
- [41] FCC, "Radio Frequency Identification: Short Range Device regulation," CFR15, vol. 47, 2004.
- [42] S. Tedjini, "Antennas for RFID Tags," presented at Joint soc-EUSAI conference, Greboble, 2005.
- [43] D.M. Dobkin, "RFID Basics: Antenna Polarization," RF Designline, 2007.
- [44] R.H. DuHamel, J.P. Scherer, "Frequency-Independent Antennas," in Antenna Engineering Handbook, R. C. Johnson, 3rd Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, chap. 14, 1993.
- [45] Ka-Lam Lau, Hang Wong, and Kwai-Man Luk, "A full-wavelength circularly polarized slot", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, pp. 741-743, 2006.
- [46] K. Finkenzeller, "RFID Handbook, 2nd Edition", John Wiley and Sons Ltd, England, pp. 7-10.
- [47] <http://www.aptsec.org/>.
- [48] K. Kurokawa, "Power waves and the scattering matrix," IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, no. 3, vol. 13, pp. 194-202, Mar 1965.

- [49] Y. T. Lo, S. W. Lee, "Antenna handbook: Antenna theory," International Thompson Publishing, Vol.2, Inc, 1993.
- [50] K. N. M Ramakrishnan, "Performance Benchmarks for Passive UHF RFID Tags," Masters Thesis report, 2005
- [51] M. Catherine, "Symbol Announces Gen 2Tags, Converter Program, RFID Journal, News article, May 2006.
- [52] Alien Technology – "RFID tags," http://www.alientechnology.com/products/rfid_tags.php.
- [53] Avery Dennison, "UHF RFID Inlays," http://rfid.averydennison.com/product_cat/uhfrfid-inlays, Oct. 13, 2011.
- [54] M. Bolic, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenovic, "RF Systems: Research Trends and Challenges," Wiley Online Library, John Wiley & Sons, 2010.
- [55] The EPCglobal Network, Overview of Design, Benefits, and Security, available at <http://www.epcglobalinc.org>, 2004.
- [56] Impinj Inc, "Monza," 2006.
- [57] Alien Technology, "Higgs-3 Product Overview," July 2008.
- [58] Impinj Inc, "Monza 3 Datasheet," 2008.
- [59] Alien Technology, "Higgs-2 Product Overview," July 2008.
- [60] Impinj Inc., "Monza 4 Tag Chip Data Sheet," 2010.
- [61] EM Microelectronic, "EM4324," 2007.
- [62] STMicroelectronics, "XRAG2," 2006.
- [63] P. Nikitin and K. Rao, "Performance limitations of passive UHF RFID systems," Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, pp. 1011-1014, 2006.
- [64] Impinj, "Receptivity-A Tag Performance Metric," 2005.
- [65] A. Toccafondi, P. Braconi, "Compact load-bars meander line antenna for UHF RFID transponder," European Conf. on Antennas and Propag., Nice, France, 2006.
- [66] C. Cho, H. Choo and I. Park, "Design of novel RFID tag antennas for metallic objects," IEEE Int. AP-S Symp. Antennas Propag., Albuquerque, NM, pp. 3245-3248, 2006
- [67] M. Keskilammi, M. Kivikoski, "Using text as a meander line for RFID transponder antennas," IEEE Antennas and Propag, vol. 3, pp. 372-374, 2004.
- [68] B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature," New York, W. H. Freeman and Company, 1977.
- [69] J. P. Gianvittorio, "Fractal Antennas: Design, Characterization and Applications," Master's thesis, University of California, Los Angeles, 2000.

- [70] V. H. Rumsey, "Frequency Independent Antennas," Academic Press, 1966.
- [71] T. Hu, C. Liu, Z. Wang, "Design and analysis of UHF tag antenna structure," China Japan Joint Microw. Conf, pp. 1-4, 2011.
- [72] G. Marrocco, A. Fonte and F. Bardati, "Evolutionary Design of Miniaturized Meander-Line Antenna for RFID Applications," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 2, pp. 362-365, Jun. 2002.
- [73] X. Qing and N. Yang, "A folded dipole antenna for RFID," presented at Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004, pp 97-100, IEEE, 2004.
- [74] A. Ghiotto, T.P. Vuong, E. Perret and S. Tedjini, "Design and miniaturization of UHF RFID antenna," Scientific days of CNFRS, Paris, 2007.
- [75] Xianming Qing, Ning Yang, "A Folded Dipole Antenna for RFID", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004.
- [76] 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.
- [77] J. Curty, N. Joehl, C. Dehollain and M. J. Delercq, "Remotely Powered Addressable UHF RFID Integrated System," IEEE Journal of Solid-State Circuits, 40, 11, November 2005, pp. 2193-2202.
- [78] S. Basat, S. Bhattacharya, A. Rida, S. Johnston, L. Yang, M. M. Tentzeris and J. Laskar, "Fabrication and Assembly of a Novel High-Efficiency UHF RFID Tag on Flexible LCP Substrate," Electronic Components and Technology Conference, May-June 2006, pp. 1352-1355.
- [79] G. Marrocco and C. Calabrese, "Automatic design of miniaturized slot-line RFID antennas," European Conf, Antennas and Propag, Edinburgh, Scotland, 2007.
- [80] M. T. Reich, C. Bauer-Reich, "UHF RFID impedance matching: When is a T-match not a T-match?," IEEE RFID Conference, Orlando, FL, pp. 23-30, 2014.
- [81] J-T Xi, H-L Zhu and T. Ye, "Exploration of printing-friendly RFID antenna designs on paper substrates," IEEE RFID Conference, Orlando, FL, 2011.
- [82] H.-W. Son, C.-S. Pyo, "Design of RFID tag antennas using an inductively coupled feed," Electron. Lett., vol. 41, no.18, pp. 1-2, Sep. 1, 2005.
- [83] R. Saba, T. Deleruyelle, J. Alarcon, M. Egels, and P. Pannier, "A Resistant textile tag antenna for RFID UHF frequency band," IEEE Conference on RFID Technology and Applications, Nice, France, pp.203-207, 2012.

- [84] J.-M. Laheurte, S. Protat and A. Louzir, "Performance Analysis of UHF RFID Tags Dedicated to Power Supply Cords," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Volume 63, Issue 11, pp. 5241–5245, Nov. 2015.
- [85] F. Gourari, S. Meriah, S. Protat, J. Dubouil, J-M Laheurte, "Comparison of two matching techniques for UHF RFID tags," *Microwave and Optical Technology Letters*, Wiley, 60 (7), pp.1763 - 1767, 2018.
- [86] <http://www.impinj.com/>, Monza 5 RFID Tag Chips Datasheet.
- [87] J. Xi, T. Ye, "Wideband and material-insensitive RFID tag antenna design utilizing double-tuning technique," *International Symposium on Antennas and Propagation*, Spokane, Washington, USA, pp. 545-548, 2011.
- [88] A. Rida, L. Yang, R. Vyas, M. Tentzeris, "Conductive Inkjet-Printed Antennas on Flexible Low-Cost Paper-Based Substrates for RFID and WSN Applications," *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, Vol. 51, No.3, pp. 13-23, Jun. 2009.
- [89] H. He, L. Sydänheimo, J. Virkki, and L. Ukkonen, "Experimental Study on Inkjet-Printed Passive UHF RFID Tags on Versatile Paper-Based Substrates," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2016.
- [90] S. Amendola, "Wireless and Battery-less Biointegrated Sensors for Bodycentric Internet of Things," Ph.D. dissertation, Università degli studi di Roma Tor Vergata, Roma, 2017.
- [91] K. D. Palmer, and M. W. Van Rooyen, "Simple broadband measurements of balanced loads using a network analyzer," *IEEE Trans. on Instrument.& Meas.*, 55(1), pp. 266-272, 2006.
- [92] F. Sarrazin, S. Pflaum and C. Delaveaud "Radiation Efficiency Measurement of a Balanced Miniature IFA-Inspired Circular Antenna using a Differential Wheeler Cap Setup," *IEEE*, 2016
- [93] P. Soboll, V. Wienstroer, and R. Kronberger, "Innovating RFID for future applications: a capacitive coupled antenna design for UHF RFID application," *IEEE Microwave*, vol. 17, no. 2, pp. 65–69, 2016.
- [94] "Tagformance pro, Voyantic Ltd, Espoo, Finland [Online]." Available: http://voyantic.com/tagformance_pro.

Abréviations

Auto-ID	Automatic Identification
IFF	Identification friend or foe
ISO	International Organization for Standardization
ISM	Industrial, Scientific and Medical Radio
EPC	Electronic Product Code
RF	Radio Frequency
LF	Low Frequency
HF	Haut Frequency
UHF	Ultra Haut Frequency
ANSI	American National Standards Institute
NFC	Near-Field Communication
RCS	Radar Cross Section
IC	Circuit Intégré
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
UPC	Universal Product Code
SSI	Shunt-Series Inductance
ICL	Inductively Coupled-Loop
PTC	Power Transmission Coefficient
FDTD	Finite-Difference Time-Domain Method
MoM	Method Of Moments
FEM	Finite Element Method
IDTechEx	Market Research, Scouting and Events on Emerging Technologies
TI-RFID	Texas Instruments Radio Frequency Identification Systems

Résumé

Récemment, l'identification par radiofréquence (RFID) est apparue comme la prochaine vague de technologie qui révolutionnera de nombreux secteurs industriels: contrôle d'accès, transport public contrôle de la bibliothèque et contrôle des bagages. La performance des étiquettes commerciales d'identification par radiofréquence est limitée par les techniques actuelles utilisées dans la conception des antennes tag. Actuellement, les techniques industrielles reposent sur le tag RFID et la construction de prototypes d'antennes de différentes configurations afin de répondre aux exigences de distance de lecture minimale. Cependant, ces techniques n'ont pas de base électromagnétique et sont incapables de fournir une solution moins coûteuse au processus de conception. Les caractéristiques de performance des tags RFID peuvent être très complexes, et une compréhension approfondie de la conception de l'antenne tag RFID peut être acquise par une approche électromagnétique afin de réduire la taille de l'antenne et le coût global du système RFID. Cette thèse porte essentiellement sur l'étude du système UHF RFID passif, spécialement les techniques d'adaptation antenne puce, les différentes techniques de miniaturisation. Au cours de cette thèse, nous avons essayé de comparer les techniques d'adaptation les plus utilisées dans la conception des antennes tag RFID. Des résultats expérimentaux ont été obtenus mettant ainsi en exergue la validation des simulations et la modélisation analytique.

Mots-clés : Identification par radiofréquence (RFID), tags, Puces RFID, Adaptation d'impédances, T-match, Boucle à couplage inductif, Miniaturisation, RFID UHF passif.

Abstract

Recently, radio frequency identification (RFID) has emerged as the next wave of innovation that will reform numerous modern segments: library control, public transport, access control and baggage control. The performance of commercial RFID tags is restricted by current techniques utilized in the design of tag antennas. Currently, industrial techniques depend on the RFID tag and the fabrication of antenna prototypes of different configurations to meet the lowest reading distance requirements. Even though, these techniques have no electromagnetic premise and can't give a solution for to the design process. The performance characteristics of RFID tags can be extremely perplexing, and a careful comprehension of the design of the RFID tag antenna can be picked up by an electromagnetic approach to reduce the antenna size and the general cost of the RFID system. This thesis focuses on the study of the UHF passive RFID system, especially the antenna chip adaptation techniques, the different techniques of miniaturization. During this thesis, we tried to compare the most used adaptation techniques in the design of RFID tag antennas. Experimental results have been obtained highlighting the validation of simulations and analytical modeling.

Keywords: Radio Frequency Identification (RFID), Tags, RFID chips, Impedance matching, T-match, Inductive coupling loop, Miniaturization, UHF passive RFID

ملخص

في الأونة الأخيرة، برزت تحديد الترددات الراديوية (RFID)، وموجة التكنولوجيا القائمة من شأنها أن تحدث ثورة في العديد من القطاعات الصناعية: التحكم في الوصول والتحكم في وسائل النقل العام للمكتبة والأمتعة. يقتصر أداء العلامات التجارية لتحديد ترددات الراديو على التقنيات الحالية المستخدمة في تصميم هوائي العلامات. حالياً، والتكنولوجيا الصناعية القائمة على النماذج العلامات RFID وبناء الهوائيات من تكوينات مختلفة لتلبية الحد الأدنى من المتطلبات مسافة القراءة. ومع ذلك، فإن هذه التقنيات لا أساس لها الكهرومغناطيسية وغير قادرة على توفير حل أقل تكلفة لعملية التصميم. تتفاعل خصائص الأداء العلامات يمكن أن تكون معقدة جداً، وفهم دقيق لتصميم العلامات هوائي RFID يمكن الحصول عليها عن طريق نهج الكهرومغناطيسي للحد من حجم الهوائي والتكلفة الإجمالية للنظام RFID. تركز هذه الرسالة على نظام RFID UHF السلبى، وخاصة تقنيات التكيف مع شرائح الهوائي، والتقنيات المختلفة للتصغير. خلال هذه الرسالة، حاولنا مقارنة تقنيات التكيف الأكثر استخداماً في تصميم هوائيات بطاقة RFID. تم الحصول على نتائج تجريبية من خلال تسليط الضوء على التحقق من صحة المحاكاة والنمذجة التحليلية.

كلمات البحث: تحديد الهوية بترددات الراديو العلامات (RFID)، والعلامات RFID، ومطابقة مقاومة، T مباراة، حتى حلقة افتران، التصغير،

السلبى UHF RFID.