



**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

**Université Kasdi Merbah Ouargla**

**Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la  
Communication**

**Département d'Électronique et des Télécommunications**

MASTER 2 ACADÉMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière: Télécommunications

Spécialité: Systèmes des télécommunications

## **Conception et simulation d'une antenne tag RFID passive à polarisation circulaire dédiée aux applications UHF**

*Présenté et soutenu publiquement par*

**Moulai Mammar Naami et Hafiane Nourelimane**

Le 19 Juin 2023

### **Jury**

<b>Mohammed BOULESBAA,</b>	Professeur à l'université de Ouargla	Président
<b>Boualem MEKIMAH,</b>	MCA à l'université de Ouargla	Encadrant
<b>Hachemi CHENINA,</b>	MCB à l'université de Ouargla	Co-Encadrant
<b>Hassiba LOUAZÈNE,</b>	MCB à l'université de Ouargla	Examinatrice
<b>Amira HAMIDI,</b>	Doctorante	Invité

# Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes parents, à ma famille qui m'ont soutenu et aimé tout au long de mon parcours académique. Leur présence et leur fierté ont été une source de motivation inébranlable. Je dédie également ce travail à mon cher professeur **Boualem Mekimah** et mes précieux amis qui sont devenus comme des frères, pour leur amitié indéfectible et les souvenirs partagés, pour toute la famille **Naami**, mes amis de département de télécommunications à Ouargla, tous ceux qui sont chers de près ou loin.

***Moulay Mammar***

# Dédicaces

A la mémoire de la regrettée **MAMA** que dieu ait son âme en son paradis.  
Je dédie ce travail à :  
Mon père **Mohamed** et mon frère **Hamza Walid**.  
Mon mari **Mohamed Redouane**.  
Ma sœur **djihane**.  
Mes sœur **Mounira, Oumalkheir, Asma et Hanane**, Leurs maris et leur enfant.  
Je dédie également ce travail à mon professeur **Boualem Mekimah**.  
Ma grand-mère, Mes oncles et mes tantes et leur enfant.  
Mes beaux-parents et tous les membres de la famille **Raache**.  
Tous les membres de ma grande famille **Hafiane** et **Siboukeur** sans exception.

**Nour El-Imane**

# Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord et avant tout, DIEU le tout puissant qui m'a donné, durant toutes mes années de recherche, la santé, le courage et la patience pour arriver à ce jour. Nous exprimons notre sincère gratitude envers notre encadrant, **Dr. Mekimah Boualem**, pour sa disponibilité, son sérieux et ses précieux conseils tout au long du projet. Un grand merci au notre président du jury **Pr. Boulesbaa Mohammed** pour son soutien aux étudiants. Nous remercions également envers notre co-encadreur, **Dr. Hachemi chenina**, pour sa contribution et à l'examinatrice **Dr. Hassiba LOUAZÈNE** d'avoir accepté d'examiner notre travail. Nous tenons également à remercier tous les enseignants de l'UKMO qui ont contribué à notre formation, en particulier nos enseignants de la faculté. Enfin, nous exprimons notre gratitude envers toutes les personnes qui ont participé directement ou indirectement à notre réussite, en y mettant tout leur cœur.

# Résumé

Le but de ce travail était de concevoir une antenne tag passive RFID à polarisation circulaire pour les applications UHF. L'étude vise à développer une antenne étiquette passive pour assurer une communication sans fil fiable et une lecture précise dans la bande UHF. La structure est constituée d'une boucle carrée excitée à travers deux stubs à base d'un T-match pour faire adapté l'antenne avec la puce. L'antenne tag proposée est très mince de taille  $90 \times 90 \times 0.15 \text{ mm}^3$  avec un gain de 2.765 dBic, une longue portée allant jusqu'à 11.361 mètres et une largeur de bande à polarisation circulaire de 43 MHz et une bande de fréquence centrée à 915 MHz. Les résultats obtenus montre que l'antenne opérant efficacement dans la bande américaine UHF avec un rayonnement bidirectionnel à polarisation circulaire dans une épaisseur très mince de 0.15 mm.

**Mots clés**—Antenne FRID à polarisation circulaire; bande UHF; lobe de rayonnement principal; largeur de bande; rapport axial.

---

## Abstract

The aim of this work was to design a circularly polarized passive RFID tag antenna for UHF applications. The study aims to develop a passive tag antenna to ensure reliable wireless communication and accurate reading in the UHF band. The structure consists of a square loop excited through two stubs T-match-based to match the antenna with its chip. The proposed tag antenna is very compact, occupying a size of  $90 \times 90 \times 0.15 \text{ mm}^3$ , with a gain of 2.765 dBic, a long range of up to 11.361 meters, a circular polarization bandwidth of 43 MHz, and a frequency band centered at 915 MHz. The obtained results demonstrate that the antenna operates efficiently in the U.S. UHF band, with bidirectional circularly polarized radiation in a very thin thickness of 0.15 mm.

**Keywords**—Axial ratio bandwidth; circularly polarized RFID Tag antenna; UHF band; impedance bandwidth; main beam direction.

## ملخص

كان الهدف من هذا العمل هو تصميم هوائي علامة سلبية RFID مستقطب دائريًا لتطبيقات UHF . تهدف الدراسة إلى تطوير هوائي علامة سلبية لضمان اتصال لاسلكي موثوق وقراءة دقيقة في نطاق UHF . يتكون الهيكل من حلقة مربعة يتم تحفيزها من خلال شطرين بناءً على تطابق T لطابقة العلامة مع الشريحة. هوائي العلامة المقترح صغير جدًا بحجم  $90 \times 90 \times 0.15m^3$  مع كسب  $2.765dB$  ، وهو نطاق طويل يصل إلى 11.361 مترًا وعرض نطاق مستقطب دائريًا يبلغ 43 ميغا هرتز ونطاق تردد مركزه عند 915 ميغا هرتز. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الهوائي يعمل بشكل فعال في النطاق UHF بالولايات المتحدة مع إشعاع ثنائي الاتجاه مستقطب دائريًا بسلك  $0.15mm$  رقيق جدًا.

**كلمات مفتاحية** هوائي مستقطب دائريًا، النسبة المحورية، عرض النطاق، فص الانتشار الرئيسي.

# Table des matières

<b>Dédicaces</b>	<b>ii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>iv</b>
<b>Résumé</b>	<b>vii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des Acronymes et Abréviations</b>	<b>xiv</b>
<b>Liste des Symboles</b>	<b>xv</b>
Introduction Générale <sup>1</sup>	
<b>1 La technologie RFID</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction	4
1.2 Historique de la RFID	4
1.3 Qu'est-ce que la RFID?	4
1.4 Principe de fonctionnement d'un système RFID	5
1.5 Architecture d'un système RFID	6
1.5.1 Tags RFID	6
1.5.2 Lecteur RFID	6
1.5.3 Le back-end	7
1.6 Caractéristiques des tags RFID	7
1.7 Types du tags RFID	8
1.7.1 Tag avec puce	8
1.7.1.1 Tags passifs	8
1.7.1.2 Tags Semi-actifs	8
1.7.1.3 Tags actives	9
1.7.2 Tag sans puce	11
1.8 Les types des lecteurs	11
1.8.1 Lecteur fixe	11
1.8.2 Lecteur mobile	11
1.9 Les fréquences d'utilisation	12
1.10 Les normes de RFID	12
1.11 Protocole de communication	14
1.12 Domaine d'application de RFID	15



1.12.1	Logistique :	15
1.12.2	La traçabilité :	15
1.12.3	Paiement :	15
1.12.4	Implant et systèmes intelligents :	16
1.13	Avantages et inconvénients	16
1.13.1	Avantages	16
1.13.1.1	Une plus grande capacité de contenu	16
1.13.1.2	La vitesse de marquage	16
1.13.1.3	Une sécurité d'accès au contenu	16
1.13.1.4	Une plus grande durée de vie	17
1.13.1.5	Une plus grande souplesse de positionnement	17
1.13.1.6	Une moindre sensibilité aux conditions environnementales	17
1.13.2	Inconvénients [16].	17
1.13.2.1	Le coût	17
1.13.2.2	La perturbation par l'environnement physique	17
1.13.2.3	Les perturbations induites par les étiquettes entre elles	18
1.13.2.4	La sensibilité aux ondes électromagnétiques parasites	18
1.13.2.5	Les interrogations sur l'impact de la radio fréquence sur la santé	18
1.14	Conclusion	18
<b>2</b>	<b>Paramètres fondamentaux d'une antenne tag RFID</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction	20
2.2	Paramètres fondamentaux des antennes Tag RFID	20
2.3	Les paramètres électriques	20
2.3.1	Coefficient de réflexion	20
2.3.2	Rapport d'ondes stationnaires ROS	21
2.3.3	Impédance d'entrée de l'antenne	21
2.3.4	Coefficient de transmission	21
2.3.5	Largeur de bande d'une antenne	22
2.4	Paramètres de rayonnement	23
2.4.1	Diagramme de rayonnement	23
2.4.2	Directivité	23
2.4.3	Angle d'ouverture	24
2.4.4	Gain de l'antenne	24
2.4.5	Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)	25
2.5	Polarisation de champ électromagnétique	25
2.6	Antenne patch à polarisation circulaire	26
2.7	La puce dans les systèmes RFID	26
2.8	L'adaptation d'impédance d'antennes de tags RFID UHF passifs	27
2.8.1	L'impédance des puces RFID UHF passives	27
2.8.2	Transmission en puissance	28
2.9	Techniques d'adaptation d'un tag RFID	29
2.9.1	L'adaptation par éléments série	30
2.9.2	Adaptation par éléments parallèles	30
2.9.3	Adaptation par couplage	30
2.10	Conclusion	31

---

<b>3 Résultats et discussion</b>	<b>32</b>
3.1 Introduction	33
3.2 Présentation du logiciel CST	33
3.3 Méthodologie de conception d'antenne de tags RFID passifs	33
3.4 Conception de l'antenne	35
3.4.1 Dimensions optimales de l'antenne proposée après optimisation	36
3.5 Résultats de simulation	38
3.5.1 Adaptation entre la puce et l'antenne	38
3.5.1.1 Coefficient de réflexion	42
3.5.1.2 Rapport d'ondes stationnaires (VSWR)	43
3.5.1.3 Rapport axial	43
3.5.1.4 Diagramme de rayonnement	44
3.5.1.5 Gain	45
3.5.1.6 Efficacité de rayonnement	45
3.5.1.7 Portée de lecture (read range)	45
3.5.1.8 Champ électrique rayonné	46
3.5.1.9 Courant électrique	47
3.5.1.10 Représentation polaire du diagramme de rayonnement	47
3.6 Comparaison avec la littérature	50
3.7 Conclusion	50
Conclusion Générale	51

# Liste des figures

1.1	Fonctionnement d'un système RFID . . . . .	5
1.2	une architecture RFID typique . . . . .	6
1.3	un exemple d'un tag . . . . .	7
1.4	principales caractéristiques d'un tag RFID . . . . .	7
1.5	Alimentation de tag passif. [12] . . . . .	9
1.6	Tag RFID actif [4]. . . . .	10
1.7	Transmission des données vers le lecteur [12]. . . . .	10
1.8	Exemple tag sans puce . . . . .	11
1.9	Exemple d'un lecture RFID fixe . . . . .	11
1.10	Exemple d'un lecture RFID mobile . . . . .	12
1.11	Représentation schématique d'une communication RFID. . . . .	14
1.12	Principales procédures de communication RFID . . . . .	14
1.13	Les applications des RFID . . . . .	16
2.1	Estimation de la bande passante d'une antenne. . . . .	23
2.2	diagramme de rayonnement . . . . .	24
2.3	Diagramme de rayonnement bi-directionnel en coordonne cartésien . . . . .	24
2.4	Les différents états de polarisation . . . . .	25
2.5	antenne patch à polarisation circulaire . . . . .	26
2.6	les puces RFID . . . . .	27
2.7	Modèle simplifié du circuit d'alimentation d'une puce RFID. . . . .	27
2.8	Modèle parallèle et modèle série de l'impédance d'entrée d'une puce RFID. . . . .	28
2.9	Coefficient de transmission T dans le cas d'une puce RFID d'impédance $Z_c = 20 - j255$ . . . . .	29
2.10	Représentation de $\Gamma^*$ sur un l'abaque de Smith. . . . .	29
2.11	Modèle parallèle et modèle série de l'impédance d'entrée d'une puce RFID [25]. . . . .	30
2.12	Modèle circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée par une inductance série [22]. . . . .	30
2.13	Modèle du circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée par une inductance parallèle [22]. . . . .	30
2.14	Modèle circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle couplée à une boucle inductive. . . . .	31
3.1	Interface du CST Microwave Studio . . . . .	33
3.2	méthodologie de conception . . . . .	35
3.3	Géométrie optimale de l'antenne proposée. . . . .	36
3.4	dimension de l'antenne . . . . .	37

---

3.5	La configuration du T-match pour les dipôles planaires et le circuit équivalent, où le rapport d'augmentation d'impédance $(1 + \alpha)$ est lié aux sections transversales des conducteurs . . . . .	39
3.6	discret porte . . . . .	40
3.7	La résistance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de $a$ et $b$ .	41
3.8	La réactance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de $a$ et $b$ .	41
3.9	emplacement de la puce. . . . .	42
3.10	$S_{11}$ en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de $a$ et $b$ . . . . .	42
3.11	Taux d'ondes Stationnaires (VSWR) . . . . .	43
3.12	AR en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de $x$ . . . . .	44
3.13	AR en fonction de fréquence du différents valeurs de $d$ . . . . .	45
3.14	Diagramme de rayonnement (directivité) à 915 MHz . . . . .	45
3.15	Diagramme de rayonnement (gain réalisé) à 915 MHz . . . . .	46
3.16	Le gain en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de $a$ et $b$ . . . .	46
3.17	Efficacité de rayonnement . . . . .	47
3.18	Le champ électrique rayonné . . . . .	48
3.19	Distribution du courant électrique sur l'antenne . . . . .	49
3.20	Diagramme de rayonnement polaire . . . . .	49

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison de différents types de systèmes [4]. . . . .	10
1.2	Les bandes des fréquences utilisées pour les systèmes RFID [14]. . . . .	12
1.3	Les différentes normes ISO 18000 . . . . .	13
3.1	Dimensions en mm de la boucle carrée . . . . .	36
3.2	Dimensions en mm des deux (02) bandes d'alimentation . . . . .	37
3.3	Dimensions en mm du stub. . . . .	37
3.4	la variation de T-match . . . . .	40
3.5	S11 en fonction de a et b . . . . .	43
3.6	Comparaison des performances de l'antenne proposée avec celles dans la littérature . . . . .	50

# Liste des Acronymes et Abréviations

APC	Antennes à Polarisation Circulaire
APL	Antennes à Polarisation Linéaire
AR	Axial Ratio
BPF	Bande Passante Fractionnelle
CCW	CounterClockWise
CPW	Coplanar Waveguide
CST	Computer Simulation Technology
CW	ClockWise
FCR	Fonction Caractéristique de Rayonnement
FDTD	Méthode des différences finies
FEM	Finite Element Method
FIT	Technique d'intégration finie
HFSS	High Frequency Structure Simulator
LHEP	Left Handed Elliptical Polarization
LHCP	Left Handed Circular Polarization
MoM	Méthode des moments
RA	Rapport Axial
RF	Radio-Fréquence
RHEP	Right Handed Elliptical Polarization
RHCP	Right Handed Circular Polarization
ROS	Rapport d'Ondes Stationnaires
SIW	Substrate Integrated Waveguide
TE	Transverse Électrique
TEM	Transverse Électrique-Magnétique
TM	Transverse Magnétique
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

# Liste des Symboles

$f_c$	Fréquence centrale
$f_1$	Fréquence inférieure
$f_2$	Fréquence supérieure
$Z_G$	L'impédance interne du générateur
$Z_C$	L'impédance caractéristique
$Z_{Ant}$	L'impédance de l'antenne
$R_{Ant}$	La résistance de l'antenne
$X_{Ant}$	Réactance de l'antenne
$R_{pertes}$	Résistance de pertes
$\Gamma(x)$	Le coefficient de réflexion sur une ligne
$s_{11}$	Le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne
$V_{max}$	La tension maximale sur une ligne
$V_{min}$	La tension minimale sur une ligne
$Q_t$	Facteur de qualité total
$Q_c$	Facteur de qualité du conducteur
$Q_d$	Facteur de qualité du diélectrique
$Q_{sw}$	Facteur de qualité des ondes de surface
$Q_{rad}$	Facteur de qualité de rayonnement
$\mu$	Perméabilité magnétique
$\epsilon$	Permittivité diélectrique
$\mu_r$	Perméabilité magnétique relative
$\epsilon_r$	Permittivité diélectrique relative
$\tan \delta$	Tangente de perte
$\sigma$	Conductivité des conducteurs
$\Delta f$	Largeur de bande
$\eta$	Rendement de rayonnement
$\eta_p$	Rendement de polarisation
$r(\theta, \varphi)$	La fonction caractéristique de rayonnement
$P(\theta, \varphi)$	Puissance dans la direction $(\theta, \varphi)$
$P(\theta_0, \varphi_0)$	Puissance dans la direction de rayonnement maximal
$D(\theta, \varphi)$	Directivité dans la direction $(\theta, \varphi)$
$G(\theta, \varphi)$	Gain dans la direction $(\theta, \varphi)$
$P_e$	Puissance disponible à l'émission
$P_r$	Puissance à la réception
$G_e$	Gain de l'antenne d'émission
$G_r$	Gain de l'antenne de réception
$\alpha_l$	L'affaiblissement de liaison

$\alpha_p$	L'affaiblissement de propagation
<b>E</b>	Le vecteur champ électrique
<b>H</b>	Le vecteur champ magnétique
$E_x$	La composante du vecteur champ électrique dans la direction $x$
$E_y$	La composante du vecteur champ électrique dans la direction $y$
$H_x$	La composante du vecteur champ magnétique dans la direction $x$
$H_y$	La composante du vecteur champ magnétique dans la direction $y$
$f$	La fréquence en Hertz
$\omega$	La pulsation en radians par seconde, égale à $2\pi f$
$k$	Le nombre d'onde en radians par mètre
$\varphi$	La phase
$\varphi_x$	La phase initiale de la composante $E_x$
$\varphi_y$	La phase initiale de la composante $E_y$
$\tau$	L'angle d'inclinaison d'un ellipse de polarisation
$P_A$	La puissance d'alimentation disponible au générateur
$P_M$	La puissance délivrée à la ligne de transmission adaptée
$P_O$	La puissance acceptée par l'antenne
$P_R$	La puissance rayonnée par l'antenne
$I$	L'intensité de rayonnement
$I_n$	L'intensité de rayonnement partielle
$M_1$	Désadaptation d'impédance due au câble RF
$M_2$	Désadaptation d'impédance due à la ligne d'alimentation de l'antenne
$G_R$	Gain réalisé
$G$	Gain
$D$	Directivité
$g_R$	Gain réalisé partiel
$g$	Gain partiel
$d$	Directivité partielle
$p$	Rendement de polarisation
<b>D</b>	L'induction électrique en Coulombs par mètre carré [ $C/m^2$ ]
<b>B</b>	L'induction magnétique en Teslas [T]
$\rho$	La densité volumique de charge en Coulombs par mètre cube [ $C/m^3$ ]
<b>J</b>	La densité de courant électrique en Ampères par mètre carré [ $A/m^2$ ]
$c$	La célérité de la lumière en mètres par seconde [ $m/s$ ]
$\chi_{mn}$	Le $m^{\text{ème}}$ zéro de la dérivée de la fonction de Bessel d'ordre $n$
$n$	Le mode angulaire
$m$	Le mode radial
$h$	La hauteur du substrat diélectrique



# **Introduction Générale**

L'utilisation de la technologie RFID (Radio Frequency Identification) devient de plus en plus essentielle dans de nombreuses applications, notamment dans la gestion des stocks, la logistique, la traçabilité des produits, et même dans le domaine de la sécurité. Le développement d'une antenne RFID passive à polarisation circulaire spécialement aux applications UHF revêt une grande importance dans la littérature [1–3]. Malgré le développement apporté sur les antennes FRID, elles nécessitent encore une amélioration en termes de performance. Par exemple l'antenne proposée dans [1] présente une taille acceptable de  $70 \times 70 \times 1.6 \text{ mm}^3$ , mais avec un très faible gain de -13 dBic et une portée très courte de 6 mètres, avec un largeur de bande à polarisation circulaire seulement de 6 MHz. Dans [2], la structure d'antenne proposée présente une bonne taille de  $69 \times 69 \times 1 \text{ mm}^3$ , une portée maximale acceptable de 8.3 mètres, mais avec un gain aussi très faible de -1.05 dBic, dans une bande de fréquences à polarisation circulaire de largeur 47 MHz. Dans le travail [3], l'auteur a proposé une structure de taille miniature  $50 \times 50 \times 4.5 \text{ mm}^3$ ; cependant, son gain et sa portée sont relativement faibles de -7.1 dBic et 5.8 mètres respectivement.

L'objectif de notre travail est de concevoir une antenne RFID passive à polarisation circulaire plus large qui puisse répondre aux exigences spécifiques des applications UHF avec une longue portée pour un gain très acceptable. Cela implique de prendre en compte des paramètres tels que la bande de fréquences, l'efficacité de la transmission d'énergie, la directivité, la résistance aux interférences, et la compatibilité avec les étiquettes RFID existantes sur le marché. La conception d'une telle antenne nécessite une approche méthodique, en commençant par une analyse approfondie des principes fondamentaux de la conception d'antennes à polarisation circulaire et des spécifications requises pour les applications UHF. En fait, différentes topologies d'antennes pourraient être explorées, telles que les antennes patches, les antennes à fente, et les antennes à boucle, afin de trouver la configuration optimale.

En outre, il est important de prendre en compte les contraintes de fabrication, les coûts et la compatibilité avec les processus industriels existants lors de la conception de de genre d'antennes. L'utilisation de techniques de fabrication avancées, telles que l'impression 3D ou la technologie des semi-conducteurs, peut également être envisagée pour faciliter la production à grande échelle des antennes.

En résumé, la conception d'une antenne RFID passive à polarisation circulaire pour les applications UHF représente un défi complexe mais essentiel dans le domaine de la RFID. Une telle antenne permettrait d'améliorer la fiabilité et la performance des systèmes RFID, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles possibilités dans la gestion des stocks, la logistique et d'autres domaines d'applications.

Le mémoire est divisé en trois chapitres après une introduction générale. Le premier chapitre présente l'état de l'art sur la technologie RFID, en rappelant l'historique et les définitions de base, les différents composants d'un système RFID ainsi que son principe de fonctionnement, en étalant sur les bandes de fréquence existantes. Nous abordons également les domaines d'application et les différents types de tags. Le deuxième chapitre est consacré aux paramètres fondamentaux des antennes RFID, y compris les paramètres électriques et celui de rayonnement. Nous décrivons également les puces RFID et leur modélisation électrique, ainsi que les techniques d'adaptation d'impédance et les configurations d'antennes à polarisation circulaire. Dans le dernier chapitre, nous décrivons la méthode utilisée pour concevoir et simuler notre Tag, ainsi que les résultats obtenus. Enfin, nous concluons sur l'importance de la RFID à polarisation circulaire dans divers domaines d'application dans une conclusion générale.

# Chapitre 1

## La technologie RFID

### Sommaire

---

<b>1.1 Introduction</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>1.2 Historique de la RFID</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>1.3 Qu'est-ce que la RFID?</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>1.4 Principe de fonctionnement d'un système RFID</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>1.5 Architecture d'un système RFID</b> . . . . .	<b>6</b>
1.5.1 Tags RFID . . . . .	6
1.5.2 Lecteur RFID . . . . .	6
1.5.3 Le back-end . . . . .	7
<b>1.6 Caractéristiques des tags RFID</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>1.7 Types du tags RFID</b> . . . . .	<b>8</b>
1.7.1 Tag avec puce . . . . .	8
1.7.2 Tag sans puce . . . . .	11
<b>1.8 Les types des lecteurs</b> . . . . .	<b>11</b>
1.8.1 Lecteur fixe . . . . .	11
1.8.2 Lecteur mobile . . . . .	11
<b>1.9 Les fréquences d'utilisation</b> . . . . .	<b>12</b>
<b>1.10 Les normes de RFID</b> . . . . .	<b>12</b>
<b>1.11 Protocole de communication</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>1.12 Domaine d'application de RFID</b> . . . . .	<b>15</b>
1.12.1 Logistique : . . . . .	15
1.12.2 La traçabilité : . . . . .	15
1.12.3 Paiement : . . . . .	15
1.12.4 Implant et systèmes intelligents : . . . . .	16
<b>1.13 Avantages et inconvénients</b> . . . . .	<b>16</b>
1.13.1 Avantages . . . . .	16
1.13.2 Inconvénients [16]. . . . .	17
<b>1.14 Conclusion</b> . . . . .	<b>18</b>

---

## 1.1 Introduction

La RFID (identification par radio-fréquence) est une technologie avancée, flexible et efficace pour les opérations automatisées. Contrairement aux codes-barres, elle utilise des ondes radio pour lire des données stockées dans des dispositifs appelés tags ou étiquettes RFID. Cette technologie permet la surveillance, l'identification et le suivi à distance d'objets, d'animaux et de personnes en utilisant des ondes radio. Dans ce premier chapitre, nous allons aborder la technologie RFID en introduisant son historique et son évolution. Nous allons également décrire les différents constituants d'un système RFID tels que le lecteur, les tags et le système de traitement de données. Nous allons également expliquer les principes de fonctionnement de la technologie RFID ainsi que quelques applications courantes. Nous allons ensuite détailler les différents types de tags et les fréquences de fonctionnement de la technologie RFID, ainsi que présenter l'état de l'art des systèmes RFID UHF passifs et quelques-unes de leurs applications. Enfin, nous allons discuter des avantages et des inconvénients de la technologie RFID.

## 1.2 Historique de la RFID

La radio-identification (ou RFID de « Radio Frequency Identification ») est une technologie d'identification relativement nouvelle qui a été développée dans les années 1980. Bien qu'étant apparue dans les années 1950, elle ne connaît un essor que depuis les années 1990. La RFID que l'on connaît aujourd'hui n'a plus grand chose à voir avec son ancêtre, qui permettait à la RAF (Royal Air Force) de distinguer les avions alliés des avions ennemis. Les principes électromagnétiques sur lesquels elle repose aujourd'hui restent les mêmes, mais les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique ont permis son développement : le prix d'un tag RFID peut atteindre aussi peu que 0,10\$ et sa taille est parfois inférieure à celle d'un grain de riz [4].

## 1.3 Qu'est-ce que la RFID ?

Pendant et à la fin de la seconde guerre mondiale : les premières étiquettes RF sans contact font leur apparition.

- Vers 1980, cette technique est introduite en Europe. Les développements se font sur les bandes BF (autour de 100 à 150 kHz) et HF (autour de 13.56 MHz).
- Vers les années 1980-85 apparaissent les premières applications à 125 et 134,2 kHz destinées à l'identification et au suivi animalier (porcs puis saumons et esturgeons mâles pour la reproduction).
- Vers 1990 démarre réellement la conception de systèmes à 125 kHz prévus pour être produits en masse. Il s'agit des systèmes dits « immobilizer » ou encore « anti démarrage », initialisés par le groupe d'assurance allemand Allianz afin de lutter contre le vol de véhicules automobiles. Développement d'applications industrielles en 125 kHz (contrôles d'accès de bâtiments, jetons de casino, etc.).
- Vers 1995, seconde percée de la RFID due au démarrage des applications destinées aux transports en commun (bus, métro, bateaux, etc.), faiblement développées en Europe mais plus fortement en Extrême Orient. A la même époque, début des procédures de normalisation des cartes à puce sans contact dites « contactless ». Grâce à son avance technologique dans le domaine des cartes à puces à contact, le secteur industriel français

acquière une position dominante via l'AFNOR et l'ISO et les familles de normes ISO 14 443 (« proximity ») et 15 693 (« vicinity ») commencent à voir le jour. En France, les applications se dessinent (contrôle d'accès d'immeubles, parking, la RATP, STIF).

- En 1998 – 1999, devant la probabilité d'une forte expansion des marchés RFID du « Supply Chain Management (gestion logistique) » d'une part et du « Item Management (gestion d'articles) » d'autre part, les industriels d'Amérique du Nord investissent le marché RFID, grâce notamment à des réglementations FCC6 favorables et une très bonne connaissance des technologies UHF et SHF, avec l'avènement du « MIT - Auto ID (Automatic Identification) Center ». Cette période marque le début d'une compétition entre l'Europe et les Etats-Unis pour les applications de gestion de chaîne logistique et d'articles, avec des technologies et des bandes de fréquences différentes : BF/HF en Europe et UHF aux Etats-Unis.

- Le 11 septembre 2001 - Les événements du 11 septembre 2001 aux Etats-Unis ont déclenché une très forte accélération de la mise en place du passeport électronique dans le monde. Devant l'urgence, l'ICAO (International Civil Aviation Organization – Organisation internationale de l'Aviation Civile) qui pilote l'ensemble du projet décide d'adopter la technologie existante (européenne), déjà normalisée en HF à 13,56 MHz (ISO 14 443).

- En 2004 – « GS1 – EPCglobal » (leader mondial des codes barres) exprime sa volonté d'utiliser les UHF pour la gestion de chaînes logistiques. C'est l'avènement du « marché de masse » des étiquettes électroniques. [5].

## 1.4 Principe de fonctionnement d'un système RFID

Une application d'identification automatique RFID, tel qu'illustré sur La figure 1.1, se compose d'une station de base qui transmet un signal selon une fréquence déterminée vers une ou plusieurs étiquettes radio situées dans son champ d'interrogation. Lorsque les étiquettes sont « éveillées », par la station de base, un dialogue s'établit selon un protocole de communication prédéfini, et les données sont échangées [6].

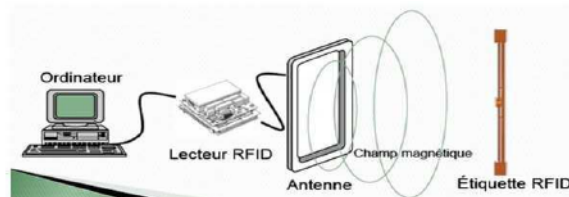


FIGURE 1.1 – Fonctionnement d'un système RFID

Les étiquettes sont aussi appelées «transpondeur » ou tag, et constituées d'une puce électronique associée à une antenne. Il s'agit d'un équipement destiné à recevoir un signal radio interrogateur et à renvoyer immédiatement et par voie radio l'information stockée dans la puce, telles que l'identification unique d'un produit. Suivant la fréquence de fonctionnement le couplage entre l'antenne de la station de base et celle de tag, peut être un couplage inductif (principe d'un transformateur) ou radiatif (fonctionnement en champ lointain). Dans les deux cas de couplage, la puce sera alimentée par une partie de l'énergie rayonnée par la station de base. Pour transmettre les informations qu'elle contient, elle va créer une modulation d'amplitude ou de phase sur la fréquence porteuse. Le lecteur reçoit ces informations et les transforme en binaire (0 ou 1). Dans le sens lecteur vers

étiquette, l'opération est symétrique, le lecteur émet des informations par modulation sur la porteuse. Les modulations sont analysées par la puce et numérisées [6].

## 1.5 Architecture d'un système RFID

Comme le montre la Figure 1.2, un système RFID se compose généralement de trois types de dispositifs : des tags, des lecteurs et un serveur d'arrière-plan central communément appelé back-end. Ces entités interagissent entre elles via des protocoles de communication - où des messages sont échangés - afin d'atteindre un objectif donné (par exemple, l'identification ou la vérification des tags du système) [7].

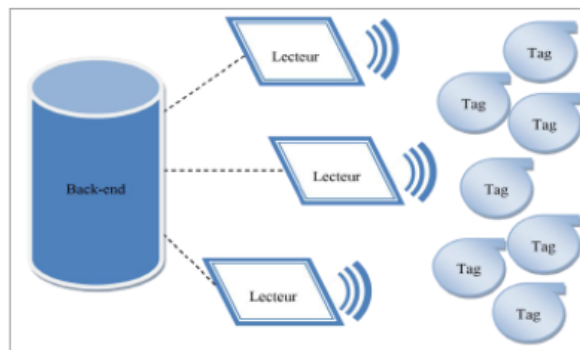


FIGURE 1.2 – une architecture RFID typique

### 1.5.1 Tags RFID

L'étiquette est un transpondeur, c'est-à-dire un circuit intégré relié à une antenne, comme représenté sur la Figure 1.3, incorporée dans un objet distant. Il peut avoir différentes sources d'alimentation, soit les siennes, soit celles fournies par le lecteur RFID. Sa mémoire peut varier de plusieurs centaines de bits (comme dans les tags EPC5) à plusieurs kilo-octets (comme dans les cartes à puce sans contact). Il peut y avoir différents niveaux de capacité informatique. Certaines balises ne peuvent effectuer que des opérations logiques, tandis que d'autres sont capables d'effectuer une cryptographie symétrique, des fonctions de hachage ou même une cryptographie asymétrique. Une balise est généralement dite « piratable », voire « falsifiable », et un attaquant peut facilement mettre la main sur les données stockées dans la mémoire de la balise. Enfin, sa distance de communication varie entre quelques centimètres à quelques décimètres. Les différentes fonctions des étiquettes RFID sont détaillées dans la section suivante [7].

### 1.5.2 Lecteur RFID

Le lecteur est un émetteur-récepteur. Il peut communiquer avec le tag lorsqu'il est dans son champ électromagnétique. Il peut également communiquer avec d'autres lecteurs ou back-end via d'autres canaux (par exemple Ethernet ou Wi-Fi). Le lecteur est plus puissant que le tag. Ses capacités de calcul peuvent être comparées à de petits ordinateurs. Il peut être fixe (par exemple à l'entrée d'un bâtiment) ou mobile (par exemple un smart-phone) et est généralement considéré comme inviolable [7].

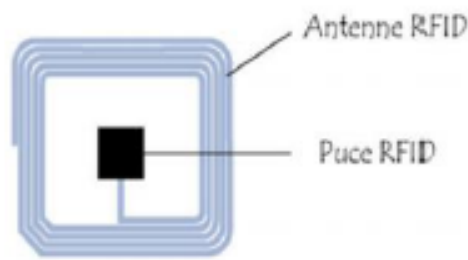


FIGURE 1.3 – un exemple d'un tag

### 1.5.3 Le back-end

Le back-end contient généralement une base de données qui stocke des informations sur chaque tag et joueur dans le système (par exemple, les ID de tag). Cependant, le back-end peut également être une sorte de commutateur qui ne fait que transmettre la communication entre les lecteurs. Dans tous les cas, le back-end ne communique qu'avec les lecteurs. Remarque : un back-end n'est pas toujours nécessaire dans un système RFID. Par exemple, si le système se compose d'un seul lecteur autonome, cet appareil peut également servir de back-end. Dans d'autres systèmes, le back-end et les lecteurs sont tous connectés via un canal sécurisé et peuvent donc être considérés comme une seule entité, simplement appelée "lecteur" [7].

## 1.6 Caractéristiques des tags RFID

Il est difficile d'établir une classification complète de la technologie RFID en raison du grand nombre de caractéristiques à prendre en compte lors de la définition d'une étiquette. Ce n'est qu'au moment de la conception d'une application RFID qu'il devient possible de déterminer les besoins technologiques spécifiques et d'identifier le type d'étiquette le plus adapté. Les principales caractéristiques des étiquettes RFID sont présentées dans la figure 1.4 et décrites ci-dessous [7].

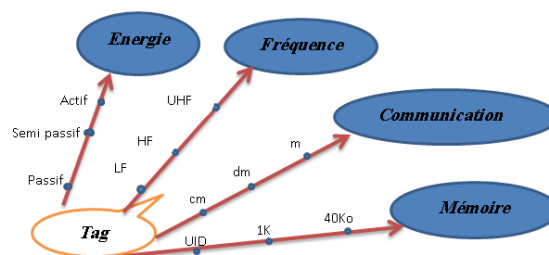


FIGURE 1.4 – principales caractéristiques d'un tag RFID

## 1.7 Types du tags RFID

### 1.7.1 Tag avec puce

La plupart des étiquettes n'exigent aucune source d'énergie si ce n'est quand elles sont interrogées par le capteur. Celui-ci les alimente alors par son signal radio. D'autres étiquettes, dites actives, sont équipées d'une mini batterie qui permet de communiquer à plus grande distance ou d'enregistrer des informations. La technologie RFID inclut l'usage de tags (étiquettes), ces tags peuvent être actifs ou passifs afin de transmettre les données souhaitées en termes de traçabilité des objets/personnes [8].

Les étiquettes RFID peuvent être classées en trois grandes catégories : les étiquettes passives, les étiquettes semi-passives (ou semi-actives) et les étiquettes actives [9].

#### 1.7.1.1 Tags passifs

Ne disposant d'aucune alimentation externe, ils dépendent de l'effet électromagnétique de réception d'un signal émis par le lecteur. C'est ce courant qui leur permet d'alimenter leurs microcircuits. Ils sont peu coûteux à produire et sont généralement réservés à des productions en volume. Ce sont eux que l'on trouve plus particulièrement dans la logistique et le transport. Ils utilisent différentes bandes de fréquences radio selon leur capacité à transmettre à distance plus ou moins importante et au travers de substances différentes (air, eau, métal). La distance de lecture est inférieure à un mètre. Les basses et hautes fréquences sont normalisées au niveau mondial. Ces puces sont collées sur les produits pour un suivi allant jusqu'aux inventaires. Elles sont jetables ou réutilisables suivant les cas. Les puces avec une antenne de type "papillon" ont une portée courante de 1 à 6 mètres. Ces puces UHF (Ultra Haute Fréquence) sont utilisées pour la traçabilité des palettes dans les entrepôts. Par contre, la tolérance aux obstacles est moyenne. Pour les très hautes fréquences (UHF), l'Europe, l'Asie et les États-Unis se distinguent par des fréquences et des réglementations différentes, figure 1.5 [10].

Les tags passifs ne disposent pas de batterie; toute l'énergie nécessaire à leur fonctionnement leur est fournie par le lecteur. En conséquence, les étiquettes passives transmettent des données seulement quand « s'est réveillé » par un lecteur [11]. Les tags passifs utilisent différentes bandes de fréquences radio selon :

- leur capacité à transmettre les données à des distances plus ou moins grandes.
- les substances différentes que les données doivent traverser (air, eau, métal Etc).

Les applications où la technologie de RFID passive offre un avantage certain sont nombreuses et diverses, prenons l'exemple de l'identification d'animaux, veiller à la sécurité des nouveaux nés ainsi que la traçabilité des déchets et la gestion des stocks. L'étiquette passive repose davantage sur le coût des tags moins onéreux que les tags actifs. Ce système s'avère très utile pour les marchandises en volume important lorsque les marchandises peuvent être lues à courte distance (passage à la caisse des supermarchés). Aussi, la distance de lecture est cependant un réel frein à ce système puisque le lecteur doit se situer dans le champ du tag afin d'en récupérer les données [11].

#### 1.7.1.2 Tags Semi-actifs

Les tags sont assistés par une source d'alimentation interne embarquée, de type pile ou batterie. Le but de cette source d'énergie est de fournir une tension d'alimentation



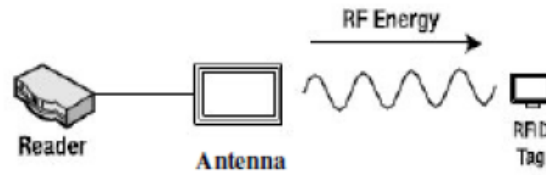


FIGURE 1.5 – Alimentation de tag passif. [12]

suffisante à la puce. La transmission de données vers le lecteur est réalisée par rétro-modulation ou modulation de charge comme pour les tags passifs. La présence de la source embarquée permet alors d'augmenter la portée de lecture jusqu'à une distance de 30 m, et offre aussi l'avantage de permettre l'intégration de capteurs à la puce RFID et ainsi collecter des données environnementales. La mémoire de stockage est aussi plus importante que celle des tags passifs [13].

### 1.7.1.3 Tags actives

Les étiquettes actives sont les plus chères car elles sont plus complexes à produire et assurent, outre des fonctions de transmission, des fonctions soit de captage soit de traitement de l'information captée, soit les deux. De ce fait, elles ont besoin d'une alimentation embarquée et sont donc caractérisées par la durée de vie de celle-ci. Si le prix est un facteur discriminatif, il faut savoir que ces étiquettes s'avèrent particulièrement bien adaptées à certaines fonctions, dont notamment la création de systèmes d'authentification, de sécurisation, d'antivol, etc. Bref, elles sont idéales pour tout ce qui concerne le déclenchement d'une alerte ou d'une alarme. Elles peuvent émettre à plusieurs centaines de mètres. Le dernier cri est le tag «insensible à l'orientation du produit», figure 1.6 [10].

La radio identification active est une forme de technologie d'identification caractérisée par l'usage de tags actifs également appelés étiquettes actives. Les tags sont de petits objets qui peuvent être collés sur des objets ou insérés dans ces mêmes objets, ils sont composés :

- d'une puce électronique.
- d'une antenne.

Ainsi, on parle de radio-identification active lorsque les étiquettes ou les tags sont actifs c'est-à-dire qu'ils sont alimentés par une source d'énergie embarquée : batterie, pile... Cette source d'énergie permet à la puce de diffuser un signal vers le lecteur RFID, figure 1.7 [11].

La RFID active offre une grande variété de domaines d'application, similaires à ceux de la RFID passive. Voici quelques exemples :

- Contrôle d'accès pour les véhicules et les piétons.
- Protection des personnes dans les environnements industriels.
- Suivi des conteneurs.

Contrairement aux étiquettes passives, les étiquettes actives sont dotées de leur propre source d'énergie, ce qui leur permet d'émettre un signal de manière autonome. Le principal avantage de cette technologie réside dans sa capacité à communiquer des données sur de longues distances, sans nécessiter la proximité d'un lecteur RFID.

Cependant, l'utilisation croissante des signaux radio entraîne des difficultés de localisation des puces par les lecteurs, ce phénomène étant connu sous le nom d'interférence. Outre ce désavantage, cette technologie soulève également des préoccupations liées au

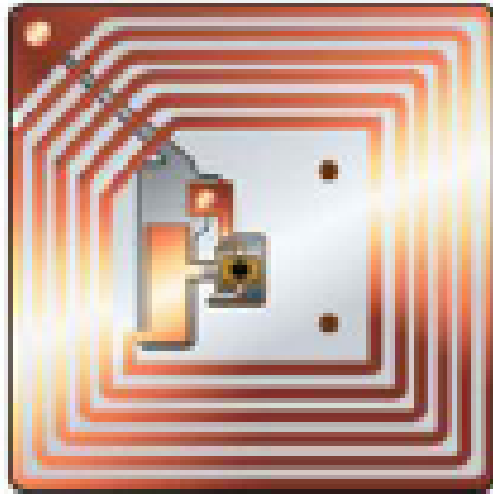


FIGURE 1.6 – Tag RFID actif [4].

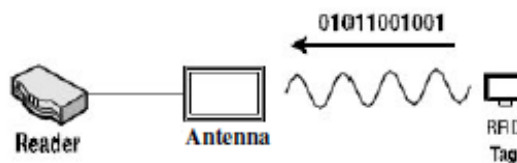


FIGURE 1.7 – Transmission des données vers le lecteur [12].

coût des étiquettes, à la confidentialité des informations transmises, ainsi qu'à l'impact controversé sur la santé dû à l'émission d'ondes magnétiques et à la durée de fonctionnement limitée des étiquettes.

Le tableau 1.1 suivant dresse un comparatif entre les systèmes actifs, semi-actifs et passifs. On voit tout l'intérêt que présentent les systèmes passifs en termes de coût et de durée de vie [4].

TABLEAU 1.1 – Comparaison de différents types de systèmes [4].

Type	Distance	Données	Durée de vie	coût
Actif	Importante	Importantes	Faible	Important
Semi passif	Moyenne	Moyennes	Moyenne	Moyenne
Passif	Faible	Faible	Importante	Faible

Chaque technologie de radio-identification a ses propres avantages qui leur assurent une place sur le marché. Cependant, en raison de la demande croissante dans le domaine de la traçabilité, il existe un réel engouement pour le développement de tags RFID à faible coût et performants en termes de débit, de distance de lecture et de vitesse de lecture. La technologie RFID passive est celle qui répond le mieux à ce besoin.

### 1.7.2 Tag sans puce

Ce sont des étiquettes qui ne contiennent pas des puces RFID ni aucun autre circuit électronique, elles exploitent des propriétés physiques et chimiques de certaines structures et matériaux pour encoder les données. Ce type d'étiquette sans puce permet d'avoir des coûts de fabrication très bas, cela est dû au fait que le coût de puce et d'assemblage antenne/puce, représentent une proportion considérable sur le coût total d'un tag. Actuellement, il n'existe sur le marché que les étiquettes sans puce de type SAW (Surface Acoustiques Wave). Un exemple d'un tag sans puce est montré par la figure 1.8 [8].

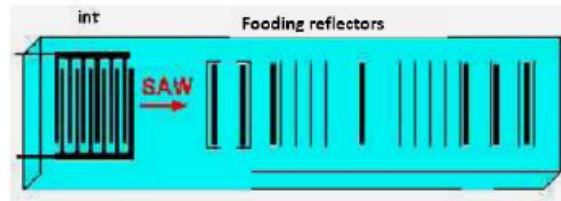


FIGURE 1.8 – Exemple tag sans puce

## 1.8 Les types des lecteurs

### 1.8.1 Lecteur fixe

La figure 1.9 présente un exemple de lecteur RFID fixe qui est généralement installé de manière permanente, sous forme de bornes ou de portiques.



FIGURE 1.9 – Exemple d'un lecture RFID fixe

### 1.8.2 Lecteur mobile

Le lecteur RFID mobile prend la forme d'un dispositif de balayage, similaire à un flash. Dans ce cas, c'est le lecteur qui se déplace, donc il n'est plus nécessaire de déplacer le tag. Un exemple de lecteur RFID mobile est présenté dans la figure 1.10.



FIGURE 1.10 – Exemple d'un lecture RFID mobile

## 1.9 Les fréquences d'utilisation

Les systèmes RFID doivent notamment veiller à ne pas perturber le fonctionnement des autres systèmes radio : (télévision, services de secours, services radio maritimes et aériens, téléphones mobiles, etc.). On ne peut, en principe, utiliser que les plages de fréquences spécifiquement réservées à ce système. La table 1.2 présente une vue d'ensemble du spectre des fréquences utilisées par les systèmes RFID ainsi que les fréquences les plus courants pour chaque bande. Il est nécessaire de noter que le tableau n'est pas exhaustif, car il est possible de trouver des systèmes, au sein de chaque groupe de fréquence, fonctionnant à d'autres fréquences.

TABLEAU 1.2 – Les bandes des fréquences utilisées pour les systèmes RFID [14].

Bande de fréquence	Gamme de fréquences	Les fréquences utilisés dans les systèmes RFID
Bas fréquence (LF)	100 kHz – 500 kHz	125 kHz, 134.2 kHz
Haute fréquence (HF)	10 MHz – 15 MHz	13.56 MHz
Ultra haute fréquence (UHF)	400 MHz – 950 MHz	866 MHz, Europe 915 MHz United States
Micro-ondes (uw)	2.4 GHz – 6.8 GHz	2.45 GHz, 3.0 GHz

## 1.10 Les normes de RFID

Le développement des normes en cours (notamment au niveau du test) sous l'impulsion des industriels et des utilisateurs, est nécessaire pour la maîtrise de cette technologie et le développement de son marché. Ce développement vise à certifier le fonctionnement, l'interopérabilité et l'interchangeabilité des systèmes RFID et de ses composants. Le tableau 1.3. présente les principales normes développées par l'ISO qui réglementent les paramètres de communication, comme la fréquence de fonctionnement, la bande passante, la puissance d'émission maximale, le type de modulation, le codage, le débit, le protocole de communication et bien d'autres paramètres.

En ce qui concerne les systèmes RFID UHF passifs, l'ISO a défini plusieurs normes pour la RFID UHF passive : la norme 18000-6 concernant le protocole de communication, la norme 18047 concernant les tests de conformité, et la norme 18046 concernant les tests de performance.

D'autre part le groupement EPCglobal a produit un standard pour encourager le large déploiement de la RFID. Ce standard, dénommé EPC Class-1 Generation-2 définit l'interface entre le lecteur et les tags. EPCglobal, créé par l'organisme GS1 réunissant l'EAN (European Article Numbering) et l'UCC (Uniform Code Council), développe des standards uniquement pour les applications de traçabilité. Il vise à terme la création d'un internet des objets. Ces normes gèrent, en plus des spécifications techniques, l'allocation des numéros d'identification spécifiques à chaque tag [1.7]. En effet, c'est ce dernier point qui fait la force de l'initiative de l'EPCglobal car elle est portée par les organismes qui gèrent déjà les normes d'utilisation du code-barres. En plus de ces organismes et de grands acteurs industriels, plusieurs laboratoires de recherche se sont associés afin d'appuyer l'EPCglobal. Notons qu'il y a eu une convergence entre les normes EPCglobal et ISO pour l'identification d'objet à l'aide de systèmes fonctionnant en UHF [4].

TABEAU 1.3 – Les différentes normes ISO 18000

Références	Fréquences	concernées	Intitulé Statut
18000-1	Vocabulaire et définitions	RFID pour la gestion d'objet – Partie 1 :Architecture de référence et définition des paramètres à normaliser	Publié le :13/09/2004
18000-2	< 135 (kHz)	RFID pour la gestion d'objet – Partie 2 :Paramètres de communications d'une interface d'air à moins de 135 (kHz)	Publié le :13/09/2004
18000-3	13,56 (MHz)	RFID pour la gestion d'objet – Partie 3 :Paramètres de communications d'une interface d'air à 13,56 (MHz)	Publié le :13/09/2004
18000-4	2,45 (GHz)	RFID pour la gestion d'objet - Partie 4 :Paramètres de communications d'une interface d'air à 2,45 (GHz)	Publié le :31/10/2004
18000-5	5,8 (GHz)	RFID pour la gestion d'objet – Partie 5 :Paramètres de communications d'une interface d'air à 5,8 (GHz)	Pas de consensus
18000-6	900 (MHz)	RFID pour la gestion d'objet – Partie 6 :Paramètres de communications d'une interface d'air entre 860 (MHz) et 960 (MHz)	Publié le :31/10/2004
18000-7	433 (MHz)	RFID pour la gestion d'objet – Partie 7 :Paramètres de communications d'une interface d'air à 433 (MHz)	Publié le :12/12/2005

## 1.11 Protocole de communication

La communication consiste en un transfert de données associé à un transfert d'énergie. La communication des données est bidirectionnelle : la communication du lecteur vers le tag est appelée liaison montante (uplink) et la réponse du tag vers le lecteur est appelée liaison descendante (downlink). Figure 1.11 illustre le principe d'une communication RFID.

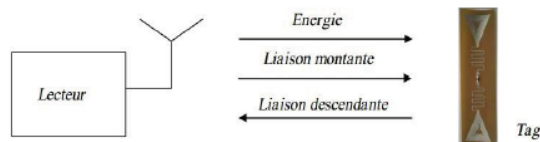


FIGURE 1.11 – Représentation schématique d'une communication RFID.

On distingue deux principaux protocoles de communication entre un tag et un lecteur RFID : le protocole TTO (Tag Talk Only, signifiant que seul le tag transmet des données) et le protocole RTF (Reader Talk First, signifiant que le lecteur est maître dans la communication). Le choix d'un protocole plutôt qu'un autre dépend de l'application visée.

Dans le protocole TTO, il n'existe pas de liaison montante. Un tag utilisant cette procédure transmet ses données de façon régulière lorsqu'il est alimenté. C'est la procédure qui est mise en œuvre dans le standard IP-X développé par la société Ipico. Lorsqu'un tag IP-X entre dans le champ d'un lecteur IP-X, il transmet de façon continue et à des intervalles de temps aléatoires son identifiant. Cette procédure est particulièrement rapide. Elle permet de lire un grand nombre de tags RFID et à des vitesses de près de 250 Km/h. Le protocole RTF est quant à lui celui qui est mis en œuvre dans le standard EPCglobal Class 1 Génération 2 (ou C1 Gen2). Lorsqu'un tag RTF entre dans le champ d'un lecteur, il attend une requête avant de transmettre son identifiant. On distingue également deux types de procédures de communication entre le lecteur et le tag : celles qui utilisent un transfert continu d'énergie et celles qui le font de manière séquentielle. Parmi, les procédures à transfert continu d'énergie, certains systèmes y associent un transfert de données bidirectionnel simultané (FDX, pour Full Duplex) et d'autres un transfert alterné (HDX, pour Half Duplex). Ces différentes procédures sont représentées sur la Figure 1.12 [4].

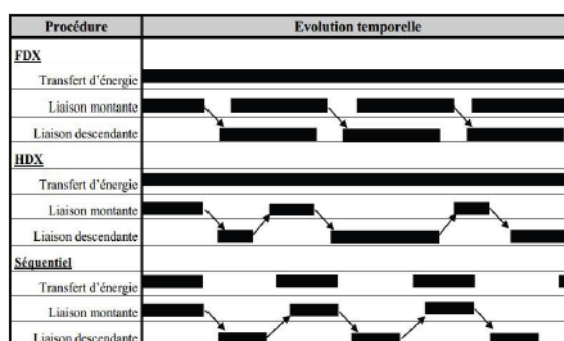


FIGURE 1.12 – Principales procédures de communication RFID

Le protocole EPCglobal (C1 Gen2) met en œuvre une procédure HDX (transfert continu d'énergie et transfert alterné de données). Dans le cas d'une procédure HDX, le protocole de communication entre un lecteur et un tag est composé de trois phases :

- Une phase de réveil du tag : le lecteur envoie une onde électromagnétique vers le tag pour lui permettre de s'alimenter en énergie nécessaire à son fonctionnement et de se mettre dans un état d'attente des instructions à venir du lecteur.
- Une phase d'instruction : le lecteur envoie une instruction au tag. Cette transmission se réalise sur porteuse. Elle se traduit par une variation en phase ou en amplitude de l'onde électromagnétique envoyée. Parallèlement à l'envoi de ces instructions, le lecteur doit assurer l'alimentation du tag. Un compromis doit être trouvé lors de la mise en forme du signal envoyé par le lecteur afin d'assurer de façon optimale ces deux fonctions. Cette mise en forme nécessite donc un choix judicieux du codage de l'information, de la technique de modulation et des temps de transmissions.
- Une phase de lecture : le tag envoie sa réponse au lecteur. Après réception des instructions du lecteur, le tag se met en mode rétro-modulation. Là encore, un compromis doit être trouvé entre ce transfert de données descendant et la puissance que le tag doit continuer à absorber afin d'assurer son alimentation. La rétro-modulation est un point critique de la conception des tags RFID. Le protocole de communication est contrôlé au niveau du lecteur et du tag par une partie numérique qui reçoit et transmet les données par une interface radiofréquence. Suite à ce bref exposé des protocoles de communication, nous présentons l'architecture des lecteurs et des tags RFID UHF passifs [4].

## 1.12 Domaine d'application de RFID

Le marché de la technologie RFID est en pleine expansion : 126 puces RFID sont vendues chaque seconde, soit 3,98 milliards d'étiquettes RFID par année. Un marché de 7,5 milliards de dollars qui sera multiplié par 4 d'ici 2022 . Ce chiffre de vente est dû essentiellement à l'intégration de la technologie RFID à la technologie habilitante « enabling technology ». Cette dernière offre aux entreprises l'opportunité de déployer cette technologie selon leur besoin tel que; achat, vente, commercialisation, marketing et communication etc (figure 1.13) [15]. La technologie RFID peut être déployée dans plusieurs domaines à savoir :

### 1.12.1 Logistique :

C'est l'un des secteurs d'activités principales de la technologie RFID. Les codes à barres ont été remplacés par les tags. C'est en repérant plusieurs tags en temps réels que la RFID était employée dans les grands conteneurs. On peut la trouver aussi dans différentes applications comme les médicaments et les marchandises [15].

### 1.12.2 La traçabilité :

C'est une dérivation de la précédente application. Les informations sur l'historique de déplacement et le temps de stockage peuvent être transmises grâce aux tags installés sur les différents produits. Cette technique est utilisée dans les hôpitaux pour suivre le processus de soin ainsi que le déplacement des patients [15].

### 1.12.3 Paiement :

Les cartes de crédit et de débit qui permettent d'effectuer des paiements sans contact avec le terminal de paiement, utilisent la RFID [15].





FIGURE 1.13 – Les applications des RFID

### 1.12.4 Implant et systèmes intelligents :

La RFID peut être implémentée sous forme de puce ou petite antenne intégrée directement dans un corps humain ou animal pour assurer une identification en temps réels. En outre, une antenne RFID accompagnée d'un système d'acquisition de données forme un capteur intelligent capable de récupérer des informations sur l'environnement qui l'entoure ou bien un sujet spécifique sur lequel il est implanté [15].

## 1.13 Avantages et inconvénients

### 1.13.1 Avantages

La capacité de mise à jour du contenu par les intervenants à la différence du code à barres pour lequel les données sont figées une fois imprimée ou marquée, le contenu des données stockées dans une étiquette radio fréquence va pouvoir être modifié, augmenté ou diminué par les intervenants autorisés (étiquettes en lecture et écriture multiple) [16].

#### 1.13.1.1 Une plus grande capacité de contenu

Dans une étiquette radiofréquence une capacité de 1 000 caractères est aisément stockable sur 1mm<sup>2</sup>, et peut atteindre sans difficulté particulière 10 000 caractères. Dans une étiquette logistique apposée sur une palette, les différentes unités contenues et leurs quantités respectives pourront être enregistrées et lues.

#### 1.13.1.2 La vitesse de marquage

Le code à barres dans un contexte logistique nécessite le plus souvent l'impression d'un support papier. La manipulation et la pose des étiquettes restent des opérations manuelles ou mécaniques. Les étiquettes radio fréquence peuvent être incluses dans le support de manutention ou dans les conditionnements dès l'origine. Les données concernant les objets contenues ou transportées sont écrites en une fraction de seconde au moment de la constitution de l'unité logistique ou de transport, sans manipulation supplémentaire.

#### 1.13.1.3 Une sécurité d'accès au contenu

Comme tout support numérique, l'étiquette radio fréquence peut être protégée par mot de passe en écriture ou en lecture. Les données peuvent être chiffrées. Dans une



même étiquette, une partie de l'information peut être en accès libre, et l'autre protégée. Cette faculté fait de l'étiquette RF, un outil adaptée à la lutte contre le vol et la contrefaçon.

#### **1.13.1.4 Une plus grande durée de vie**

Dans les applications où un même objet peut être utilisé plusieurs fois, comme l'identification des supports de manutention, ou la consignation du contenant, une étiquette radio fréquence peut être réutilisée 1 000 000 de fois.

#### **1.13.1.5 Une plus grande souplesse de positionnement**

Avec l'étiquette radio fréquence, il est possible de s'abstraire des contraintes liées à la lecture optique, elle n'a pas besoin d'être vue. Il lui suffit d'entrer dans le champ du lecteur pour que sa présence soit détectée.

#### **1.13.1.6 Une moindre sensibilité aux conditions environnementales**

Les étiquettes RFID n'ont pas besoin d'être positionnées à l'extérieur de l'objet à identifier. Elles peuvent donc être mieux protégées des agressions liées aux stockages, aux manutentions ou au transport. De plus leur principe de fonctionnement ne les rend pas sensibles aux souillures, ou taches diverses qui nuisent à l'utilisation du code à barres.

### **1.13.2 Inconvénients [16].**

#### **1.13.2.1 Le coût**

Les prix restent nettement supérieurs à ceux des étiquettes code à barres pour des unités consommateurs. Utiliser les étiquettes radio fréquence en lieu et place du code à barres sur les produits de grande consommation, n'est donc pas aujourd'hui économiquement réaliste. Cela le devient pour lutter contre le vol ou la contrefaçon sur les produits à forte valeur ajoutée, ou pour tracer les produits dans le cadre du service après-vente, comme l'électroménager ou la hi-fi. Par contre au-delà du conditionnement unitaire, le coût de l'étiquette radio fréquence peut devenir marginal par rapport à la valeur des produits contenus. C'est pourquoi dans le domaine des produits de grande consommation, les premières applications de ces étiquettes peuvent voir le jour sur les cartons, sur les palettes et sur les unités de transport. Par ailleurs, si la comparaison se fait au niveau du système d'identification et de traçage, il faut prendre en compte les coûts lecteurs, favorables à la RFID, ainsi que le gain de temps venant de la non obligation de manipuler les objets pour présenter le code à barres devant le lecteur.

#### **1.13.2.2 La perturbation par l'environnement physique**

La lecture des étiquettes radio fréquences est perturbée par la présence, par exemple, de métaux dans leur environnement immédiat. Des solutions doivent être étudiées au cas par cas pour minimiser ces perturbations, comme cela a été fait par exemple pour l'identification des bouteilles de gaz.

### **1.13.2.3 Les perturbations induites par les étiquettes entre elles**

Dans de nombreuses applications, plusieurs étiquettes radio fréquences peuvent se présenter en même temps dans le champ du lecteur volontairement ou involontairement. Ceci peut être voulu en magasin, au moment du passage à la caisse ou entre les portiques antivols.

### **1.13.2.4 La sensibilité aux ondes électromagnétiques parasites**

Les systèmes de lecture RFID sont dans certaines circonstances sensibles aux ondes électromagnétiques parasites émises par des équipements informatiques (des écrans d'ordinateurs) ou des systèmes d'éclairages plus généralement par les équipements électriques. Leur emploi doit donc être testé en tenant compte de l'environnement.

### **1.13.2.5 Les interrogations sur l'impact de la radio fréquence sur la santé**

Cette question fait débat depuis quelques années, en particulier concernant les portiques antivols et les téléphones portables. Les étiquettes passives ne présentent aucun risque quel que soit leur nombre puisqu'elles ne sont actives que lorsqu'elles se trouvent dans le champ d'un lecteur. Les études portent donc essentiellement sur les lecteurs et visent à définir les critères de régulation de leur puissance d'émission afin d'éviter qu'ils ne créent des perturbations sur les équipements de santé tels que les pacemakers, mais aussi sur l'organisme humain.

## **1.14 Conclusion**

Ce chapitre offre une vue d'ensemble de la technologie RFID. Elle permet la collecte automatique de données sans intervention humaine, grâce à des micro-contrôleurs en cours d'exécution. Les avancées récentes dans la fabrication de semi-conducteurs ont permis de réduire considérablement le coût de la RFID, la rendant rentable pour des applications à grande échelle dans des domaines tels que le médical et le commercial. Les applications de la RFID sont extrêmement nombreuses et se développent constamment avec de nouvelles idées. Le chapitre suivant portera sur l'état de l'art des antennes RFID.

# Chapitre 2

## Paramètres fondamentaux d'une antenne tag RFID

### Sommaire

---

<b>2.1 Introduction</b> . . . . .	<b>20</b>
<b>2.2 Paramètres fondamentaux des antennes Tag RFID</b> . . . . .	<b>20</b>
<b>2.3 Les paramètres électriques</b> . . . . .	<b>20</b>
2.3.1 Coefficient de réflexion . . . . .	20
2.3.2 Rapport d'ondes stationnaires ROS . . . . .	21
2.3.3 Impédance d'entrée de l'antenne . . . . .	21
2.3.4 Coefficient de transmission . . . . .	21
2.3.5 Largeur de bande d'une antenne . . . . .	22
<b>2.4 Paramètres de rayonnement</b> . . . . .	<b>23</b>
2.4.1 Diagramme de rayonnement . . . . .	23
2.4.2 Directivité . . . . .	23
2.4.3 Angle d'ouverture . . . . .	24
2.4.4 Gain de l'antenne . . . . .	24
2.4.5 Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) . . . . .	25
<b>2.5 Polarisation de champ électromagnétique</b> . . . . .	<b>25</b>
<b>2.6 Antenne patch à polarisation circulaire</b> . . . . .	<b>26</b>
<b>2.7 La puce dans les systèmes RFID</b> . . . . .	<b>26</b>
<b>2.8 L'adaptation d'impédance d'antennes de tags RFID UHF passifs</b> . . . . .	<b>27</b>
2.8.1 L'impédance des puces RFID UHF passives . . . . .	27
2.8.2 Transmission en puissance . . . . .	28
<b>2.9 Techniques d'adaptation d'un tag RFID</b> . . . . .	<b>29</b>
2.9.1 L'adaptation par éléments série . . . . .	30
2.9.2 Adaptation par éléments parallèles . . . . .	30
2.9.3 Adaptation par couplage . . . . .	30
<b>2.10 Conclusion</b> . . . . .	<b>31</b>

---

## 2.1 Introduction

Les antennes sont exploitées dans plusieurs domaines grâce à sa facilité d'adaptation aux diverses situations, notamment dans la RFID. Les antennes en général sont principalement caractérisées par leur longueur d'onde, ainsi que d'autres paramètres qui constituent la base de leur fonctionnement. Ce deuxième chapitre nous le consacrerons aux paramètres fondamentaux et aux bases de réalisation des antennes Tag RFID où nous les avons énumérés. Dans un premier temps nous rappellerons les paramètres fondamentaux des antennes, qui se divisent en trois parties, les paramètres circuits, les paramètres de rayonnement et les paramètres de réception. Dans un second temps nous nous intéresserons à la puce dans les systèmes RFID. Vient par la suite l'adaptation d'impédances des antennes dipôles, les différents types de polarisation et les pertes de transmission, ainsi que les diverses antennes à polarisation circulaire. Le chapitre sera clôturé par une conclusion.

## 2.2 Paramètres fondamentaux des antennes Tag RFID

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vis versa en réception afin d'assurer la transmission de l'information. On peut les qualifier comme des adaptateurs d'impédances entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur.

## 2.3 Les paramètres électriques

### 2.3.1 Coefficient de réflexion

Une antenne s'adapte à une ligne de transmission à impédance caractéristique  $Z_0$  réelle ( généralement  $50$  ou  $75\Omega$  ). Le coefficient de réflexion d'une antenne  $\Gamma$  est défini par l'équation (2.1) suivante [17] :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_c}{Z_a + Z_c} \quad (2.1)$$

Lors de la réflexion des ondes, celles incidentes et réfléchies peuvent être en phase tension est maximale ( $V_{max}$ ) peut exprimer par,

$$V_{max} = V_d + V_r \quad (2.2)$$

Si les deux sont en opposition de phase, l'amplitude résultante est une tension minimale ( $V_{min}$ ) peut exprimer par,

$$V_{min} = V_d - V_r \quad (2.3)$$

Le ROS et le coefficient de réflexion peuvent être définis par les relations (2.4) et (2.5) suivantes :

$$\rho = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (2.4)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_d} \quad (2.5)$$

Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  est toujours inférieur ou égal à 1. On le définit en décibel (dB) par l'équation(2.6) suivante [17] :

$$|S_{11}|(dB) = 20 \log |\Gamma| \quad (2.6)$$

Dans le cas où il n'y a pas de ligne de transmission entre l'antenne et une charge qui peut ne pas présenter une impédance réelle. Il faut dans ce cas maximiser la puissance transmise à la charge. Le rapport (2.7) entre la puissance réfléchiée par une charge et la puissance maximale totale pouvant lui être transmise est définie par le coefficient de réflexion en puissance  $\Gamma^*$  :

$$\Gamma^* = \frac{Z_c - Z_a^*}{Z_c + Z_a^*} \quad (2.7)$$

Dans le cas où la charge est complexe conjuguée à l'impédance de l'antenne ( $Z_p = Z_a^*$ ), le maximum de la puissance lui est transmise ( $\Gamma^* = 0$ ) [4].

### 2.3.2 Rapport d'ondes stationnaires ROS

Pour une antenne, si l'adaptation n'est pas réalisée entre l'impédance de la ligne de transmission et l'impédance de l'antenne, les ondes subissent des réflexions vers la source causant ainsi le phénomène d'interférences avec les ondes incidentes et donnant naissance à des ondes stationnaires caractérisées par le Rapport d'ondes Stationnaires (ROS) défini selon [17] par :

$$\rho = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (2.8)$$

Le ROS est toujours supérieur ou égal à 1, la valeur maximale du ROS généralement admise pour la sécurité du matériel est de 2 ce qui donne un paramètre  $S_{11}$  inférieur ou égale à -10 dB [4].

### 2.3.3 Impédance d'entrée de l'antenne

Une antenne est caractérisée, d'un point de vue électrique par son impédance. L'expression de l'impédance se présente sous forme complexe  $Z_a$ , où la partie réelle est une résistance liée au rayonnement  $R_r$  et la partie imaginaire, une réactance (2.9) liée aux pertes  $R_i$  [17].

$$Z_a = R_a + iX_a \quad (2.9)$$

Où  $R_a$  et  $X_a$  sont respectivement l'impédance, la résistance et la réactance de l'antenne, à ses bornes d'entrée. L'énergie dissipée par  $R_r$  correspond à l'énergie rayonnée par l'antenne, et l'énergie dissipée par  $R_i$  correspond quant à elle aux pertes de conduction, aux pertes diélectriques et aux pertes d'onde de surface de l'antenne [4].

$$R_a = R_r + R_i \quad (2.10)$$

### 2.3.4 Coefficient de transmission

Le coefficient de transmission en puissance  $\tau$ , est le rapport de la puissance transférée à une charge sur la puissance totale maximum pouvant lui être transférée. Il est défini par la relation (2.11) suivante :

$$\tau = 1 - |\Gamma^*|^2 \quad (2.11)$$

Où  $|\tau^*|^2$  correspond aux pertes d'insertions. Le coefficient de transmission peut également être exprimé en fonction des impédances d'une antenne et de sa charge  $Z_a$  et  $Z_c$ . Cette relation (2.12) est d'une grande importance en RFID, parce qu'elle correspond au rapport entre la puissance transférée à une puce RFID et la puissance totale maximum pouvant lui être transmise.

$$\tau = \frac{4R_a R_c}{|Z_a + Z_c|^2} \quad (2.12)$$

### 2.3.5 Largeur de bande d'une antenne

La largeur de bande ou la bande passante d'une antenne peut être définie comme étant une plage de fréquences pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil donné. La bande passante peut aussi être définie comme une bande de fréquences où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou réciproquement, de l'antenne vers le récepteur) est supérieur à un seuil donné. On parle alors de l'adaptation entre la source d'excitation et l'antenne. La bande passante d'une antenne est estimée à partir de sa courbe du coefficient de réflexion (ou parfois de sa courbe du VSWR) comme le montre la figure 2.1. Elle correspond selon certains critères typiques à un coefficient de réflexion inférieur à -6 dB, inférieur à -10 dB ou inférieur à -15 dB. Cependant, le seuil -10 dB est souvent le plus considéré dans la pratique, qui signifie que 90% d'énergie de la source est transférée vers l'antenne et seulement 10% de cette énergie est réfléchi. Elle est souvent considérée comme une gamme de fréquences positionnée de part et d'autre de la fréquence centrale  $f_c$ . La largeur de bande est donnée par [17] :

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (2.13)$$

Où  $f_1$  et  $f_2$  sont les fréquences limites inférieure et supérieure respectivement au seuil donné. L'expression de la bande passante fractionnelle (BPF) relative à la fréquence centrale s'exprime par :

$$\text{BPF}\% = \frac{\Delta f}{f_c} \times 100\% \quad (2.14)$$

Comme la fréquence centrale  $f_c = \frac{f_1 + f_2}{2}$  l'expression de la bande passante fractionnelle devient [17] :

$$\text{BPF}\% = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \times 100\% \quad (2.15)$$

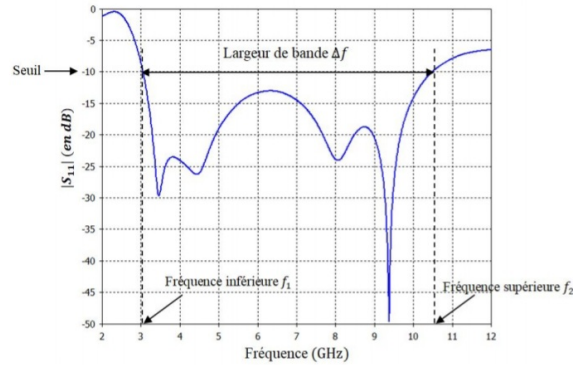


FIGURE 2.1 – Estimation de la bande passante d'une antenne.

## 2.4 Paramètres de rayonnement

Les caractéristiques d'une antenne sont déterminées par rapport à une source de référence, une source ponctuelle qui rayonne sa puissance d'alimentation d'une façon identique dans toutes les directions constituant la source de référence idéale. La puissance rayonnée par unité d'angle solide dans une direction définie par les deux angles  $(\theta, \phi)$  s'écrit :

$$P_0(\theta, \phi) = \frac{P_a}{4\pi} \quad (2.16)$$

Où  $P_a$  est la puissance d'alimentation [18].

### 2.4.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En dehors du cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, les antennes ne rayonnent pas leurs puissances de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace. Il y a généralement une direction de rayonnement maximale autour de laquelle se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée et des directions secondaires autour desquelles se répartit la fraction de la puissance restante. La fonction caractéristique de rayonnement  $F(\theta, \phi)$  de l'antenne permet d'avoir une vision globale du rayonnement. Elle est définie comme étant le rapport de la puissance transmise dans une direction donnée  $P(\theta, \phi)$  à la puissance  $P_{max}$  de la direction où le rayonnement est maximal, figure 2.2 [18].

$$P_0(\theta, \phi) = \frac{P_a}{4\pi} \quad (2.17)$$

### 2.4.2 Directivité

La directivité d'une antenne est le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction  $(\theta, \phi)$  à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide pour une même puissance totale rayonnée

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_r} \quad (2.18)$$

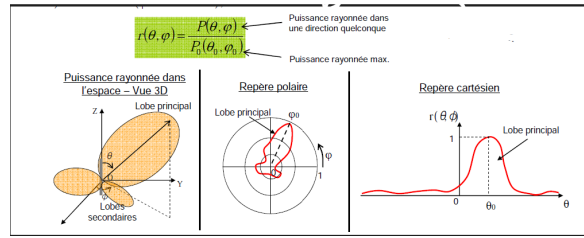


FIGURE 2.2 – diagramme de rayonnement

La directivité indique dans quelles directions la densité de puissance est meilleure ou moins bonne que celle de l'antenne isotrope.

### 2.4.3 Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture est l'angle que font entre elles les deux directions du lobe principal selon lesquelles la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal. La figure 2.3 présente un exemple de présentation diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes [18].

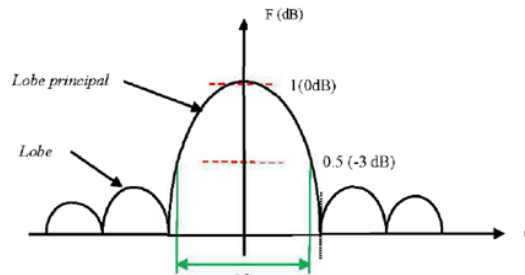


FIGURE 2.3 – Diagramme de rayonnement bi-directionnel en coordonne cartésien

L'angle  $\delta\theta$  présenté sur ce diagramme est l'angle d'ouverture, lorsque l'antenne présente un lobe principal assez fin, la plus grande partie de la puissance rayonnée est à l'intérieur des deux directions à (-3 dB). Donc l'angle d'ouverture nous donne une idée assez précise sur la finesse du lobe et la qualité du rayonnement [19].

### 2.4.4 Gain de l'antenne

La puissance rayonnée par une antenne varie généralement selon la direction considérée. Le gain d'une antenne dans une direction  $(\theta, \phi)$  est le rapport de la puissance rayonnée dans cette direction  $P(\theta, \phi)$  à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation et il est exprimé par [17].

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_a} \quad (2.19)$$

La relation entre le gain et la directivité d'une antenne est donnée par l'équation suivante :



$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_r} \eta = \eta D(\theta, \phi) \quad (2.20)$$

### 2.4.5 Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)

La puissance isotrope rayonnée équivalente d'une antenne (PIRE ou EIRP en anglais) est un terme souvent utilisé en télécommunications (principalement dans les bilans de liaison) qui définit, dans la direction de rayonnement maximal, la puissance électrique qu'il faudrait apporter à une antenne isotrope pour obtenir la même puissance rayonnée dans cette direction. Elle se calcule selon [20] par :

$$\text{PIRE} = G \times P \quad (2.21)$$

## 2.5 Polarisation de champ électromagnétique

La polarisation de champ électromagnétique correspond à l'orientation d'un vecteur de champ électrique dans le plan orthogonal par rapport à la direction de la propagation. Si le vecteur de champ électrique est toujours orienté dans la même direction, l'onde est polarisée linéairement. Si le vecteur de champ électrique tourne autour de la direction de la propagation, l'onde est polarisée circulairement ou plus généralement elliptiquement. La connaissance du diagramme de rayonnement n'est pas suffisante pour quantifier la nature de l'onde émise par l'antenne. Pour caractériser l'onde émise, on détermine le rapport axial (RA), le sens de rotation (droite ou gauche) et l'angle d'inclinaison de l'ellipse  $t$ . On trouvera dans la littérature citée en référence l'ensemble des formulations qui permettent de caractériser l'ellipse de polarisation. Précisons ici que la nature de la polarisation n'est pas uniforme dans toute la sphère qui entoure l'antenne. On peut la déterminer dans la direction normale à l'antenne mais, dans certaines applications, sa connaissance est utile lorsque l'on s'écarte de la normale et l'on peut définir un angle d'ouverture à l'intérieur duquel la qualité de la polarisation pour laquelle a été conçue l'antenne reste correcte. Le rapport axial est défini comme étant le rapport du grand axe sur le petit axe de l'ellipse de polarisation figure 2.4. Il donne une indication fondamentale sur la polarisation de l'onde qui se propage. Pour une polarisation circulaire de bonne qualité, on fixera un seuil de rapport axial à 2 dB par exemple. On peut déterminer expérimentalement ce paramètre de deux façons : – en utilisant une antenne à polarisation linéaire, – à l'aide de deux antennes à polarisation circulaire (droite et gauche) [21].

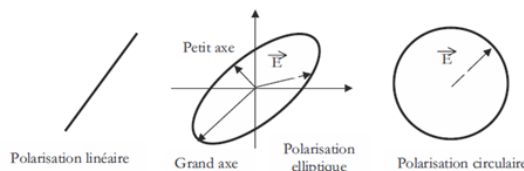


FIGURE 2.4 – Les différents états de polarisation

Dans le cas d'une antenne à polarisation linéaire, l'antenne sous test est fixe et l'on fait pivoter l'antenne de référence autour de son axe horizontal. On décrit ainsi l'ellipse de polarisation d'où l'on déduit le rapport axial expérimental. L'angle d'inclinaison  $t$  est

directement déduit du tracé résultant de la mesure. Ici aussi, l'antenne de référence à polarisation linéaire (bien souvent un cornet) doit présenter un niveau de composante croisée le plus faible possible afin de limiter les erreurs sur la mesure du rapport axial. On constate que cette approche, fiable et simple, peut nécessiter un temps de mesure long si l'on souhaite caractériser l'antenne sur la totalité de la sphère. Pour minimiser le temps de mesure, on évite la rotation complète de l'antenne de référence. On ne recherche dans ce cas, que la valeur maximale du champ (qui correspond au grand axe de l'ellipse) et la valeur minimale (petit axe) à 90° du grand axe. De la même façon, connaissant le centre de rotation de l'antenne, on peut reconstituer mathématiquement l'ellipse de polarisation à partir de trois mesures de champs qui correspondent à trois orientations distinctes de l'antenne de référence. Dans la seconde configuration, l'antenne sous test est toujours fixe, et l'on utilise deux antennes de référence à polarisation circulaire droite et gauche positionnées relativement proche l'une de l'autre. La procédure consiste à mesurer successivement les niveaux de champ ( $E_{droite}$  et  $E_{gauche}$ ) reçus sur ces deux antennes et à déterminer le rapport axial de la façon suivante :

$$RA = \frac{E_{droite} + E_{gauche}}{E_{droite} - E_{gauche}} \quad (2.22)$$

Cette méthode est moins gourmande en durée de mesure. De plus, selon le signe du rapport axial, on peut déduire le sens de la polarisation de l'onde. En effet, une valeur positive du RA correspondra à une onde polarisée elliptiquement à droite tandis que, dans le cas contraire, il s'agira d'une onde polarisée elliptiquement à gauche. Enfin, précisons que les antennes de référence qui présentent une très bonne qualité de polarisation circulaire sont les antennes filaires hélicoïdales. Celles-ci sont d'autant plus performantes (rapport axial proche de l'unité) que le nombre de tours qui les constituent est important [21].

## 2.6 Antenne patch à polarisation circulaire

Les antennes patch n'ont pas toutes une polarisation rectiligne. Selon leur structure et la manière de les alimenter, il est possible de leur donner une polarisation elliptique ou circulaire. Par exemple, en introduisant des fentes dans l'antenne et en jouant sur la position du point de polarisation, ou en excitant l'antenne en points par deux sources égales mais déphasées de 90°, 2.5 [20].

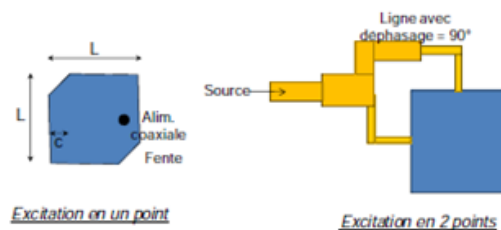


FIGURE 2.5 – antenne patch à polarisation circulaire

## 2.7 La puce dans les systèmes RFID

Les puces RFID existent sous plusieurs formes(figure 2.6) :

- Le format standard : elle n'est plus utilisée dans le domaine du RFID.
- Le format die (mort) nécessite une grande concentration lors de l'intégration avec l'antenne RFID.
- Boucle inductive est très difficile à l'intégrer manuellement. Elle est sophistiquée et demande beaucoup du temps lors de la fabrication.
- Le format strap est le plus utilisé. Il offre une grande flexibilité lors du processus d'intégration avec l'antenne [15].

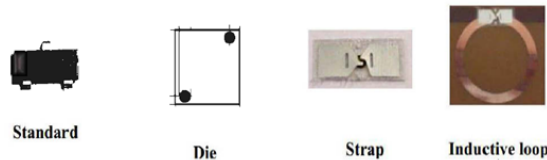


FIGURE 2.6 – les puces RFID

## 2.8 L'adaptation d'impédance d'antennes de tags RFID UHF passifs

L'impédance d'entrée d'une puce RFID à l'état de repos correspond à l'impédance de son circuit d'alimentation transformant l'énergie radio-fréquence en énergie continue. Nous allons dans une première partie introduire les caractéristiques de cette impédance, puis dans une seconde partie, nous verrons comment optimiser le transfert d'énergie [22].

### 2.8.1 L'impédance des puces RFID UHF passives

L'impédance complexe d'une puce RFID, ( $Z_c = R_c + jX_c$ ) est de nature capacitive à cause de son circuit d'entrée lui permettant de récupérer et de stocker l'énergie nécessaire à son fonctionnement.

$$Z_c = R_c + jX_c \quad (2.23)$$

Un modèle simplifié de ce circuit est représenté sur la figure 2.7. La résistance  $R_s$  représente les pertes équivalentes dans les résistances séries des diodes Schottky. La capacité  $C_j$  représente la capacité équivalente des capacités de jonction des diodes Schottky. Et enfin la capacité  $C_r$  représente la capacité équivalente des capacités de dérivation ainsi que la capacité réservoir en sortie [22].

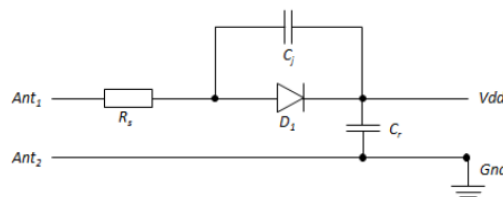


FIGURE 2.7 – Modèle simplifié du circuit d'alimentation d'une puce RFID.

L'impédance d'entrée d'une puce RFID dépend donc en grande partie de ce circuit d'entrée et de la technologie employée pour le réaliser. Cependant il faut tenir compte de l'impédance parasite apportée par le packaging et par la technique de fixation de la puce. Par exemple, l'impédance série apportée par un procédé flip chip utilisant un adhésif de type ACP (Anisotropic Conductive Paste) varie de  $0,25$  à  $3\Omega$  et dépend pour beaucoup de la température de recuit de l'adhésif [23]. Au vue de la faible impédance d'entrée pouvant être présentée par une puce RFID, ces valeurs ne sont pas négligeables. Il est certes possible de mesurer l'impédance des puces en packaging die par l'utilisation d'une mesure sous pointes. Cependant afin de tenir compte des effets du packaging, il est préférable de réaliser la mesure de cette impédance en utilisant une méthode de calibration de type SOL (Short, Open, Load) ou de type LRL (Line, Reflect, Line) respectivement introduite dans [24] et [4]. A partir de cette mesure, on peut déterminer le circuit équivalent parallèle ( $R_p, C_p$ ) ou série ( $R_c, C_c$ ) de la puce qui pourra être utilisé en phase de conception (figure 2.8) [22].

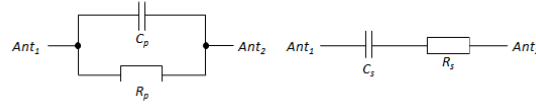


FIGURE 2.8 – Modèle parallèle et modèle série de l'impédance d'entrée d'une puce RFID.

## 2.8.2 Transmission en puissance

Nous avons vu que l'impédance d'entrée d'une puce RFID n'est pas réelle. L'antenne devant permettre d'optimiser le transfert d'énergie vers le circuit RFID, le coefficient de réflexion en puissance  $\Gamma^*$ , donné par (22), doit être pris en compte pour réaliser l'adaptation.

$$\Gamma^* = \frac{Z_c - Z_a}{Z_c + Z_a} \quad (2.24)$$

Où  $Z_a = R_a + jX_a$  est l'impédance de l'antenne et  $Z_a$  est le complexe conjugué de  $\overline{Z_a}$ . Ce coefficient devra être minimisé afin d'optimiser le coefficient de transfert en puissance  $T$  donné par (23).

$$T = 1 - |\Gamma^*|^2 = \frac{4R_a R_c}{|Z_c + Z_a|^2}; 0 < T < 1 \quad (2.25)$$

La figure 2.9 illustre ce coefficient de transmission en puissance dans le cas d'un exemple de puce RFID. Ce coefficient de transmission est optimal lorsque l'impédance de l'antenne est égale au complexe conjugué de l'impédance de la puce RFID ( $Z_a = \overline{Z_c}$ ).

On peut définir l'impédance normalisée d'une charge,  $Z_l$ , par (24).

$$Z_l = \frac{R_l}{R_a} + j \frac{X_l + X_a}{R_a} \quad (2.26)$$

Alors à partir de (21) et (23), on peut exprimer  $\Gamma^*$  en fonction de  $Z_l$  (25).

$$\Gamma^* = \frac{Z_l - 1}{Z_l + 1} \quad (2.27)$$

Ainsi on peut tracer  $\Gamma^*$  sur un abaque de Smith tel que illustré sur la figure 2.10. La distance entre le centre de l'abaque et  $Z_l$  correspondant à  $|\Gamma^*|$ .

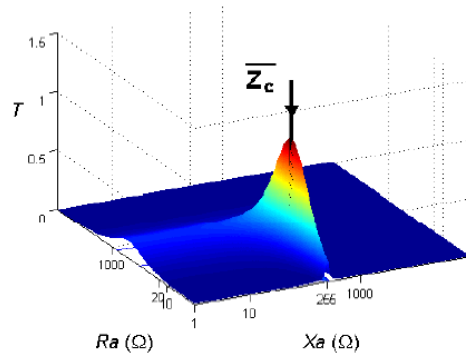


FIGURE 2.9 – Coefficient de transmission  $T$  dans le cas d'une puce RFID d'impédance  $Z_c = 20 - j255$ .

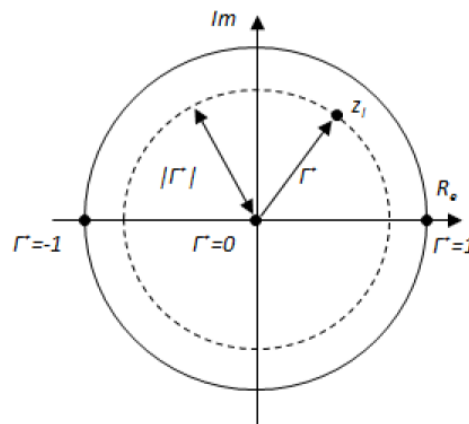


FIGURE 2.10 – Représentation de  $\Gamma^*$  sur un l'abaque de Smith.

Sur l'abaque de Smith (figure 2.10),  $T$  est maximum au centre de l'abaque pour  $\Gamma^* = 0$  et minimum sur la périphérie de l'abaque pour  $|\Gamma^*| = 1$ .  $|\Gamma^*|^2$  correspond aux pertes d'insertions [22].

## 2.9 Techniques d'adaptation d'un tag RFID

L'impédance d'entrée d'une puce RFID en mode repos correspond à l'impédance de son circuit d'alimentation qui convertit l'énergie radiofréquence en énergie continue. L'un des premiers avantages de l'adaptation d'impédance entre l'antenne de l'étiquette et la puce est de récupérer suffisamment d'énergie pour générer une tension continue adéquate afin d'alimenter la puce RFID. Une puce RFID (ou puce d'étiquette RFID) peut être représentée électriquement par un circuit série ou parallèle, comme illustré dans la Figure 2.11 [22].

Pour des raisons de rentabilité, il n'est pas toujours possible d'effectuer l'adaptation d'une antenne de tags RFID en ajoutant des éléments discrets. Il existe trois types de techniques d'adaptation qui peuvent être mises en œuvre : l'adaptation par éléments en série, par éléments en parallèle et par couplage magnétique. D'autres techniques sont également décrites dans les références citées. [26] [4].

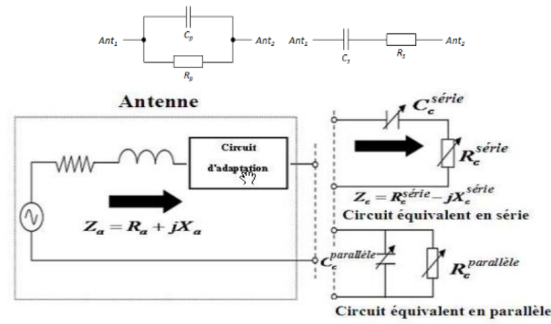


FIGURE 2.11 – Modèle parallèle et modèle série de l'impédance d'entrée d'une puce RFID [25].

### 2.9.1 L'adaptation par éléments série

L'adaptation d'une antenne peut être réalisée en ajoutant un élément inductif en série, comme illustré dans la Figure 2.12. Ce méandre ajoute une composante inductive qui permet d'adapter l'antenne aux caractéristiques de la puce. Ce type d'adaptation présente l'avantage de réduire la taille totale de l'antenne en la repliant [22].

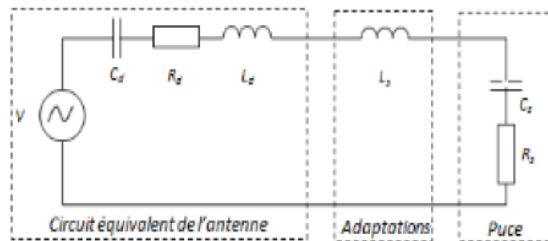


FIGURE 2.12 – Modèle circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée par une inductance série [22].

### 2.9.2 Adaptation par éléments parallèles

Une autre méthode d'adaptation consiste à placer un élément inductif en parallèle avec le port de l'antenne, comme le montre la Figure 2.13 [22].

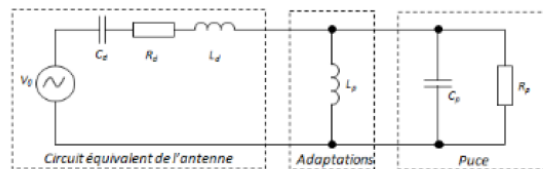


FIGURE 2.13 – Modèle du circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée par une inductance parallèle [22].

### 2.9.3 Adaptation par couplage

La dernière méthode consiste à réaliser l'adaptation par couplage magnétique, comme illustré dans la Figure 2.14. La puce RFID est connectée à une boucle qui est elle-même

couplée à l'antenne. En ajustant le couplage entre l'antenne et la boucle, il est possible d'effectuer l'adaptation d'impédance. Cette méthode d'adaptation présente plusieurs avantages. Tout d'abord, la boucle permet d'optimiser le fonctionnement du tag en champ proche. De plus, ce type d'antenne permet de réduire les coûts de fabrication du tag en permettant la réalisation séparée de la boucle et de l'antenne, évitant ainsi la connexion directe de la puce à l'antenne par un procédé flip-chip [22].

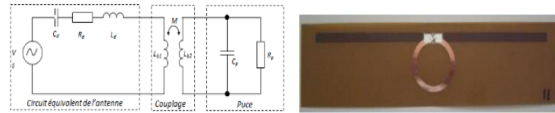


FIGURE 2.14 – Modèle circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle couplée à une boucle inductive.

## 2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté les différents paramètres fondamentaux permettant de caractériser les antennes RFID, citant en premier lieu les paramètres décrivant l'antenne comme étant un circuit. En deuxième lieu ceux qui renseignent sur sa qualité d'émission et de réception donnant une vision spatiale et en troisième lieu les paramètres de réception. A la fin de ce chapitre, nous avons évoqué l'importance du choix de la puce dans les systèmes RFID et sur quelle base celle-ci doit se faire, en citant les techniques de modélisation électrique des puces RFID passives.

# Chapitre 3

## Résultats et discussion

### Sommaire

---

<b>3.1 Introduction</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>3.2 Présentation du logiciel CST</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>3.3 Méthodologie de conception d'antenne de tags RFID passifs</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>3.4 Conception de l'antenne</b> . . . . .	<b>35</b>
3.4.1 Dimensions optimales de l'antenne proposée après optimisation . . . . .	36
<b>3.5 Résultats de simulation</b> . . . . .	<b>38</b>
3.5.1 Adaptation entre la puce et l'antenne . . . . .	38
<b>3.6 Comparaison avec la littérature</b> . . . . .	<b>50</b>
<b>3.7 Conclusion</b> . . . . .	<b>50</b>

---



### 3.1 Introduction

Ce présent chapitre est dédié à la conception d'une antenne tag RFID à polarisation circulaire pour les applications UHF. Le but est d'améliorer les performances d'un tag en termes de gain, de portée, de taille et de polarisation. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser une antenne à boucle carrée comportant une ouverture au coin et une alimentation croisée pour faire générer un champ à polarisation circulaire. L'adaptation avec une puce d'impédance complexe (Alien IC Higgs) est fait à l'aide d'un T-match pour fonctionner dans la bande américaine UHF [902-928] MHz. Nous avons choisi, comme outil de travail, le logiciel de simulation CST Microwave Studio.

### 3.2 Présentation du logiciel CST

Computer Simulation Technology (CST) est un logiciel polyvalent qui permet de simuler et de résoudre une large gamme de problèmes électromagnétiques. Il couvre des domaines allant des basses fréquences aux micro-ondes, en passant par l'optique, la thermique et la mécanique. Le CST est composé de plusieurs modules ou studios spécialisés dans chacun de ces domaines [27]. Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons décidé d'utiliser le CST qui représente un outil spécialisé dans la simulation électromagnétique 3D des composants à haute fréquence. Ce logiciel nous permettra de modéliser et d'analyser avec précision les comportements électromagnétiques des éléments à haute fréquence que nous souhaitons étudier (figure 3.1).

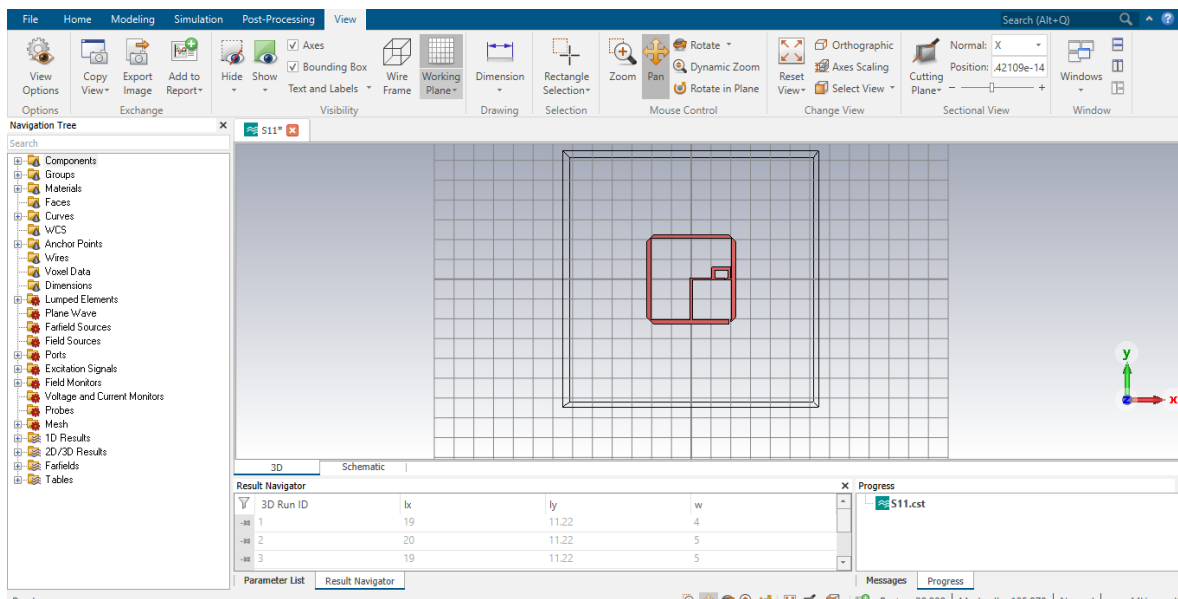


FIGURE 3.1 – Interface du CST Microwave Studio

### 3.3 Méthodologie de conception d'antenne de tags RFID passifs

L'utilisation de logiciels de simulation électromagnétique est incontournable dans la conception d'antennes. Il permet de réaliser l'optimisation des antennes aux paramètres

désirés. Cette étape peut être très couteuse en termes de temps et de ressources. Dans nos méthodologies de conception, nous utilisons le solveur temporel de CST Microwave Studio qui met en œuvre la méthode des intégrales finies associées aux conditions limites pour résoudre un problème électromagnétique. L'utilisation d'un tel logiciel demande beaucoup d'expérience afin d'optimiser le temps de conception. La méthodologie de conception que nous avons mise en œuvre est illustrée sur la figure 3.2.

Plusieurs étapes sont nécessaires :

- La définition de la structure de l'antenne à l'aide de paramètres : Différentes fonctions du logiciel permettent de définir des structures simples et d'effectuer des opérations booléennes sur ces structures. Un programme en Visual Basic, un langage de programmation orienté objet, permet également de définir des structures plus complexes en utilisant les classes d'objets proposées par le logiciel.
- La définition des matériaux diélectriques et conducteurs.
- La définition des conditions limites : Plusieurs types de conditions limites peuvent être définis dont un mur électrique ou un espace ouvert. Il est également possible de définir des symétries électriques ou magnétiques permettant de diviser le domaine de calcul et donc de diminuer le temps de calcul.
- La définition du port d'alimentation : Deux types de ports sont disponibles dont le port guide d'onde utilisé pour alimenter les lignes microstrips ou coplanaires et les câbles coaxiaux, ainsi que le port discret adapté aux structures nécessitant des sources discrètes (dont les puces RFID).
- La définition de la plage de fréquence : Afin d'optimiser les temps de calcul de structures résonantes, il faut exclure du domaine de calcul les fréquences de résonance des modes supérieurs.
- La définition du maillage : CST Microwave Studio possède un générateur de maillage dont on peut paramétrer la densité. Le contrôle du maillage est une étape importante. Plus le nombre de maille est importante plus le temps de calcul est élevé. Cependant un nombre de maille trop faible peut générer des résultats erronés. Dans le but d'optimiser le maillage, il faut utiliser la fonction de sous maillage permettant de densifier le maillage à chaque interface ainsi que le maillage local.
- Paramétrer le solveur temporel : Permet de définir le niveau de précision du solveur temporel. Il peut également permettre de paramétrer un filtre auto régressif permettant d'optimiser le temps de calcul dans le cas de structure résonante.
- Vérifier et analyser les résultats de simulations : Il faut vérifier que les résultats obtenus correspondent bien à ce qui est attendu en théorie afin de valider la simulation.
- Effectuer une étude paramétrique : Afin d'identifier des paramètres géométriques de l'antenne pouvant améliorer les propriétés désirées, il est possible de lancer une étude paramétrique qui permettra de voir l'influence d'un paramètre sur les propriétés de l'antenne. Cette étape permet de converger vers une solution.
- Effectuer une optimisation : Après avoir effectué une étude paramétrique et avoir convergé vers une solution, il est possible d'utiliser les outils d'optimisation disponible sous le logiciel.
- Exporter la structure pour le prototypage une fois que les caractéristiques voulues sont obtenues [4].

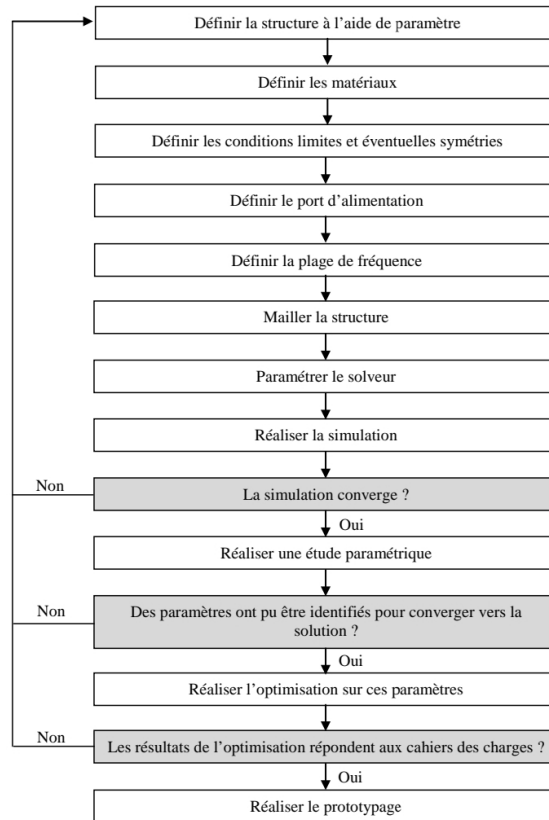


FIGURE 3.2 – méthodologie de conception

### 3.4 Conception de l'antenne

La géométrie de l'antenne d'étiquette en boucle proposée, avec une surface de  $90 \times 90 \times 0.15 \text{ mm}^3$ , est bien illustrée dans la figure 3.3. L'antenne proposée comprend une boucle carrée avec coins tronqués, deux bandes d'alimentation et un T-match d'adaptation ayant des largeurs respectives de  $T1=4 \text{ mm}$ ,  $T3=2 \text{ mm}$  et  $T2=3 \text{ mm}$ . Dans cette conception, l'antenne a été construite en utilisant une feuille de cuivre d'une épaisseur de  $h=0.15 \text{ mm}$ . Les deux bandes d'alimentation, de longueurs respectives de  $6 \text{ mm}$  (x) et  $73 \text{ mm}$  (y), sont reliées ensemble par une puce d'étiquette. Le T-match d'adaptation, de dimensions  $a=19 \text{ mm}$  x  $b=11.22 \text{ mm}$ , est placé sur la puce d'étiquette. Un espace ouvert d'une longueur de  $g=2 \text{ mm}$  est situé à une distance de  $d=5 \text{ mm}$  du coin inférieur droit de la boucle carrée (figure 3.3).

L'antenne proposée est conçue pour fonctionner dans la bande UHF de 902 à 928 MHz, désignée pour l'Amérique du Nord. L'impédance de la puce d'étiquette (*Alien IC Higgs*) est de  $13.5 - j111 \Omega$  à 915 MHz, et la puissance minimale requise pour activer cette puce est de -14 dBm. Par conséquent, l'impédance d'entrée de l'antenne proposée doit être de  $13.5 + j111 \Omega$  afin d'assurer un transfert de puissance optimal entre l'antenne et la puce d'étiquette. Pour obtenir l'impédance d'entrée souhaitée, la technique consistant à charger un T-match d'adaptation à travers le point d'alimentation de l'antenne est introduite, ce point d'alimentation étant l'emplacement de la puce d'étiquette. En ajustant les paramètres a et b du stub d'adaptation, une bonne adaptation d'impédance conjuguée peut être réalisée.

Dans cette conception, la longueur moyenne totale de la boucle carrée est de 327.64

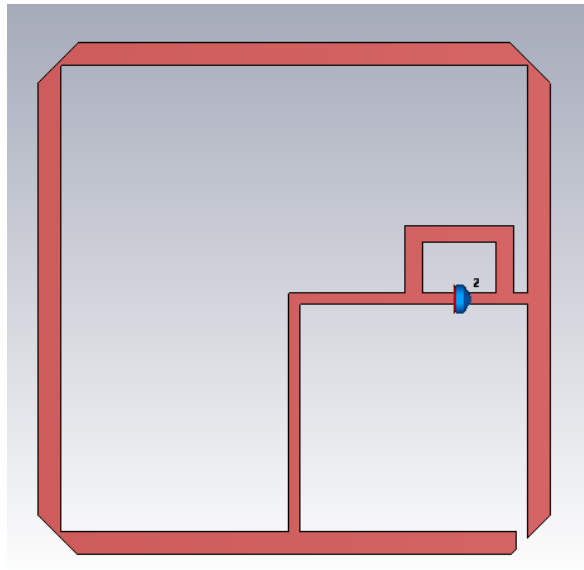


FIGURE 3.3 – Géométrie optimale de l'antenne proposée.

mm, ce qui correspond approximativement à une longueur d'onde dans l'air libre à 915 MHz. Il convient de noter qu'une antenne en boucle carrée d'une seule longueur d'onde avec un espace ouvert est difficile à polariser en onde CP [28]. Par conséquent, la technique la plus importante dans cette conception consiste à incorporer deux bandes d'alimentation supplémentaires dans l'antenne en boucle carrée avec un espace ouvert. En choisissant judicieusement les longueurs  $x$  et  $y$  des deux bandes d'alimentation et l'emplacement  $d$  de l'espace ouvert, il est possible d'obtenir un bon rayonnement à polarisation circulaire [29].

### 3.4.1 Dimensions optimales de l'antenne proposée après optimisation

La boucle carrée est en cuivre. Les dimensions de la structure d'antenne proposée sont bien illustrées séparément dans les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3. Ces dimensions sont aussi bien montrées sur le design dans la figure 3.4. Les deux (02) bandes d'alimentation sont aussi en Cuivre. Le stub (T-match) est en cuivre. Notre structure est conçue substrat diélectrique.

TABLEAU 3.1 – Dimensions en mm de la boucle carrée

paramètre	dimension (mm)
L	90
W	9.9
d	5
T1	4
g	2
h	0.15

TABLEAU 3.2 – Dimensions en mm des deux (02) bandes d'alimentation

paramètre	dimension (mm)
x	6
y	73
T3	2
h	0.15
p	1

TABLEAU 3.3 – Dimensions en mm du stub.

Paramètre	Dimension (mm)
a	19
b	11.22
T2	3
h	0.15

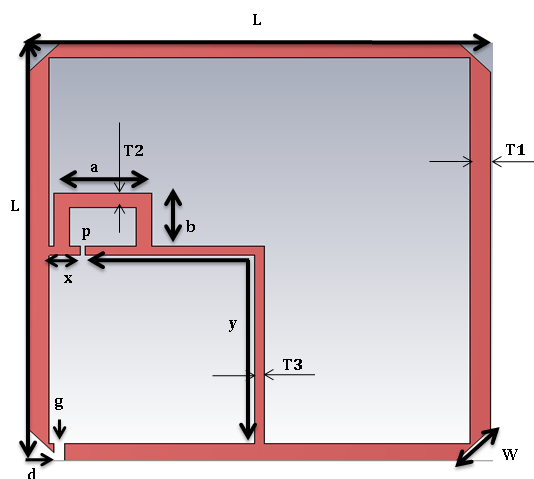


FIGURE 3.4 – dimension de l'antenne

### 3.5 Résultats de simulation

Cette antenne tag doit être conçue pour fonctionner dans la bande UHF 902-928 (MHz) réservée à la région américaine. Il est essentiel qu'elle possède une polarisation circulaire. Cela permettra au tag de recevoir et de transmettre des signaux de manière efficace, indépendamment de l'orientation relative de l'antenne du lecteur RFID.

Dans le but de comprendre le fonctionnement de notre antenne et de maîtriser son comportement, nous avons réalisé une étude paramétrique approfondie. Cette étude consiste à modifier différentes dimensions de l'antenne afin de comprendre leur influence et d'obtenir les meilleurs résultats.

Chaque paramètre géométrique a un effet distinct sur l'impédance d'entrée et le coefficient de réflexion de l'antenne. Ainsi, une analyse paramétrique a été réalisée en faisant varier cinq paramètres : les paramètres a et b du T-match, ainsi que les paramètres x, y et d.

Dans un premier temps, nous avons modifié les paramètres a et b du T-match afin d'assurer une adaptation d'impédance entre l'antenne et la puce. Dans un deuxième temps, nous avons varié la longueur de bande d'alimentation horizontal (x) et l'ouverture gap (d) pour améliorer les performances globales de notre tag, en particulier le gain qui influence directement la portée.

Cette étude paramétrique nous a permis de comprendre comment chaque paramètre influence sur les performances de l'antenne et nous a guidé dans l'optimisation de notre conception pour obtenir les meilleures performances possibles.

#### 3.5.1 Adaptation entre la puce et l'antenne

L'adaptation d'impédance est une étape critique qui vise à assurer une puissance maximale de l'antenne vers la puce et vice versa (lecture et écriture), ce qui permet d'optimiser les performances du tag. Pour y parvenir, il est impératif d'ajuster directement l'impédance de l'antenne du tag RFID à celle de la puce, laquelle présente généralement une impédance complexe. Cette adaptation précise de l'impédance est essentielle pour maximiser l'efficacité de la transmission d'énergie, minimiser les pertes dues à des incompatibilités d'impédance et réduire les réflexions indésirables. En veillant à une adaptation d'impédance adéquate, une communication optimale est établie entre l'antenne et la puce RFID, ce qui se traduit par une puissance de transmission optimisée et des performances accrues du tag RFID. L'impédance de l'antenne et celle de la puce sont généralement complexes et données par :

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} \quad (3.1)$$

$$Z_{puce} = R_{puce} + jX_{puce} \quad (3.2)$$

Pour que l'adaptation soit réalisée, il faut que  $Z_{ant} = Z_{puce}^*$ , ceci peut être réalisé si :

$$R_{ant} = R_{puce} \quad (3.3)$$

$$X_{ant} = -X_{puce} \quad (3.4)$$

Le circuit d'adaptation d'impédance T-match est l'un des circuits les plus utilisés pour adapter l'impédance de l'antenne avec celle de la puce. Ce circuit tire son nom du fait que

l'inductance et la capacité du circuit équivalent du T-match forment une configuration en forme de « T » figure 3.5.

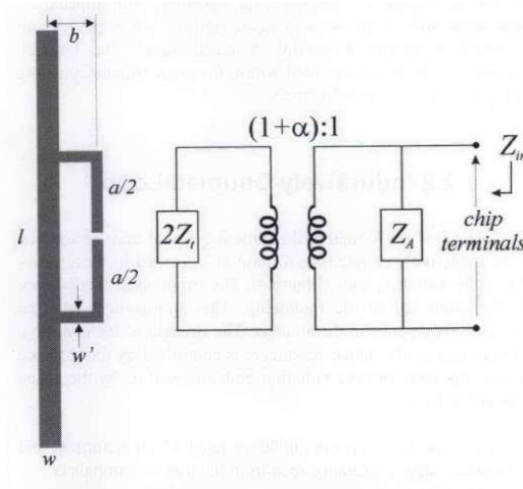


FIGURE 3.5 – La configuration du T-match pour les dipôles planaires et le circuit équivalent, où le rapport d'augmentation d'impédance  $(1 + \alpha)$  est lié aux sections transversales des conducteurs

En référence à la Figure 3.5, l'impédance d'entrée d'un dipôle (plan) d'une longueur  $L$  peut être modifiée en introduisant un stub court-circuit centré, comme expliqué en détail dans le vieux livre [30], et plus récemment dans [31]. La source de l'antenne est connectée à un deuxième dipôle d'une longueur  $a < L_1$ , placé à une courte distance  $b$  du premier et plus grand dipôle. Le courant électrique se répartit le long des deux principaux rayonnants en fonction de la taille de leurs sections transversales. Il peut être prouvé [30], [31] que l'impédance au point source est donnée par [26] :

$$z_{in} = \frac{2z_t(1 + \alpha)^2 z_A}{2z_t + (1 + \alpha)^2 z_A} \quad (3.5)$$

où  $Z_t = jZ_0 \tan(\frac{ka}{2})$  est l'impédance d'entrée du stub court-circuit formé par les conducteurs du T-match et une partie du dipôle;  $Z_0 = 276 \log_{10}(\frac{b}{\sqrt{r_e \times r'_e}})$  est l'impédance caractéristique de la ligne de transmission à deux conducteurs avec un espacement  $b$ ;  $Z_A$  est l'impédance du dipôle prise à son centre en l'absence de la connexion du T-match;  $r_e = 0,25wetr'$  et  $r'_e = 8,25w'$  sont les rayons équivalents du dipôle et du stub de correspondance, supposés être des traces planes; et  $\alpha = \frac{\ln(\frac{b}{r'})}{\ln(\frac{b}{r})}$  est le facteur de division du courant entre les deux conducteurs [26].

Les paramètres géométriques,  $a$ ,  $b$ , et la largeur de la trace,  $w'$ , peuvent être ajustés pour correspondre à l'impédance complexe de la puce,  $Z_{chip}$ . Le T-match agit comme un transformateur d'impédance (Figure 3.5). Dans le cas des dipôles d'une demi-longueur d'onde, l'impédance d'entrée résultante au port T-match est inductive, tandis que pour des dipôles plus petits, l'impédance d'entrée totale peut être à la fois capacitive et inductive. Par exemple, la Figure 2 montre un graphique d'adaptation pour la disposition du T-match, avec le rapport entre les sections transversales des dipôles fixé à  $\frac{w}{w'} = 3$ . Les résistances et inductances d'entrée dépendent à la fois des tailles des stubs  $a$  et  $b$ , mais avec

des règles différentes. Il est connu que la section transversale du deuxième conducteur a un effet considérable sur l'impédance de l'antenne résultante. En particulier, il peut être facilement vérifié à partir de l'équation 3.5 que l'augmentation du rapport  $\frac{w}{w'}$  augmentera les valeurs d'impédance, et les iso-lignes de résistance et de réactance deviennent presque verticales et mutuellement parallèles (fortement dépendantes de la taille de b), ce qui entraîne une agilité d'adaptation réduite. Même avec de petites valeurs de a et b, des valeurs élevées de résistance d'entrée sont généralement trouvées. Cela rend difficile l'adaptation de l'impédance aux émetteurs de micro-puces réelles, à moins d'apporter une modification de la forme du principal rayonnant. Une seule disposition de T-match ne serait donc pas entièrement adéquate pour l'adaptation des micro-puces à haute impédance de phase. Dans de tels cas, des degrés de liberté supplémentaires sont ajoutés au moyen de plusieurs étages de T-match. La géométrie du T-match peut également être intégrée au sein du principal rayonnant [26].

Dans cette configuration, l'antenne est alimentée par un port discret ayant une impédance de 50 ( $\Omega$ ) comme illustré dans la Figure 3.6.

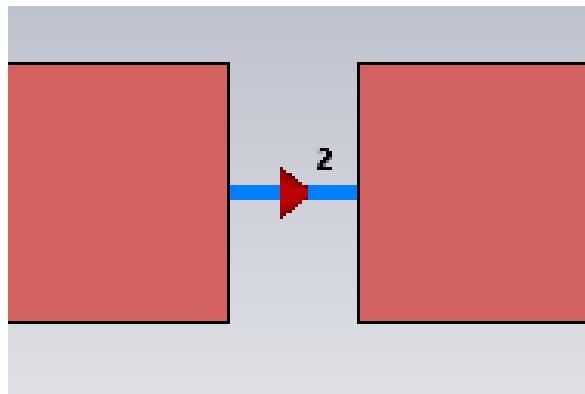


FIGURE 3.6 – discret porte

Le tableau 3.4 résume les résultats obtenus, et il est remarqué que l'antenne est mieux adaptée lorsque a = 19 mm et b = 11.22 mm. Cela signifie que, parmi les différentes valeurs testées, a = 19 mm, b = 11.22 mm offrent une adaptation d'impédance optimale entre l'antenne et la puce RFID, ce qui donne des meilleures performances à l'antenne en termes de rendement, gain et adaptation.

TABLEAU 3.4 – la variation de T-match

b (mm)	a (mm)	fréquence (MHz)	Z ( $\Omega$ )
11.22	20	915	16.23+j116.19
11.22	18	915	12.8+ j104.89
11.22	19	915	14.47+j110.575
11	19	915	13.98+j 109.27
12	19	915	16.25+j115.35

Les Figures 3.7 et 3.8 illustrent les variations de la résistance et de la réactance de l'impédance d'entrée de l'antenne avec le circuit d'adaptation d'impédance T-match en fonction de la fréquence, pour différentes valeurs de "a" et "b".

Les valeurs de a = 19 mm et b = 11.22 mm sont spécifiquement choisies, car elles permettent d'obtenir des valeurs de  $R_a$  (résistance) et  $X_a$  (réactance) très proches de celles



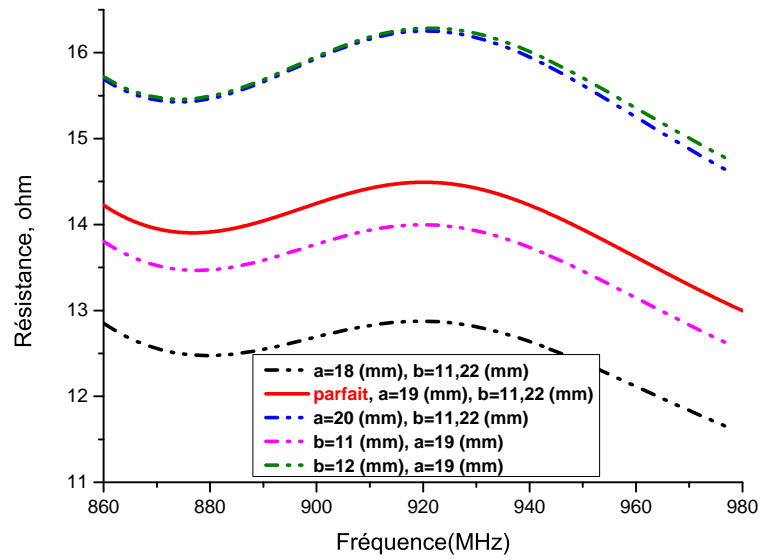


FIGURE 3.7 – La résistance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de a et b

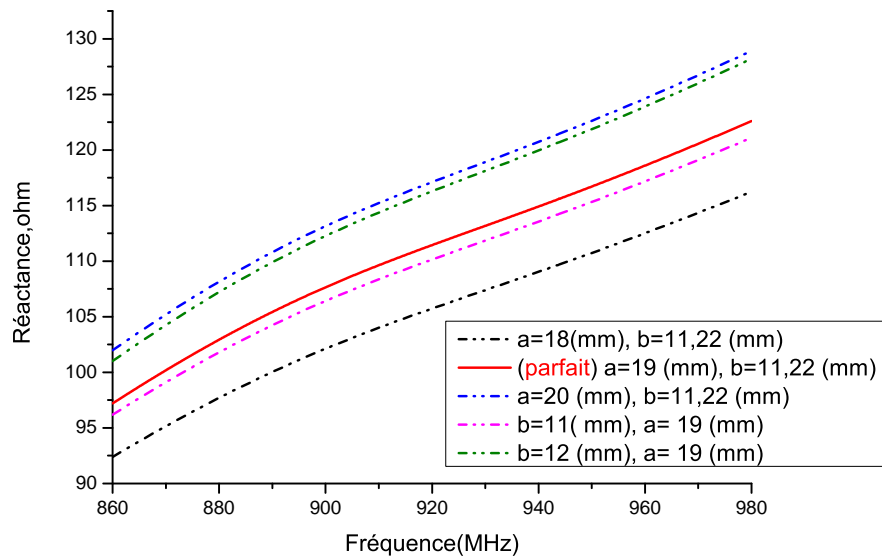


FIGURE 3.8 – La réactance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de a et b

de  $Z_{puce}$  (impédance de la puce). Cette sélection de  $a$  et  $b$  permet donc d'atteindre une adaptation d'impédance efficace entre l'antenne et la puce, ce qui est important pour maximiser les performances et assurer une transmission optimale de l'énergie et des données.

Après optimisation et pour atteindre un fonctionnement de l'antenne à notre fréquence désirée on obtient les paramètres optimaux suivants :  $a_{sub} = 19 \text{ mm}$  et  $b_{sub} = 11.22 \text{ mm}$ .

Les résultats de simulation et d'optimisation ont permis d'extraire les paramètres optimaux d'adaptation à 915 MHz de cette antenne pour la puce (Alien IC Higgs) d'impédance  $Z_p = 13.5 - j111 (\Omega)$ .

Une fois les paramètres optimaux déterminés, nous plaçons la puce qui est modélisée sous CST par des éléments localisés (lumped elements) comme le montre la figure 3.9.

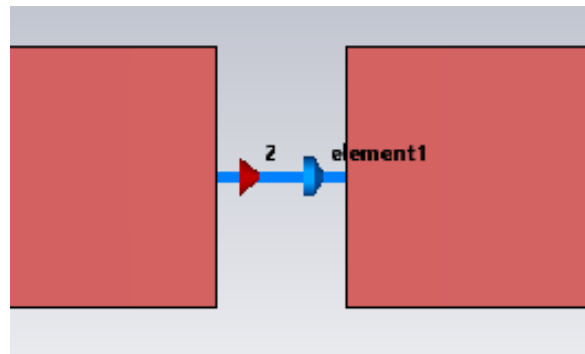


FIGURE 3.9 – emplacement de la puce.

### 3.5.1.1 Coefficient de réflexion

Nous lançons la simulation de l'antenne sur CST avec les paramètres optimaux et l'effet capacitif de la puce on a obtenu les résultats illustrés dans le tableau 3.5 .

La Figure 3.10 présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de  $a$  et  $b$  . Cette représentation graphique permet d'observer comment le coefficient de réflexion varie avec la fréquence en variant les paramètres  $a$  et  $b$ .

Le Tableau 3.5 résume les résultats obtenus, et il est remarqué que l'antenne est mieux adaptée lorsque  $a=19 \text{ mm}$ ,  $b=11,22\text{mm}$  . Cela signifie que, parmi les différentes valeurs

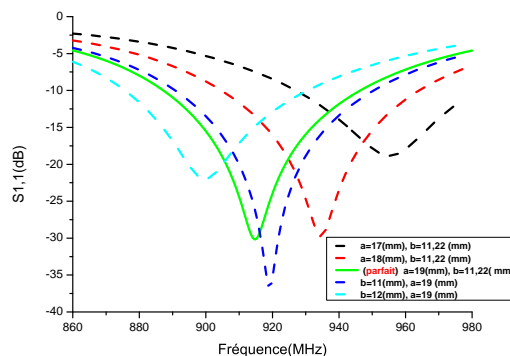


FIGURE 3.10 – S11 en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de  $a$  et  $b$

testées,  $a=19$  mm ,  $b=11.22$ mm donnent une adaptation d'impédance optimale entre l'antenne et la puce RFID, ce qui se traduit par de meilleures performances globales de l'antenne.

TABLEAU 3.5 – S11 en fonction de a et b

Dimension du T-match (mm)	S11 (dB)	Fréquence(MHz)
a =17 , b = 11.22	-18.83	955.29
a = 18 , b= 11.22	-29.77	934.56
a = 19 , b= 11.22	-30.13	915
b =11 , a=19	-36.82	919.13
b = 12 , a=19	-21.98	900

### 3.5.1.2 Rapport d'ondes stationnaires (VSWR)

La Figure 3.11 représente le taux d'ondes Stationnaires (VSWR) de l'antenne simulée dans le domaine fréquentiel. Nous pouvons observer que le VSWR atteint une valeur de 1.06 à la fréquence de résonance de 915 MHz, ce qui montre une très faible réflexion à l'entrée de l'antenne.

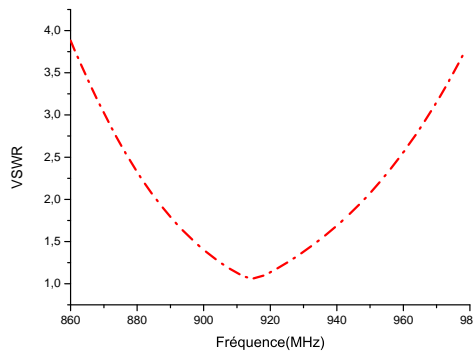


FIGURE 3.11 – Taux d'ondes Stationnaires (VSWR)

### 3.5.1.3 Rapport axial

Le rapport axial, défini comme le rapport du demi-grand axe au demi-petit axe de l'ellipse, joue un rôle important dans la caractérisation des ondes. Il est compté positivement pour les ondes gauches et négativement pour les ondes droites. Ce rapport axial (AR) satisfait la relation suivante :

$$1 \leq |AR| \leq \infty \quad (3.6)$$

Cette inégalité indique que le rapport axial doit être supérieur ou égal à 1, ce qui signifie que le demi-grand axe de l'ellipse doit être plus grand ou égal au demi-petit axe (polarisation circulaire). Par ailleurs, le rapport axial peut tendre vers l'infini, indiquant une ellipse très allongée dans une direction donnée (polarisation linéaire).

Lorsque le rapport axial (AR) est égal à 1, la polarisation de l'onde est circulaire. Cela signifie que l'ellipse est parfaitement équilibrée, avec un demi-grand axe égal au demi-petit axe. En revanche, lorsque le rapport axial tend vers l'infini, la polarisation de l'onde est rectiligne. Cela signifie que l'ellipse est très allongée dans une direction spécifique, créant une polarisation linéaire.

Le rapport axial (AR) est souvent exprimé en décibels (dB) pour faciliter la comparaison et la mesure. La formule utilisée pour convertir le rapport axial en dB est :

$$AR(dB) = 20 \log_{10}(AR) \quad (3.7)$$

où AR linéaire est la valeur absolue du rapport axial exprimée linéairement. Cette conversion en dB permet d'obtenir une échelle logarithmique plus pratique pour représenter des valeurs de rapport axial très différentes entre elles.

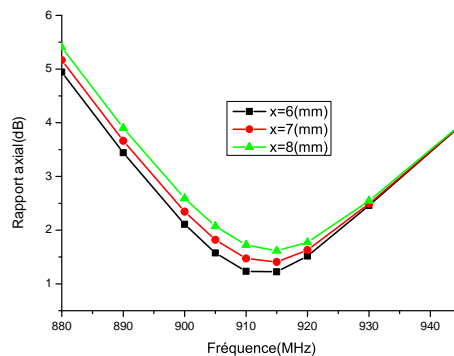


FIGURE 3.12 – AR en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de x

Pour obtenir une antenne à polarisation circulaire, il est nécessaire que le rapport axial soit inférieur à 3 dB. Ce rapport axial varie rapidement en fonction de la fréquence, de l'angle  $\theta$  et de l'angle  $\phi$ . La polarisation circulaire est obtenue lorsque l'antenne est orientée perpendiculairement à sa surface, c'est-à-dire avec des angles  $\phi = \theta = 90^\circ$ .

La Figure 3.12 présente le rapport axial en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de x. Cette représentation graphique permet d'observer comment AR varie avec la fréquence en variant la longueur x.

La valeur de x=6 mm a été spécifiquement choisie, car elle permet d'obtenir des valeurs de AR très proches de 1.

La Figure 3.13 présente la variation du AR en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de d. Cette représentation graphique permet d'observer comment AR varie avec la fréquence en variant le paramètre d.

La valeur de d=5 mm est spécifiquement choisie, car elle permet d'obtenir des valeurs de AR très bas (proches de 0 dB).

Cela confirme que l'antenne présente une polarisation circulaire dans la direction normale à son plan, sur la plage de fréquences UHF, ce qui peut être avantageux pour certaines applications nécessitant une polarisation circulaire constante.

### 3.5.1.4 Diagramme de rayonnement

La Figure 3.14 représente le diagramme de rayonnement de l'antenne tag proposée. Nous pouvons observer que la directivité atteint une valeur de 2.767 dBi à la fréquence de résonance 915 MHz, ce qui montre une bonne qualité de transmission.

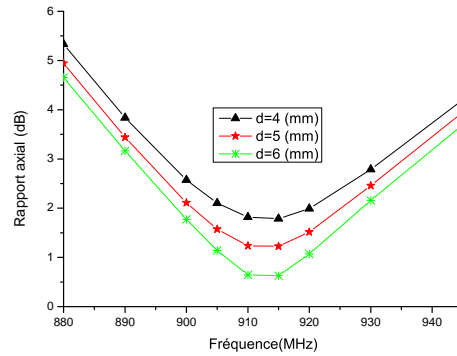


FIGURE 3.13 – AR en fonction de fréquence du différents valeurs de d

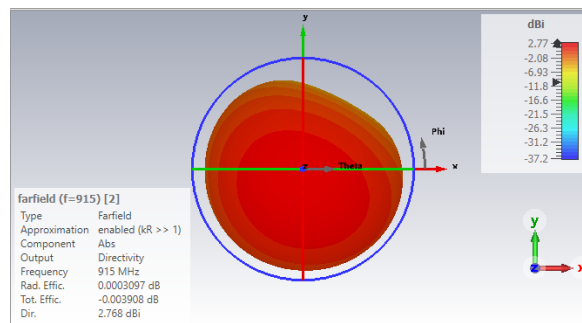


FIGURE 3.14 – Diagramme de rayonnement (directivité) à 915 MHz

La Figure 3.15 présente le diagramme de rayonnement en 3D (gain de notre antenne), qui est de 2.765 dBi. Il représente la répartition tridimensionnelle de la puissance rayonnée par l'antenne, permettant de visualiser la direction dans laquelle l'antenne émet la puissance maximale. Il est clairement observé que l'antenne présente deux directions de rayonnement où la puissance est maximale, à savoir vers l'avant et vers l'arrière (direction verticale à l'antenne).

La valeur maximale de puissance rayonnée est de 2.77 dBi.

### 3.5.1.5 Gain

La Figure 3.16 représente le gain (G) de l'antenne. Nous pouvons observer que le G atteint une valeur de 2.765 dBi à la fréquence de résonance de 915 MHz, pour les valeurs choisies  $a=19$  mm,  $b=11.22$  mm, ce qui présente la structure optimale de notre antenne.

### 3.5.1.6 Efficacité de rayonnement

La Figure 3.17 représente l'efficacité de l'antenne. Nous pouvons observer que l'efficacité atteint une valeur de 99% à la fréquence de résonance de 915 MHz, ce qui indique une bonne adaptation de l'antenne.

### 3.5.1.7 Portée de lecture (read range)

Le gain de l'antenne tag ( $G_{tag}$ ) est un facteur important dans le calcul de la distance de lecture. En utilisant l'équation de Friis, on peut déterminer la distance maximale à la-

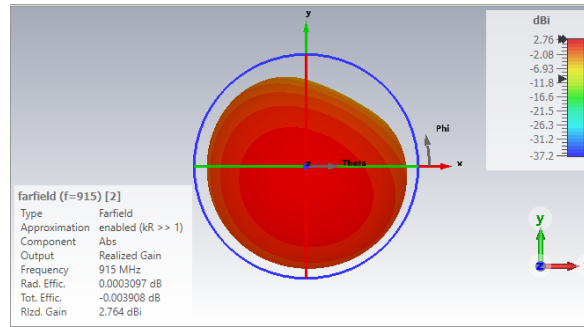


FIGURE 3.15 – Diagramme de rayonnement (gain réalisé) à 915 MHz

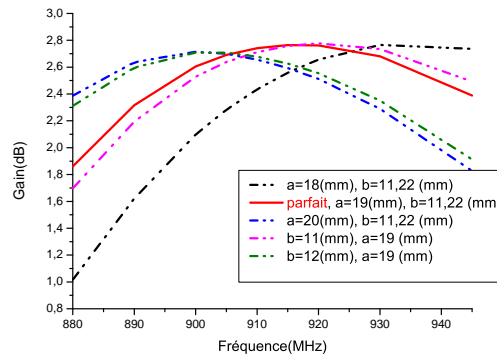


FIGURE 3.16 – Le gain en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de a et b

quelle le tag peut être lu en fonction de la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE), de la sensibilité de la puce ( $P_{th}$ ) et du coefficient de transmission ( $\tau$ ).

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{\text{PIRE} \times G_r \times \tau}{P_{th}}} \quad (3.8)$$

Nous avons comme données :

- $\lambda = c/f$ ,  $c = 3 \times 10^8$  m/s,  $f = 915$  MHz
- $G_r = G_{tag} = 2.764$  dBi
- $\tau = 1 - |S_{11}|^2$
- $P_{th} = -14$  dBm
- PIRE = 4 W

Une application numérique sur la portée donne :

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{\text{PIRE} \times G_r \times \tau}{P_{th}}} = 11.361 \text{ m}$$

### 3.5.1.8 Champ électrique rayonné

D'après la figure 3.18, nous avons observé que le champ électrique E se propage verticalement à l'antenne en direction de la droite, du point de vue de la source (l'antenne). Cependant, du point de vue du récepteur, le champ électrique se dirige vers la gauche. Il est évident que le champ électrique varie circulairement, ce qui monte sa polarisation circulaire.

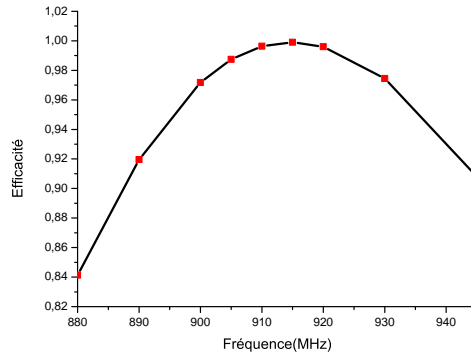


FIGURE 3.17 – Efficacité de rayonnement

### 3.5.1.9 Courant électrique

D'après la figure 3.19, lorsque la phase varie de  $0^\circ$  à  $270^\circ$ , on constate que la distribution du courant se fait dans le sens horaire. Cette observation indique que notre antenne a une polarisation circulaire gauche avec une valeur maximale du courant de 10 A/m.

### 3.5.1.10 Représentation polaire du diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement (DDR) de l'antenne montre un rayonnement bi-directionnel, ce qui signifie qu'elle émet et reçoit des signaux dans deux directions opposées. Dans le plan horizontal, le lobe principal du DDR est dirigé vers  $\theta = 177^\circ$ , ce qui indique que l'antenne a une réponse maximale dans cette direction comme montre dans la figure 3.20 en bas.

Lorsque l'angle dans le plan vertical est égal à 0 degré ( $\phi = 0^\circ$ ), le gain de l'antenne est de 2.61 dBi. Cela signifie que l'antenne a une directivité supérieure à une antenne isotrope (qui rayonnerait uniformément dans toutes les directions) de 2.61 dBi dans la direction  $\theta = 177^\circ$ .

En revanche, lorsque ( $\phi = 90^\circ$ ), le DDR montre un rayonnement bidirectionnel avec un lobe principal dirigé vers la direction  $\theta = 168^\circ$ . Le gain de l'antenne dans cette configuration est de 2.77 dBi, ce qui indique une directivité accrue par rapport à une antenne isotrope dans la direction  $\theta = 168^\circ$ .

Ces valeurs de gain et de direction du lobe principal peuvent être utilisées pour évaluer les performances et les caractéristiques de rayonnement de l'antenne dans différentes configurations et orientations.



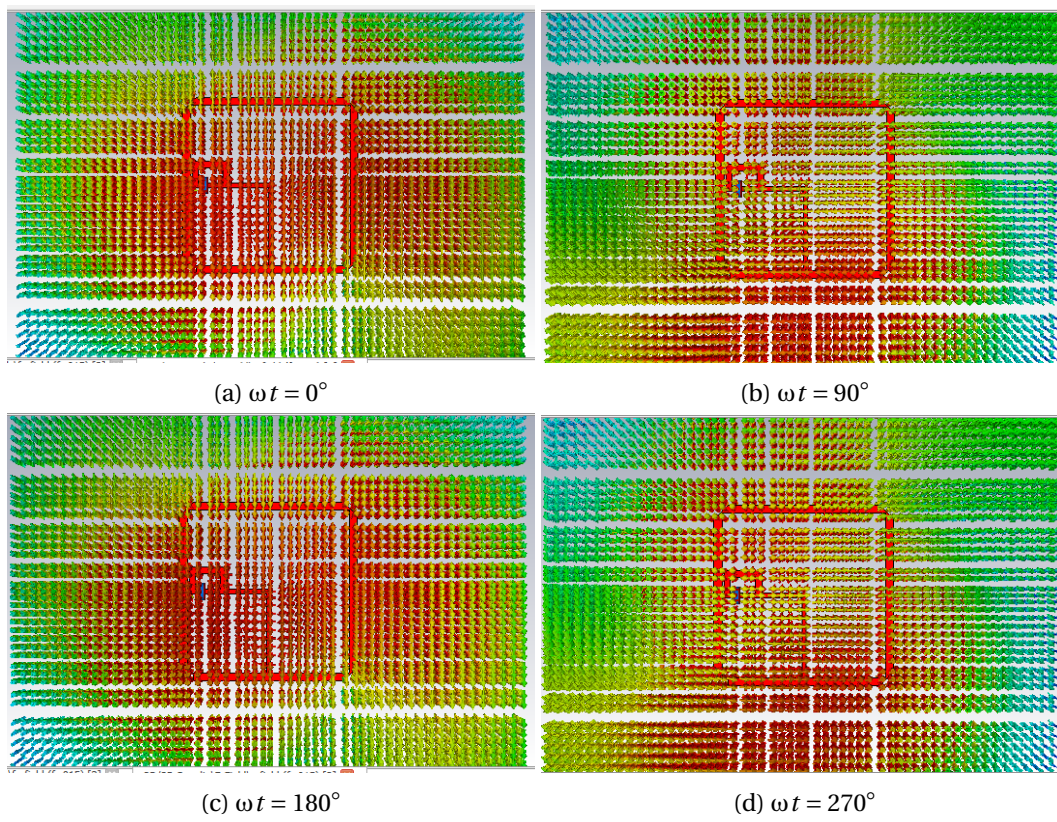


FIGURE 3.18 – Le champ électrique rayonné



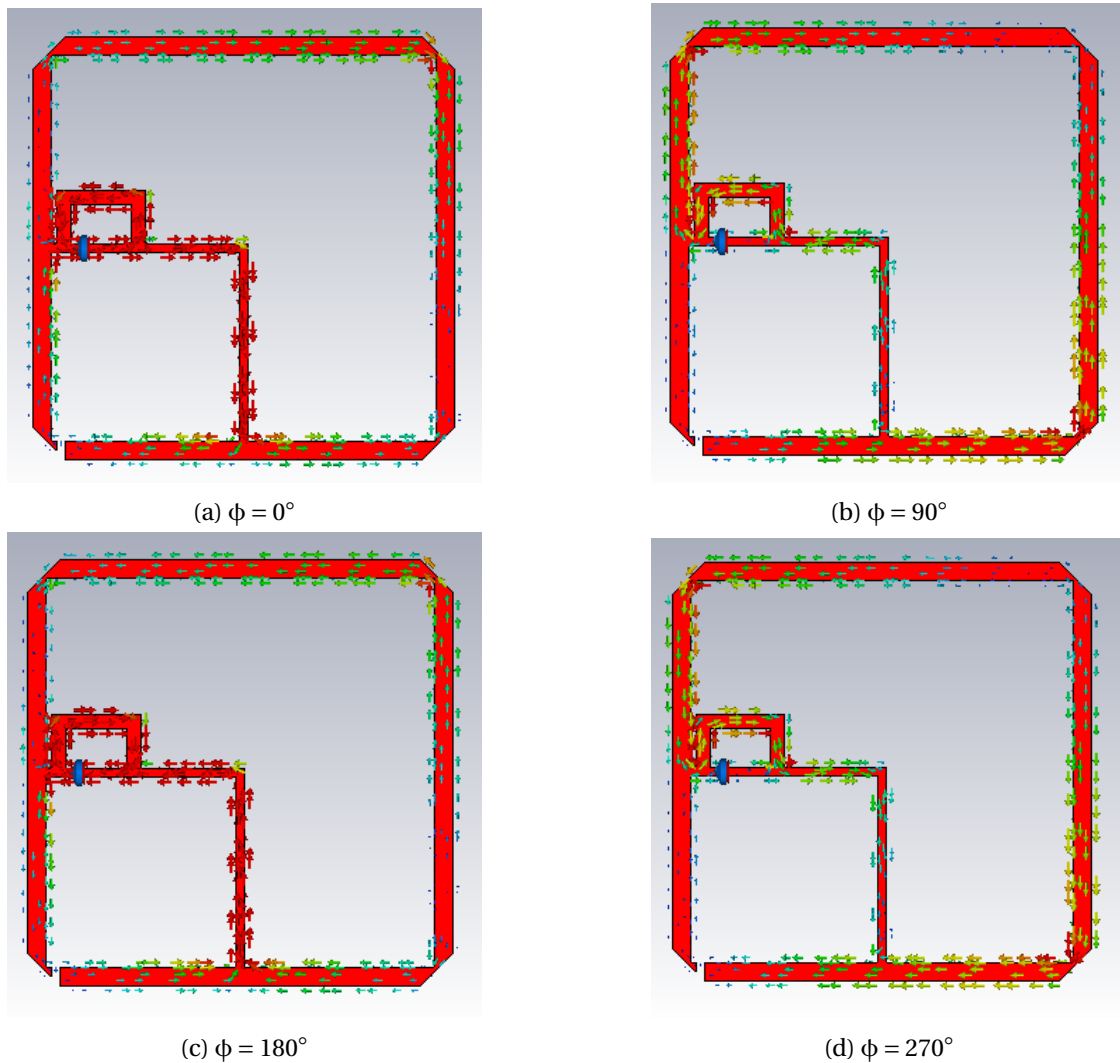


FIGURE 3.19 – Distribution du courant électrique sur l'antenne

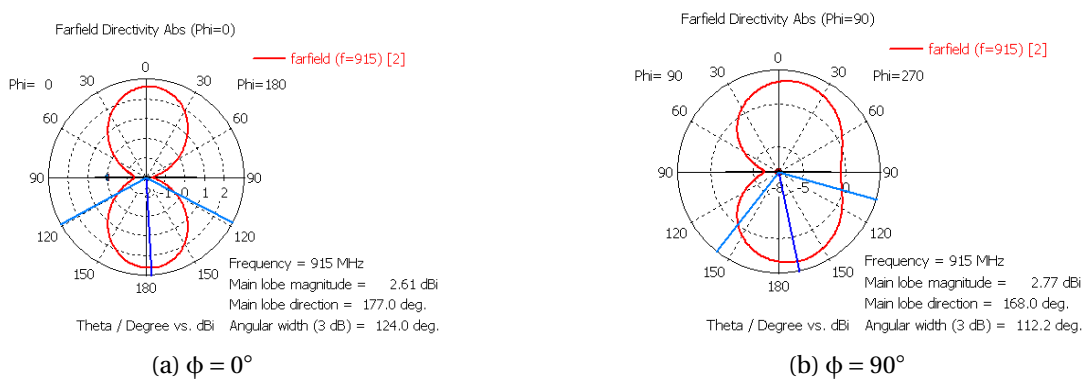


FIGURE 3.20 – Diagramme de rayonnement polaire

### 3.6 Comparaison avec la littérature

Le tableau 3.6 récapitule une comparaison entre notre antenne et celles qui sont disponibles dans la littérature. D'après le tableau nous remarquons que notre antenne RFID proposée présente une portée plus élevée que les autres antennes mentionnées [1–3], avec une valeur de 11.361 mètres. De plus, le gain de notre antenne est également supérieur, ce qui montre les meilleures performances en termes de gain, de portée et de largeur de fréquences à polarisation circulaire. En ce qui concerne la taille, notre antenne présente des dimensions de  $90 \times 90 \times 0.15 \text{ mm}^3$ , ce qui en fait une antenne relativement mince par rapport aux autres références mentionnées. Cette caractéristique peut être avantageuse pour des applications nécessitant une intégration discrète ou un espace restreint.

TABLEAU 3.6 – Comparaison des performances de l'antenne proposée avec celles dans la littérature

Réf.	Dimensions ( $\text{mm}^3$ )	Gain (dBic)	Portée(m)	Fréquence (MHz)	3-(dB) AR BW(MHz)
[1]	$70 \times 70 \times 1.6$	-13	2	925	6
[2]	$69 \times 69 \times 1$	-1.05	8.3	915	47
[3]	$50 \times 50 \times 4.5$	-7.1	5.8	915	3
Ant. Prop.	$90 \times 90 \times 0.15$	2.765	11.361	915	43

### 3.7 Conclusion

Nous avons présenté une conception réussie d'une antenne tag RFID à polarisation circulaire dédiée aux applications UHF. L'antenne présente une bande passante de 59.22 MHz (de 887.22 à 946.44 MHz). La configuration de l'antenne proposée présente de bonnes performances en offrant une plage de lecture dépasse de 11 mètres et un gain atteint de 2.764 dBic. De plus, cette antenne présente un rayonnement à polarisation circulaire et un rapport axial de 1.22 dB à 915 MHz. En plus, notre structure d'antenne occupe une épaisseur très mince de 0.15 mm ce qui donne à la structure proposée une large utilisation dans diverses applications RFID dans la bande UHF.

# **Conclusion Générale**

L'objectif de ce travail était de concevoir une structure d'antenne étiquette RFID passive à polarisation circulaire. Nous avons commencé par un contexte général sur la technologie RFID avant de nous plonger dans l'étude des paramètres fondamentaux des antennes. Nous avons ensuite présenté plusieurs techniques d'adaptation d'impédances et nous avons expliqué le principe de la polarisation circulaire, tout en fournissant des configurations d'antennes à polarisation circulaire pour donner un aperçu de nos travaux à venir. Après, nous avons mis en pratique nos connaissances en concevant notre étiquette RFID à polarisation circulaire à l'aide du logiciel de simulation CST Microwave Studio, obtenant les résultats escomptés. Nous avons présenté la conception d'une antenne tag RFID passive à polarisation circulaire dédiée aux applications UHF à 915 MHz. L'antenne présente une bande passante adéquate de 59.22 MHz, allant de 887.22 à 946.44 MHz couvre la bande américaine UHF. La structure de l'antenne proposée présente de bonnes performances en offrant une portée de lecture dépasse les 11 mètres et un gain atteint les 2.764 dBic et une directivité atteint les 2.768 dBi. De plus, l'antenne présente un rayonnement à polarisation circulaire avec un rapport axial très bas de 1.22 dB à 915 MHz et de largeur de 43 MHz. Aussi, cette structure occupe une épaisseur très mince de 0.15 mm, donne une flexibilité en termes d'applications. Avec toutes ces performances, notre antenne étiquette peut être utilisée efficacement dans diverses applications RFID dans la bande UHF.

Nous avons acquis une expérience précieuse en travaillant en équipe et en concevant et menant à bien notre projet. Cette expérience nous a également permis de mieux comprendre les différentes étapes impliquées dans la réalisation d'un projet, depuis la conception jusqu'à la mise en œuvre. Dans l'ensemble, ce projet nous a fourni des compétences et des connaissances essentielles pour notre développement professionnel futur. Bien que notre travail ait atteint son objectif principal, il est encore possible de l'améliorer. En effet, les recherches présentées dans ce mémoire peuvent être poursuivies sur plusieurs fronts. Tout d'abord, il serait intéressant de concevoir un autre tag à polarisation circulaire qui couvre l'ensemble de la bande RFID, ce qui n'a pas été le cas dans cette étude. De plus, réduire la taille du tag pour qu'il puisse être utilisé dans des applications où la taille est un facteur clé serait une bonne extension de ce projet. Ces pistes d'amélioration pourraient contribuer à approfondir la recherche dans ce domaine.

# Bibliographie

- [1] H.-D. Chen, S.-H. Kuo, C.-H. Tsai, *et al.*, “Coupling-feed circularly polarized rfid tag antenna mountable on metallic surface,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 5, pp. 2166–2174, 2012.
- [2] A. S. M. Sayem, D. Le, R. B. Simorangkir, T. Björninen, K. P. Esselle, R. M. Hashmi, and M. Zhadobov, “Optically transparent flexible robust circularly polarized antenna for uhf rfid tags,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2334–2338, 2020.
- [3] D. Le, S. Ahmed, L. Ukkonen, and T. Björninen, “A small all-corners-truncated circularly polarized microstrip patch antenna on textile substrate for wearable passive uhf rfid tags,” *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 5, no. 2, pp. 106–112, 2021.
- [4] A. Ghiotto, *Conception d’antennes de tags RFID UHF; application a la réalisation par jet de matière*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2008.
- [5] A. de l’Afsset, “Les systèmes d’identification par radiofréquences (rfid),” 2009.
- [6] E. M. MAKROUM, R. Mounir, M. LATRACH, and A. BENBASSOU, “Conception d’antennes spirales rectangulaires pour tag rfid uhf,” *Revue Méditerranéenne des Télécommunications*, vol. 4, no. 1, 2014.
- [7] T. Martin, “Le b.a.-ba de la rfid origines, technologies et applications,” *Technologie et Applications Publication périodique de Smals*, 2014.
- [8] S. Preradovic, *Chipless RFID system for barcode replacement*. PhD thesis, Monash University Melbourne, Australia, 2010.
- [9] H. Liu, M. Bolic, A. Nayak, and I. Stojmenovi, “Integration of rfid and wireless sensor networks,” in *encyclopedia on ad hoc and ubiquitous computing : theory and design of wireless ad hoc, Sensor, and Mesh Networks*, pp. 319–347, World Scientific, 2010.
- [10] B. Youssef, B. S. Bassim, and R. O. J. Gabriel, “projet rfid,” *TELECOM Sud paris, Sud Paris*, 2011.
- [11] S. GANNAR and A. HATEM, “L’identification par radiofréquence : Technologie et usage dans le management de demain,” *Revue Marocaine de recherche en management et marketing*, vol. 1, no. 13, 2016.
- [12] M. Beckner, M. Simms, R. Venkatesh, and M. Badran, *Pro RFID in BizTalk Server 2009*. Springer, 2009.
- [13] A. C. De Souza, *Conception d’antennes et méthode de caractérisation des systèmes RFID UHF en champ proche et en champ lointain*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2015.
- [14] A. Lozano-Nieto, *RFID design fundamentals and applications*. CRC press, 2017.

- [15] I. Gammoudi, *Application des antennes RFID à base de liquide crystal polymère dans un environnement souterrain*. PhD thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2017.
- [16] L. A. NDIAYE Khadidiatou, “Comprendre la technologie rfid,” *Universit Paris 13*, pp. 12 – 14, 2016-2017.
- [17] B. Mekimah, A. Messai, and T. Djerafi, *Amélioration des caractéristiques des patches microbandes pour les applications ultra large bande*. PhD thesis, Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2020.
- [18] H. Chorfi, *Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (Canada), 2012.
- [19] Y. Zhou, C.-C. Chen, and J. L. Volakis, “Single-fed circularly polarized antenna element with reduced coupling for gps arrays,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 5, pp. 1469–1472, 2008.
- [20] A. Boyer, “Support de cours énoncé de travaux dirigés,” 2011.
- [21] O. Picon, L. Cirio, C. Ripoll, G. Baudoin, J.-F. Bercher, and M. Villegas, *Les antennes : Théorie, conception et applications*. Dunod, 2009.
- [22] A. Ghiotto, T.-P. Vuong, K. Wu, and S. Tedjini, “Adaptation d’impédances d’antennes aux impédances de circuits de tags rfid uhf passifs,” in *16èmes Journées Nationales Microondes*, p. x, 2009.
- [23] H. Chu, B. An, F. Wu, and Y. Wu, “Rfid tag packaging with anisotropically conductive adhesive,” in *2006 7th International Conference on Electronic Packaging Technology*, pp. 1–4, IEEE, 2006.
- [24] A. Ghiotto, S. Cantalice, T.-P. Vuong, A. Pouzin, G. Fontgalland, and S. Tedjini, “Miniaturized patch antenna for the radio frequency identification of metallic objects,” in *2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 583–586, IEEE, 2008.
- [25] M. Dhaouadi, “Conception et optimisation des antennes rfid uhf en vue d’améliorer la fiabilité des systèmes rfid,” *Communications. Tunis : Ecole Supérieure des Communications de Tunis*, 2014.
- [26] G. Marrocco, “The art of uhf rfid antenna design : Impedance-matching and size-reduction techniques,” *IEEE antennas and propagation magazine*, vol. 50, no. 1, pp. 66–79, 2008.
- [27] H. Hasani, M. Tamagnone, S. Capdevila, C. F. Moldovan, P. Maoddi, A. M. Ionescu, C. Peixeiro, J. R. Mosig, A. K. Skrivervik, and J. Perruisseau-Carrier, “Tri-band, polarization-independent reflectarray at terahertz frequencies : Design, fabrication, and measurement,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 268–277, 2016.
- [28] H. Morishita and K. Hirasawa, “Wideband circularly-polarized loop antenna,” in *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting*, vol. 2, pp. 1286–1289, IEEE, 1994.
- [29] H.-D. Chen, C.-H. Tsai, C.-Y. Kuo, *et al.*, “Circularly polarized loop tag antenna for long reading range rfid applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1460–1463, 2013.
- [30] S. Uda and Y. Mushiake, “Yagi-uda antenna,” *Tokyo, Sasaki Printing and Publishing Co*, pp. 119–131, 1954.

- [31] J. W. . S. Inc, "Antenna theory, analysis and design," *Second Edition, New York*, pp. 119–131, 1997.