



**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

Mémoire de Master Académique

Pour obtenir le diplôme de master délivré par

Université Kasdi Merbah Ouargla

Spécialité "Systèmes des télécommunications"

**Conception d'une antenne étiquette RFID passive
compacte en bande UHF**

Présenté et soutenu publiquement par

Omar KAFI ET ABDELMADJID BOUDJEMAA

Le 20 Juin 2023

Jury

Mohammed BOULESBAA,	Professeur à l'université de Ouargla	Président
Abdelkrim BELHEDRI,	MAA à l'université de de Ouargla	Encadrant
Boualem MEKIMAH,	MCA à l'université de Ouargla	Co-Encadrant
Naceur AOUNALLAH,	MCA à l'université de Ouargla	Examinateur
Amira HAMIDI,	Doctorante	Invité

Dédicaces

J'ai l'honneur de dédier ce modeste mémoire.

A mon défunt père et défunte mère.

Je dédie ce travail aussi.

A mon épouse et fils Ismail pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A ma famille, mes chers frères et ma chère sœur, neveux et nièces (Larbi, Manel et Narimene) qui m'ont accompagné durant la période du projet.

A nos amis, sans oublier Abdenour BELHEDRI, lui aussi qui n'a pas cessé de m'avoir donné de l'aide durant toute cette période.

Merci à tous.

Omar KAFI

Dédicaces

A cœur vaillant rien d'impossible, A conscience tranquille tout est accessible
Quand il y a la soif d'apprendre, Tout vient à point à qui sait attendre
Quand il y a le souci de réaliser un dessein, Tout devient facile pour arriver à nos fins
Malgré les obstacles qui s'opposent, En dépit des difficultés qui s'interposent
Les études sont avant tout, Un avenir glorieux et magique
Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis.
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri
Aujourd'hui, ici rassemblés auprès des jurys,
Nous prions Dieu que cette soutenance, Fera signe de persévérance
Et que nous serions enchantés, Par notre travail honoré
Je dédie ce mémoire à ... ?

Tout d'abord je tiens à remercier le bon Dieu qui m'amène jusqu'à la fin de mes études.
Mes très chers parents que j'aime jusqu'à la frontière de l'imagination qui m'ont guidé
durant les moments pénibles de ce long chemin ma mère qui a sacrifié toute sa vie afin
de m'avoir devenir ce que je suis, et mon père le maître qui m'a été à mon côté et ma sou-
tenu durant toute ma vie, mes deux frères Anis et Walid
Mon chère amis et frère Mounir qui a été mon soutien, mon appui et mon encourageant
tout au long de cette période, sans oublier Ramzi et Abdelnour aussi qui m'ont aidé pen-
dant cette période.

A nos frères et sœurs on témoigne d'une profonde affection, on vous dédie ce travail en
souhaitant accomplissement de tous vos désirs.

Abdelmadjid BOUDJEMAA.

Remerciements

Notre remerciement avant tout, louange à « ALLAH » de nous avoir donné santé, courage, volonté et foi pour réaliser ce travail.

Nos remerciements vont à Notre directeur de projet Monsieur Abdelkrim BELHEDRI , maitre-assistant classe A à l'université KASDI MERBAH de Ouargla UKMO, qui nous a guidé de ses précieux conseils et suggestions, et la confiance qu'il nous a témoigné et aussi pour nous avoir offert un cadre de travail agréable et un encadrement de qualité.

Nous remercions vivement Monsieur Boualem MEKIMAH, maitre-de conférence classe A à l'université KASDI MERBAH de Ouargla UKMO, pour son suivi et son soutien lors de la réalisation de ce travail, Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance, pour les encouragements, les conseils et la confiance qu'il a toujours témoignés.

Nous tenons à exprimer également nos remerciements à Monsieur Mohamed BOULASBAA , Professeur à l'université KASDI MERBAH de Ouargla UKMO pour l'intérêt porté à notre travail et nous avoir fait l'immense honneur de présider le jury de notre projet de fin d'études.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude au membre de jury Monsieur Naceur AOUNALLAH, maitre-de conférence classe A, à l'université KASDI MERBAH de Ouargla UKMO, pour l'intérêt qu'il a porté à nous, en acceptant d'examiner et juger notre travail.

Nous exprimons aussi nos vifs remerciements à tous nos enseignants du département d'électronique et de Télécommunication de l'université KASDI MERBAH de Ouargla UKMO pour l'effort qu'ils ont déployé afin d'assurer notre formation, pour leurs compétences, et surtout leur modestie.

Nous aimerions aussi remercier nos familles, nos amis, ainsi que tous ceux qui ont contribués de prêt ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Dans ce contexte, notre projet s'est focalisé sur le développement d'une antenne pour étiquette RFID dans le but de la miniaturisation.

Une conception d'antenne en surface plane compacte pour l'identification par radio-fréquence à ultra-haute fréquence (RFID UHF) fonctionnant dans la bande 860-960MHz est étudiée. Pour obtenir une taille compacte de $60 \times 60 \times 0.34 \text{ mm}^3$ pour cette antenne en boucle, la technique d'utilisation de la structure en boucle en méandres est appliquée. L'adaptation d'impédance souhaitable entre l'antenne et la puce RFID est obtenue en appliquant un (T-match). En plus de présenter un gain de 1.68dBi et une portée de lecture allant jusqu'à 13.98m sont également démontrés.

Mots clés—Antenne RFID UHF, antenne étiquette, T-Match, adaptation, bande UHF, miniaturisation.

Abstract

The RFID (Radio Frequency Identification) technology is becoming increasingly important in today's society, particularly in various fields such as access control, localization, healthcare, security, logistics, and many others. The development of this technology brings about new constraints, such as antenna size and the range between the reader and the tag. In this context, our project focuses on the development of a compact RFID tag antenna with the aim of miniaturization. A compact planar antenna design for Ultra-High Frequency (UHF) Radio Frequency Identification (RFID) operating in the 860-960MHz band is being studied. To achieve a compact size of 60x60mm² for this loop antenna, the meander loop structure technique is applied. The desired impedance matching between the antenna and the RFID chip is achieved by employing a T-match. Additionally, good gain and a long reading range of up to 13.98m are also demonstrated.

Keywords—RFID Tag antenna UHF, T-Match, adaptation, bande UHF, miniaturization.

ملخص

تحتل تقنية RFID (تحديد الترددات اللاسلكية) مكانة متزايدة الأهمية في مجتمع اليوم، لا سيما في مجالات متنوعة مثل التحكم في الوصول والموقع والصحة والسلامة والخدمات اللوجستية وغيرها الكثير. يسلط تطوير هذه التكنولوجيا الضوء على قيود جديدة مثل حجم الهوائيات، والنطاق بين القارئ والعلامة، وما إلى ذلك.

في هذا السياق، ركز مشروعنا على تطوير هوائي لعلامات RFID للتصغير.

تجرى دراسة تصميم هوائي سطحي مسطح مدج لتحديد الترددات الفائقة (RFID UHF) في النطاق 860-960 MHz . لتحقيق حجم مدج يبلغ $60 * 60 * 0.34$ ملم تمكعب لهذا الهوائي الحلقي، يتم تطبيق تقنية استخدام بنية الحلقة المتعرجة. يتم تحقيق تكيف المعاوقة المستصوبة بين الهوائي وشريحة RFI د من خلال تطبيق كعب تكيف بسيط (T-match) بالإضافة إلى تقديم مكاسب جيدة ومدى قراءة طويل يصل إلى 13.98 متر

كلمات مفتاحية - هوائي RFID UHF ، T-Match ، تكيف ، نطاق UHF ، شريحة هوائي

Table des matières

Dédicaces	ii
Dédicaces	iii
Remerciements	iv
Résumé	vii
Table des matières	viii
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xiii
Liste des Acronymes et Abréviations	xiv
Liste des Symboles	xv
Introduction Générale	1
1 Généralités sur les antennes RFID	4
1.1 Introduction	5
1.2 Systèmes RFID	5
1.2.1 Lecteur RFID	5
1.2.1.1 Lecteur portable	5
1.2.1.2 Lecteur fixe	6
1.2.2 Etiquettes RFID	6
1.2.2.1 Etiquettes passives	7
1.2.2.2 Etiquettes semi-passives	7
1.2.2.3 Etiquettes actives	7
1.2.2.4 Etiquettes sans puce	8
1.2.3 Principe de fonctionnement des systèmes RFID	8
1.3 Bandes de fréquences d'un système RFID et ses applications	9
1.4 Types de couplages	10
1.4.1 Couplage inductif ou champ proche	11
1.4.2 Couplage radiatif ou champ lointain	12
1.5 Régulations et normes des systèmes RFID	13
1.5.1 Régulations des systèmes RFID	13
1.5.2 Normalisation des systèmes RFID	13
1.6 Domaine d'application de la RFID	15
1.6.1 Gestion de stock	15

1.6.2	Contrôle d'accès	15
1.6.3	Suivi des animaux	15
1.6.4	Paiement sans contact	16
1.6.5	Logistique et transport	16
1.6.6	Bibliothèques	17
1.6.7	Sécurité alimentaire	17
1.6.8	Santé	18
1.7	système RFID UHF passif	18
1.7.1	Généralités sur la RFID UHF passive	18
1.7.2	Critères de performances dans une communication RFID UHF passive	18
1.7.2.1	Transferts d'énergie et d'information entre le lecteur et l'étiquette	18
1.7.2.2	Transfert de puissance entre l'antenne et la puce de l'étiquette RFID	19
1.7.2.3	Distance maximale de lecture de l'étiquette	20
1.7.3	Système RFID UHF passif dans la bande 860-960 MHz et 2.4 GHz	20
1.7.3.1	Système RFID UHF passif à 860-960 MHz	20
1.7.3.2	Système RFID UHF passif à 2.4 GHz	21
1.8	Avantages et limites de la technologie RFID	21
1.8.1	Avantages de la technologie RFID	21
1.8.2	Limite de la technologie RFID	21
1.9	Les paramètres fondamentaux des antennes	22
1.9.1	Paramètres électriques	22
1.9.1.1	Impédance d'entrée de l'antenne	22
1.9.1.2	Bande passante	22
1.9.1.3	Notions de coefficient de Réflexion et de Transmission	23
1.9.1.4	Distance de lecture	24
1.9.2	Paramètres de rayonnement	24
1.9.2.1	Diagramme de rayonnement	24
1.9.2.2	Fonction caractéristique de rayonnement [25]	24
1.9.2.3	Directivité et gain	25
1.9.2.4	Rendement	25
1.9.2.5	Polarisation	25
1.10	Conclusion	27
2	RFID dans les systèmes de contrôle d'accès et localisation	28
2.1	Introduction	29
2.2	RFID dans un système de contrôle d'accès	29
2.3	Domaine d'application d'un système de contrôle d'accès	29
2.3.1	contrôle d'accès RFID dans les bâtiments	29
2.3.2	contrôle d'accès RFID dans les entreprises	30
2.3.3	contrôle d'accès RFID dans les écoles	30
2.3.4	contrôle d'accès RFID dans les hôpitaux	31
2.3.5	Contrôle d'accès RFID des véhicules	31
2.3.5.1	Autoroutes	32
2.3.5.2	Passage des frontières	32
2.3.5.3	Postes de garde	33
2.3.6	Contrôle d'accès RFID dans les universités	33

2.4	Avantages et inconvénients d'un système de contrôle d'accès RFID	34
2.4.1	Avantages	34
2.4.2	Inconvénients	34
2.5	RFID dans un système de localisation	34
2.6	Domaine d'application d'un système de localisation RFID	35
2.6.1	Gestion de la chaîne d'approvisionnement	35
2.6.2	Gestion de stock	35
2.6.3	Suivi des actifs	36
2.6.4	Gestion des soins de santé	36
2.6.5	Suivi des animaux	36
2.7	Avantages et inconvénients d'un système de localisation	37
2.7.1	Avantages	37
2.7.2	Inconvénients	37
2.8	Gestion de stock utilisée par la technologie RFID	37
2.9	Avantages et inconvénients de la gestion de stock	39
2.9.1	Avantages	39
2.9.2	Inconvénients	39
2.10	Conclusion	40
3	Résultats et discussion	41
3.1	Introduction	42
3.2	Conception d'une antenne étiquette RFID UHF passive	42
3.3	Techniques d'adaptation d'impédance pour les étiquettes RFID UHF pas- sives	43
3.4	Présentation de prototypes d'antennes	44
3.5	Conception de l'antenne à éléments en forme de U	45
3.5.1	Adaptation d'impédance entre l'antenne et la puce	45
3.5.2	Modification de la géométrie de l'antenne	46
3.5.3	Alimentation de l'antenne par couplage	47
3.5.4	Adaptation d'impédance	48
3.5.5	Impédance d'entrée en fonction du paramètre L_x	49
3.5.6	Impédance d'entrée en fonction de paramètre L_y	50
3.5.7	Impédance d'entrée en fonction de paramètre D	51
3.5.8	Impédance de l'antenne étiquette	52
3.6	Coefficient de réflexion	53
3.6.1	Représentation du coefficient de réflexion par l'abaque de Smith	54
3.7	Rapport d'ondes stationnaires (ROS)	55
3.8	Gain	55
3.9	Directivité	56
3.10	Efficacité de rayonnement	56
3.11	Diagramme de rayonnement	57
3.12	Portée maximale de l'étiquette	58
3.13	Comparaison des résultats	58
3.14	Conclusion	59
	Conclusion Générale	60

Liste des figures

1.1	Lecteur portable RFID, “intermec” [12].	5
1.2	Portique RFID de l’entreprise IRIS-RFID.	6
1.3	Classification des étiquettes [13].	7
1.4	Fonctionnement général d’un système RFID [15].	8
1.5	Spectre des fréquences RFID [16].	9
1.6	Classement des étiquettes RFID en fonction de leur zone de fonctionnement [17].	10
1.7	Types de couplages RFID [18].	11
1.8	Différentes formes d’étiquette RFID HF (NFC) [15].	12
1.9	Différente forme d’étiquette RFID UHF [17].	12
1.10	Régulation de la puissance pour la RFID UHF/SHF (1.62 W ERP= 1 W EIRP)	13
1.11	Normes ISO pour les différentes familles de système RFID [20].	14
1.12	RFID gestion de stock.	15
1.13	RFID contrôle d’accès.	15
1.14	RFID suivi des animaux.	16
1.15	RFID paiement sans contact.	16
1.16	RFID logistique et transport.	17
1.17	RFID Bibliothèque.	17
1.18	RFID sécurité alimentaire.	17
1.19	RFID dans le domaine de la santé	18
1.20	Modélisation électrique de l’antenne [27].	22
1.21	Estimation de la bande passante d’une antenne à partir de sa courbe du coefficient de réflexion [27].	23
1.22	Illustration du diagramme de rayonnement d’une antenne [30].	25
1.23	Représentation cartésienne d’une polarisation linéaire [27].	26
1.24	Représentation cartésienne d’une polarisation circulaire [27].	27
1.25	Représentation cartésienne de la polarisation elliptique [27].	27
2.1	Contrôle d’accès RFID dans les bâtiments	30
2.2	Contrôle d’accès RFID dans une entreprise	30
2.3	Contrôle d’accès RFID dans une école primaire	31
2.4	Contrôle d’accès RFID dans les hôpitaux	31
2.5	Contrôle d’accès RFID dans les autoroutes	32
2.6	Contrôle d’accès RFID dans un passe-frontière	32
2.7	Contrôle d’accès RFID dans un poste de garde	33
2.8	Contrôle d’accès RFID dans une université	33
2.9	Système de localisation RFID pour chaîne d’approvisionnement	35
2.10	Système de localisation RFID pour la gestion de stock	35

2.11	Système de localisation RFID pour suivi des actifs	36
2.12	Système de localisation RFID pour suivi des soins de santé	36
2.13	Système de localisation RFID pour le suivi des animaux	37
2.14	Gestion de stock utilisée dans la technologie RFID	38
2.15	Vérification des produits par la technologie RFID dans la gestion de stock	38
2.16	Technologie RFID utilisée pour suivre des produits	39
3.1	méthodologie de développement de la conception d'une antenne étiquette RFID UHF passive.	42
3.2	Circuit équivalent de configuration de T-Match (a) – circuit en série [43]; (b) – circuit en parallèle [44].	43
3.3	Antenne étiquette RFID	44
3.4	Antenne étiquette RFID	44
3.5	Géométrie de l'antenne à éléments en forme de U.	45
3.6	Impédance d'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence	46
3.7	Géométrie de l'antenne modifiée.	46
3.8	Géométrie de l'antenne modifiée	47
3.9	Géométrie de l'antenne proposée.	48
3.10	Impédance d'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence	48
3.11	Partie réelle en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre L_x	49
3.12	Partie imaginaire en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre L_x	49
3.13	Partie réelle en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre L_y	50
3.14	Partie imaginaire en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre L_y	50
3.15	Partie réelle en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre D	51
3.16	Partie imaginaire en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre D	51
3.17	Impédance d'entrée de l'antenne optimisée en fonction de la fréquence	52
3.18	Représentation du port d'alimentation et de la puce	53
3.19	Impédance aux bornes du port d'excitation en fonction de la fréquence	53
3.20	Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre D	54
3.21	coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne proposée.	54
3.22	coefficient de réflexion en fonction de l'impédance.	55
3.23	Rapport d'onde stationnaire (VSWR) en fonction de la fréquence	55
3.24	Gain en fonction de la fréquence	56
3.25	Directivité en fonction de la fréquence	56
3.26	Efficacité en fonction de la fréquence	57
3.27	Diagramme de rayonnement en 3D.	57
3.28	représentation polaire du diagramme de rayonnement.	58

Liste des tableaux

1.1	Spectres alloués à la RFID UHF en fonction de la région [10].	13
1.2	Normes ISO 18000 pour la standardisation des systèmes RFID [19].	14
3.1	Dimensions de l'antenne MLA	45
3.2	Dimensions de l'antenne MLA	47
3.3	paramètres de l'antenne étiquette	48
3.4	Valeur de l'impédance d'entrée pour des valeurs types du paramètre Lx à 915 MHz	50
3.5	Valeur de l'impédance d'entrée pour des valeurs types du paramètre Ly à 915 MHz	51
3.6	valeurs optimales des paramètres de l'antenne proposée	52
3.7	valeurs optimales des paramètres de l'antenne proposée	52
3.8	Tableau de comparaison	59

Liste des Acronymes et Abréviations

BPF	La Bande Passante Fractionnelle
CST	Computer Simulation Technology
EM	Electro Magnétique
EPC Gen 2	Electronic Product Code Generation 2
ERP	Effective Radiated Power
ERIP	Equivalent Isotropically Radiated Power
ETSI	l'Institut Européen des Standards de Télécommunications (en anglais, European Telecomm
FCC	La Commission Fédérale des Communications (en anglais, Federal Communication Commi
FCR	La fonction caractéristique de rayonnement
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
HF	High Frequency
ID	IDentification
ISM	Industrial Scientific Medical
ISO	Organization International de Normalization
LBT	Listen Before Talk
LF	Low Frequency
LHCP	Left Handed Circular Polarization
MLA	Meander Loop Antenna
NFC	Near Field Communication
PIRE	Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente
RA	Rapport Axial
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
RHCP	Right Handed Circular Polarization
SAW	Surface Acoustic Wave
SHF	Super High Frequency
TAG	Transponder And Reader of Identification
UHF	Ultra High Frequency
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

Liste des Symboles

f_c	Fréquence centrale
f_1	Fréquence inférieure
f_2	Fréquence supérieure
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
Γ^*	Le coefficient d'adaptation-conjuguée de réflexion
s_{11}	Le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne
ϵ	Permittivité diélectrique
ϵ_r	Permittivité diélectrique relative
$\tan \delta$	Tangente de perte
Δf	Largeur de bande
η	Rendement de rayonnement
$r(\theta, \varphi)$	La fonction caractéristique de rayonnement
$P(\theta, \varphi)$	Puissance dans la direction (θ, φ)
$P(\theta_0, \varphi_0)$	Puissance dans la direction de rayonnement maximal
$D(\theta, \varphi)$	Directivité dans la direction (θ, φ)
$G(\theta, \varphi)$	Gain dans la direction (θ, φ)
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
E	Le vecteur champ électrique
E	Le vecteur champ électrique
H	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
ω	La pulsation en radians par seconde, égale à $2\pi f$
k	Le nombre d'onde en radians par mètre
φ	La phase
φ_x	La phase initiale de la composante E_x

φ_y	La phase initiale de la composante E_y
τ	Coefficient de transmission
P_A	La puissance d'alimentation disponible au générateur
P_T	la puissance appliquée ou transmise à l'antenne
P_R	La puissance rayonnée par l'antenne
G_R	Gain réalisé
G	Gain
D	Directivité
Z_{Chip}	L'impédance de la puce
Z_t	L'impédance du stub
R_{Ray}	La résistance de rayonnement de l'antenne
P_{th}	La puissance minimum d'activation d'étiquette appelée la sensibilité
λ	La longueur d'onde
χ	Coefficient d'adaptation de polarisation entre l'antenne du lecteur et l'antenne du Tag
Z_t	l'impédance du T-match.
Z_a	l'impédance équivalente de l'antenne.
α	le facteur de division de courant entre les deux conducteurs.

Introduction Générale

Ces dernières années, la technologie de radio-identification par fréquence (RFID) fonctionnant dans la bande ultra-haute fréquence (UHF) a attiré une attention considérable en raison de ses excellentes caractéristiques telles qu'une longue portée de lecture, un débit élevé et une petite taille. Les systèmes RFID UHF ont de nombreuses applications dans le suivi des actifs [1], notamment l'identification d'objets, la collecte électronique de péage [2], les soins de santé [3], le contrôle d'accès [2], la gestion de la chaîne d'approvisionnement [4], les usines et les entrepôts [5, 6].

La technologie RFID utilise différentes bandes de fréquence, notamment la basse fréquence (LF) de 125/135 KHz, la haute fréquence (HF) de 13,56 MHz, l'ultra-haute fréquence (UHF) de 860-960 MHz, ainsi que les bandes micro-ondes de 2400-2485 MHz et 5725-5875 MHz. Les systèmes RFID utilisant la bande UHF offrent des avantages tels qu'une portée de détection plus longue, une lecture plus rapide et une capacité de stockage d'informations plus importante par rapport aux systèmes utilisant les basses et hautes fréquences (LF et HF). Dans les systèmes RFID passifs, où les étiquettes ne sont pas alimentées par une batterie, l'antenne de l'étiquette joue un rôle clé dans la collecte de l'énergie à partir de l'onde électromagnétique émise par le lecteur [7].

Cependant, de nombreux défis subsistent, notamment en ce qui concerne la taille des antennes d'étiquettes RFID, qui ne sont pas toujours compatibles avec certaines applications telles que le contrôle d'accès, le suivi des actifs et la gestion de stock. Par exemple dans [5], l'antenne présente une grande taille de 150x150x0.339 mm³ avec un faible gain de -4.45 dBi avec une portée de lecture de 7.317 m. Dans [8], la structure de l'antenne proposée ayant une faible taille de 60x45x1.6 mm³ avec un gain relativement faible de 0.95 dBi et une courte portée allant jusqu'à 6.2 m. Dans le travail [9], l'antenne présente une grande taille de 127.9 x189.6 x21.6 mm³, un bon gain de 6 dBi et une portée de lecture de 8m, ce qui signifie que ces antennes ne peuvent pas être compatibles à quelques applications. Alors que notre antenne proposée en boucle à méandres de forme circulaire fait la différence en termes de taille, de gain et de portée de lecture à savoir : une petite taille de 60 x 60 x 0.34 mm³, un gain acceptable de 1.68 dBi, une longue portée de 13.98 m avec un rayonnement omnidirectionnel.

Dans le cadre de notre projet, nous nous sommes concentrés sur la conception d'une antenne compacte plane miniature en boucle pour l'identification par radiofréquence (RFID UHF passif) fonctionnant dans la bande 860-960 MHz. Nous avons utilisé le simulateur CST Studio Microwave pour faciliter le développement de cette antenne et lui permettre de s'adapter à diverses applications.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous présenterons les généralités sur les systèmes RFID, leurs composants, leurs principes de fonctionnement, leurs régulations et leurs normes. Nous examinerons également les domaines d'application des systèmes RFID et discuterons des paramètres fondamentaux des antennes, ainsi que de leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre abordera les systèmes RFID utilisés dans le contrôle d'accès et la localisation, en fournissant des informations générales sur leur utilisation, leurs avantages et leurs inconvénients, ainsi que leurs domaines d'applications. Nous introduirons également l'utilisation des systèmes RFID dans la gestion de stock, en discutant de leurs avantages et inconvénients spécifiques à ce domaine.

Le troisième chapitre sera consacré pour concevoir une antenne étiquette RFID UHF passive ayant une impédance adaptée avec l'impédance d'entrée de la puce préalablement choisie. L'adaptation nécessite une étude paramétrique de l'adaptateur utilisé, qui est le T-match, à la fréquence 915 MHz. Les résultats obtenus seront comparés avec ceux des

autres travaux déjà réalisés.

Chapitre 1

Généralités sur les antennes RFID

Sommaire

1.1 Introduction	5
1.2 Systèmes RFID	5
1.2.1 Lecteur RFID	5
1.2.2 Etiquettes RFID	6
1.2.3 Principe de fonctionnement des systèmes RFID	8
1.3 Bandes de fréquences d'un système RFID et ses applications	9
1.4 Types de couplages	10
1.4.1 Couplage inductif ou champ proche	11
1.4.2 Couplage radiatif ou champ lointain	12
1.5 Régulations et normes des systèmes RFID	13
1.5.1 Régulations des systèmes RFID	13
1.5.2 Normalisation des systèmes RFID	13
1.6 Domaine d'application de la RFID	15
1.6.1 Gestion de stock	15
1.6.2 Contrôle d'accès	15
1.6.3 Suivi des animaux	15
1.6.4 Paiement sans contact	16
1.6.5 Logistique et transport	16
1.6.6 Bibliothèques	17
1.6.7 Sécurité alimentaire	17
1.6.8 Santé	18
1.7 système RFID UHF passif	18
1.7.1 Généralités sur la RFID UHF passive	18
1.7.2 Critères de performances dans une communication RFID UHF pas- sive	18
1.7.3 Système RFID UHF passif dans la bande 860-960 MHz et 2.4 GHz	20
1.8 Avantages et limites de la technologie RFID	21
1.8.1 Avantages de la technologie RFID	21
1.8.2 Limite de la technologie RFID	21
1.9 Les paramètres fondamentaux des antennes	22
1.9.1 Paramètres électriques	22
1.9.2 Paramètres de rayonnement	24
1.10 Conclusion	27

1.1 Introduction

L'identification par radiofréquence (RFID), est une technologie intelligente qui est très performante, flexible et convient bien pour des opérations automatiques. A la différence d'autres technologies d'identification comme les codes à barres, la RFID est une méthode d'identification qui utilise les ondes radio RF pour lire les données contenues dans des dispositifs appelés étiquettes ou (tag RFID en anglais) d'une façon rapide et plus fiable. Les systèmes RFID UHF ont d'énormes applications dans les opérations de détection et de suivi sans fil, notamment l'identification des objets, la collecte de péage électronique, les soins de santé, les réseaux de capteurs distribués, le contrôle d'accès, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et la détection d'activités frauduleuses dans les magasins de détail, les usines et les entrepôts [6, 10].

Ce premier chapitre est organisé comme suit : Nous introduirons quelques notions sur la technologie RFID, les différents constituants d'un système RFID seront décrites à savoir : le lecteur, les étiquettes et les systèmes de traitement de données, nous donnons aussi le principe de fonctionnement, ensuite, les différents types d'étiquettes ainsi que la régulations et normes de la technologie RFID, les types de couplage, et nous aborderons ensuite les systèmes RFID UHF passif, ainsi que quelques applications de la technologie RFID. Nous terminerons par les différents avantages et limites de la technologie RFID et les paramètres d'antennes.

1.2 Systèmes RFID

Un système RFID se compose d'un lecteur, d'une étiquette ou (transpondeur) et d'un terminal qui permet l'exploitation des données collectées.

1.2.1 Lecteur RFID

Selon les applications visées, le lecteur RFID peut se présenter sous deux formes : portable ou fixe.

1.2.1.1 Lecteur portable

Les lecteurs RFID portables doivent être peu encombrants pour être maniés par un utilisateur. Ils sont composés d'une antenne et d'un système d'exploitation qui permet d'identifier les étiquettes. Un lecteur portable développé par l'entreprise Intermec est présenté sur la Figure 1.1 [11].



FIGURE 1.1 – Lecteur portable RFID, “intermec” [12].

1.2.1.2 Lecteur fixe

Le lecteur RFID fixe est implanté dans des systèmes de portique à travers lesquels les étiquettes transitent figure 1.2. Pour pouvoir détecter les étiquettes, l'antenne du lecteur doit respecter un cahier des charges : une polarisation, un rayonnement avec de faibles lobes secondaires afin de ne pas détecter des étiquettes à proximité de la zone de lecture, et un gain suffisamment élevé pour pouvoir détecter les étiquettes à une distance raisonnable [11].

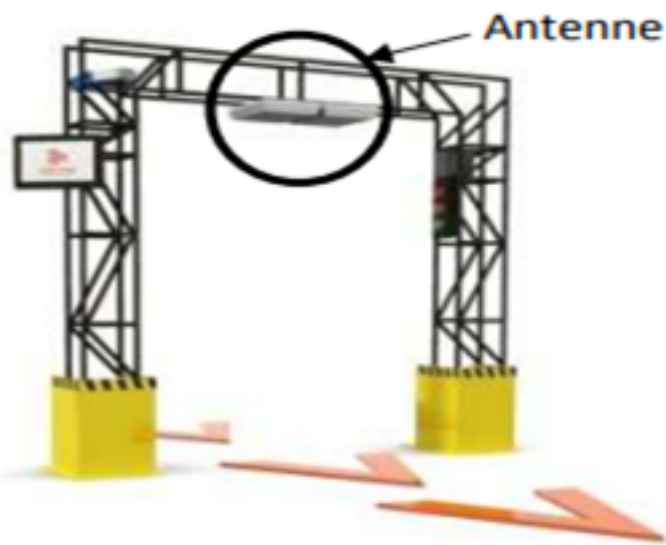


FIGURE 1.2 – Portique RFID de l'entreprise IRIS-RFID.

1.2.2 Étiquettes RFID

Différentes étiquettes sont présentées en fonction de la bande de fréquence utilisée. Ces mêmes étiquettes peuvent être classées selon un aspect technologique. En effet, selon les applications visées les étiquettes doivent répondre à des besoins différents. Les différentes classes d'étiquettes sont présentées ci-dessous [11].

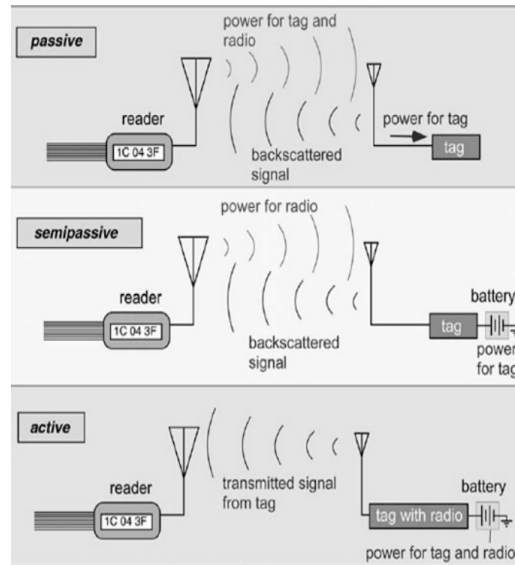


FIGURE 1.3 – Classification des étiquettes [13].

1.2.2.1 Étiquettes passives

L'étiquette passive est l'étiquette la plus utilisée dans l'industrie RFID. Ceci est principalement dû à son faible coût et à sa facilité de fabrication. L'étiquette utilise l'onde RF reçue du lecteur pour alimenter la puce et rétromodule cette onde pour renvoyer son identifiant. L'inconvénient de ce type d'étiquette est leurs utilisations à faible distance [11].

1.2.2.2 Étiquettes semi-passives

La deuxième catégorie d'étiquette concerne les étiquettes semi-passives. Ils comportent une batterie afin d'alimenter la puce de l'étiquette. L'information est renvoyée de la même façon qu'avec une étiquette passive c'est à-dire par rétro-modulation. Le dialogue entre un lecteur et une étiquette semi-ipeut aller jusqu'à 100 m dû au seuil de sensibilité plus faible que pour les étiquettes passives. La majeure partie des étiquettes semi-actives sont utilisées en tant que capteur afin de renvoyer une information sur le milieu dans lequel ils se trouvent [11].

1.2.2.3 Étiquettes actives

Les étiquettes actives sont dotées d'une source d'énergie qui leur permet d'alimenter leur chaîne de transmission RF. L'avantage de ce type d'étiquette est de permettre des communications de plus de 100 m [14]. Leur inconvénient réside dans le coût et la durée de vie limitée de la batterie embarquée.

Ces étiquettes trouvent leurs places dans des applications de surveillance à la personne et de traçabilité logistique.

Les différents types d'étiquettes sont classifiés selon la figure 1.3 [11] :

1.2.2.4 Étiquettes sans puce

Ce sont des étiquettes qui ne disposent pas de circuit électronique et qui utilisent des principes physiques ou chimiques pour générer un code d'identification (ID). Un exemple d'étiquette « chipless » est l'étiquette SAW (Surface Acoustic Wave, pour onde acoustique de surface). Illustre le fonctionnement d'un tel transpondeur. Ce type d'étiquette est constituée de réflecteur positionné sur un matériau piézoélectrique et d'une antenne reliée à un transducteur qui transforme les ondes radiofréquences en ondes acoustiques et vice versa. Cette technique fonctionne très bien à 2.4 GHz. A des fréquences plus élevées, les pertes sont trop grandes pour que ce principe soit utilisé [15].

1.2.3 Principe de fonctionnement des systèmes RFID

Un système RFID est composé de deux entités qui communiquent entre elles :

- Une étiquette intelligente, associée à l'élément à identifier qui est capable de répondre à une demande venant d'un lecteur.
- Une station de base ou lecteur RFID qui a pour mission d'identifier l'étiquette. Le lecteur envoie une onde électromagnétique en direction de l'élément à identifier. En retour, il reçoit l'information renvoyée par l'étiquette. La Figure 1.4 présente le fonctionnement général d'un système RFID.

Le lecteur agit généralement en maître par rapport à l'étiquette, si l'étiquette est dans la zone de lecture du lecteur, ce dernier l'active en lui envoyant une onde électromagnétique et entame la communication.

Le lecteur est relié à une application hôte qui récupère l'information pour la traiter.

Un lecteur RFID est donc chargé de l'interface avec le système global relatif à l'application et de la gestion de l'identification des étiquettes qui se présentent à lui. L'étiquette est, quant à elle, constituée d'une antenne et d'une puce électronique [15].

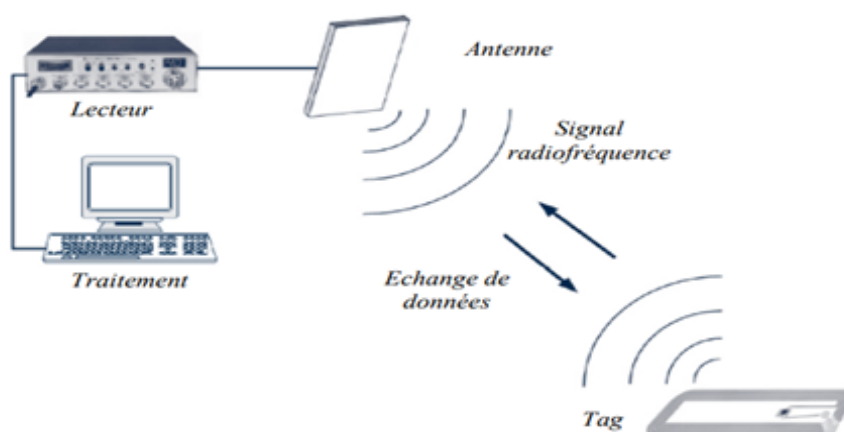


FIGURE 1.4 – Fonctionnement général d'un système RFID [15].

1.3 Bandes de fréquences d'un système RFID et ses applications

Au niveau d'une communication RFID, les signaux échangés entre le lecteur et les étiquettes doivent être sécurisés. La RFID doit cohabiter d'un point de vue spectral avec d'autres technologies sans fil. Pour la RFID, nous distinguons les bandes suivantes Fig. 1.5 [16] :

- La bande LF à 125 kHz et 143 kHz
- La bande HF à 13.56 MHz
- La bande UHF 860-960 MHz
- La bande SHF à 2.45 et 5.8 GHz

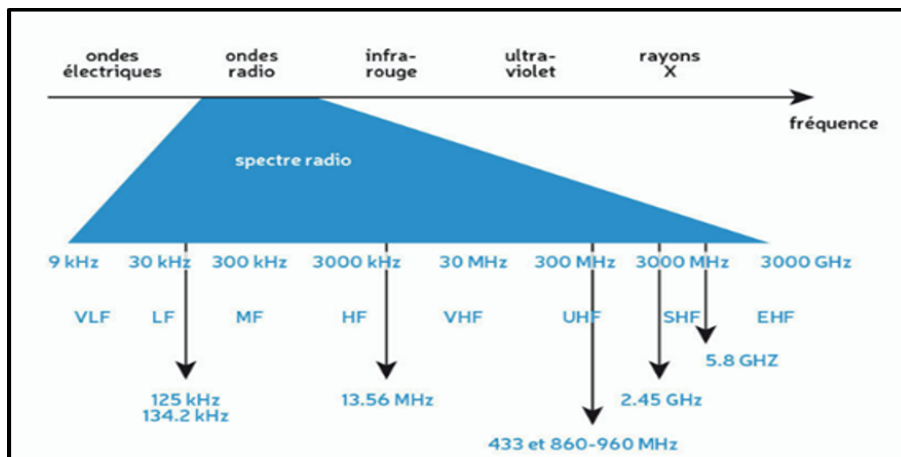


FIGURE 1.5 – Spectre des fréquences RFID [16].

Les bandes de fréquences sont utilisées dans différents domaines d'application. Voici quelques exemples pour les bandes de fréquences LF, HF, UHF et SHF :

- **LF (30 kHz - 300 kHz) :** Cette bande de fréquence est utilisée pour les systèmes de navigation et de communication maritime, les systèmes de localisation de sous-marins, les systèmes de radiodiffusion à très longue portée et les systèmes de communication avec des navires et des avions [16].
- **HF (3 MHz - 30 MHz) :** Cette bande de fréquence est utilisée pour les communications longue distance, comme la radiodiffusion internationale, la communication entre avions et navires, les systèmes de communication militaires et les systèmes de communication d'urgence [16].
- **UHF (300 MHz - 3 GHz) :** Cette bande de fréquence est utilisée pour les systèmes de communication sans fil, tel que les téléphones portables, les radios bidirectionnelles, les systèmes de communication par satellite, les systèmes de télévision par

câble et les réseaux de communication sans fil [15].

- **SHF (3 GHz - 30 GHz) :** Cette bande de fréquence est utilisée pour les systèmes de communication haute vitesse, comme les réseaux de communication par satellite, les systèmes de communication militaires, les systèmes de communication de données à haut débit, les systèmes de radar à courte portée et les systèmes de transmission de télévision par satellite [15].

1.4 Types de couplages

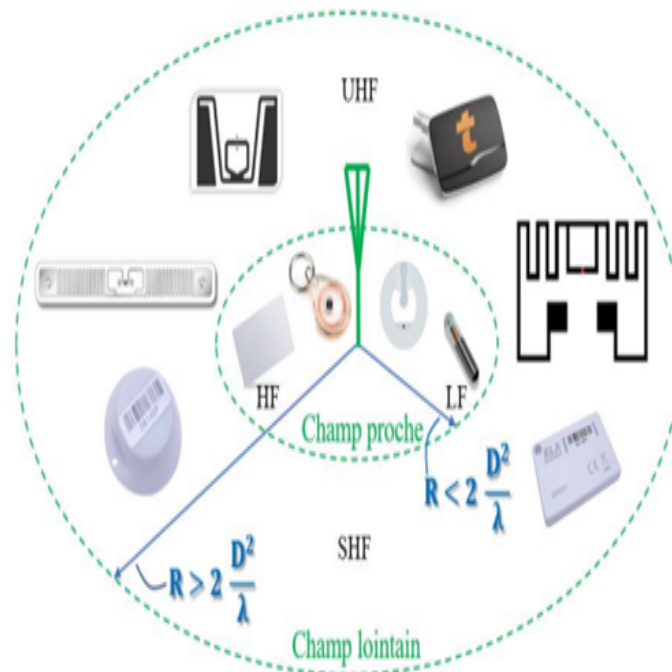


FIGURE 1.6 – Classement des étiquettes RFID en fonction de leur zone de fonctionnement [17].

Les ondes électromagnétiques sont générées par l'antenne représentée au centre dans la Figure 1.6. En fonction de la distance R , elles se comportent de manières différentes. Nous parlons de zone de champ proche lorsque la distance R est petite devant la longueur d'onde, de zone de champ lointain si R devient significative devant λ . Cette distance est donnée dans la Figure 1.6, elle dépend de D , la dimension de l'antenne émettrice et de la longueur d'onde associée à la fréquence de fonctionnement par [17] :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

Les ondes électromagnétiques voyagent dans le vide à la vitesse de la lumière (et presque aussi vite dans l'air), avec $c = 300000 \text{ km / s}$. À l'aide de cette relation, on remarque simplement que si la fréquence est petite, la longueur d'onde est très grande, et donc pour

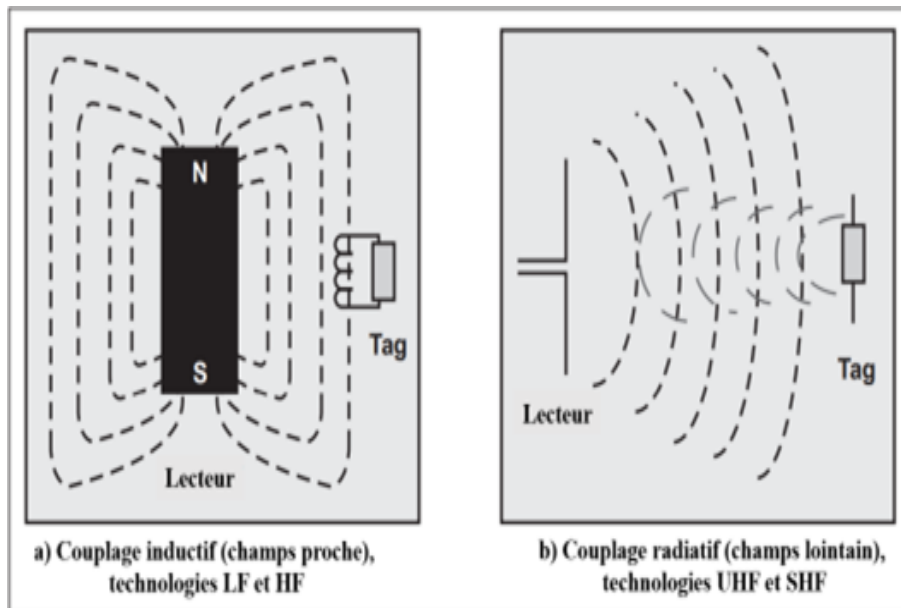


FIGURE 1.7 – Types de couplages RFID [18].

que l'antenne rayonne de manière efficace en champ lointain, il faut que sa longueur physique soit proche de la longueur d'onde à la fréquence considérée.

Pour les fréquences basses (LF) et hautes (HF) en RFID, il est impossible d'avoir des antennes d'un ordre de grandeur d'un kilomètre ou même du mètre. C'est pourquoi les systèmes où la longueur d'onde est beaucoup plus grande que l'antenne sont généralement couplés par induction magnétique : presque toute l'énergie disponible est contenue dans une région proche de l'antenne du lecteur voir Figure 1.7a. Dans cette région, la communication entre l'étiquette et le lecteur est effectivement instantanée puisque le temps de propagation vers l'étiquette est faible. Par contre, lorsque la fréquence est grande, la taille de l'antenne diminue en conséquence, par exemple pour les ultras hautes fréquences (UHF) la taille de l'antenne est de l'ordre de la dizaine de centimètres. Dans cette région d'espace le couplage est réalisé par radiation voir Figure 1.7b puisque l'antenne est de taille comparable à la longueur d'onde.

1.4.1 Couplage inductif ou champ proche

En radio fréquence, lorsque l'antenne est bien accordée à l'impédance de la puce. Le champ électromagnétique généré par le lecteur, induit un courant au niveau de l'antenne de l'étiquette, ce qui permet d'alimenter la puce. Ensuite, afin de générer une réponse en retour il suffit à la puce de moduler sa charge pour que le lecteur soit directement impacté par ces variations de courant et ainsi en déduire une réponse voir Figure 1.7a [17].

L'antenne utilisée en couplage inductif est sous forme de boucle voir Figure 1.8. Les bandes LF et HF sont principalement utilisées pour l'identification des animaux, les titres de transport et le paiement sans contacts. En NFC, les antennes présentent des formes très proches les unes des autres. Elles sont composées de boucles de conducteurs formant plusieurs enroulements afin d'obtenir une valeur d'inductance de quelques μH . Ce sont donc des selfs à air planaires facilement intégrables dans des objets tel que des tickets papier, des jetons ou des cartes de crédit.

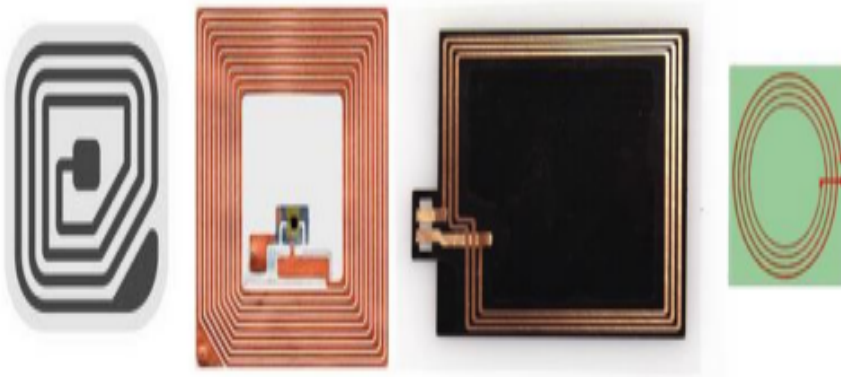


FIGURE 1.8 – Différentes formes d'étiquette RFID HF (NFC) [15].

1.4.2 Couplage radiatif ou champ lointain

En bande UHF ou SHF, l'échange des données est basé sur la propagation d'onde électromagnétique (EM) Figure 1.7b. Lorsqu'un signal haute fréquence est appliqué à l'antenne du lecteur, une onde EM est générée. De manière réciproque, si l'antenne de l'étiquette est placée dans le champ EM généré par le lecteur, une tension électrique apparaît à ses bornes. Cette tension est utilisée pour alimenter la puce de l'étiquette. Les antennes des étiquettes RFID UHF passifs en couplage radiatif se déclinent suivant une multitude de géométries différentes voir Figure 1.9. Le choix d'une antenne RFID est en grande partie défini par l'application. La première contrainte est le prix de l'antenne, celui-ci comprend le substrat, le moyen de fixation de la puce et le matériau composant l'antenne (cuivre, encre conductrice, etc...). La seconde contrainte est la taille de l'antenne, puisqu'elle fixe la taille finale de l'étiquette. Cette dernière dépend fortement de l'application [17].

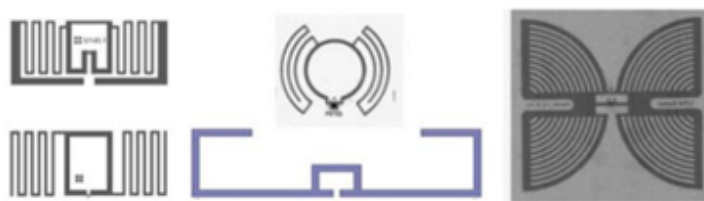


FIGURE 1.9 – Différente forme d'étiquette RFID UHF [17].

On peut citer également : la polarisation de l'antenne (défini comme étant la direction privilégiée de l'onde émise/reçue par l'antenne) qui en modifie la forme, l'adaptation entre l'antenne et la puce RFID, permettant un bon transfert de puissance d'alimentation. Et également l'efficacité de rayonnement de l'antenne permettant d'avoir une communication correcte quelles que soient les propriétés diélectriques ou conductrices des objets sur lesquels elle est apposée (papier, plastique, métal, etc.) [17].

1.5 Régulations et normes des systèmes RFID

1.5.1 Régulations des systèmes RFID

La réglementation régissant les systèmes RFID dépend des autorités publiques. Elle est différente d'un pays à l'autre ce qui ne facilite pas la mise en place d'un système universel particulièrement intéressant dans le contexte actuel de la mondialisation. La technologie RFID ne peut utiliser que les gammes de fréquences allouées aux applications industrielles, scientifiques ou médicales, appelées bandes ISM (Industrial Scientific Medical). Ces bandes présentent l'avantage d'être libre de droit. Cependant, elles ne bénéficient pas d'une harmonisation au niveau international. De plus ces bandes de fréquences sont utilisées par bien d'autres technologies de communication sans fil. En ce qui concerne les systèmes RFID fonctionnant par couplage inductif, les fréquences 125 kHz et 13,56 MHz font l'objet d'un consensus international. Cependant, ce n'est pas encore le cas pour les fréquences UHF pour lesquelles on distingue 3 régions. Le Tableau 1.1 [10] et la figure 1.10 présentent en fonction de ces régions, les bandes de fréquences et les puissances allouées à la RFID UHF.

TABLEAU 1.1 – Spectres alloués à la RFID UHF en fonction de la région [10].

région	bande de fréquence	Puissances autorisées
Europe	869,4 à 869,65 MHz	500 mW ERP
	865 à 868 MHz	100 mW ERP -LBT
	865,6 à 867,6 MHz	2 W ERP – LBT (10 canaux de 200 kHz)
	865,6 à 868 MHz	500 mW ERP – LBT
Amérique	902 à 928 MHz	4 W EIRP - FHSS (80 canaux de 325 kHz)
Asie et Océan	Japon : 952 à 954 MHz	4 W EIRP
	Corée : 908,5 à 914 MHz	4 W EIRP
	Australie : 915 à 928 MHz	1 W EIRP

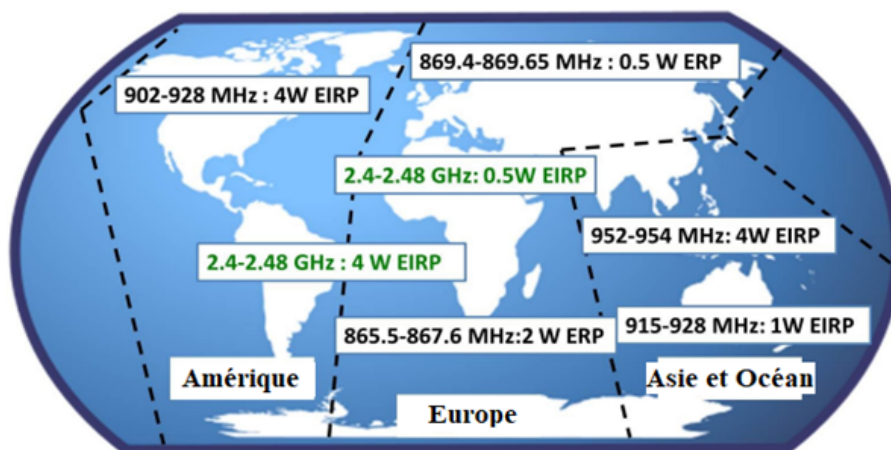


FIGURE 1.10 – Régulation de la puissance pour la RFID UHF/SHF (1.62 W ERP= 1 W EIRP)

1.5.2 Normalisation des systèmes 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

TABLEAU 1.2 – Normes ISO 18000 pour la standardisation des systèmes RFID [19].

Références	Fréquences concernées	Intitulé	Statut
18000-1	Vocabulaire et définitions	RFID pour la gestion d'objet – Partie I : 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 I 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 1 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 A 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 A 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 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 A 433 MHz	Publié le 12/12/2005

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 1.2 et la figure 1.11 présentent 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 [10].

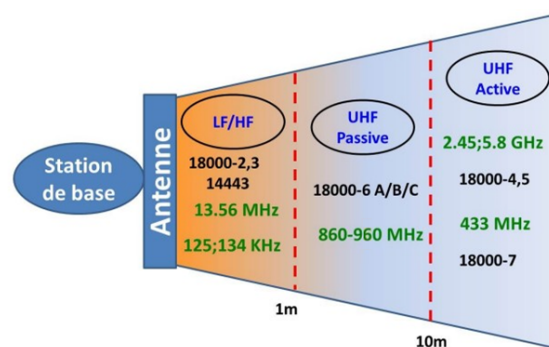


FIGURE 1.11 – Normes ISO pour les différentes familles de système RFID [20].

1.6 Domaine d'application de la RFID

La technologie RFID (Radio-Frequency Identification) est utilisée pour suivre et identifier des objets à distance en utilisant des ondes radio. Voici quelques exemples d'applications courantes de la technologie RFID :

1.6.1 Gestion de stock

Les entreprises peuvent utiliser la technologie RFID pour suivre et gérer les stocks de produits en temps réel, ce qui permet une gestion plus efficace des inventaires [21].



FIGURE 1.12 – RFID gestion de stock.

1.6.2 Contrôle d'accès

Les cartes d'accès RFID peuvent être utilisées pour contrôler l'accès aux zones sécurisées dans les entreprises et les bâtiments gouvernementaux [22].



FIGURE 1.13 – RFID contrôle d'accès.

1.6.3 Suivi des animaux

Les animaux peuvent être équipés de puces RFID pour permettre leur identification et leur suivi.



FIGURE 1.14 – RFID suivi des animaux.

1.6.4 Paiement sans contact

Les cartes de crédit et les téléphones mobiles équipés de la technologie NFC (Near Field Communication) utilisent la technologie RFID pour permettre des paiements sans contact, comme présenté sur la figure 1.15 [21].



FIGURE 1.15 – RFID paiement sans contact.

1.6.5 Logistique et transport

La technologie RFID peut être utilisée pour suivre les colis et les produits tout au long de la chaîne d'approvisionnement, ce qui permet une gestion plus efficace des livraisons et une réduction des erreurs, comme présenté sur la figure 1.16 [22].



FIGURE 1.16 – RFID logistique et transport.

1.6.6 Bibliothèques

Les bibliothèques peuvent utiliser la technologie RFID pour suivre les livres et les médias empruntés, ce qui facilite la gestion de leur inventaire et la gestion des prêts, comme présenté sur la figure 1.17 [21].



FIGURE 1.17 – RFID Bibliothèque.

1.6.7 Sécurité alimentaire

La technologie RFID peut être utilisée pour suivre les aliments tout au long de la chaîne d'approvisionnement, ce qui permet de garantir la sécurité alimentaire en cas de rappel de produits, comme présenté sur la figure 1.18.



FIGURE 1.18 – RFID sécurité alimentaire.

1.6.8 Santé

Les bracelets RFID peuvent être utilisés pour suivre les patients dans les hôpitaux et les cliniques. Cela permet de s'assurer que les patients sont là où ils sont censés être et de réduire les risques de perte ou de confusion comme présenté sur la figure 1.19 [21].



FIGURE 1.19 – RFID dans le domaine de la santé

1.7 système RFID UHF passif

1.7.1 Généralités sur la RFID UHF passive

Une communication RFID UHF passive est donc basée sur l'utilisation d'étiquettes passives (étiquettes qui n'embarquent pas de source d'alimentation). Le lecteur RFID entame la communication en transmettant une onde électromagnétique qui se propage en champ lointain et qui permet d'alimenter l'étiquette (ou les étiquettes) placée(s) à une certaine distance. L'étiquette communique son identifiant au lecteur sous forme d'onde dite rétro-modulée. Cette onde rétro-modulée est le résultat de la réflexion de l'onde émise par le lecteur au niveau de l'étiquette. En effet, l'étiquette commute l'impédance de sa puce selon deux états, modifiant le coefficient de réflexion, et par conséquent, la capacité de l'étiquette à réfléchir plus ou moins l'onde émise. Les deux états d'impédance permettent ainsi de moduler l'onde renvoyée (réfléchi). Le lecteur reçoit le signal modulé et le décode pour obtenir l'information retournée par l'étiquette (dont son identifiant). Dans le cas où plusieurs étiquettes sont présentes dans le voisinage de l'étiquette d'intérêt, un protocole de communication standardisé permet de gérer les échanges entre lecteur et les étiquettes, et ce protocole peut s'appuyer sur un système d'anticollision. Dans la spécification EPC Gen 2, la fréquence du signal modulant au niveau de l'étiquette est comprise entre 40 KHz et 640 KHz pour une fréquence de la porteuse comprise entre 860 MHz et 960 MHz [23].

1.7.2 Critères de performances dans une communication RFID UHF passive

1.7.2.1 Transferts d'énergie et d'information entre le lecteur et l'étiquette

Les performances d'une communication RFID dépendent, de façon complémentaire, de plusieurs caractéristiques du lecteur et de l'étiquette. Le lecteur émet une onde sinusoïdale radiofréquence qui a pour objectif, d'une part, d'alimenter l'étiquette, et d'autre

part, d'opérer l'échange d'informations (en mode émetteur, l'onde émise est alors modulée). Le maximum du niveau de puissance émis par le lecteur est réglementé. Il peut être défini à partir de la Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE) qui correspond au produit de la puissance appliquée ou transmise à l'antenne (P_{th}) par le gain de l'antenne (P_{Gr}). En Europe, le niveau maximum de la PIRE est imposé par l'institut européen des standards de télécommunications (en anglais, European Telecommunication Standards Institute, ETSI) et est égal à 3.2 W (pour la bande de fréquence d'origine); aux Etats-Unis, il est imposé par la commission fédérale des communications (en anglais, Federal Communication Commission, FCC) et vaut 4 W [23].

Ainsi, pour activer la puce d'étiquette, le lecteur RFID doit transmettre une puissance suffisante (dans la limite autorisée) pour atteindre la puissance minimale d'activation de l'étiquette (P_{th}), appelée la sensibilité de l'étiquette, de l'ordre de -25 dBm pour les plus faibles. Une fois la communication établie, le lecteur (en mode récepteur) doit être en mesure de détecter l'information retournée par l'étiquette, c'est-à-dire de la démoduler. Il faut donc qu'il soit capable de détecter le signal rétrodiffusé en tant que tel, mais aussi de distinguer les deux niveaux correspondant à la modulation. La sensibilité (ici de réception) d'un lecteur RFID est de l'ordre de -100 dBm pour les plus performants [23].

D'un point de vue rayonnement électromagnétique, la polarisation des antennes est aussi un élément fondamental en radio. Le facteur de pertes lié à la polarisation (χ), qui se définit par le produit scalaire des vecteurs unitaires des longueurs effectives respectifs de l'antenne d'émission et l'antenne de réception, est compris entre 0 et 1. En RFID, le lecteur présente généralement une antenne polarisée circulairement de sorte à ne pas privilégier une direction particulière, et les étiquettes sont généralement dotées d'une «simple» antenne de type dipôle de (G_t), donc polarisée linéairement. Une perte en termes de polarisation de 3 dB est donc constatée.

1.7.2.2 Transfert de puissance entre l'antenne et la puce de l'étiquette RFID

Le transfert de puissance entre l'antenne et la puce de l'étiquette RFID est optimal (c'est-à-dire que 50% de la puissance est effectivement transmise) si la condition, bien connue dans le domaine radiofréquence, d'adaptation d'impédance est vérifiée : l'impédance de l'antenne (Z_{ant}) doit donc être égale au complexe conjugué de l'impédance de la puce (Z_{Chip}) dans la bande de fréquences d'intérêt, soit :

$$Z_{ant} = Z_{chip}^* \quad (1.2)$$

avec

$$Z_{chip} = R_{chip} + jX_{chip} \quad (1.3)$$

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} \quad (1.4)$$

soit donc,

$$R_{chip} = R_{ant} \quad (1.5)$$

$$X_{chip} = -X_{ant} \quad (1.6)$$

Il est à noter qu'en RFID, la traditionnelle adaptation 50 Ω n'a donc pas vraiment de sens pour concevoir une étiquette. En général, l'impédance de la puce est imposée (disponible dans les données constructeur) et est utilisée pour concevoir l'antenne ou le réseau d'adaptation, de sorte à réaliser l'adaptation d'impédance [23].

Le coefficient de transmission τ dont la valeur est comprise entre 0 et 1, caractérise cette adaptation d'impédance [23] Son expression est donnée par la relation suivante :

$$\tau = \frac{4R_{chip}R_{ant}}{|Z_{chip} + Z_{ant}|^2} \quad (1.7)$$

1.7.2.3 Distance maximale de lecture de l'étiquette

La distance maximale de lecture, comme son nom l'indique, est la distance maximale à laquelle une étiquette peut être lue par un lecteur RFID, c'est-à-dire reçoit suffisamment d'énergie pour s'activer et devenir opérationnelle (plusieurs cas possibles selon les ordres envoyés par le lecteur en écriture et lecture qui correspondent à une sensibilité donnée fournie par le constructeur).

L'équation de Friis (dite équation des télécommunications), modifiée pour tenir compte de la transmission entre antenne et puce côté étiquette, permet de calculer la puissance reçue par la puce (P_r) qui doit être supérieure ou égale à la sensibilité de l'étiquette (P_{th}) [24], soit :

$$P_r = P_t G_t L_{Los} \chi G_r \tau \geq P_{th} \quad (1.8)$$

L_{Los} Représente les pertes de propagation avec $L_{Los} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$; λ est la longueur d'onde et R est la distance lecteur-étiquette. Par conséquent, la distance de lecture maximale s'exprime comme ci-dessous :

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \chi \tau}{P_{th}}} \quad (1.9)$$

La distance de lecture est un paramètre très utilisé en pratique qu'il faut savoir nuancer car elle dépend de la sensibilité de l'étiquette P_{th} qui varie selon les opérations à réaliser par l'étiquette comme évoqué ci-dessus. Par exemple, pour l'une des puces de dernière génération, la puce Monza 7 : la puissance d'activation est de -24 dBm pour la lecture et de -21 dBm pour l'écriture dans la mémoire interne de l'étiquette [24]. Dans l'hypothèse d'une propagation en espace libre, une fréquence de fonctionnement de 868 MHz, une puissance transmise PIRE de 3.2 W (puissance maximale du standard ETSI), en considérant une étiquette dipôle de gain égal à 2 dBi dans le cas d'une adaptation d'impédance parfaite, les distances maximales de lecture et d'écriture sont de 31.5 m et 22.4 m respectivement.

1.7.3 Système RFID UHF passif dans la bande 860-960 MHz et 2.4 GHz

1.7.3.1 Système RFID UHF passif à 860-960 MHz

Le système RFID UHF passif à 860-960 MHz est le plus couramment utilisé dans les applications RFID. Cette technologie offre une portée de lecture plus élevée que les systèmes RFID UHF passifs à 2.4 GHz, pouvant atteindre plusieurs mètres selon les spécifications des étiquettes RFID et des lecteurs. Les étiquettes RFID UHF passives à 860-960 MHz sont souvent utilisées pour la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la logistique, la traçabilité des produits, le suivi des actifs, le contrôle d'accès, etc. Les lecteurs RFID UHF passifs à 860-960 MHz sont disponibles en différentes tailles et formes, allant

des lecteurs portables aux lecteurs fixes, pour répondre aux besoins de différentes applications. Cette technologie est largement utilisée dans l'industrie et dans les entreprises pour améliorer l'efficacité des opérations et réduire les coûts [25].

1.7.3.2 Système RFID UHF passif à 2.4 GHz

Les systèmes RFID UHF passifs à 2.4 GHz sont utilisés dans des applications nécessitant une lecture à très courte portée, généralement inférieure à un mètre. Les étiquettes RFID UHF passives à 2.4 GHz sont souvent utilisées pour la gestion de stock en magasin, la gestion des actifs, le suivi des articles de vente au détail, etc. Les lecteurs RFID UHF passifs à 2.4 GHz sont disponibles en différentes tailles et formes, allant des lecteurs portables aux lecteurs fixes, pour répondre aux besoins de différentes applications. Les étiquettes RFID UHF passives à 2.4 GHz sont souvent moins chères que les étiquettes RFID UHF passives à 860-960 MHz, ce qui les rend plus économiques pour les applications de lecture à courte portée [25]. Bien que cette technologie ne soit pas adaptée à toutes les applications, elle est très efficace pour les applications qui nécessitent une lecture à courte portée (gestion de stock). Le choix entre les systèmes RFID UHF passifs à 860-960 MHz et 2.4 GHz dépend des spécifications de l'application et des besoins en portée de lecture. Le système RFID UHF passif à 860-960 MHz offre une portée de lecture plus élevée, tandis que le système RFID UHF passif à 2.4 GHz est plus économique pour les applications de lecture à courte portée.

1.8 Avantages et limites de la technologie RFID

1.8.1 Avantages de la technologie RFID

- Permettent une identification rapide et précise des objets ou produits grâce à la technologie de communication sans fil.
- Offrent une traçabilité en temps réel, ce qui facilite la gestion de stock et la logistique [26].
- Augmentent la sécurité, en permettant la surveillance et le contrôle des accès aux zones sensibles.
- Résistent aux conditions environnementales difficiles et peuvent être utilisées dans des environnements difficiles.

1.8.2 Limite de la technologie RFID

- Les coûts de mise en place peuvent être élevés, en raison des coûts des équipements RFID et des investissements nécessaires pour intégrer les systèmes RFID dans les processus de l'entreprise.
- Les technologies RFID peuvent avoir des problèmes de compatibilité avec les systèmes existants, ce qui peut entraîner des perturbations dans les opérations commerciales [26].
- Les systèmes RFID peuvent être vulnérables aux piratages et aux attaques de sécurité, ce qui peut compromettre la confidentialité des données.
- Les systèmes RFID peuvent être moins efficaces pour suivre des objets en mouvement rapide ou des objets très petits.

1.9 Les paramètres fondamentaux des antennes

1.9.1 Paramètres électriques

1.9.1.1 Impédance d'entrée de l'antenne

D'un point de vue électrique, une antenne est complètement caractérisée par son impédance d'entrée Z_{ant} . L'expression de Z_{ant} se décompose en une partie réelle R_{ant} et une partie imaginaire X_{ant} et s'écrit comme suit :

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} \quad (1.10)$$

La partie réelle R_{Ant} regroupe la résistance de pertes et la résistance de rayonnement de l'antenne et s'écrit comme suit :

$$R_{Ant} = R_{pertes} + R_{ray} \quad (1.11)$$

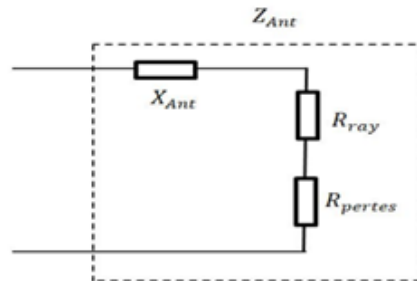


FIGURE 1.20 – Modélisation électrique de l'antenne [27].

Le rendement de l'antenne peut se définir comme suit :

$$\eta = \frac{R_{ray}}{R_{pertes} + R_{ray}} \quad (1.12)$$

Évidemment pour avoir un bon rendement, la résistance liée aux pertes R_{pertes} doit être petite devant la résistance liée au rayonnement R_{ray} .

1.9.1.2 Bande passante

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 [27].

La bande passante d'une antenne est estimée à partir de sa courbe du coefficient de réflexion (ou parfois de sa courbe du VSWR). 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

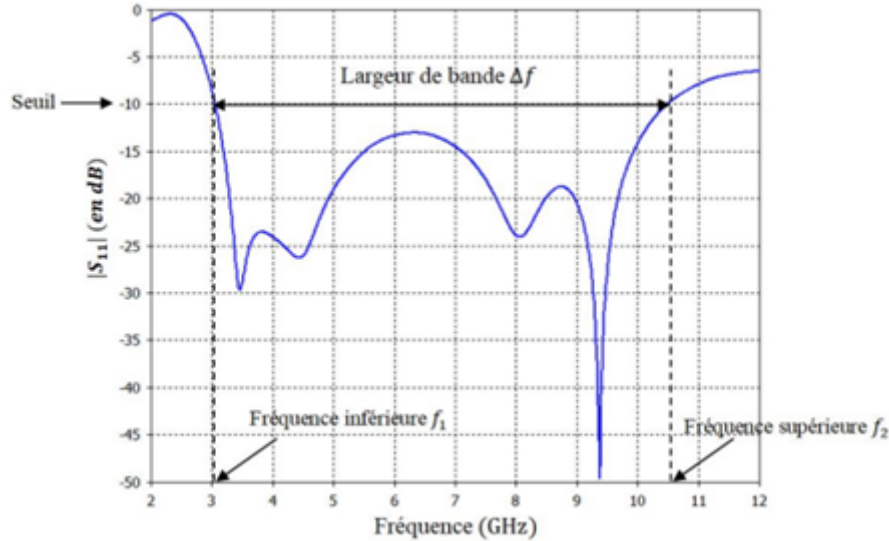


FIGURE 1.21 – Estimation de la bande passante d’une antenne à partir de sa courbe du coefficient de réflexion [27].

énergie est réfléchiée. 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 :

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (1.13)$$

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 [28] :

$$\text{BPF}(\%) = \frac{\Delta f}{f_c} \times 100\% \quad (1.14)$$

Comme la fréquence ce

$$\text{BPF}(\%) = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2} \times 100\% \quad (1.15)$$

1.9.1.3 Notions de coefficient de Réflexion et de Transmission

Le coefficient de Réflexion, Γ est le rapport d’amplitude entre l’onde EM réfléchiée en entrée de l’antenne et l’onde EM incidente. Il dépend de l’impédance d’entrée de l’antenne Z_{ant} et de l’impédance caractéristique de la puce RFID Z_{puce}

$$\Gamma = \frac{Z_{puce} - Z_{ant}}{Z_{puce} + Z_{ant}} \quad (1.16)$$

Si l’adaptation n’est pas assurée, une partie de la puissance est renvoyée vers la source (re-rayonnée par l’antenne), appelée en anglais « mismatch loss » (pertes de désadaptation) [28].

Le coefficient de Transmission τ , également très utilisé en RFID, représente la fraction de puissance transmise de l’antenne de l’étiquette vers la puce, ou inversement de la puce

vers l'antenne pour le re-rayonnement de l'onde, lors de la réponse de l'étiquette. Ce coefficient dépend également des impédances de l'antenne et la puce, et s'exprime suivant l'équation :

$$\tau = 1 - |\Gamma^*|^2 = \frac{4R_{puce}R_{ant}}{|Z_{ant} + Z_{puce}|^2} \quad (1.17)$$

Γ^* est appelé coefficient d'adaptation-conjuguée de réflexion, le coefficient $|\Gamma^*|$, traduit l'état de l'adaptation du système.

1.9.1.4 Distance de lecture

La sensibilité en l'écriture d'habitude se diffère de la sensibilité en lecture par quelque [dB]. La sensibilité de l'étiquette peut être calculée à partir de la puissance minimale nécessaire pour activée l'étiquette, la distance est l'une des caractéristiques importantes souvent utilisée pour évaluer les performances de l'antenne de l'étiquette, la distance maximale à laquelle une étiquette peut lire est donné [29] :

$$r = Dmax = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{PIRE \times Gr \times \tau}{P_{th}}} \quad (1.18)$$

Où : $PIRE = P_t \times G_t$.

P_{th} : est la sensibilité du circuit intégré (la puce) en (Watt).

G_r : gain reçu; τ : coefficient de transmission, aussi donné par :

$$\tau = \frac{4R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2} \leq 1 \quad (1.19)$$

Noté que :

$Z_{chip} = R_{chip} + jX_{chip}$: Impédance de la puce (chip).

$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant}$: Impédance de l'antenne.

1.9.2 Paramètres de rayonnement

1.9.2.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement fournit des informations sur la capacité d'une antenne à rayonner dans l'espace. Ainsi, à partir du diagramme de rayonnement, il est possible de définir plusieurs paramètres du rayonnement d'une antenne dont l'ouverture, le niveau de puissance et la direction des lobes secondaires.

1.9.2.2 Fonction caractéristique de rayonnement [25]

La fonction caractéristique de rayonnement (FCR), notée par $r(\theta, \varphi)$, est une représentation graphique du rapport entre la puissance que rayonne l'antenne, dans une direction quelconque définie par le couple (θ, φ) , et la puissance maximale $P(\theta_0, \varphi_0)$ rayonnée par la même antenne. C'est à dire la FCR varie entre 0 et 1 tout dépend de la direction considérée.

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P(\theta_0, \varphi_0)} \quad (1.20)$$

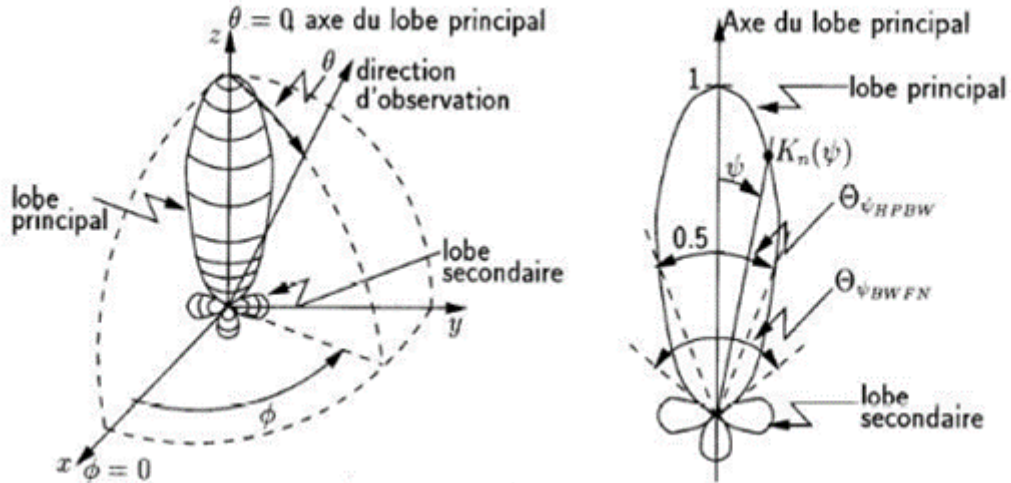


FIGURE 1.22 – Illustration du diagramme de rayonnement d'une antenne [30].

1.9.2.3 Directivité et gain

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

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction } (\theta, \varphi)}{\text{puissance rayonnée totale}} \quad (1.21)$$

Le gain d'une antenne dans une certaine direction, $G(\theta, \varphi)$, est quant à lui donné par le rapport de l'intensité de puissance rayonnée dans une certaine direction sur l'intensité de puissance acceptée par l'antenne qui serait rayonnée par une antenne isotrope sans pertes. Conformément à la définition de l'IEEE, le gain de l'antenne ne prend pas en compte les pertes de désadaptation (ou pertes d'insertion) [31].

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction } (\theta, \varphi)}{\text{puissance totale acceptée}} \quad (1.22)$$

1.9.2.4 Rendement

Le rendement d'une antenne mesure la partie de la puissance perdue entre la source RF et le milieu de propagation [25]. Il est défini en général par le rapport de la puissance totale rayonnée P_r à la puissance d'alimentation P_a , qu'on lui a fournie :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad (1.23)$$

Le gain est relié alors à la directivité en valeurs réelles par

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a/4\pi} = \eta \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r/4\pi} = \eta D(\theta, \varphi) \quad (1.24)$$

1.9.2.5 Polarisation

La polarisation de l'onde électromagnétique est décrite par le locus de la pointe du vecteur champ électrique E (ou magnétique H) au cours du temps, on peut distinguer

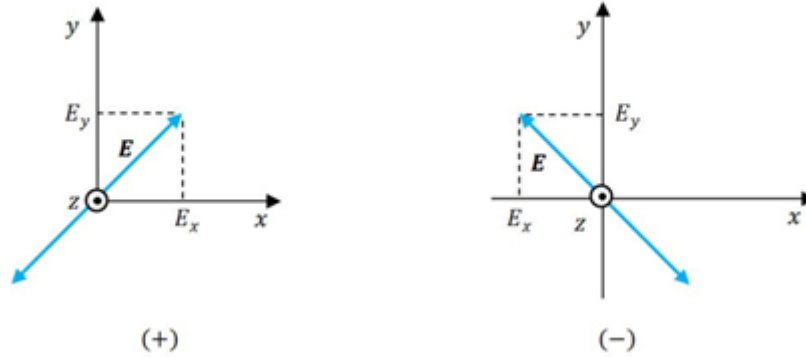


FIGURE 1.23 – Représentation cartésienne d'une polarisation linéaire [27].

trois types de polarisation. En prenant l'axe z comme étant la direction de propagation, l'expression du champ E s'exprime par :

$$\mathbf{E}(z, t) = \hat{\mathbf{x}}E_x(z, t) + \hat{\mathbf{y}}E_y(z, t) \quad (1.25)$$

Si la propagation de l'onde suit la direction des z positifs, la forme trigonométrique peut donc s'écrire comme suit :

$$\mathbf{E}(z, t) = \hat{\mathbf{x}}E_{x0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) + \hat{\mathbf{y}}E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \quad (1.26)$$

Où, E_{x0} et E_{y0} sont respectivement les amplitudes des composantes du champ électrique E dans les directions x et y ; k étant le nombre d'onde; φ_x et φ_y sont les phases initiales des deux composantes E_x , E_y respectivement. On distingue trois types de polarisation brièvement décrites ci-dessous.

► Polarisation linéaire

Une onde est linéairement polarisée lorsque son vecteur champ électrique ayant une expression comme dans l'équation

$$\mathbf{E}(z, t) = \hat{\mathbf{x}}E_{x0} \cos(\omega t - kz) \pm \hat{\mathbf{y}}E_{y0} \cos(\omega t - kz) \quad (1.27)$$

La Figure 1.23 représente clairement l'orientation du vecteur champ électrique dans le cas d'une polarisation linéaire.

► Polarisation circulaire

La polarisation circulaire, Fig. 1.24, est obtenue uniquement lorsque les composantes du vecteur champ ont les mêmes amplitudes ($E_{x0} = E_{y0}$) et la différence de phase entre ces deux composantes soit un nombre impair de $\pi/2$, c'est à dire $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = (2n + 1)\pi/2$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, on obtient

$$\mathbf{E}(z, t) = E_{x0} [\hat{\mathbf{x}} \cos(\omega t - kz) \pm \hat{\mathbf{y}} \sin(\omega t - kz)] \quad (1.28)$$

Sachant que le + et le -, représentent respectivement la polarisation circulaire main gauche (LHCP) et la polarisation circulaire main droite (RHCP). La Figure 1.24, montre clairement le cercle tracé par l'extrémité du vecteur champ électrique.

► Polarisation elliptique

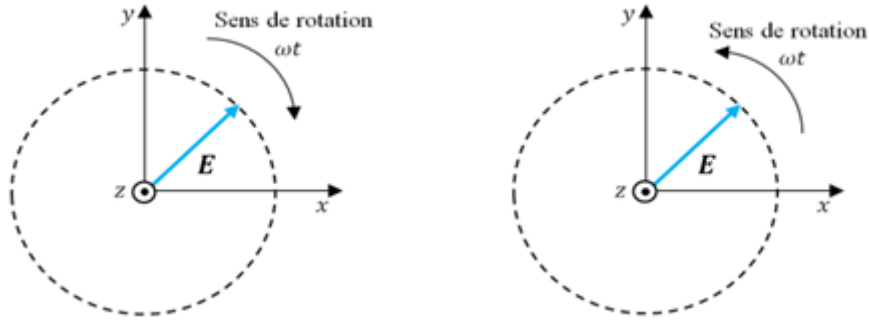


FIGURE 1.24 – Représentation cartésienne d’une polarisation circulaire [27].

Dans le cas de la polarisation elliptique (Fig. 1.25), si on prend uniquement le cas d’une ellipse alignée sur l’un des axes principaux, les amplitudes des composantes du vecteur champ électrique sont différentes ($E_{x0} \neq E_{y0}$) et la différence de phase entre les deux composantes soit un nombre impair de $\pi/2$, c’est-à-dire : $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = (2n + 1)\pi/2$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, on peut donc écrire :

$$\mathbf{E}(z, t) = \hat{\mathbf{x}}E_{x0} \cos(\omega t - kz) \pm \hat{\mathbf{y}}E_{y0} \sin(\omega t - kz) \quad (1.29)$$

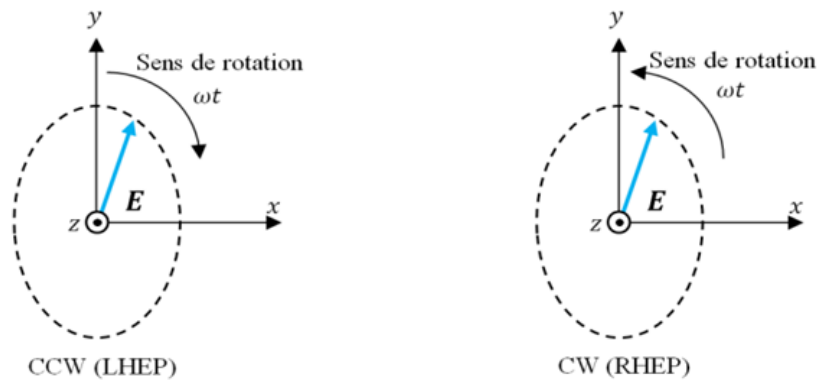


FIGURE 1.25 – Représentation cartésienne de la polarisation elliptique [27].

Sachant que le + et le -, représentent respectivement la polarisation elliptique main gauche (LHEP) et la polarisation elliptique main droite (RHEP).

L’ellipse est tracée par l’extrémité du vecteur champ électrique au cours du temps.

Le rapport entre les amplitudes selon le grand axe et le petit axe est appelé rapport axial (RA), en anglais axial ratio (AR) [32].

$$RA = \frac{\text{grand axe}}{\text{petit axe}}, 1 \leq RA \leq +\infty \quad (1.30)$$

1.10 Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis d’introduire dans un premier temps, les notions, les principes de base de la technologie RFID, de présenter les éléments qui la composent (lecteur et étiquette) et leurs caractéristiques fondamentales. Nous avons ensuite entamé les paramètres d’antennes ainsi que la technologie RFID UHF passive.

Chapitre 2

RFID dans les systèmes de contrôle d'accès et localisation

Sommaire

2.1 Introduction	29
2.2 RFID dans un système de contrôle d'accès	29
2.3 Domaine d'application d'un système de contrôle d'accès	29
2.3.1 contrôle d'accès RFID dans les bâtiments	29
2.3.2 contrôle d'accès RFID dans les entreprises	30
2.3.3 contrôle d'accès RFID dans les écoles	30
2.3.4 contrôle d'accès RFID dans les hôpitaux	31
2.3.5 Contrôle d'accès RFID des véhicules	31
2.3.6 Contrôle d'accès RFID dans les universités	33
2.4 Avantages et inconvénients d'un système de contrôle d'accès RFID	34
2.4.1 Avantages	34
2.4.2 Inconvénients	34
2.5 RFID dans un système de localisation	34
2.6 Domaine d'application d'un système de localisation RFID	35
2.6.1 Gestion de la chaîne d'approvisionnement	35
2.6.2 Gestion de stock	35
2.6.3 Suivi des actifs	36
2.6.4 Gestion des soins de santé	36
2.6.5 Suivi des animaux	36
2.7 Avantages et inconvénients d'un système de localisation	37
2.7.1 Avantages	37
2.7.2 Inconvénients	37
2.8 Gestion de stock utilisée par la technologie RFID	37
2.9 Avantages et inconvénients de la gestion de stock	39
2.9.1 Avantages	39
2.9.2 Inconvénients	39
2.10 Conclusion	40

2.1 Introduction

La technologie RFID (Radio-Frequency Identification) permet l'identification automatique d'objets ou de personnes à distance à l'aide d'ondes radio. Cette technologie est largement utilisée dans de nombreux domaines, notamment pour le contrôle d'accès et la localisation.

Le contrôle d'accès RFID permet de restreindre l'accès à des zones sécurisées, tel que des bâtiments, des zones industrielles, des centres de données ou des entrepôts, en autorisant uniquement les personnes ou les véhicules munis d'un badge ou d'une étiquette RFID à entrer dans ces zones.

La localisation RFID permet de suivre en temps réel la position d'objets ou de personnes équipés d'étiquettes RFID. Cette technologie peut être utilisée pour la gestion de flottes de véhicules, la surveillance d'objets de valeur, la traçabilité des produits ou la surveillance de personnes dans les zones sensibles [33].

2.2 RFID dans un système de contrôle d'accès

Le contrôle d'accès RFID peut être utilisé dans une variété de contextes, tel que les bâtiments gouvernementaux, entreprises, écoles, universités et hôpitaux. Les systèmes de contrôle d'accès RFID peuvent être configurés pour fonctionner de différentes manières en fonction des exigences de sécurité et de gestion d'accès, Par exemple, un système de contrôle d'accès RFID peut être configuré pour n'autoriser l'accès qu'aux employés autorisés qui ont les badges RFID appropriés. Le système peut également être configuré pour limiter l'accès à certaines zones et à certains moments de la journée ou pour surveiller et signaler des accès non autorisés [33].

2.3 Domaine d'application d'un système de contrôle d'accès

Le système de contrôle d'accès RFID trouve des applications dans de nombreux domaines pour assurer la sécurité et la gestion d'accès aux zones restreintes ou sensibles à savoir :

2.3.1 contrôle d'accès RFID dans les bâtiments

Les systèmes de contrôle d'accès RFID peuvent être utilisés dans les bâtiments pour permettre l'accès uniquement aux personnes autorisées. Les badges d'identification RFID sont attribués à chaque employé ou visiteur autorisé, et ces badges doivent être présentés à un lecteur RFID pour permettre l'accès à certaines zones. Les systèmes de contrôle d'accès RFID peuvent être configurés pour fonctionner de différentes manières en fonction des exigences de sécurité et de gestion d'accès, Par exemple, ils peuvent être configurés pour limiter l'accès à certaines zones à certains moments de la journée ou pour surveiller et signaler des accès non autorisés [34].

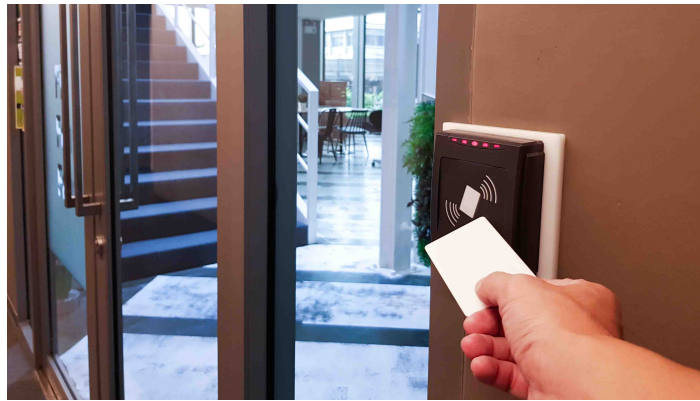


FIGURE 2.1 – Contrôle d'accès RFID dans les bâtiments

2.3.2 contrôle d'accès RFID dans les entreprises

Les entreprises peuvent utiliser des systèmes de contrôle d'accès RFID pour restreindre l'accès aux zones sensibles, tel que les centres de données ou les laboratoires de recherche. Les badges d'identification RFID peuvent être utilisés pour contrôler l'accès des employés aux zones restreintes en fonction de leur rôle et de leur niveau d'autorisation. Les systèmes de contrôle d'accès RFID peuvent également être utilisés pour suivre et signaler des accès non autorisés [34].



FIGURE 2.2 – Contrôle d'accès RFID dans une entreprise

2.3.3 contrôle d'accès RFID dans les écoles

Les écoles peuvent utiliser des systèmes de contrôle d'accès RFID pour gérer l'accès des étudiants et du personnel à certains bâtiments et zones, tel que les dortoirs ou les bibliothèques. Les badges d'identification RFID peuvent être utilisés pour autoriser l'accès uniquement aux personnes autorisées et pour enregistrer l'heure et l'emplacement des accès [34].



FIGURE 2.3 – Contrôle d'accès RFID dans une école primaire

2.3.4 contrôle d'accès RFID dans les hôpitaux

Les hôpitaux peuvent utiliser des systèmes de contrôle d'accès RFID pour limiter l'accès aux zones sensibles, tel que les salles d'opération ou les zones de stockage de médicaments. Les badges d'identification RFID peuvent être utilisés pour contrôler l'accès des médecins, des infirmiers et du personnel aux zones restreintes en fonction de leur rôle et de leur niveau d'autorisation. Les systèmes de contrôle d'accès RFID peuvent également être utilisés pour enregistrer l'heure et l'emplacement des accès [3].



(a)



(b)

FIGURE 2.4 – Contrôle d'accès RFID dans les hôpitaux

2.3.5 Contrôle d'accès RFID des véhicules

Le contrôle d'accès RFID des véhicules est une application de la technologie RFID pour contrôler l'accès des véhicules à différentes zones, tel que les postes de garde, les autoroutes et les passages des frontières. Cette technologie permet de détecter rapidement et facilement les véhicules autorisés et de contrôler leur accès en temps réel, sans avoir besoin d'un contrôle manuel.

Les autoroutes, les passages des frontières et les postes de garde sont des zones où la sécurité est essentielle pour assurer la protection des personnes et des biens. La technologie RFID permet de résoudre ces problèmes en fournissant une solution de contrôle d'accès

plus sûre, plus fiable et plus efficace. Les véhicules sont équipés d'une étiquette RFID, généralement placée sur le pare-brise, qui contient les informations d'identification et d'autorisation du véhicule [2].

2.3.5.1 Autoroutes

Les portiques RFID installés le long de la route détectent les étiquettes RFID à mesure que le véhicule passe, permettant ainsi la facturation automatique du péage sans que le conducteur n'ait à s'arrêter. Cela permet de réduire le temps d'attente et les embouteillages sur les routes, ainsi que les coûts de gestion des péages [2].

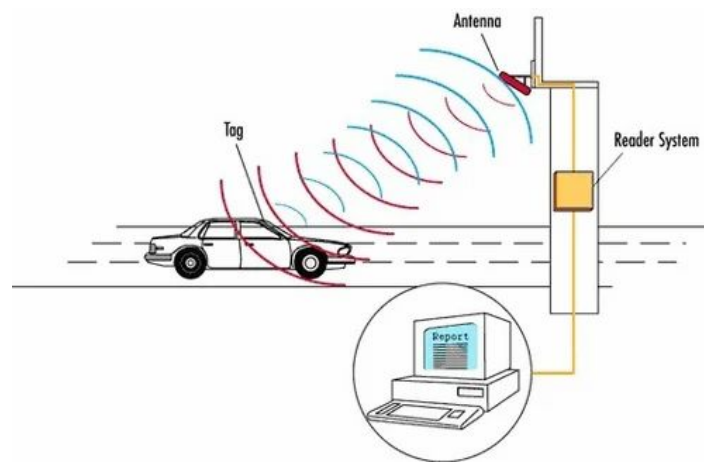


FIGURE 2.5 – Contrôle d'accès RFID dans les autoroutes

2.3.5.2 Passage des frontières

La technologie RFID est utilisée pour vérifier l'identité des véhicules et des conducteurs, ainsi que pour détecter les véhicules suspects ou les tentatives de fraude. Cette technologie permet de faciliter le passage des frontières pour les véhicules autorisés, tout en renforçant la sécurité des frontières [35]. Le système de laissez-passer frontalier intelligent utilisant la RFID est illustré à la figure 2.6.



FIGURE 2.6 – Contrôle d'accès RFID dans un passe-frontière

2.3.5.3 Postes de garde

Lorsqu'un véhicule se présente à un poste de garde, les portiques RFID installés détectent l'étiquette RFID du véhicule, permettant ainsi de vérifier rapidement s'il est autorisé à entrer ou non. Si le véhicule est autorisé, la barrière s'ouvre automatiquement et le véhicule est autorisé à passer. Si le véhicule n'est pas autorisé, une alerte est envoyée au poste de garde pour qu'une vérification manuelle soit effectuée [2].

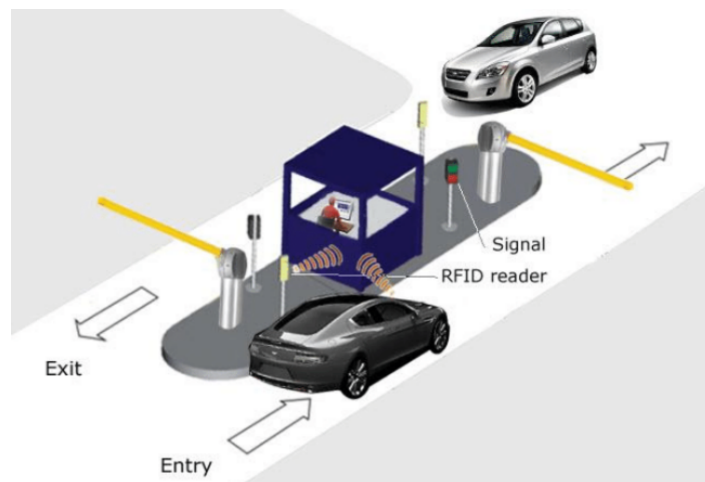


FIGURE 2.7 – Contrôle d'accès RFID dans un poste de garde

2.3.6 Contrôle d'accès RFID dans les universités

Le contrôle d'accès RFID dans les universités est une application de plus en plus répandue pour renforcer la sécurité et la gestion des accès dans les entrées-sorties et les campus universitaires [34].



FIGURE 2.8 – Contrôle d'accès RFID dans une université

2.4 Avantages et inconvénients d'un système de contrôle d'accès RFID

Le contrôle d'accès utilisé par la technologie RFID est une technologie d'avenir qui présente plusieurs avantages, mais avec les nombreuses applications, cette technologie a néanmoins des limites. Dans ce qui suit, nous rappelons les avantages et les inconvénients que cette technologie peut présenter [36].

2.4.1 Avantages

- Rapidité : Les étiquettes RFID permettent une identification rapide des utilisateurs et l'accès peut être accordé presque instantanément.
- Sécurité : Le système RFID est plus sûr que les systèmes de contrôle d'accès traditionnels basés sur des clés ou des cartes magnétiques, car les étiquettes RFID ne peuvent pas être facilement copiées.
- Suivi : Les étiquettes RFID peuvent être utilisées pour suivre les mouvements des personnes dans une zone sécurisée, ce qui peut aider à résoudre les problèmes de sécurité et de responsabilité.
- Contrôle à distance : Les systèmes RFID peuvent être gérés à distance, ce qui permet aux administrateurs de contrôler l'accès de manière plus efficace.

2.4.2 Inconvénients

- Coût : Les systèmes RFID sont souvent plus coûteux que les systèmes de contrôle d'accès traditionnels.
- Fiabilité : Les étiquettes RFID peuvent être endommagées ou perdues, ce qui peut entraîner des problèmes de fiabilité et d'efficacité.
- Protection de la vie privée : Certains utilisateurs peuvent être préoccupés par la possibilité que les systèmes RFID enregistrent et suivent leurs mouvements.
- Interférences : Les interférences électromagnétiques peuvent causer des problèmes de communication avec les étiquettes RFID, ce qui peut rendre le système moins fiable.

2.5 RFID dans un système de localisation

La localisation est une autre application courante de la technologie RFID.

Les systèmes de localisation RFID permettent de suivre la position d'objets ou de personnes à l'intérieur d'un espace défini, tel qu'un entrepôt, un hôpital ou un aéroport. Les systèmes de localisation RFID utilisent des balises RFID pour identifier les objets ou les personnes et des lecteurs RFID pour détecter leur position. Les systèmes de localisation RFID peuvent être utilisés pour améliorer la gestion de stock, le suivi des patients dans un hôpital ou la localisation des bagages dans un aéroport.

En termes de localisation RFID, il existe différentes approches pour suivre les objets ou les personnes. Les systèmes de localisation passive RFID utilisent des balises RFID qui sont activées lorsqu'elles passent devant un lecteur RFID et qui transmettent des informations sur leur position. Les systèmes de localisation active RFID utilisent des balises RFID qui sont continuellement actives et qui envoient des signaux de localisation à des lecteurs RFID.

Les systèmes de localisation hybrides RFID combinent les deux approches pour offrir des performances de localisation optimales dans des environnements complexe [25].

2.6 Domaine d'application d'un système de localisation RFID

Le domaine d'application de la technologie RFID pour la localisation peut être très vaste et couvre différents secteurs d'activité :

2.6.1 Gestion de la chaîne d'approvisionnement

La RFID peut être utilisée pour suivre et localiser les produits tout au long de la chaîne d'approvisionnement, depuis la production jusqu'à la livraison aux clients [4].



FIGURE 2.9 – Système de localisation RFID pour chaîne d'approvisionnement

2.6.2 Gestion de stock

La RFID peut être utilisée pour suivre et localiser les produits dans un entrepôt, ce qui permet une gestion plus efficace des stocks et une réduction des erreurs de gestion de stock [37].

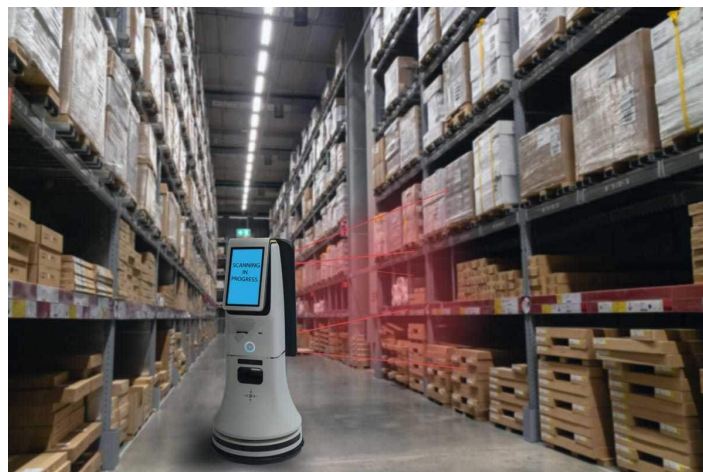


FIGURE 2.10 – Système de localisation RFID pour la gestion de stock

2.6.3 Suivi des actifs

La RFID peut être utilisée pour suivre et localiser des actifs tel que des équipements, des outils ou des véhicules dans une entreprise, ce qui permet une gestion plus efficace des actifs et une réduction des pertes [1].



FIGURE 2.11 – Système de localisation RFID pour suivi des actifs

2.6.4 Gestion des soins de santé

La RFID peut être utilisée pour suivre et localiser les patients, les équipements médicaux et les fournitures médicales dans un hôpital ou une clinique, ce qui permet une gestion plus efficace et une meilleure qualité de soins [3].

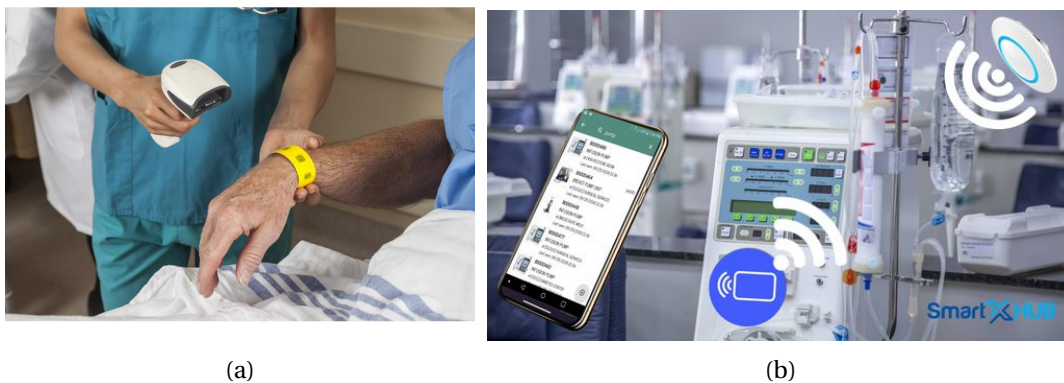


FIGURE 2.12 – Système de localisation RFID pour suivi des soins de santé

2.6.5 Suivi des animaux

La RFID peut être utilisée pour suivre et localiser les animaux dans les fermes ou les zoos, ce qui permet une gestion plus efficace de l'élevage et de la conservation des espèces [38].



FIGURE 2.13 – Système de localisation RFID pour le suivi des animaux

2.7 Avantages et inconvénients d'un système de localisation

2.7.1 Avantages

- Précision élevée de la localisation : la technologie RFID peut offrir une précision de localisation élevée, ce qui peut être utile dans des environnements où la localisation précise des objets ou des personnes est importante.
- Économique : la technologie RFID peut être relativement peu coûteuse par rapport à d'autres systèmes de localisation.
- Automatisation : la technologie RFID peut être automatisée, ce qui signifie que les processus de localisation peuvent être effectués sans intervention humaine [39].

2.7.2 Inconvénients

- Portée limitée : les systèmes RFID peuvent avoir une portée limitée, ce qui peut être un inconvénient dans les environnements de grande taille.
- Interférences : les systèmes RFID peuvent être sensibles aux interférences, ce qui peut entraîner des erreurs de localisation.
- Coût initial élevé : bien que la technologie RFID puisse être peu coûteuse à long terme, le coût initial d'installation peut être élevé [38].

2.8 Gestion de stock utilisée par la technologie RFID

La technologie RFID est également largement utilisée pour la gestion de stock. Les systèmes de gestion des stock RFID peuvent suivre les produits à mesure qu'ils se déplacent dans le processus de fabrication, de stockage, de distribution et de vente, ce qui permet aux entreprises de surveiller et de contrôler efficacement les niveaux de stock et de s'assurer que les produits sont toujours disponibles en quantité suffisante [39].



FIGURE 2.14 – Gestion de stock utilisée dans la technologie RFID

Les étiquettes RFID peuvent être attachés à chaque produit individuel ou à chaque conteneur d'expédition, et ces étiquettes peuvent être lues à distance par des lecteurs RFID placés dans des endroits stratégiques. Les lecteurs RFID peuvent lire les informations sur l'étiquette, telles que le numéro de série, le code de produit, la date de fabrication, etc..., et envoyer ces données à un système de gestion de stock centralisé [39].

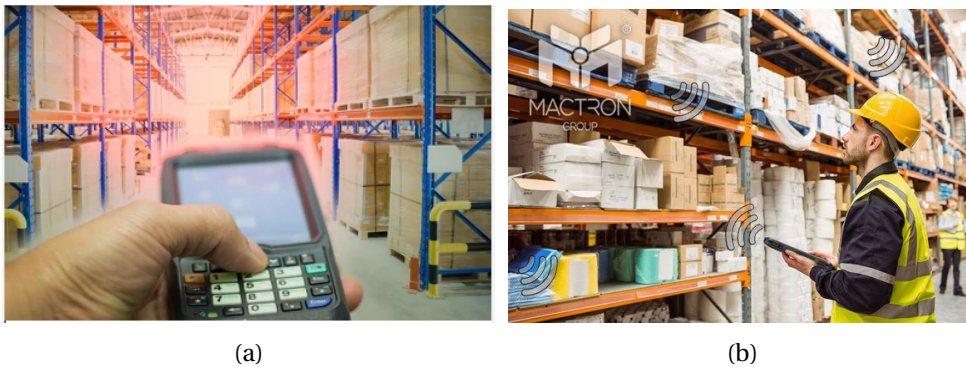


FIGURE 2.15 – Vérification des produits par la technologie RFID dans la gestion de stock

Le système de gestion de stock utilise ensuite ces informations pour suivre les mouvements des produits et maintenir des niveaux de stock optimaux. Il peut générer des alertes lorsque les niveaux de stock sont bas, de sorte que les produits puissent être réapprovisionnés à temps. Il peut également fournir des rapports détaillés sur l'inventaire des produits, les mouvements des stocks, les commandes des clients ect..., ce qui permet aux entreprises de mieux comprendre leurs activités et de prendre des décisions éclairées en matière de gestion des stocks. En outre, la technologie RFID peut également être utilisée pour suivre les produits à mesure qu'ils se déplacent dans la chaîne d'approvisionnement, ce qui permet de réduire les erreurs de livraison et de minimiser les pertes et les vols de produits. Les entreprises peuvent également utiliser la technologie RFID pour suivre les articles retournés et pour gérer les rappels de produits en cas de problèmes de qualité ou de sécurité [39].

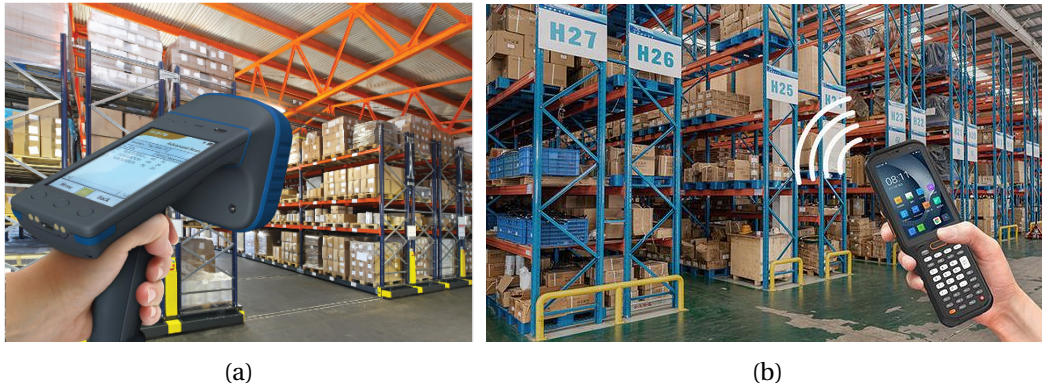


FIGURE 2.16 – Technologie RFID utilisée pour suivre des produits

2.9 Avantages et inconvénients de la gestion de stock

La gestion de stock utilisée par la technologie RFID est une technologie de performance présentant des avantages et inconvénients. Dans ce qui suit, nous rappelons les avantages et les inconvénients que cette technologie peut présenter [40].

2.9.1 Avantages

- La technologie RFID peut permettre une gestion plus précise et en temps réel des niveaux de stock, ce qui peut améliorer la disponibilité des produits et réduire les ruptures de stock.
- La technologie RFID peut améliorer la précision de la gestion de stock et réduire les erreurs de saisie des données, ce qui peut réduire les coûts associés aux pertes ou invendus.
- L'utilisation de la technologie RFID pour la gestion de stock peut réduire les coûts de main-d'œuvre associé à la gestion manuelle des stocks et des inventaires.
- La technologie RFID peut aider à réduire le temps nécessaire pour identifier et localiser des articles individuels, ce qui peut améliorer l'efficacité de la gestion de stock.
- L'utilisation de la technologie RFID pour la gestion de stock peut faciliter la mise en place de systèmes d'inventaire automatisés, ce qui peut améliorer l'efficacité et la rapidité du processus [40].

2.9.2 Inconvénients

- Le coût initial d'installation de la technologie RFID peut être élevé, ce qui peut rendre son adoption difficile pour certaines organisations.
- La technologie RFID peut être vulnérable aux interférences et aux perturbations électromagnétiques, ce qui peut affecter la précision des données collectées.
- La collecte et l'utilisation de données personnelles via la technologie RFID peuvent soulever des préoccupations en matière de protection de la vie privée.
- L'utilisation de la technologie RFID peut nécessiter une infrastructure informatique et de communication supplémentaire pour la gestion et l'analyse des données [40].

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système de contrôle d'accès et de localisation sur la technologie RFID des systèmes sans fil permettant une lecture d'informations et de données sans contact qui sont collectées des étiquettes par de lecteurs spécifiques. Nous avons également présenté leurs domaines d'application avec leurs avantages et inconvénients. En fin nous avons exposé l'utilisation de la technologie RFID dans la gestion de stock, ses domaines d'application, ses avantages et inconvénients.

Chapitre 3

Résultats et discussion

Sommaire

3.1 Introduction	42
3.2 Conception d'une antenne étiquette RFID UHF passive	42
3.3 Techniques d'adaptation d'impédance pour les étiquettes RFID UHF pas- sives	43
3.4 Présentation de prototypes d'antennes	44
3.5 Conception de l'antenne à éléments en forme de U	45
3.5.1 Adaptation d'impédance entre l'antenne et la puce	45
3.5.2 Modification de la géométrie de l'antenne	46
3.5.3 Alimentation de l'antenne par couplage	47
3.5.4 Adaptation d'impédance	48
3.5.5 Impédance d'entrée en fonction du paramètre L_x	49
3.5.6 Impédance d'entrée en fonction de paramètre L_y	50
3.5.7 Impédance d'entrée en fonction de paramètre D	51
3.5.8 Impédance de l'antenne étiquette	52
3.6 Coefficient de réflexion	53
3.6.1 Représentation du coefficient de réflexion par l'abaque de Smith	54
3.7 Rapport d'ondes stationnaires (ROS)	55
3.8 Gain	55
3.9 Directivité	56
3.10 Efficacité de rayonnement	56
3.11 Diagramme de rayonnement	57
3.12 Portée maximale de l'étiquette	58
3.13 Comparaison des résultats	58
3.14 Conclusion	59

3.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, et dans un premier lieu, nous présentons deux structures d'antennes réalisées dans l'article [9] et [41], afin de pouvoir arriver à une conception d'une antenne adaptée et performante. La deuxième partie consiste à concevoir une antenne étiquette RFID UHF passive adaptée, dans la bande 860-960 MHz, avec une impédance complexe d'une puce choisie, NXP UCODE G2XM, d'impédance $Z_c=16-j148$ [42], pour une fréquence de fonctionnement à 915 MHz. L'adaptation d'impédance est faite par l'utilisation d'un T-match. La plage de fréquences choisie pour le fonctionnement de cette antenne en bande UHF est de 0.8 GHz à 1 GHz. Nous travaillons à l'aide d'un logiciel CST Studio Microwave, dans un souci de gain de temps et d'optimisation de la structure aux paramètres désirés. L'utilisation d'un tel logiciel demande beaucoup d'expérience et de manipulations afin de simuler et d'optimiser notre prototype d'antenne.

3.2 Conception d'une antenne étiquette RFID UHF passive

La conception d'une antenne étiquette RFID UHF passive nécessite de mettre en œuvre une méthodologie de développement dont l'organigramme est présenté dans la figure 3.1.

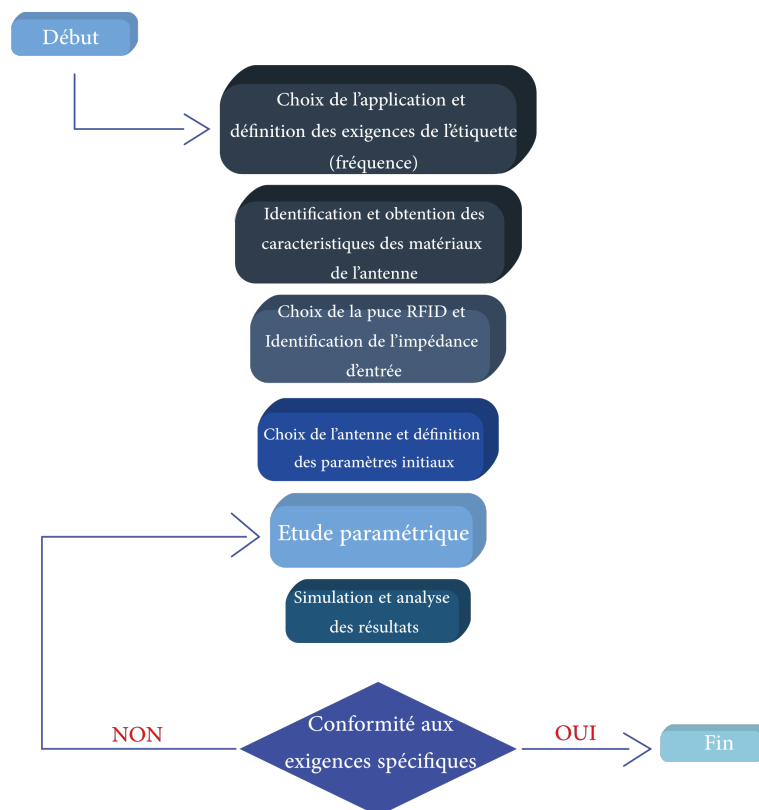


FIGURE 3.1 – méthodologie de développement de la conception d'une antenne étiquette RFID UHF passive.

Lors du choix des applications, pour que le système RFID fonctionne bien, les exigences et les contraintes du système seront mises en correspondance avec les exigences de la conception telles que les réglementations de chaque pays et la capacité d'interagir

avec les autres systèmes de télécommunications.

L'antenne sera conçue à l'aide de logiciel de simulation CST Studio Microwave afin d'optimiser en premier lieu les paramètres de l'antenne pour une bonne adaptation de l'impédance de celle-ci avec celle de la puce, et en deuxième lieu les performances de l'antenne tels que le gain, la directivité, le rendement et la distance de lecture.

3.3 Techniques d'adaptation d'impédance pour les étiquettes RFID UHF passives

Il existe différentes approches d'adaptation entre l'antenne de l'étiquette et la puce RFID à savoir :

- Le T-match;
- La boucle d'impédance à couplage mutuel;
- La structure Tip-loading.

Pour notre antenne proposée nous avons choisi la technique du T-match. Généralement la puce RFID possède une impédance capacitive. Le rôle de T-match est d'ajouter une structure d'adaptation inductive, cette structure utilise une combinaison d'inductance en parallèle et en série comme le montre la figure 3.2.

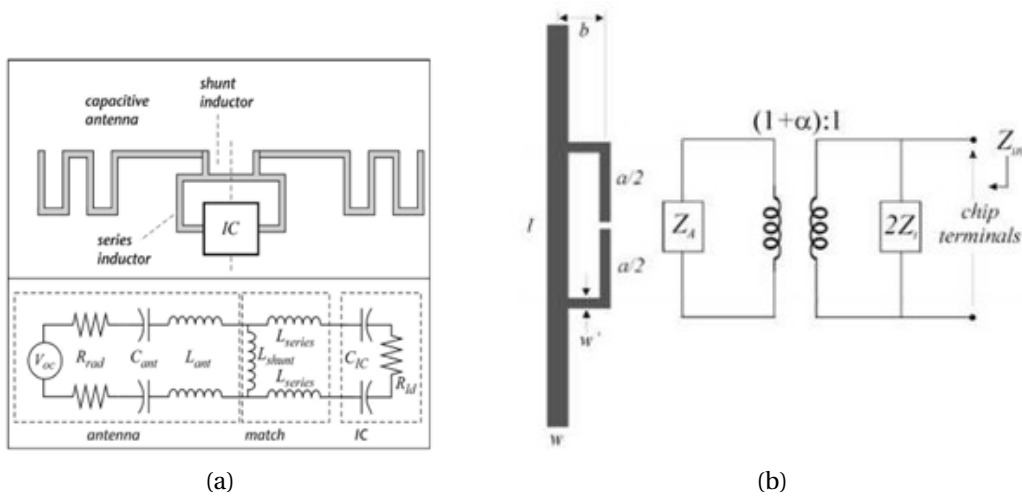


FIGURE 3.2 – Circuit équivalent de configuration de T-Match (a) – circuit en série [43]; (b) – circuit en parallèle [44].

L'impédance équivalente vue à partir de la puce est [44] :

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

Où

Z_t : est l'impédance du T-match.

Z_a : est l'impédance équivalente de l'antenne.

α : est le facteur de division de courant entre les deux conducteurs.

Le T-match fonctionne comme un adaptateur d'impédance dont les paramètres peuvent être ajustés pour une adaptation adéquate entre la puce et l'antenne.

3.4 Présentation de prototypes d'antennes

Dans un premier lieu, nous allons présenter deux prototypes d'antennes déjà conçus dans les articles [41] et [9], leurs géométries sont présentées dans les figures 3.3 et 3.4.

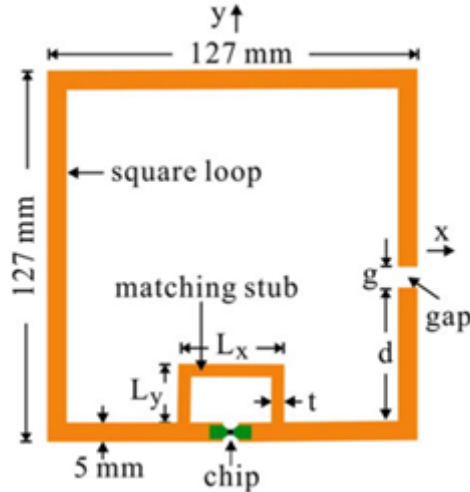


FIGURE 3.3 – Antenne étiquette RFID

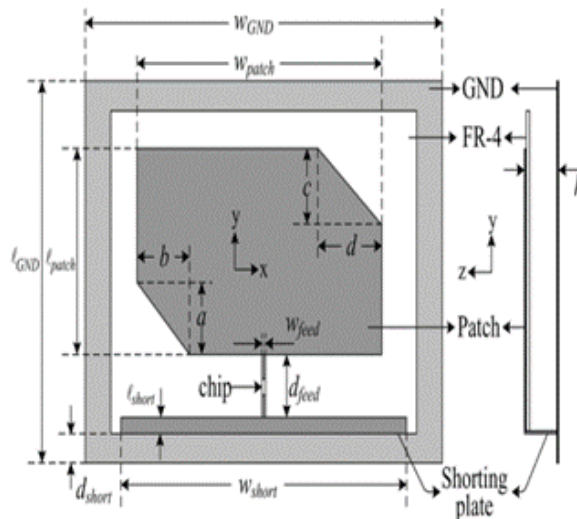


FIGURE 3.4 – Antenne étiquette RFID

Nous avons remarqué que la plupart des conceptions d'antennes étiquettes RFID sont généralement de tailles assez grandes. Pour cela nous avons pensé de concevoir une antenne étiquette de taille relativement petite. En d'autres termes, nous avons opté à la miniaturisation sous un nouvel angle. Notre idée se concentre sur la conception d'une antenne compacte plane en boucle de méandres de forme circulaire, afin de réduire la taille de l'antenne.

3.5 Conception de l'antenne à éléments en forme de U

Nous allons maintenant entreprendre la conception de l'antenne miniature antenne boucle en méandres MLA (Meander Loop Antenna en anglais) de forme circulaire. La structure de l'antenne MLA est représentée par la figure 3.5.

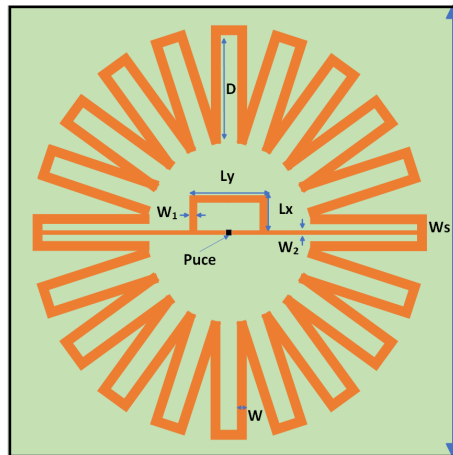


FIGURE 3.5 – Géométrie de l'antenne à éléments en forme de U.

L'antenne est conçue sur un substrat FR-4 de permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$, avec une Tangente de perte $Tan\delta = 0.0025$ et d'une épaisseur $h=1.6$ mm. La taille globale de l'antenne est de $60 \times 60 \times 1.635$ mm³, la fréquence de résonance est de 915 MHz.

L'antenne est adaptée par un T-match. La boucle en méandres est composée de 20 éléments étroits en forme de U connectés en série. Chaque élément étant à 18° l'un de l'autre formant une boucle de forme circulaire. Les paramètres L_x , L_y , W_1 et D servent pour varier l'impédance de l'antenne dans le but de l'adapter avec celle de la puce. L'antenne est alimentée par un contact direct.

Les dimensions de l'antenne sont illustrées dans le tableau 3.1.

TABEAU 3.1 – Dimensions de l'antenne MLA

Paramètre	Valeur (mm)
Ws	6
H	1.6
T	0.035
D	12
W1	2
Ly	7.1
Lx	20
W2	1

3.5.1 Adaptation d'impédance entre l'antenne et la puce

Dans le but d'adapter l'impédance de l'antenne avec celle de la puce ($16-j148 \Omega$), nous allons faire une étude paramétrique du T-match en faisant varier les paramètres L_x , L_y , W_1

et D pour avoir une impédance de l'antenne proche ou égale à $16+j148 \Omega$. Les résultats obtenus sont représentés par la figure 3.6.

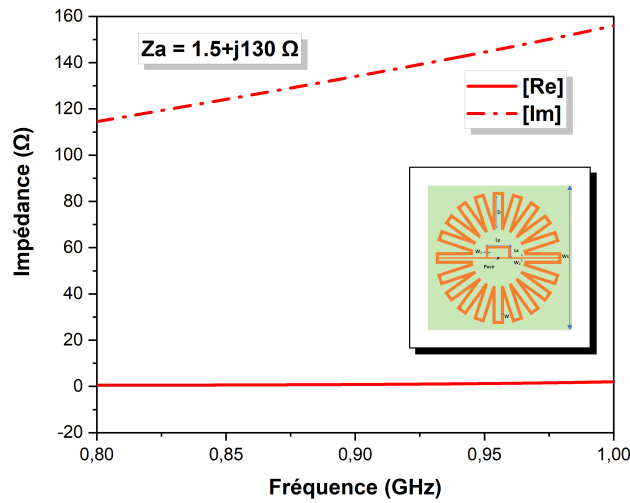


FIGURE 3.6 – Impédance d'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence

On remarque que la valeur de la partie imaginaire varie de 118 à 160 Ω , mais la partie réelle est restée constante autour de 1.5 Ω à 915MHz, l'impédance de l'antenne est sensiblement égale à $1.5+j130 \Omega$. En outre nous avons constaté que le calcul prend beaucoup de temps, ce qui rendrait difficile la réalisation de cette étude paramétrique. Par conséquent, nous avons envisagé d'apporter une modification sur une partie de l'antenne en modifiant la forme des méandres.

3.5.2 Modification de la géométrie de l'antenne

Au lieu d'avoir une forme de segments droits aux extrémités, les éléments en forme de U prendront la forme de demi-cercle, comme illustré dans la figure 3.7.

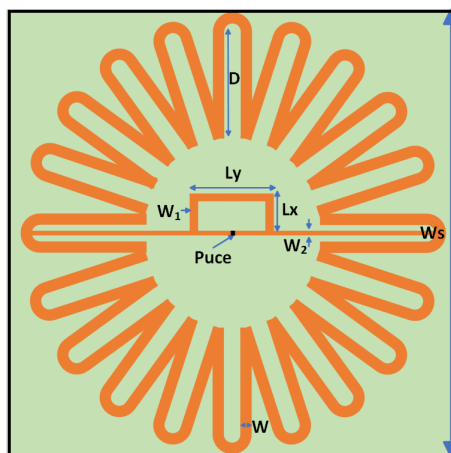


FIGURE 3.7 – Géométrie de l'antenne modifiée.

Les dimensions de l'antenne modifiée sont illustrées dans le tableau 3.2 :

TABLEAU 3.2 – Dimensions de l’antenne MLA

Paramètre	Valeur (mm)
Ws	6
H	1.6
T	0.035
D	12
W1	2
Ly	7
Lx	19.5
W2	2

Après avoir modifié la géométrie de l’antenne MLA et essayer d’optimiser ses paramètres, nous avons constaté que la simulation prend encore beaucoup de temps, et que le résultat obtenu est loin de la valeur voulue, la figure 3.8 montre les variations de la partie réelle et de la partie imaginaire en fonction de la fréquence on trouve que $Z_a=3+j90 \Omega$ à 915 MHz .

Par conséquent, nous envisageons une autre modification afin d’optimiser le temps de calcul.

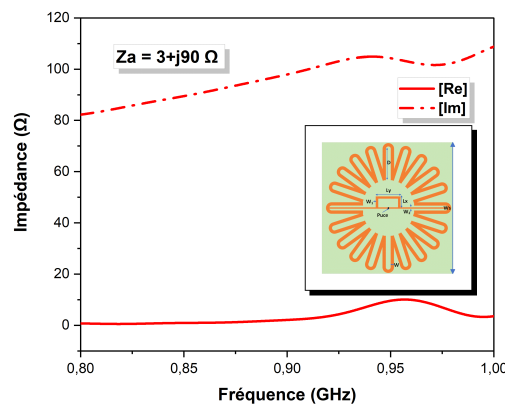


FIGURE 3.8 – Géométrie de l’antenne modifiée

3.5.3 Alimentation de l’antenne par couplage

Un couplage inductif entre l’antenne et le T-match est réalisé comme il est présenté par la figure 3.9.

Le substrat des deux antennes précédentes a été remplacé par le substrat de type Rogers RO4003C. Les dimensions (largeur et longueur) sont conservées.

Un substrat mince de 0.305 mm, de constante diélectrique relative $\epsilon_r = 3.55$ et de tangente de perte $\tan \delta = 0.0027$. La fréquence de résonance est toujours à 915 MHz.

Les paramètres de l’antenne sont regroupés dans le tableau 3.3.

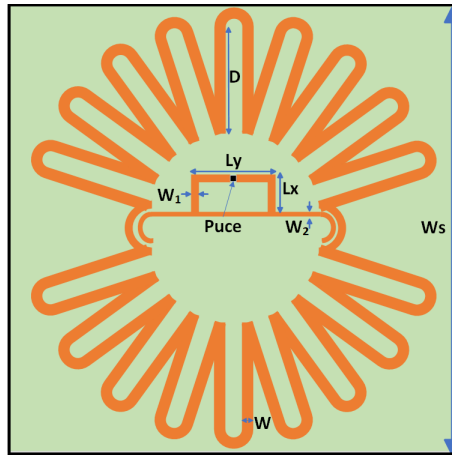


FIGURE 3.9 – Géométrie de l’antenne proposée.

TABEAU 3.3 – paramètres de l’antenne étiquette

Paramètre	Valeur (mm)
Ws	60
H	0.305
T	0.035
D	10.6
W1	0.5
Ly	11
Lx	7
W2	2

3.5.4 Adaptation d’impédance

Nous allons commencer par la première simulation de l’impédance d’entrée de la MLA proposée sur une plage de fréquences de 0.8 GHz à 1.0 GHz. Les résultats de la

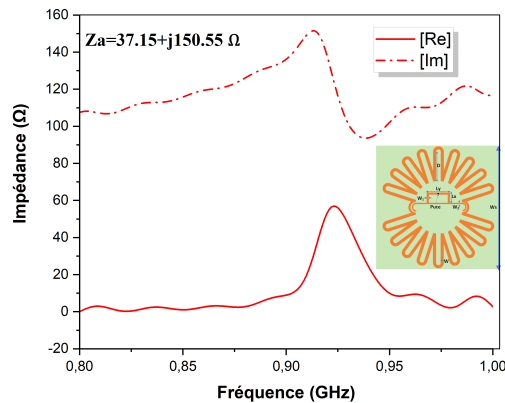


FIGURE 3.10 – Impédance d’entrée de l’antenne en fonction de la fréquence

première simulation, figure 3.10, montrent la présence de deux rebondissements dans la partie réelle ainsi que dans la partie imaginaire de l’impédance d’entrée. Ces deux rebondissements montrent des variations rapides à une certaine fréquence. On va exploiter

ces variations pour avoir l'impédance voulue ($16+j148$) à 915 MHz. D'après le résultat obtenu, nous avons constaté que l'impédance d'entrée de l'antenne à 915 MHz est $Z_a = 37.15+j150.55 \Omega$.

Nous allons maintenant exploiter les effets des paramètres L_x et L_y du T-match sur Z_a .

3.5.5 Impédance d'entrée en fonction du paramètre L_x

Les figures ?? et 3.12 montrent les variations de l'impédance d'entrée (partie réelle et imaginaire) en fonction de la fréquence pour des valeurs types de L_x . On remarque aussi que la partie réelle et la partie imaginaire augmentent lorsque le paramètre L_x augmente au voisinage à 915 MHz.

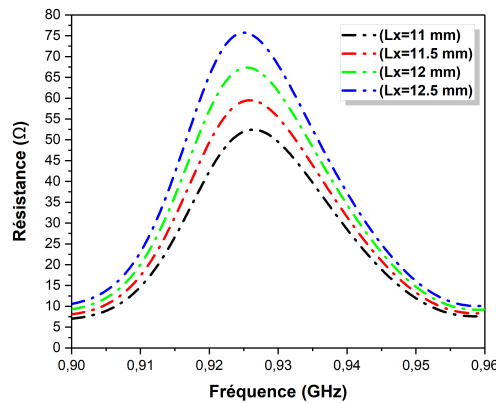


FIGURE 3.11 – Partie réelle en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre L_x .

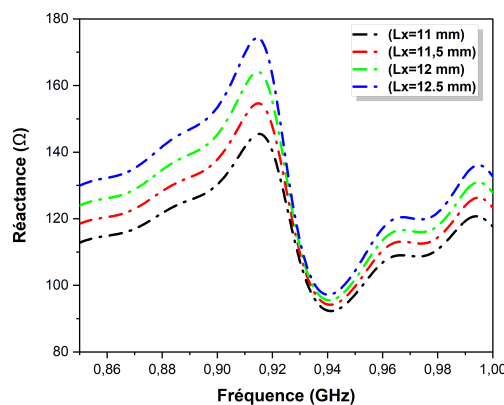


FIGURE 3.12 – Partie imaginaire en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre L_x

Le tableau 3.4 résume les valeurs de L_x et les valeurs correspondantes de l'impédance d'entrée à 915 MHz.

TABLEAU 3.4 – Valeur de l'impédance d'entrée pour des valeurs types du paramètre Lx à 915 MHz

Lx(mm)	11	11.5	12	12.5
R(Ω)	26	32.5	37.5	42.5
X(Ω)	145	152	161	173

3.5.6 Impédance d'entrée en fonction de paramètre Ly

Les figures 3.13 et 3.14 montrent les variations de l'impédance d'entrée (partie réelle et imaginaire) en fonction de la fréquence pour des valeurs types de Ly.

On remarque aussi que la partie réelle et la partie imaginaire augmentent lorsque le paramètre Ly augmente au voisinage de 915 MHz.

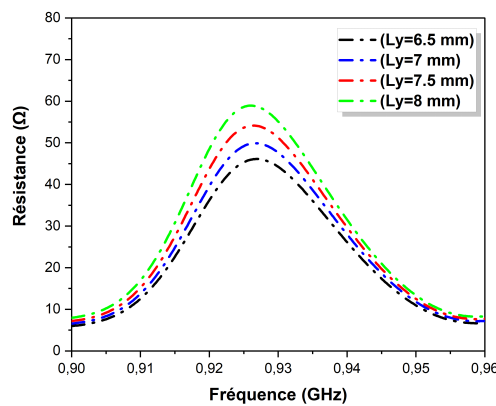


FIGURE 3.13 – Partie réelle en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre Ly.

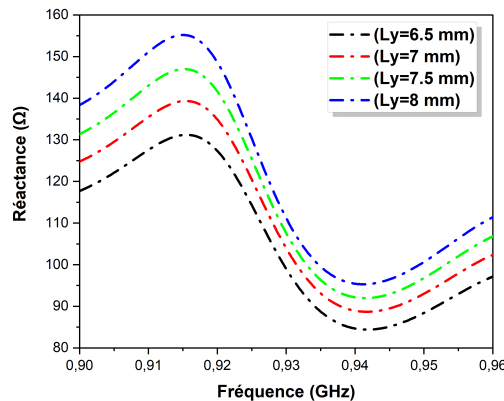


FIGURE 3.14 – Partie imaginaire en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre Ly.

Le tableau 3.5 résume les valeurs de Ly et les valeurs correspondants de l'impédance d'entrée à 915 MHz. En résumé, d'après les résultats obtenus nous avons constaté qu'il y a une proportionnalité directe entre les valeurs des paramètres Lx et Ly du T-match et les valeurs réelles et imaginaires de l'impédance d'entrée de l'antenne, c'est à dire, que

TABEAU 3.5 – Valeur de l'impédance d'entrée pour des valeurs types du paramètre Ly à 915 MHz

Ly(mm)	6.5	7	7.5	8
R(Ω)	22	25	27	31
X(Ω)	131	139	146	155

l'augmentation de la valeur de Lx et Ly entraine une augmentation de la partie réelle et de la partie imaginaire en même temps. Cela ne permet pas d'avoir une adaptation.

3.5.7 Impédance d'entrée en fonction de paramètre D

Nous allons, maintenant voir l'influence du paramètre D de la partie méandres de l'antenne sur son l'impédance d'entrée. Les résultats obtenus sont représentés par les figures 3.15 et ??.

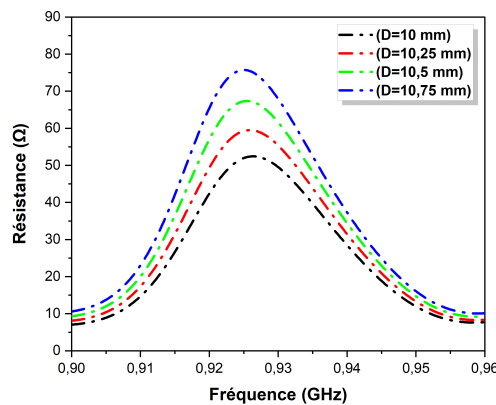


FIGURE 3.15 – Partie réelle en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre D.

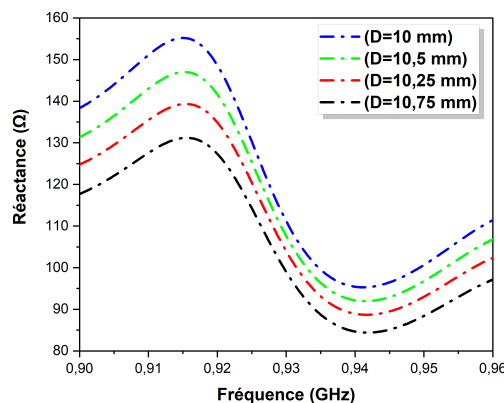


FIGURE 3.16 – Partie imaginaire en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre D.

Le tableau 3.6 résume les valeurs de D et les valeurs correspondants de l'impédance d'entrée à 915 MHz. On constate que lorsque la valeur du paramètre D augmente, la valeur de la résistance augmente, mais celle de la réactance diminue. Il existe donc une

relation de variation inverse entre la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne, ce qui facilite l'obtention de l'adaptation.

TABLEAU 3.6 – valeurs optimales des paramètres de l'antenne proposée

D(mm)	10	10.25	10.5	10.75
R(Ω)	27	30	37	44
X(Ω)	155	147	139	132

A partir des figures ?? à ?? et a partir des tableaux 3.4, 3.5 et 3.6; nous avons étudié paramétriquement et simultanément toutes les combinaisons de valeurs de Lx (autour de 11 mm); Ly (autour de 7 mm) et D (autour de 10 mm).

Comme il est montré par la figure 3.17 l'impédance d'entrée de l'antenne est $Z_a = 16.12 + j148.05 \Omega$. A partir de cette impédance Z_a et l'impédance de la puce $Z_c = 16 - j148 \Omega$, on peut calculer selon l'équation 1.15, le coefficient de transmission qui a une valeur égale à 0.999 qui est très proche à l'unité. Les valeurs optimales qui ont permis d'obtenir l'adaptation sont résumées dans le tableau 3.7 en bas.

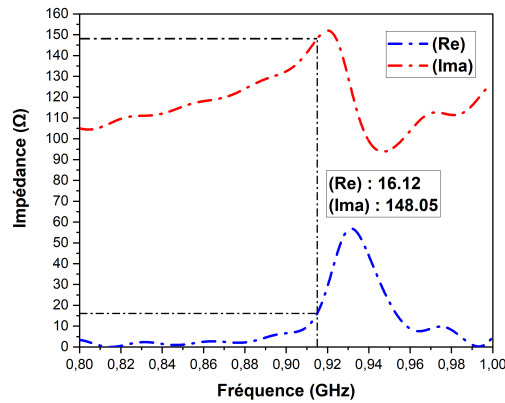


FIGURE 3.17 – Impédance d'entrée de l'antenne optimisée en fonction de la fréquence

TABLEAU 3.7 – valeurs optimales des paramètres de l'antenne proposée

Paramètre	Valeur (mm)
Ws	60
H	0.305
T	0.035
D	10.58
W1	0.5
Ly	7.75
Lx	11.3
W2	0.8

3.5.8 Impédance de l'antenne étiquette

Après avoir déterminé les paramètres optimaux de l'antenne, nous allons maintenant intégrer la puce déjà choisie précédemment (NXP UCODE G2XM) comme il est montré

par la figure 3.18.

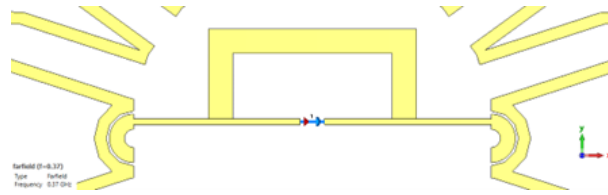


FIGURE 3.18 – Représentation du port d’alimentation et de la puce

L’impédance d’entrée de la puce est donnée par $Z_c = 16 - j148 \Omega$ à la fréquence 915 MHz. Cette impédance est capacitive (partie imaginaire négative) et est égale à $-jX_c = -j148 \Omega$, avec $X_c = 1/2\pi fC = 148 \Omega$. Le calcul nous amène à une valeur de $C = 1.17526911$ pF. Cette valeur est intégrée dans l’antenne pour représenter la puce. Le seuil de détection de la puce est $P_{th} = -17$ dBm. Cette valeur rentre dans le calcul de la portée maximale de l’étiquette. Nous passons maintenant à une autre étape de simulation dont la puce représentée par les éléments localisés (lumped elements) est intégrée dans l’antenne.

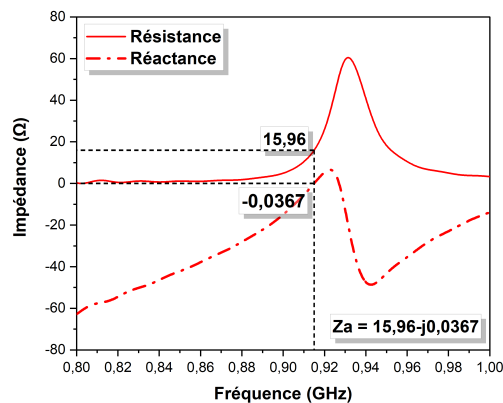


FIGURE 3.19 – Impédance aux bornes du port d’excitation en fonction de la fréquence

Le résultat de la figure 3.19 montre que l’adaptation est réalisée dont la valeur de l’impédance aux bornes du port d’excitation est approximativement égale à $15.96 - j0.0367 \Omega$ à 915 MHz. Ce qui très correcte, puisque l’association en série de l’impédance de l’antenne et celle de la puce donne exactement cette valeur.

3.6 Coefficient de réflexion

Nous allons maintenant calculer le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour des valeurs rapprochées du paramètre D. La figure 3.20 montre qu’à la fréquence 915 MHz, la valeur du coefficient de réflexion est égale à -56.76 dB. Cette valeur montre que l’antenne est bien adaptée à cette fréquence et que la fréquence de résonance coïncide avec l’adaptation pour la même valeur du paramètre $D=10.58$ mm.

La figure 3.21 montre que cette antenne a une bande passante étroite égale à 12 MHz. Ce type de bande convient à l’utilisation des systèmes RFID qui ne demandent pas une large bande.

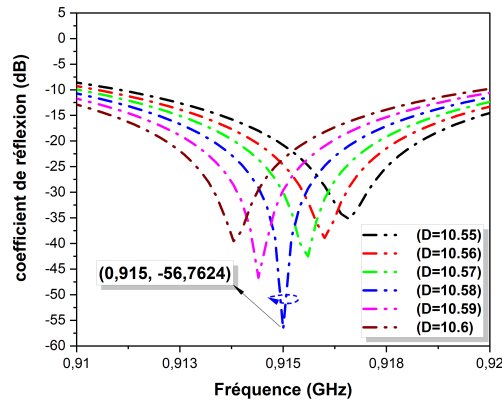


FIGURE 3.20 – Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre D.

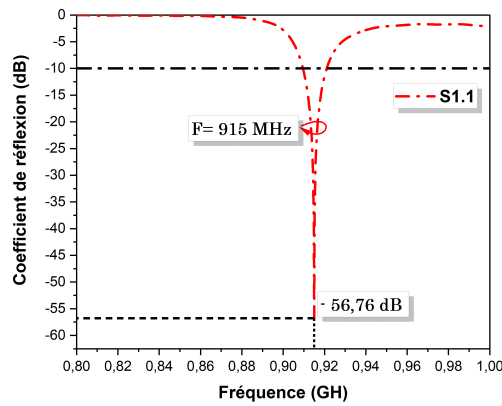


FIGURE 3.21 – coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne proposée.

3.6.1 Représentation du coefficient de réflexion par l'abaque de Smith

Le S_{1,1} peut être représenté par l'abaque de Smith (fig. 3.22). La courbe représente la plage de simulation de 0.8 à 1 GHz. Le coefficient de réflexion à l'intérieur de la bande est représenté par la courbe qui est entre les points 2 et 3. On peut lire l'impédance de l'étiquette au niveau de chaque point. On peut voir aussi que cette courbe passe par le point 1. Ce point est très proche du centre de l'abaque qui est le point d'adaptation de l'étiquette à 915 MHz.

Dans le diagramme de Smith, lors de la représentation d'une impédance de charge de 16Ω , le paramètre S_{1,1} indique l'amplitude et la phase de l'onde réfléchie à la charge. Une valeur du coefficient de réflexion S_{1,1} plus proche de 1 représente une meilleure adaptation entre la charge et la ligne de transmission, indiquant une réflexion minimale.

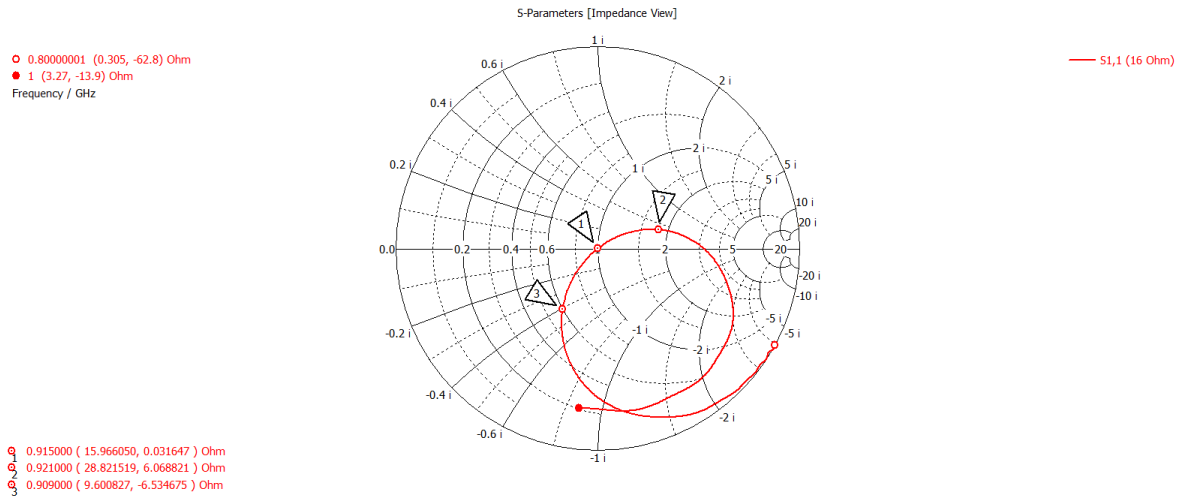


FIGURE 3.22 – coefficient de réflexion en fonction de l'impédance.

3.7 Rapport d'ondes stationnaires (ROS)

Le rapport d'onde stationnaire ou VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) présente une valeur égale 1.00291 proche de la valeur 1 à la fréquence 915 MHz. Cette valeur est très proche de la valeur idéale comme il est montré par la figure 3.23.

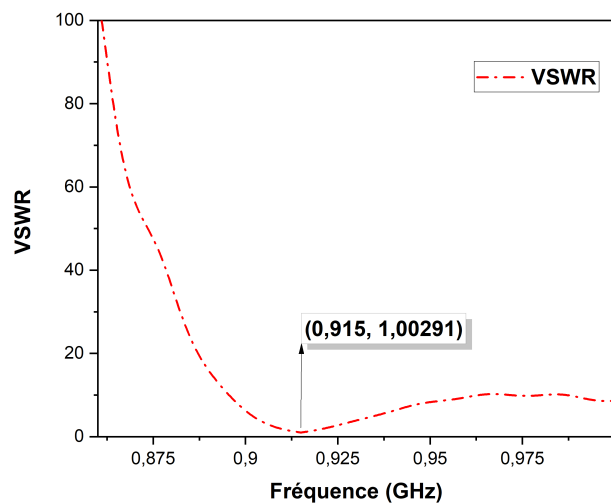


FIGURE 3.23 – Rapport d'onde stationnaire (VSWR) en fonction de la fréquence

3.8 Gain

Notre antenne présente un gain maximal de 1.68 dBi à la fréquence 915 MHz comme il est montré par la figure 3.24.

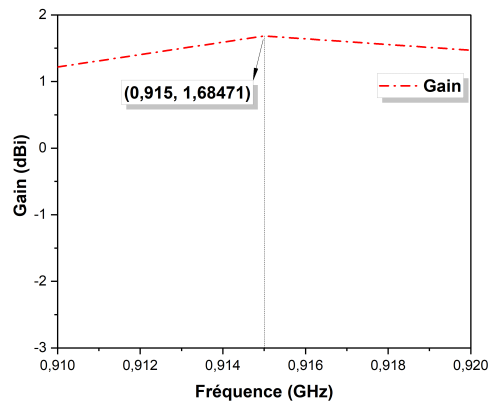


FIGURE 3.24 – Gain en fonction de la fréquence

3.9 Directivité

L'antenne proposée présente une directivité maximale de 2.31 dBi à la fréquence 915 MHz comme il est montré par la figure 3.25.

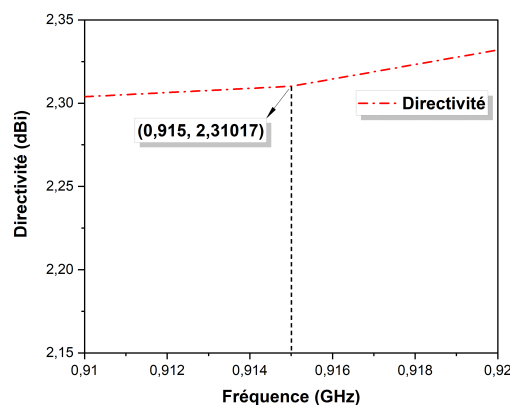


FIGURE 3.25 – Directivité en fonction de la fréquence

3.10 Efficacité de rayonnement

La figure 3.26 représente l'efficacité totale de rayonnement de notre antenne en fonction de la fréquence. Elle est égale à 86,57% à la fréquence 915 MHz.

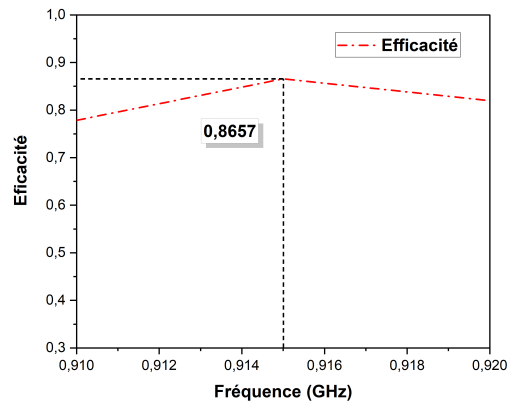


FIGURE 3.26 – Efficacité en fonction de la fréquence

3.11 Diagramme de rayonnement

Notre antenne proposée représente un rayonnement omnidirectionnel comme il a été montré dans la figure 3.27 avec une directivité maximale de **2.31 dBi**.

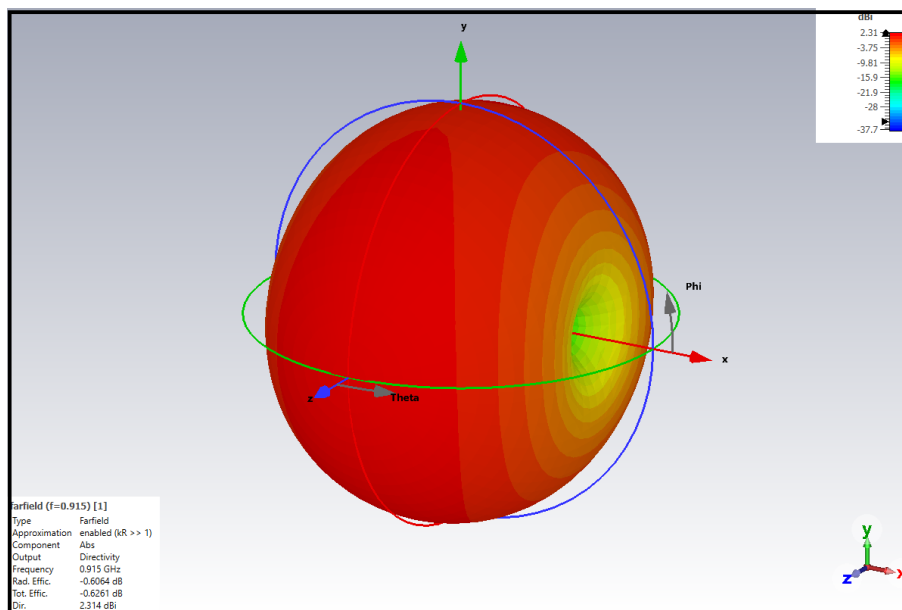


FIGURE 3.27 – Diagramme de rayonnement en 3D.

La figure 3.28 montre le diagramme de rayonnement en représentation polaire de l'antenne proposée avec un gain maximal de 1.68 dBi à la fréquence 915 MHz.

La figure 3.28a représente un rayonnement omnidirectionnel sur le plan y-z pour $\theta = 0^\circ$.

La figure 3.28b représente un rayonnement bidirectionnel maximal sur le plan x-y pour $\varphi = 0^\circ$ et $\varphi = 180^\circ$.

La figure 3.28c représente un rayonnement bidirectionnel maximal sur le plan x-z pour $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 180^\circ$.

La figure 3.28d représente un rayonnement bidirectionnel maximal sur le plan y-z pour $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 180^\circ$.

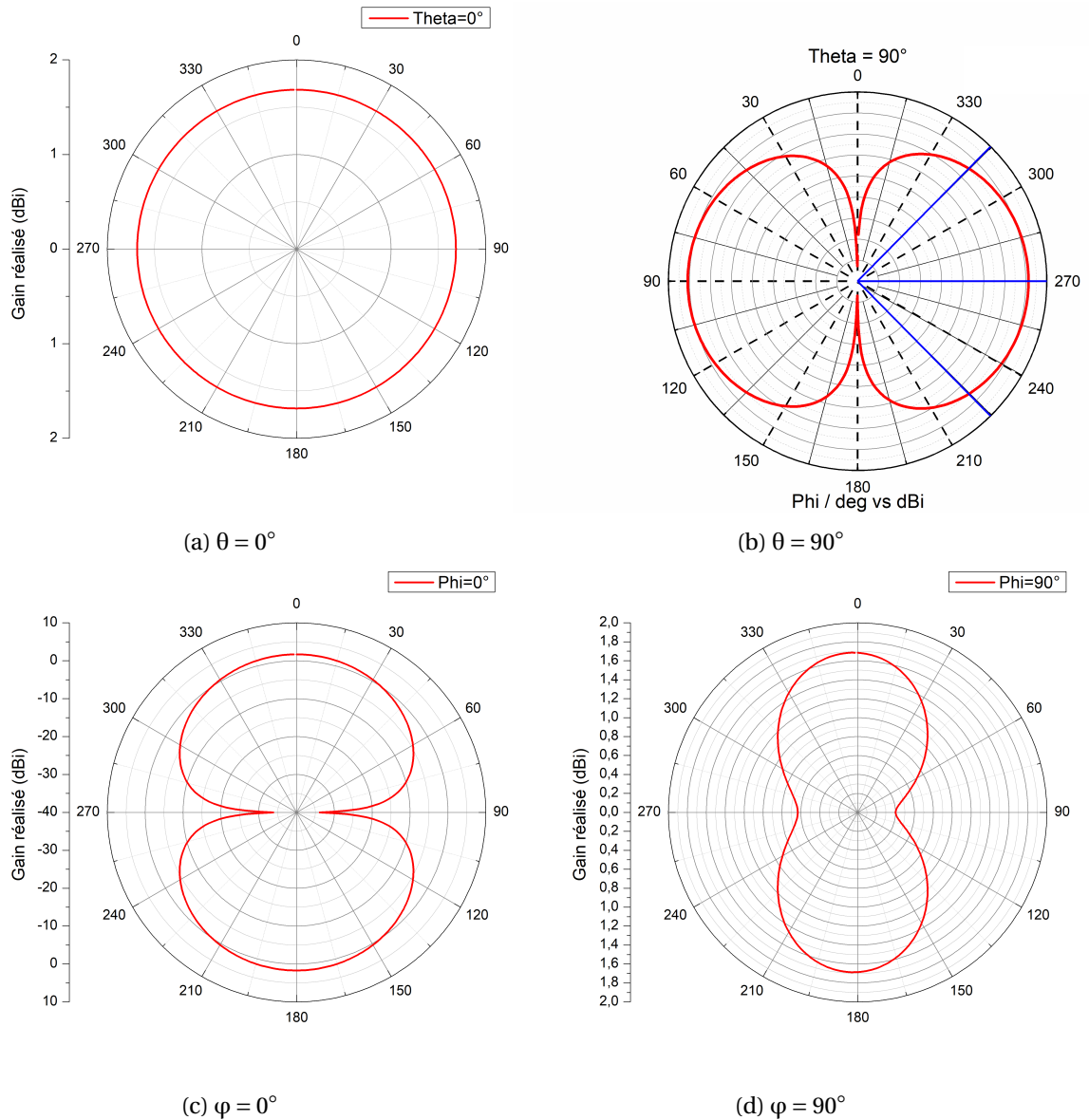


FIGURE 3.28 – représentation polaire du diagramme de rayonnement.

3.12 Portée maximale de l'étiquette

La portée maximale est calculée en utilisant l'équation (1.18).

$$r = Dmax = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{PIRE \times Gr \times \tau}{P_{th}}} \quad (3.2)$$

Avec $Gr = 1.68$ dBi et $\tau = 0.999$.

La portée maximale est 13.98 mètres.

3.13 Comparaison des résultats

Le tableau suivant fait référence à une comparaison sur des dimensions la distance de lecture et le gain entre la MLA proposée et les résultats précédemment publiés :

TABLEAU 3.8 – Tableau de comparaison

Référence	Taille(mm^3)	Gain(dBi)	Portée(m)
[5]	150×50×0.339	-4.45	7.317
[8]	60 × 45× 1.6	0.95	6.2
[9]	127.9 × 189.6 ×21.6	6	8
[45]	86×20×0.8	-3.876	6
[46]	90×90×0.15	2.83	16.3
Antenne proposée	60×60×0.34	1.68	13.98

En raison de la bonne correspondance des résultats obtenus avec notre antenne MLA proposée, le tableau présente une comparaison avec ceux rapportés dans les références [5], [8], [9], [45] et [46]. Notre antenne miniature, d'une taille de $60 \times 60 \times 0.34 \text{ mm}^3$, montre une portée de lecture de 13.98 m et un gain de 1.68 dBi, qui sont comparables à ceux susmentionnés. Ces performances font de notre antenne un excellent candidat pour les applications RFID dans la bande UHF passive, avec une fréquence de fonctionnement de 915 MHz.

3.14 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter une conception d'antenne RFID adaptée à nos besoins spécifiques, en mettant en évidence la miniaturisation. Pour cela, nous nous sommes concentrés sur la conception d'une antenne étiquette RFID UHF passive à boucle en méandres de type circulaire, fonctionnant à une fréquence de 915 MHz. Nous avons utilisé le logiciel CST Microwave Studio. la structure d'antenne proposée ayant une taille miniature de $60 \times 60 \times 0.34 \text{ mm}^3$, une portée de lecture maximale de 13.98 m et un gain de 1.68 dBi. Ces performances sont très encourageantes et démontrent leur potentiel pour des applications pratiques dans le domaine de la RFID et qui peuvent être améliorés à l'avenir.

Conclusion Générale

Ce travail traite essentiellement la technologie RFID et plus précisément la conception d'une antenne étiquette RFID passive utilisée dans la bande UHF à l'aide de l'outil de simulation CST Studio Microwave.

Cependant, les défis persistants concernent la taille des antennes d'étiquettes RFID, qui peut être incompatible avec certaines applications telles que le contrôle d'accès, le suivi des actifs et la gestion des stocks. Dans notre projet, nous accordons une attention particulière sur la conception d'une antenne miniature en boucle plane pour l'identification par radiofréquence (RFID UHF passif) dans la bande de fréquences 860-960 MHz. L'utilisation du simulateur CST Studio Microwave nous a grandement facilité la tâche dans ce processus.

Dans le premier chapitre nous avons présenté la technologie RFID, avec ses composantes et ses classifications. nous avons décrit aussi son principe de fonctionnement, régulation, normes, domaines d'application, les paramètres fondamentaux des antennes et enfin les avantages et les inconvénients.

Le second chapitre nous avons exposé l'utilisation des systèmes dans le contrôle d'accès et la localisation avec leurs domaines d'applications, leurs avantages et inconvénients, et nous avons terminé par un petit détail de son utilisation pour la gestion de stock en décrivant aussi les domaines d'applications avec leurs avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre est consacré pour la conception d'une antenne étiquette RFID passive utilisée dans la bande UHF à la fréquence de résonance 915 MHz à l'aide de l'outil de simulation CST Studio Microwave qu'on s'est familiarisé avec par la suite, en premier lieu nous avons commencé à présenter deux structures d'antennes RFID réalisées précédemment dans la littérature, dans le but de parvenir à une conception adéquate qui puisse satisfaire notre objectif, nous avons pensé à la miniaturisation, d'où la géométrie d'une antenne à boucle circulaire en méandres de taille $60 \times 60 \times 0.34 \text{ mm}^3$. Nous avons attaché beaucoup d'attention à l'adaptation d'impédance entre l'antenne étiquette et la puce choisie. C'est grâce à cette adaptation que nous avons pu obtenir des bons résultats en termes de coefficient de réflexion à -56.76 dBi, un VSWR égale à 1.00291, une efficacité de 86.57%, un gain qui est de 1.68 dBi, d'une portée de lecture atteint les 13.98 m, d'une directivité de 2.31 dBi avec un rayonnement omnidirectionnel et d'une bande passante étroite de 12 MHz, ce qui démonte une fiabilité caractérisée par de bonnes communications entre l'étiquette et le lecteur.

Perspectives :

Nous visons principalement à faire de ce travail une référence pour les études futures sur cette technologie. De plus, il est important de noter que la chaîne de transmission d'un système RFID passif est hautement adaptable et peut être ajustée pour améliorer divers aspects de ses performances, tels que la taille, la distance de lecture, le gain, la polarisation circulaire et bien d'autres.

Bibliographie

- [1] R. E. Floyd, "Rfid in animal-tracking applications," *IEEE Potentials*, vol. 34, no. 5, pp. 32–33, 2015.
- [2] P. Blythe, "Rfid for road tolling, road-use pricing and vehicle access control," in *IEE colloquium on RFID technology (Ref. No. 1999/123)*, pp. 8–1, IET, 1999.
- [3] W. Yao, C.-H. Chu, and Z. Li, "The use of rfid in healthcare : Benefits and barriers," in *2010 IEEE International Conference on RFID-Technology and Applications*, pp. 128–134, IEEE, 2010.
- [4] K. S. Rao, P. V. Nikitin, and S. F. Lam, "Antenna design for uhf rfid tags : A review and a practical application," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 53, no. 12, pp. 3870–3876, 2005.
- [5] 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.
- [6] C. R. Medeiros, J. R. Costa, and C. A. Fernandes, "Rfid smart shelf with confined detection volume at uhf," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 773–776, 2008.
- [7] J.-H. Lu and B.-S. Chang, "Planar compact square-ring tag antenna with circular polarization for uhf rfid applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 2, pp. 432–441, 2016.
- [8] W. Zeng, J. Zhao, B. Ke, and Q. Wu, "Compact microstrip rfid tag antenna mountable on metallic objects," *Procedia Engineering*, vol. 16, pp. 320–324, 2011.
- [9] C. Cho, I. Park, and H. Choo, "Design of a circularly polarized tag antenna for increased reading range," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 10, pp. 3418–3422, 2009.
- [10] C. R. Medeiros, J. R. Costa, and C. A. Fernandes, "Rfid reader antennas for tag detection in self-confined volumes at uhf," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53, no. 2, pp. 39–50, 2011.
- [11] N. Raimbault, *Antenne hélice compacte directive à polarisation circulaire pour dispositif RFID*. PhD thesis, Université Rennes 1, 2015.
- [12] P. V. Nikitin and K. Rao, "Helical antenna for handheld uhf rfid reader," in *2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010)*, pp. 166–173, IEEE, 2010.
- [13] K. Ashton *et al.*, "That 'internet of things' thing," *RFID journal*, vol. 22, no. 7, pp. 97–114, 2009.
- [14] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John wiley & sons, 2011.

- [15] 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.
- [16] W. Yao, C.-H. Chu, and Z. Li, "The adoption and implementation of rfid technologies in healthcare : a literature review," *Journal of medical systems*, vol. 36, pp. 3507–3525, 2012.
- [17] K. Finkenzeller, *RFID handbook : fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication*. John wiley & sons, 2010.
- [18] V. D. Hunt, A. Puglia, and M. Puglia, *RFID : a guide to radio frequency identification*. John Wiley & Sons, 2007.
- [19] A. Zahid, N. Mufti, S. Ullah, M. W. Nawaz, A. Sharif, M. A. Imran, Q. H. Abbasi, *et al.*, "Iot-enabled vacant parking slot detection system using inkjet-printed rfid tags," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 7, pp. 7828–7835, 2023.
- [20] H.-G. Xue, X.-X. Yang, Z. Ma, and Y. Wang, "Single-fed broadband circularly polarised dipole antenna with simple structure," *Electronics Letters*, vol. 53, no. 3, pp. 134–136, 2017.
- [21] D. Paret, *RFID at ultra and super high frequencies : theory and application*. John Wiley & Sons, 2009.
- [22] R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip antenna design handbook*. Artech house, 2001.
- [23] K. S. Rao, P. V. Nikitin, and S. F. Lam, "Impedance matching concepts in rfid transponder design," in *Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies (AutoID'05)*, pp. 39–42, IEEE, 2005.
- [24] P. V. Nikitin and K. Rao, "Performance limitations of passive uhf rfid systems," in *2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 1011–1014, IEEE, 2006.
- [25] B. Glover and H. Bhatt, *RFID essentials*. O'Reilly Media, Inc., 2006.
- [26] L. McCathie, "The advantages and disadvantages of barcodes and radio frequency identification in supply chain management," 2004.
- [27] B. Mekimah, *Amélioration des caractéristiques des patchs microbandes pour les applications ultra large bande*. PhD thesis, Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2020.
- [28] S. A. Ahson and M. Ilyas, *RFID handbook : applications, technology, security, and privacy*. CRC press, 2017.
- [29] C. A. Balanis, "Antenna theory : A review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 1, pp. 7–23, 1992.
- [30] C. A. Balanis, *Antenna theory : analysis and design*. John wiley & sons, 2015.
- [31] V. Monebhurrin, "Standard definitions of terms for antennas and radio wave propagation," in *2019 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*, pp. 1–2, IEEE, 2019.
- [32] J.-P. Hauet, "L'identification par radiofréquence (rfid) techniques et perspectives : Les générateurs électrochimiques," *REE. Revue de l'électricité et de l'électronique*, no. 10, pp. 79–88, 2006.

- [33] K. Domdouzis, B. Kumar, and C. Anumba, "Radio-frequency identification (rfid) applications : A brief introduction," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 21, no. 4, pp. 350–355, 2007.
- [34] V. Moreno, M. A. Zamora, and A. F. Skarmeta, "A low-cost indoor localization system for energy sustainability in smart buildings," *IEEE sensors journal*, vol. 16, no. 9, pp. 3246–3262, 2016.
- [35] P. Asavanarakul, A. Ruengwaree, and S. Sakulchat, "Graphene-based rfid tag antenna for vehicular smart border passings," *CMC-COMPUTERS MATERIALS & CONTINUA*, vol. 71, no. 3, pp. 4737–4748, 2022.
- [36] K. Michael and L. McCathie, "The pros and cons of rfid in supply chain management," in *International Conference on Mobile Business (ICMB'05)*, pp. 623–629, Ieee, 2005.
- [37] W.-R. Hansen and F. Gillert, *RFID for the Optimization of Business Processes*. John Wiley & Sons, 2008.
- [38] T. Sanpechuda and L.-o. Kovavisaruch, "A review of rfid localization : Applications and techniques," in *2008 5th international conference on electrical engineering/electronics, computer, telecommunications and information technology*, vol. 2, pp. 769–772, IEEE, 2008.
- [39] U. Bagchi, A. Guiffrida, L. O'Neill, A. Zeng, and J. Hayya, "The effect of rfid on inventory management and control," *Trends in Supply Chain Design and Management : Technologies and Methodologies*, pp. 71–92, 2007.
- [40] B. Christiansen, *Handbook of research on global supply chain management*. IGI Global, 2015.
- [41] C.-H. Tsai, H.-D. Chen, and C.-Y.-D. Sim, "High-gain circularly-polarized loop tag antenna for long reading distance rfid application," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 10, pp. 2335–2341, 2014.
- [42] G. Zamora, F. Paredes, F. J. Herraiz-Martínez, F. Martín, and J. Bonache, "Bandwidth limitations of ultra high frequency–radio frequency identification tags," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, no. 10, pp. 788–794, 2013.
- [43] D. M. Dobkin, *The RF in RFID : Passive UHF RFID in Practice*. Newnes, 2007.
- [44] I. Antennas and P. Magazine, "Politecnico v. the art of uhf rfid antenna design : impedance matching and sizereduction techniques," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 50, pp. 66–79, 2008.
- [45] Y. Gmih and A. Farchi, "Compact antenna for uhf-rfid tag tested on the human body for identification cards," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–10, 2020.
- [46] 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.