

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de Fin d'Etude
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Techniques**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Réseau de Télécommunications**

**Simulation et réalisations des antennes imprimées pour des
applications RFID**

Présenté par :
Kerboub Marwen
Menidjel Karim

Sous la direction de :
Mr. MEHRI Omar

Année Universitaire : 2020-2021

Remerciement

✚ *Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et*

le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail

✚ *Nous tenons à remercier notre encadreur : Mr. Mehri Omar*

professeur l'université 8 MAI 1945 Guelma pour m'avoir offert un

cadre de travail agréable et un encadrement de qualité.

✚ *Nous remercions tous les honorables professeurs de les avoir*

acceptés de présider cet honorable jury.

✚ *En fin, nous remercions tous nos enseignants du département de*

génie électrique et électronique de l'université 8 MAI 1945

Guelma, sans oublier de citer tous les enseignants qui ont

contribué à ma formation depuis l'école primaire jusqu'aux études

universitaire

Dédicace

Je dédie ce travail a:

Mon PERE Allah yarhmo qui a pleuré de me voir atteindre ce niveau.

Ma très chère MAMAN qui a sacrifié pour que je puisse arriver Jusque-là et qui m'a beaucoup soutenu durant mon cursus.

Mes adorables frères **RAMI, NESSRINE, SAWSENE, RAOUNEK** et **HASSENA** Qui sont toujours à mes côtés et n'ont jamais cessé de me soutenir.

Mes très chères amies : **ANWAR, BASSEM, ZAKIE, ALLA, KARIM** et **LOTFI**.

En fin à toute ma promotion de Télécommunications Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible, Je vous dis merci.

Kerboub Marwen

Dédicace

J'ai l'immense honneur de dédier ce mémoire :

A mes très chers parents qui étaient présents pour moi durant toute ma vie.

Je dédie ce travail aussi à mes frères.

*À mes très chers amis : **KHELIL FEKHR ELISLAM, BEN ARBIA AYMEN, TOUAHRIA HAYTHEM.....***

A tous mes connaissances

A tous mes enseignants qui ont fait leurs possibles pour nous donner le maximum d'informations concernant notre étude

A tous la promotion RST 2021.

Menidjel Karim

RESUME

Actuellement, le code à barres est progressivement remplacé par des tags RFID (Radio Fréquence Identification) dites aussi « étiquettes communicantes ayant la possibilité de stocker de l'information de manière dynamique et de communiquer sans fil avec leur l'environnement ambiant. Cette technologie trouve ses applications dans différents domaines tels que la traçabilité, suivi médical de l'état d'une passion, le pilotage de la production, Etc...

Ce projet de fin d'étude vise à concevoir des antennes imprimées pour des applications RFID. Pour cela diverses conceptions d'antennes ont été présentées.

Pour chaque antenne, nous avons optimisé sa géométrie et ses dimensions en faisant plusieurs simulations avec le logiciel CST afin de déterminer les paramètres de l'antenne qui influencent le plus ses performances.

Les performances de ces antennes ont été également évaluées à travers la représentation du coefficient de réflexion, du diagramme de rayonnement en 2D et 3D et du gain. La validation des résultats pour la dernière structure à donner beaucoup de précision entre les résultats mesurés et simulés en termes de coefficient de réflexion.

Mots clés : Tag, lecteur, système RFID, bande UHF, bande ULB, antennes RFID.

ABSTRACT

Currently, the barcode is gradually being replaced by RFID (Radio Frequency Identification) also known as "communicating labels having the ability to store information dynamically and to communicate wirelessly with their surrounding environment. This technology finds its applications in various fields such as traceability, medical monitoring of the state of a passion, production management, etc.

This end-of-study project aims to design printed antennas for RFID applications. For this various antenna designs were presented.

For each antenna, we optimized its geometry and dimensions by performing several simulations with the CST software in order to determine the antenna parameters that most influence its performance.

The performance of these antennas was also evaluated through the representation of the reflection coefficient, the 2D and 3D radiation pattern and the gain. The validation of the results for the last structure to give a lot of precision between the results measured and simulated in terms of coefficient of reflection.

Keywords: Tag, reader, RFID system, UHF band, ULB band, RFID antennas.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENT	i
DÉDICACE	ii
RESUME	iv
ABSTRACT.....	iv
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES ABREVIATIONS.....	xiii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 01 : LA TECHNOLOGIE RFID	4
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 BREF HISTORIQUE DE LA RFID.....	5
I.3 LES SYSTEMES RFID	6
I.3.1 LECTEURS RFID	6
I.3.2 LE TAG RFID (ETIQUETTE)	7
I.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME RFID.....	8
I.5 DIFFERENTS TYPES DE TAGS.....	8
I.5.1 TAGS AVEC PUCE	8
I.5.2 TAG SANS PUCE	10
I.6 FREQUENCES DES SYSTEMES RFID.....	10
I.6.1 DIFFERENTES BANDES DE FREQUENCES.....	10
I.6.2 COMPARATIFS DES DIFFERENTS SYSTEMES RFID.....	11
I.7 NORMES DES SYSTEMES RFID	12
I.8 CLASSEMENT PAR DISTANCE DE COMMUNICATION	13
I.8.1 SYSTEME RFID EN CHAMP PROCHE	14
I.8.2 SYSTEME RFID EN CHAMP LOINTAIN	14

I.9 ETAT DE L'ART DES SYSTEMES RFID UHF PASSIFS.....	16
I.9.1 PROTOCOLE DE COMMUNICATION	16
I.9.2 ARCHITECTURE D'UN LECTEUR RFID UHF	18
I.9.3 ARCHITECTURE DU TAG RFID UHF PASSIF	21
I.10 APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE RFID	26
I.11 AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UN SYSTEME RFID.....	27
I.11.1 AVANTAGES	27
I.11.2 INCONVENIENT	28
I.12 CONCLUSION.....	29
CHAPITRE 02 : LES ANTENNES RFID.....	30
II.1 INTRODUCTION	31
II.2 LES PARAMETRES FONDAMENTAUX DES ANTENNES	31
II.2.1 LES PARAMETRES CIRCUITS.....	31
II.2.2 LES PARAMETRES DE RAYONNEMENT	36
II.3 TYPES D'ANTENNE RFID	40
II.3.1. ANTENNES UNIVERSELLES	40
II.3.2. ANTENNES RFID LARGE PORTÉE.....	40
II.3.3. ANTENNES RFID DE COURTE PORTÉE.....	41
II.3.4. ANTENNES RFID ROBUSTES.....	41
II.3.5. ANTENNES RFID DU SOL.....	42
II.4 TYPE DES TAGS RFID PASSIFS.....	43
II.4.1 TAG EN BOUCLE	43
II.4.2 L'ANTENNE TAG DIPOLE	44
II.4.3 PATCH TAGS	45
II.5 LES PUCES RFID	46
II.6 CLASSIFICATION DES ANTENNES	47
II.6.1 ANTENNES OMNIDIRECTIONNELLES	47

II.6.2 ANTENNES SECTORIELLES	48
II.6.3 ANTENNE DIRECTIONNELLE (DIRECTIVES)	48
II.7 DOMAINE D'UTILISATION	49
II.8 ADAPTATION D'IMPEDANCE DES ANTENNES DIPOLES.....	49
II.8.1 ADAPTATION D'UNE ANTENNE DIPOLE PAR UNE INDUCTANCE SERIE	49
II.8.2 ADAPTATION D'UNE ANTENNE PAR UNE INDUCTANCE PARALLELE.	50
II.8.3 ADAPTATION D'IMPEDANCE PAR COUPLAGE	51
II.8.4 ADAPTATION D'IMPEDANCE PAR T-MATCH STRUCTURE.....	52
II.9 CONCLUSION	53
CHAPITRE 03 : CONCEPTION ET SIMULATION D'ANTENNES POUR SYSTEME	
RFID	54
III.1 INTRODUCTION.....	55
III.2 LA METHODOLOGIE DE CONCEPTION D'ANTENNES DE TAGS RFID PASSIFS	55
III.3 ANTENNE PATCH HEXAGONALE MONO BANDE POUR RFID.....	56
III.3.1 ANTENNE HEXAGONALE DE DEPART	56
III.4 ANTENNE PATCH BI-BANDE POUR RFID.....	59
III.4.1 ANTENNE RECTANGULAIRE DE DEPART	59
III.4.2 ANTENNE BI-BANDE	61
III.5 ANTENNE DIPOLE FRACTALE RFID ADAPTEE A 50 Ω	63
III.5.1 FRACTALE DE HILBERT A L'ITERATIONS DEUX [35,36]	63
III.5.2 ANTENNE DIPOLE FRACTALE RFID	64
III.6 REALISATION	67
III.6.1 DESCRIPTION DU MATERIEL	67
III.6.2 LE MODELE REALISÉ	68
III.6.3 MESURES EXPERIMENTALES	69
III.7 CONCLUSION	70

CONCLUSION GENERALE.....71
REFERENCES73

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Exemple d'un lecteur RFID.	7
Figure I.2 : Tag RFID.	7
Figure I.3 : Fonctionnement d'un système RFID.	8
Figure I.4 : Exemple d'un Tag actif RFID	9
Figure I.5 : Exemple d'un tag RFID UHF passif.	9
Figure I.6 : RFID UHF avec Tag semi-passif.	10
Figure I.7 : Exemple tag sans puce.	10
Figure I.8 : Le champ magnétique du lecteur.	14
Figure I.9 : Représentation schématique d'une communication RFID.	16
Figure I.10 : Principales procédures de communication RFID.	17
Figure I.11 : Schéma bloc fonctionnel d'un lecteur RFID UHF.	19
Figure I.12 : Chaîne d'émission simplifiée d'un module UHF.	19
Figure I.13 : Chaîne de réception simplifiée d'un module UHF.	20
Figure I.14 : Emission/réception d'un lecteur RFID UHF. (a) Architecture bi statique.	20
Figure I.15 : Bloc de compensation dans la chaîne d'émission/réception.	21
Figure I.16 : Schéma fonctionnel d'un tag UHF RFID.	21
Figure I.17 : Schéma bloc d'un front-end d'un tag UHF passif.	22
Figure I.18 : Schéma bloc de l'architecture d'un Tag RFID UHF.	23
Figure I.19 : Réflexion de l'onde incidente.	24
Figure I.20 : Prévision de l'évolution du marché de la RFID.	27
Figure II.1 : Schéma équivalent d'une antenne en transmission.	32
Figure II.2 : Schéma équivalent d'une antenne en réception.	32
Figure II.3 : Représentation de Γ^* sur un abaque de Smith.	34
Figure II.4 : Illustration des régions du champ électromagnétique d'une antenne.	36
Figure II.5 : Illustration du diagramme de rayonnement d'une antenne.	38
Figure II.6 : Antenne universelle RFID laird 980.	40
Figure II.7 : Antenne RFID large portée.	41
Figure II.8 : Antenne RFID courte portée.	41
Figure II.9 : Antenne RFID robustes.	42
Figure II.10 : Antenne RFID du sol.	43

Figure II.11: Contrôle d'accès.	Figure II.12: Paiement électronique.	44
Figure II.13: Antenne Dipôle.....		44
Figure II.14: Types des tags RFID dipôle.		45
Figure II.15: Structure de l'antenne patch.....		45
Figure II.16: Les puces RFID.		47
Figure II.17: Diagramme de rayonnement d'une antenne omnidirectionnelle Isotrope.		47
Figure II.18: Diagramme de rayonnement d'une antenne sectoriel.		48
Figure II.19: Diagramme de rayonnement d'une antenne Directionnelle.....		49
Figure II.20: Modèle circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée avec une inductance en série.....		50
Figure II.21: Géométrie de l'antenne dipôle adaptée par une inductance série.		50
Figure II.22: Modèle circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée par une inductance parallèle.		51
Figure II.23: Géométrie de l'antenne dipôle adaptée par une inductance parallèle.....		51
Figure II.24: Prototype de tag composé d'une antenne dipôle adaptée par couplage magnétique.....		51
Figure II.25: Antenne dipôle adaptée par couplage.		52
Figure II.26: la configuration T-Match et le circuit équivalent.....		52
Figure II.27: Le model de circuit équivalent de la configuration T-Match.....		53
Figure III.1: Méthodologie de conception d'antennes de tags RFID passifs.		56
Figure III.2 : Géométrie de l'antenne patch hexagonale de départ.		57
Figure III.3 : Coefficient de réflexion de l'antenne hexagonale de départ.....		57
Figure III.4: Coefficient de réflexion de l'antenne hexagonale optimisée.		58
Figure III.5: Diagramme de rayonnement 2D&3D (Directivité) à $f=5.8\text{GHz}$ pour l'antenne hexagonale.		59
Figure III.6: Géométrie de l'antenne patch rectangulaire mono-bande.		60
Figure III.7: Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire mono-bande.....		60
Figure III.8: Géométrie de l'antenne patch rectangulaire bi-bande.		61
Figure III.9: Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire bi-bandes (2.45&5.8 GHz).....		62
Figure III.10: Diagramme de rayonnement 2D&3D dans les deux fréquences 2.5 GHz et 5.8 GHz pour l'antenne patch rectangulaire bi-bandes.....		63

Figure III.11: Géométrie de Hilbert a l'itération deux.	64
Figure III.12: Structure de l'antenne dipôle fractale.	64
Figure III.13: Influence du paramètre « b » sur l'antenne.	65
Figure III.14: Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale.	66
Figure III.15: Diagrammes de rayonnement de l'antenne dipôle fractale à la fréquence 2.45 GHz.	66
Figure III.16: Impédance d'entrée de l'antenne dipôle fractale.	67
Figure III.17: La machine ProtoMat S103.	68
Figure III.18: (a) antenne dipôle fractale simulée, (b) antenne dipôle fractale réalisée.	69
Figure III.19: Analyseur de réseau vectoriel.	69
Figure III.20 : Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale simulé et mesurer.	70

LISTE DES TABLEAUX

Table I. 1 : Bref historique de la RFID .	6
Table I. 2 : Différentes fréquences des systèmes RFID.	11
Table I. 3: Comparaison de différentes bandes de la technologie RFID.	12
Table I. 4 : Normes ISO 18000 pour la standardisation des systèmes RFID.	13
Table I. 5: Classement des tags RFID par le champ de rayonnement.	15
Table II. 1: présente quelques valeurs de Γ^* en fonction de l'impédance Zl .	33
Table III. 1 : Dimensions de l'antenne hexagonale de départ.	57
Table III. 2: Dimensions de l'antenne hexagonale après optimisation.	58
Table III. 3: Dimensions optimisées de l'antenne patch rectangulaire mono-bande	60
Table III. 4: Dimensions optimisées de l'antenne patch rectangulaire bi-bande.	61
Table III. 5: Dimensions optimisées de l'antenne dipôle fractale.	65

LISTE DES ABREVIATIONS

ASK: Amplitude Shift Key.

CST: Computer Simulation Technology.

CST MWS: Computer Simulation Technology Micro Wave Studio.

DB: decibels.

DBi: decibel isotropic.

EPC: Electronic Product Code GLOBAL.

HF: Haut Frequency.

ISO: International Organization for Standardization.

LF: Low Frequency.

PSK: Phase Shift Keying.

RTF: Reader Talk First.

RFID: Radio-Frequency Identification.

TTF: Tag Talk First.

UHF : ultra haute fréquence (Ultra High Frequency).

ULB: Ultra Large Bande.

INTRODUCTION GENERALE

L'identification par radiofréquence (RFID), qui a été développée durant la Seconde Guerre mondiale, est une technologie qui offre une capacité d'identification et de suivi sans fil plus robuste que celle d'un code à barres. La RFID peut être utilisée par exemple pour identifier des objets dans l'entreposage, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et d'autres processus d'automatisation. Dans un système RFID passif typique, chaque objet individuel est équipé d'une petite étiquette peu coûteuse qui comprend une antenne et un circuit intégré spécifique à l'application avec un code de produit électronique unique. Le lecteur émet un signal pour activer l'étiquette, qui traverse la zone électromagnétique générée par une antenne de lecture, et décode les données codées dans la micro puce de l'étiquette. Les données sont ensuite transmises à un ordinateur hôte pour le traitement. Le signal d'interrogation provenant du lecteur doit avoir suffisamment de puissance pour activer la micro puce de l'étiquette, effectuer un traitement de données et retransmettre une séquence modulée sur une distance de lecture requise.

L'objectif de notre projet de fin d'étude est de faire une contribution à l'étude et à la conception des antennes pour lecteurs et Tag RFID, on partant par une antenne hexagonale mono-bandes et rectangulaire bi-bandes jusqu'à l'antenne dipôle à base des motifs fractales, Qui vaut la peine d'aller jusqu'à la réalisation, ainsi que la validation des résultats à donner beaucoup de précision entre les résultats mesurées et simulées en terme de coefficient de réflexion.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons le contexte général de la technologie RFID où nous rappellerons l'historique de la technologie RFID et les systèmes RFID, nous allons décrire les principes de fonctionnement de ces systèmes, ainsi que les différents types des tags (tags avec puce et sans puce). Nous présenterons ensuite les fréquences et les normes des systèmes RFID et aussi l'état de l'art. Puis nous rappellerons le classement par distance de communication (système RFID en champ proche, système RFID en champ lointain) et les différents domaines d'application (santé, culture, industrie ...). Nous attirerons l'attention sur les avantages et inconvénients. Nous terminerons ce premier chapitre par une conclusion.

Le deuxième chapitre est consacré au dénombrement des paramètres fondamentaux des antennes RFID tels que les paramètres circuit (impédance, bande passante, ...) et les paramètres de rayonnement (gain, diagramme de rayonnement, ...) et aussi les types d'antenne RFID (antennes universelles, antennes RFID large portée...), un certain modèle de puces, puis nous rappellerons la

Introduction générale

classification des antennes (antennes omnidirectionnelles, antenne sectoriel...). Avant d'entamer le dernier chapitre, nous allons citer les techniques d'adaptation d'impédance des antennes dipôles.

Concernant le troisième chapitre, dont le but est la conception de nos antennes tag et lecteur RFID à caractéristiques améliorées, nous allons d'abord définir le logiciel utilisé CST, et la méthodologie de travail. Nous entamerons ensuite la conception de notre antenne patch hexagonale mono bande et rectangulaire Bi-bande pour RFID où l'on détaillera les différentes étapes de simulation pour aboutir aux résultats finaux, Après, nous avons simulé une antenne dipôle fractale RFID adaptée à 50Ω , et enfin une réalisation et validation de résultats. Le travail est achevé par une conclusion générale.

CHAPITRE I : LA TECHNOLOGIE RFID

I.1 INTRODUCTION

La technologie RFID (Radio Frequency Identification) ou identification par fréquence radio fait partie des technologies d'identification automatique, au même titre que la reconnaissance optique de caractères ou de codes barre. Le but de ces technologies est de permettre l'identification d'objets ou d'individus par des machines. La technologie RFID a la particularité de fonctionner à distance, sur le principe suivant : un lecteur émet un signal radio et reçoit en retour les réponses des étiquettes ou tags qui se trouvent dans son champ d'action. Le tag se compose d'un circuit intégré et d'une antenne utilisée pour émettre/recevoir les ondes électromagnétiques vers/depuis le lecteur.

Ce premier chapitre a pour objectif de faire une présentation générale de la technologie RFID, en commençant par son historique puis les différents constituants d'un système RFID seront décrites à savoir le lecteur, les tags et système de traitement de données, nous donnons aussi les principes de fonctionnement, et quelques applications. Ensuite, les différents types de tags ainsi que les fréquences de fonctionnement de la technologie RFID seront détaillés. Enfin, un état de l'art sommaire et non exhaustif de différentes antennes commerciales pour lecteurs RFID, ainsi que les avantages et les inconvénients de la technologie RFID seront présentés.

I.2 BREF HISTORIQUE DE LA RFID

La technologie d'identification par radiofréquence RFID est véritablement née durant la Seconde Guerre mondiale. Les Allemands, les Japonais, les Américains et les Britanniques ont utilisé tous un radar qui avaient pour rôle d'envoyer un signal questionnant les Tags placés sur les avions afin de distinguer les alliés des ennemis. L'identification à distance a été proposée par Stockman en 1948 [1]. Le tableau I.1. Dresse un historique rapide de l'évolution de la RFID.

1948	Les études d'Harry Stockman ont donné lieu aux premiers articles scientifiques sur la RFID.
1960	Les applications commerciales sont de plus en plus visées, d'autres brevets sont déposés surtout autour de la problématique du contrôle d'accès. Le premier tag fait son apparition.
1970	La RFID commence à être commercialisée. Elle rentre véritablement en pleine phase de recherche et développement dans le domaine industriel. Le tag RFID passif fait sa première apparition. Il permet de réduire le cout de fabrication avec des portées faibles de quelques centimètres. Les premiers tags RFID de ce type sont conçus avec des éléments discrets.
1980	Les fabricants des tags RFID se multiplient. Le bétail et le suivi des chaînes de production dans les industries automobiles font l'objet des premières applications commerciales de la RFID. En Europe l'application RFID pour la traçabilité des animaux fait son apparition.
1990	C'est le début de la mise en place des normes pour la RFID [1]. IBM, Philips, TI, Tagsys, Motorola produisent des tags RFID pour les bandes 915 MHz et 2.4 GHz. La diode Schottky CMOS permet la fabrication de la puce RFID.
2000	Le développement de la RFID se poursuit. La taille des étiquettes RFID dépend uniquement des dimensions des antennes des tags. Les fabricants des produits RFID (lecteurs, tags et puces) deviennent nombreux partout dans le monde.
2004	La mise en place du standard EPC pour la RFID UHF sous la norme ISO 18000-6C [1, 15,16].
2007	Première conférence internationale, IEEE exclusivement sur la thématique RFID.
2010	La conférence IEEE RFID-TA fait son apparition de même que la RFID sans puce intègre le marché. Du point de vue de la régulation, la RFID gagne des nouvelles bandes de fréquence et profite de quelques milliwatts supplémentaires autorisés sur certaines fréquences.

Table I.1: Bref historique de la RFID [2].

I.3 LES SYSTEMES RFID

Un système RFID se compose toujours de deux composants: Le Tag qui est situé sur l'objet à identifier et le lecteur qui a pour rôle d'identifier ce Tag. Systèmes RFID permettent la lecture et l'écriture à distance et sans contact de données d'un Tag.

I.3.1 LECTEURS RFID

Un lecteur RFID est un appareil qui est utilisé pour interroger le tag RFID. Le lecteur joue le rôle d'émetteur et de récepteur. Le lecteur comporte une antenne (Émetteur) qui émet

des ondes radio alors le tag répond en renvoyant ses données. Le lecteur utilise son antenne (récepteur) attachée pour recueillir les données reçues à partir de tag. Il transmet ensuite ces données à un ordinateur pour traitement. La communication de système RFID est basée sur le principe de relation Maître-Esclave, où le lecteur RFID joue le rôle de Maître et le tag celui d'esclave [1]. Le lecteur RFID communique juste avec des tags qui sont dans son champ de lecture. Les lecteurs peuvent prendre plusieurs formes et tailles fonctionnent sur de nombreuses fréquences différentes, et peuvent offrir une large gamme de fonctionnalités. Un exemple d'un Lecteur RFID est illustré par la figure I.1.



Figure I.1: Exemple d'un lecteur RFID.

I.3.2 LE TAG RFID (ETIQUETTE)

Une des méthodes d'identification les plus utilisées est d'abriter un numéro de série ou une suite de données dans une puce (chip) et de relier cette dernière à une petite antenne. Ce couple (puce silicium + antenne) est alors encapsulé dans un support (RFID Tag ou RFID Label). Ces "tag" peuvent alors être incorporés dans des objets ou être collés sur des produits. Le tout est alors imprimé sur un support pliable, souvent adhésif. Le format des données inscrites sur les étiquettes est standardisé à l'initiative d'EPC (Global Electronic Product Code) [3].

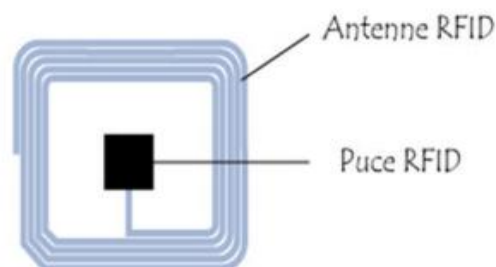


Figure I.2: Tag RFID.

I.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME RFID

Un signal radio est émis par un lecteur via une antenne. Les transpondeurs passant à proximité, utilisent l'énergie électromagnétique émise par cette antenne pour s'alimenter et transmettre les données qu'ils contiennent. La fréquence du signal radio émis par l'antenne peut varier de 125KHz à 2,45GHz. De cette fréquence dépendra la distance de communication entre le transpondeur et l'antenne (de 1 à 10m) ainsi que la vitesse de transfert des données (de 10Kb/s à 200Kb/s) [4]. La figure I.3 présente le fonctionnement général d'un système RFID.

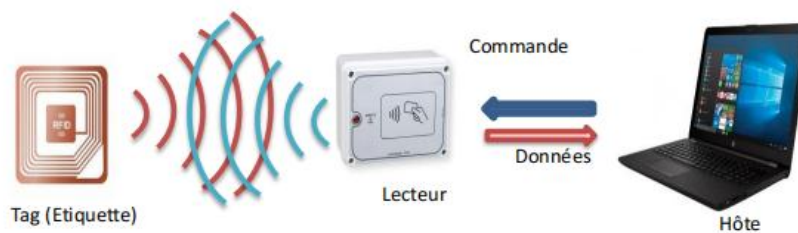


Figure I.3: Fonctionnement d'un système RFID.

I.5 DIFFERENTS TYPES DE TAGS

I.5.1 TAGS AVEC PUCE

On peut différencier les tags RFID constitués d'une puce en fonction de leur source d'alimentation. On peut distinguer trois catégories : tag actif, tag passifs et tag semi-passif [5].

a) tag actif

Les étiquettes actives sont les plus chères car elles sont plus complexes à produire et assurent, outre des fonctions de transmission, des fonctions soit de captage soit de traitement de l'information captée, soit les deux. De ce fait, elles ont besoin d'une alimentation embarquée et sont donc caractérisées par la durée de vie de celle-ci. Si le prix est un facteur discriminatif, il faut savoir que ces étiquettes s'avèrent particulièrement bien adaptées à certaines fonctions, dont notamment la création de systèmes d'authentification, de sécurisation, d'antivol, etc... En général, elles sont idéales pour tout ce qui concerne le déclenchement d'une alerte ou d'une alarme. Elles peuvent émettre à plusieurs centaines de mètres. Un exemple d'un tag RFID actif est montré par la figure I.4.

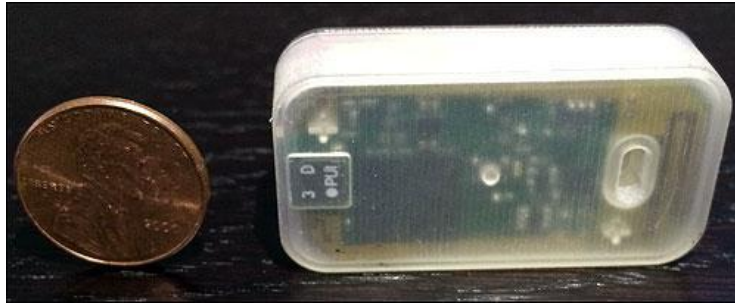


Figure I.4: Exemple d'un Tag actif RFID [5].

b) tag passif (sans batterie)

Ces tags, ne disposant pas d'alimentation externe, dépendent de l'effet électromagnétique de réception d'un signal émis par le lecteur. C'est ce courant qui leur permet d'alimenter leurs microcircuits. Ils sont peu coûteux à produire et sont généralement réservés à des productions en volume. Ce sont eux que l'on trouve plus particulièrement dans la logistique et le transport. Ils utilisent différentes bandes de fréquences radio selon leur capacité à transmettre à distance plus ou moins importante et au travers de substances différentes (air, eau, métal). La distance de lecture est inférieure à un mètre. Les basses et hautes fréquences sont normalisées au niveau mondial. Ces puces sont collées sur les produits pour un suivi allant jusqu'aux inventaires. Elles sont jetables ou réutilisables suivant les cas [6].

La figure I.5 illustre un exemple d'un tag RFID UHF passif. Ce type de tag est constitué d'une antenne et d'une puce électronique tous les deux intégrés sur le même support.

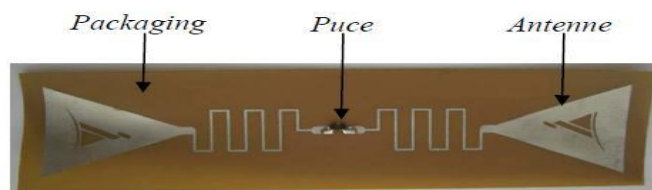


Figure I.5: Exemple d'un tag RFID UHF passif.

c) tag semi-passif

Ces tags constituent un compromis entre les tags passifs et actifs. En effet, de même façon que les tags actifs, ils disposent d'une batterie externe afin d'alimenter récepteur radio et les circuits intégrés de contrôle. Toutefois, ils ne disposent pas d'émetteur radio et utilisent

ainsi une modulation retro-réfléctive pour transmettre les informations aux lecteurs de la même façon que les tags passifs. Un exemple d'un tag semi passif est montré sur la figure I.6 [6].



Figure I.6: RFID UHF avec Tag semi-passif.

I.5.2 TAG SANS PUCE

Ce sont des tags qui ne disposent pas de circuit électrique et qui utilisent des principes physique ou chimiques pour générer un code d'identification. Ce type de tag constitué 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 très élevées les pertes sont trop grandes pour que ce principe soit utilisé [6], (voir figure I.7).

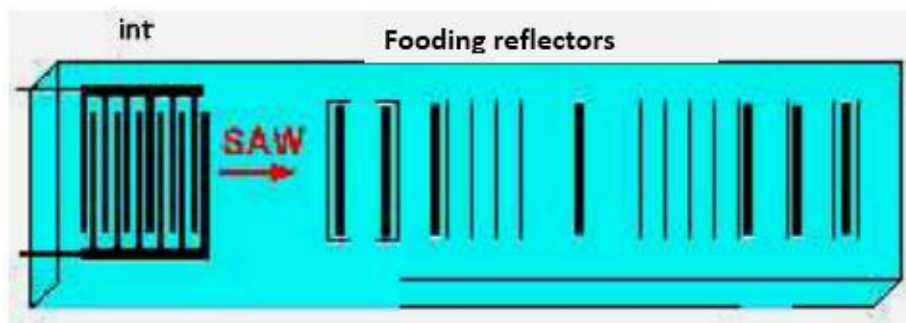


Figure I.7: Exemple tag sans puce.

I.6 FREQUENCES DES SYSTEMES RFID

I.6.1 DIFFERENTES BANDES DE FREQUENCES

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

1- Basses fréquences (LF) de 125.KHz à 135.KHz (ISO11784/5, ISO14223) ;

2- Hautes fréquences (HF) à 13.56. MHz (ISO 14443A 1-4, ISO 14443B 1-4, ISO 15693-3 et ISO 18000-3) ;

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

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

En général, une fréquence plus élevée présente l'avantage de permettre un échange d'informations (entre lecteur et marqueur) à des débits plus importants qu'en basse fréquence [7]. Les débits importants permettent l'implémentation de nouvelles fonctionnalités au sein des marqueurs (cryptographie, mémoire plus importante, anticollision,). Par contre une fréquence plus basse bénéficiera d'une meilleure pénétration dans la matière.

Les bandes de fréquence allouées à la RFID, la puissance d'émission autorisée et d'autres spécifications relatives à l'application sont contrôlées par des organisations de normalisation internationales et régionales telles que l'ISO et l'ETSI. Le tableau I.2 résume les différentes bandes de fréquences utilisées pour la technologie RFID [8].

	LF	HF	UHF	SHF
Bande	125-134 KHz	13.56. MHz	860-960. MHz	2.45-5.8 GHz
Longueur d'onde	2400. m	22. m	33. cm	9. cm
Zone de champ	Proche	Proche	Proche/Lointain	Lointain
Nature des tags	Passif	Passif	Actif/Passif	Actif
Quelques applications	Identification animale ; Systèmes d'alarme.	Prépaiement; Forfait de station de ski.	Inventaire ; Gestion d'actifs.	RTL; Télépéage autoroutier.

Table I. 2: Différentes fréquences des systèmes RFID.

I.6.2 COMPARATIFS DES DIFFERENTS SYSTEMES RFID

La comparaison de différents systèmes de radio-identification en termes de distance, débit, pénétration et cout, est représentée dans le tableau I.3

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

Table I. 3: Comparaison de différentes bandes de la technologie RFID [5].

D'après le tableau I.3, les bandes de fréquence UHF offrent une moins bonne pénétration du signal à travers les obstacles que la bande HF, mais elles permettent d'atteindre des distances de lecture plus grandes et un débit d'échange d'informations plus important.

I.7 NORMES DES SYSTEMES RFID

Le développement des normes en cours (notamment au niveau du test) sous l'impulsion des industriels et des utilisateurs, est nécessaire pour la maîtrise de cette technologie et le développement de son marché. Ce développement vise à certifier le fonctionnement, l'interopérabilité et l'interchangeabilité des systèmes RFID et de ses composants. Le Tableau I.4 présente les principales normes développées par l'ISO qui réglementent les paramètres de communication, comme la fréquence de fonctionnement, la bande passante, la puissance d'émission maximale, le type de modulation, le codage, le débit, le protocole de Communication et bien d'autres paramètres [9].

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

Table I. 4: Normes ISO 18000 pour la standardisation des systèmes RFID.

D'autre part le groupement EPC global a produit un standard pour encourager le large déploiement de la RFID. Ce standard, dénommé EPC Class-1 Génération-2 définit l'interface entre le lecteur et les tags. EPC global, créé par l'organisme GS1 réunissant l'EAN (European Article Numbering) et l'UCC (Uniform Code Council), développe des standards uniquement pour les applications de traçabilité. Il vise à terme la création d'un internet des objets. Ces normes gèrent, en plus des spécifications techniques, l'allocation des numéros d'identification spécifiques à chaque tag [10]. En effet, c'est ce dernier point qui fait la force de l'initiative de l'EPC global car elle est portée par les organismes qui gèrent déjà les normes d'utilisation du code-barres. En plus de ces organismes et de grands acteurs industriels, plusieurs laboratoires de recherche se sont associés afin d'appuyer L'EPC global. Notons qu'il y a eu une convergence entre les normes EPC global et ISO pour l'identification d'objet à l'aide de systèmes fonctionnant en UHF.

I.8 CLASSEMENT PAR DISTANCE DE COMMUNICATION

En fonction de l'antenne du tag et du lecteur, les systèmes RFID peuvent être classés en deux grandes catégories.

I.8.1 SYSTEME RFID EN CHAMP PROCHE

Dans cette situation, il est plus naturel de parler de couplage électromagnétique entre un tag et le lecteur comme montré dans la figure I.8. Ce couplage est souvent assuré par deux bobines, une au niveau du lecteur et l'autre au niveau du tag. On parle alors de champ proche car la distance de communication est limitée à quelques dizaines de cm au maximum. Dans les systèmes RFID en champ proche, la transmission de la puissance ainsi que les données à partir du lecteur sont assurées grâce au couplage mutuel à travers le champ magnétique pour un couplage inductif ou le champ électrique à travers un couplage capacitif. Dans la pratique c'est souvent le couplage magnétique qui est mis en œuvre à cause de sa simplicité. Le principal inconvénient des systèmes RFID en champ proche est la relative faible distance de lecture [5].

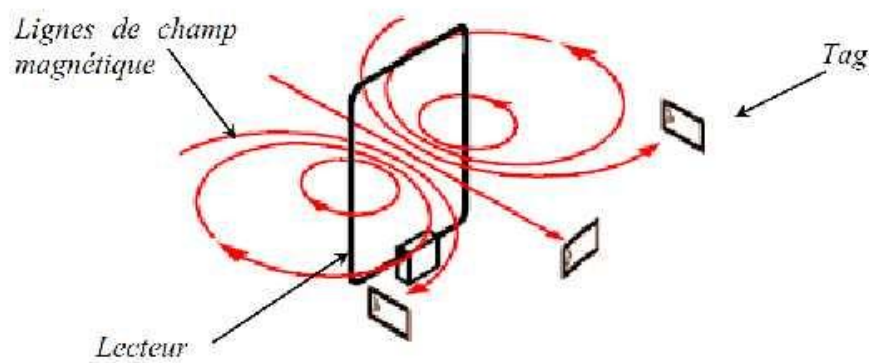


Figure I.8: Le champ magnétique du lecteur

Le mode de fonctionnement en couplage magnétique concerne les systèmes travaillant aux fréquences entre 9 kHz et 135 kHz en basses fréquences et 13.56 MHz en haute fréquence. Aujourd'hui, nous utilisons des systèmes de couplage magnétique fonctionnant jusqu'à 29 MHz.

I.8.2 SYSTEME RFID EN CHAMP LOINTAIN

Contrairement aux systèmes à champ proche, les systèmes RFID en champ lointain ont la capacité de transmettre des informations entre le lecteur et le tag par les ondes électromagnétiques et donc sur des distances beaucoup plus grandes, qui peuvent dépasser la dizaine de mètres. Le lecteur transmet de l'énergie au tag, une partie de cette énergie est reçue et absorbée par le tag pour s'auto-alimenter alors qu'une autre partie est réfléchi par l'antenne du tag. Grâce à une commutation électronique réalisée par le chip RFID, l'antenne du tag voit une commutation de charge ce qui modifie le niveau du signal réfléchi par le tag. C'est cette

opération appelée "backscattering" (ou rétro- modulation) qui permet la communication des données du tag vers le lecteur.

Les systèmes RFID en champ lointain fonctionnant aux fréquences typiquement supérieures à 100 MHz, la plupart du temps en bande UHF (Ultra High Frequency) comme 868 MHz, 915 MHz ou 955 MHz ou les bandes ISM à 5.8 GHz ou 2.45 GHz. La distance de lecture pour les systèmes RFID en champ lointain est affectée par la densité de l'énergie reçue par le tag et la sensibilité du lecteur pour le signal réfléchi à partir de l'étiquette.

Fréquence	Distance de lecture	Applications
Systèmes RFID en champ proche		
9 – 135 KHz	quelques cm jusqu'au 50 cm	Les cartes de paiement et passeports électroniques
6.78 MHz	quelques cm jusqu'au 50 cm	Pas beaucoup d'application
13.56 MHz	quelques cm jusqu'au 50 cm	Les cartes intelligentes sans contact
Systèmes RFID en champ lointain		
433.92 MHz	1 m jusqu'au 30 dépendants des applications	Les systèmes RFID actifs aux fréquences UHF
860 MHz ~ 960 MHz	≈ 5 m jusqu'au 10 m	Les systèmes RFID passifs aux fréquences UHF
2.45 GHz	1 m jusqu'au 6 m	Les systèmes de péage, Actifs
5.8 GHz	Inférieur à 1 m	Pas encore beaucoup d'exploitation

Table I. 5: Classement des tags RFID par le champ de rayonnement.

Les systèmes UHF ne sont pas limités par l'émission localisée des lignes de champ autour du lecteur. Les dimensions des antennes capables de produire des champs électromagnétiques suffisants pour assurer la communication sont de l'ordre de la demie de longueur d'onde (pour une fréquence de 900 MHz, l'antenne devra mesurer ≈ 16,5 cm). Dans le cas des transpondeurs passifs, l'énergie d'alimentation du tag est générée par la récupération d'une partie du champ rayonné par le lecteur. Cette partie est redressée puis conditionnée pour alimenter la puce RFID.

La densité d'énergie de signal rayonné décroît en fonction de l'inverse du carré de la distance séparant le lecteur et le tag. De ce fait, l'utilisation des systèmes passifs se limite à des

distances ne dépassant pas la dizaine de mètres pour des fréquences aux alentours de 900MHz. Cette distance diminue fortement lorsque la fréquence augmente. Pour des fréquences supérieures, les tags nécessitent souvent une alimentation et deviennent actifs. Un avantage majeur des tags UHF réside certainement dans leur faible coût de production grâce aux techniques de développement utilisées et la miniaturisation du tag (puce et antenne).

I.9 ETAT DE L'ART DES SYSTEMES RFID UHF PASSIFS

Nous avons vu les intérêts de la technologie RFID UHF passive comparativement aux autres technologies de radio-identification. Nous allons maintenant nous consacrer à la présentation des procédures de communication et des architectures relatives à cette technologie.

I.9.1 PROTOCOLE DE COMMUNICATION

La communication consiste en un transfert de données associé à un transfert d'énergie. La communication des données est bidirectionnelle : la communication du lecteur vers le tag est appelée liaison montante (up Link) et la réponse du tag vers le lecteur est appelée liaison descendante (down Link). La Figure I.9 illustre le principe d'une communication RFID.

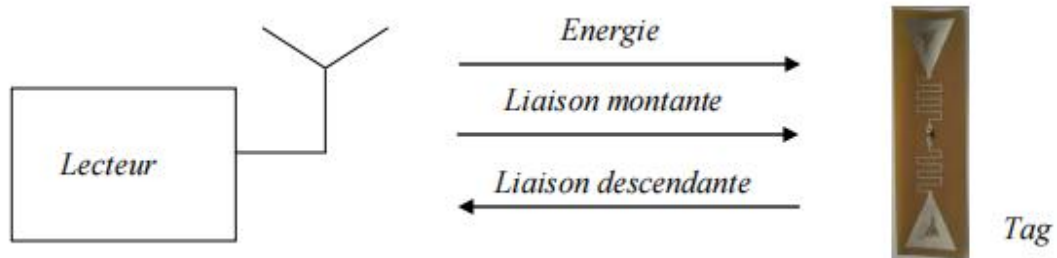


Figure I.9: Représentation schématique d'une communication RFID.

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

Dans le protocole TTO, il n'existe pas de liaison montante. Un tag utilisant cette procédure transmet ses données de façon régulière lorsqu'il est alimenté. C'est la procédure qui est mise en œuvre dans le standard IP-X développé par la société Ipico. Lorsqu'un tag IP-X entre dans le champ d'un lecteur IP-X, il transmet de façon continue et à des intervalles de temps aléatoires son identifiant. Cette procédure est particulièrement rapide. Elle permet de lire un grand nombre de tags RFID et à des vitesses de près de 250 Km/h.

Le protocole RTF est quant à lui celui qui est mis en œuvre dans le standard EPCglobal Class 1 Génération 2 (ou C1 Gen2). Lorsqu'un tag RTF entre dans le champ d'un lecteur, il attend une requête avant de transmettre son identifiant.

On distingue également deux types de procédures de communication entre le lecteur et le Tag : celles qui utilisent un transfert continu d'énergie et celles qui le font de manière séquentielle. Parmi, les procédures à transfert continu d'énergie, certains systèmes y associent un transfert de données bidirectionnel simultané (FDX, pour Full Duplex) et d'autres un transfert alterné (HDX, pour Half Duplex) [10]. Ces différentes procédures sont représentées sur la Figure I.10.

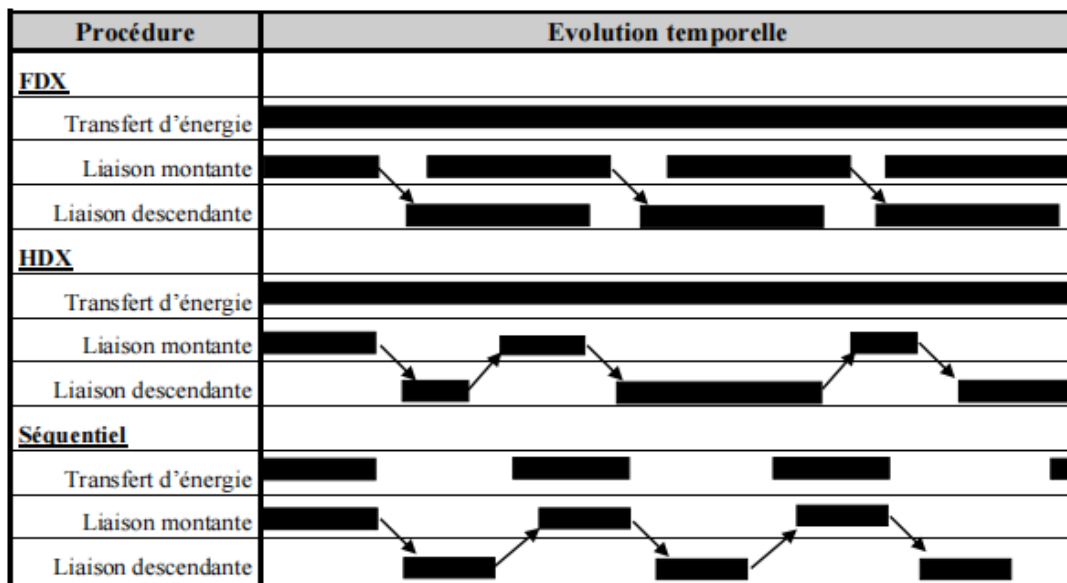


Figure I.10: Principales procédures de communication RFID.

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

- Une phase de réveil du tag : le lecteur envoie une onde électromagnétique vers le tag pour lui permettre de s'alimenter en énergie nécessaire à son fonctionnement et de se mettre dans un état d'attente des instructions à venir du lecteur.
- Une phase d'instruction : le lecteur envoie une instruction au tag. Cette transmission se réalise sur porteuse. Elle se traduit par une variation en phase ou en amplitude de l'onde électromagnétique envoyée. Parallèlement à l'envoi de ces instructions, le lecteur doit assurer l'alimentation du tag. Un compromis doit être trouvé lors de la mise en forme du signal envoyé par le lecteur afin d'assurer de façon optimale ces deux fonctions.

Cette mise en forme nécessite donc un choix judicieux du codage de l'information, de la technique de modulation et des temps de transmissions [11].

- Une phase de lecture : le tag envoie sa réponse au lecteur. Après réception des instructions du lecteur, le tag se met en mode rétro-modulation. Là encore, un compromis doit être trouvé entre ce transfert de données descendant et la puissance que le tag doit continuer à absorber afin d'assurer son alimentation. La rétro-modulation est un point critique de la conception des tags RFID.

Le protocole de communication est contrôlé au niveau du lecteur et du tag par une partie numérique qui reçoit et transmet les données par une interface radiofréquence. Suite à ce bref exposé des protocoles de communication, nous présentons l'architecture des lecteurs et des tags RFID UHF passifs.

I.9.2 ARCHITECTURE D'UN LECTEUR RFID UHF

Un lecteur RFID est l'interface entre une application hôte et les tags RFID. Son rôle est de réaliser la gestion de la communication avec les tags RFID et de transmettre leurs données à l'application hôte. Un lecteur est composé de différentes fonctions illustrées sur la Figure I.11 :

- Une unité de contrôle numérique. C'est cette unité de contrôle qui génère et met en forme le signal numérique contenant l'information à transmettre aux tags et traite en retour, la réponse de celui-ci. Elle est en charge du codage et du décodage des signaux et éventuellement du cryptage et du décryptage des données.
- Un front-end radio constitué d'un émetteur et d'un récepteur radiofréquence. Cette partie est en charge de la génération d'une porteuse radiofréquence, de sa modulation avec un signal numérique généré par l'unité de contrôle et de la démodulation de la réponse des tags.
- D'une ou plusieurs antennes permettant de transmettre et de recevoir les données, et de propager l'énergie radiofréquence télé-alimentant les tags.

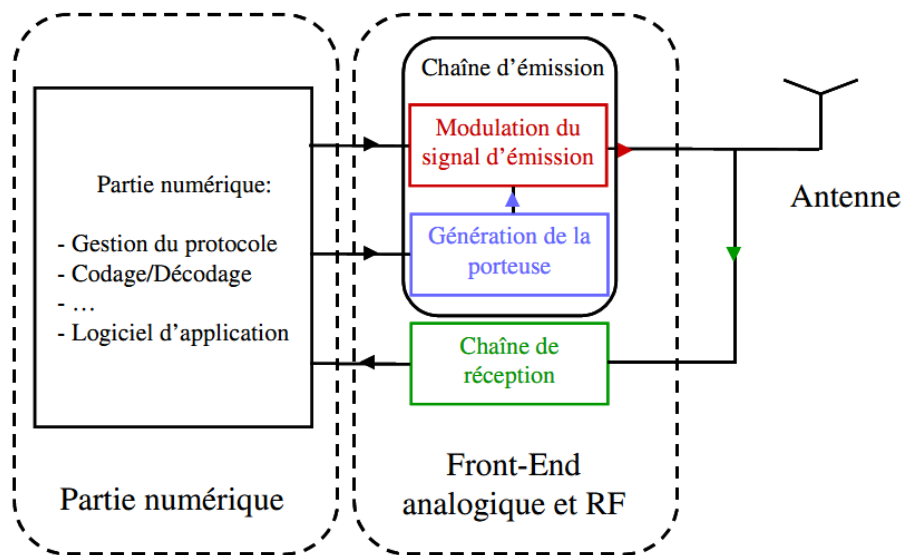


Figure I.11: Schéma bloc fonctionnel d'un lecteur RFID UHF.

Nous allons décrire plus en détail la partie radiofréquence qui présente pour nous plus d'intérêts.

1.9.2.1 DESCRIPTIONS DE LA CHAÎNE D'ÉMISSION

Un schéma bloc simplifié d'une chaîne d'émission d'un lecteur RFID est donné en Figure I.12. Les données arrivent codées de la partie numérique, elles sont modulées grâce à une porteuse générée par une PLL (Phase Locked Loop). Le signal modulé est ensuite amplifié puis filtré avant d'être transmis.

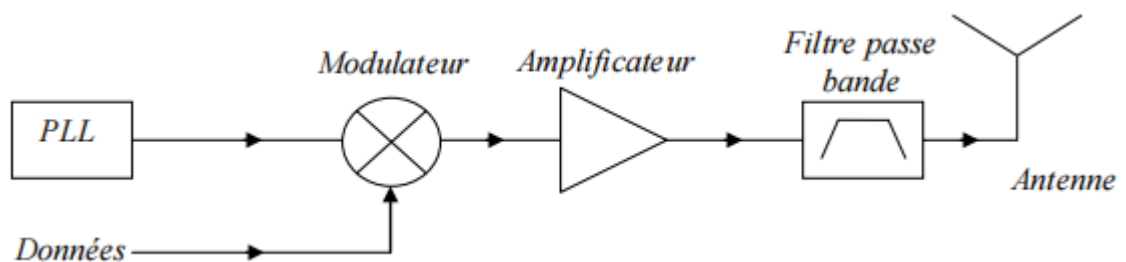


Figure I.12: Chaîne d'émission simplifiée d'un module UHF.

1.9.2.2 descriptions de la chaîne de réception

Un schéma bloc simplifié de l'architecture d'un récepteur est donné en Figure I.13. Le signal reçu est d'abord amplifié à l'aide d'un amplificateur faible bruit (LNA - Low Noise Amplifier), filtré, démodulé (souvent par un démodulateur I/Q) et numérisé par un convertisseur analogique / numérique.

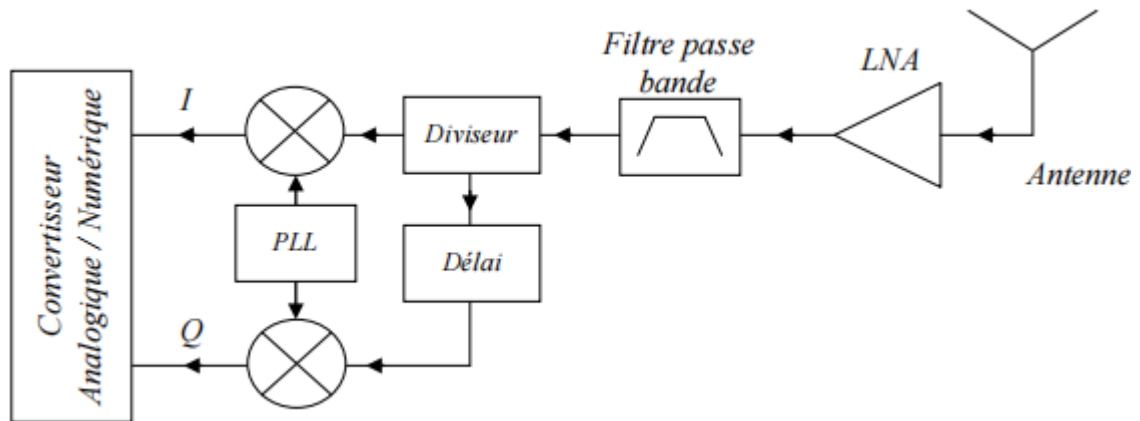


Figure I.13: Chaîne de réception simplifiée d'un module UHF.

1.9.2.3 émission et réception

L'émission et la réception des signaux peuvent se faire de deux façons :

- Par l'utilisation de deux antennes, l'une réalisant l'émission et l'autre réalisant la réception (Figure I.14 (a)). Ce type d'architecture est dit bi statique. Il demande une bonne isolation entre les deux antennes. Un système de ce genre est composé en général de deux antennes à polarisation circulaire croisée (polarisation droite et polarisation gauche).
- Par l'utilisation d'une seule antenne réalisant l'émission et la réception (Figure I.14 (b)). Ce type d'architecture est dit mono statique. La séparation des signaux émis et reçus se fait à l'aide d'un coupleur directionnel ou d'un circulateur.

La seconde architecture est souvent la plus rencontrée car moins encombrante et économiquement plus intéressante. Elle est implémentée dans les lecteurs portables où l'encombrement doit être minimum. Cependant les performances en termes de niveau signal à bruit sont meilleures pour un lecteur à deux antennes.

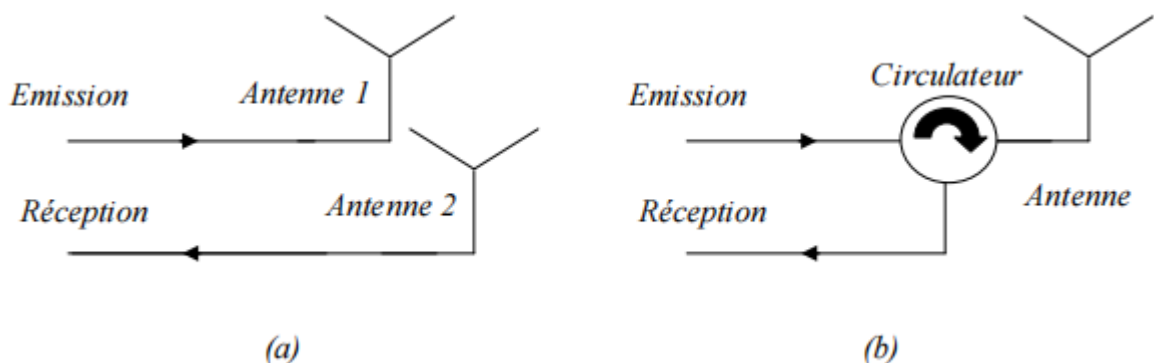


Figure I.14: Emission/réception d'un lecteur RFID UHF. (a) Architecture bi statique.

Malheureusement, les antennes, les coupleurs directionnels et les circulateurs ne sont pas parfaits. L'isolation entre l'émission et la réception n'est généralement pas suffisante et la perturbation qui vient s'ajouter au signal reçu peut limiter la sensibilité de la réception et donc abaisser les performances globales du système. Ce défaut est corrigé à l'aide d'un bloc de compensation tel qu'illustré sur la Figure I.15. Le signal d'émission est envoyé vers le bloc de compensation à l'aide d'un coupleur. Le bloc de compensation amplifie (ou atténue) et déphase ce signal afin d'annuler au niveau de la réception le défaut d'isolation des antennes, du coupleur ou du circulateur.

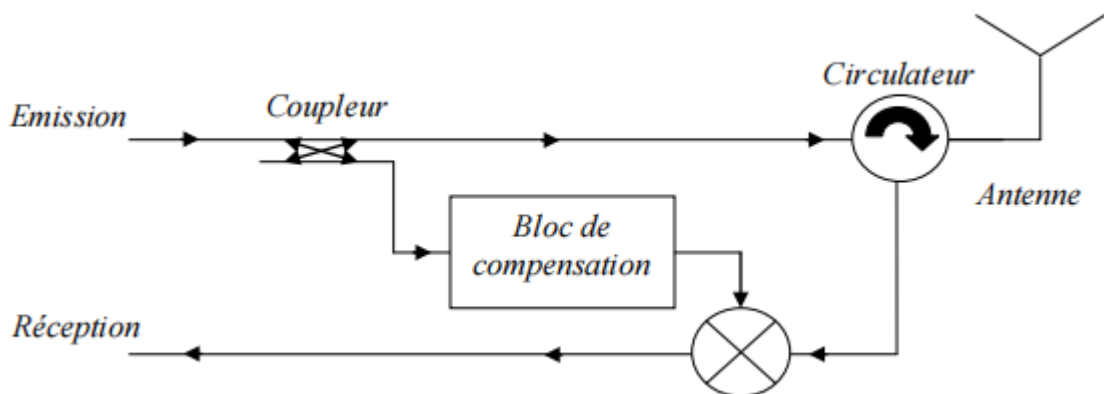


Figure I.15: Bloc de compensation dans la chaîne d'émission/réception.

I.9.3 ARCHITECTURE DU TAG RFID UHF PASSIF

Un tag RFID UHF passif est constitué d'une antenne et d'une puce électronique. Cette dernière comprend une partie radiofréquence (*Front-end radio*), et une partie numérique [5]. Un schéma représentatif d'un tag UHF est illustré dans la Figure I.16.

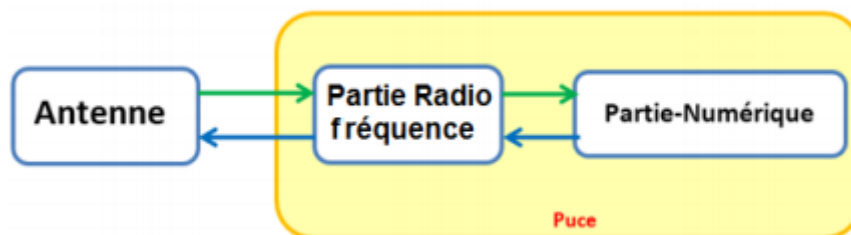


Figure I.16: Schéma fonctionnel d'un tag UHF RFID.

I.9.3.1 architecture de la puce d'un tag RFID

Comme le montrait la Figure I.16, la puce est constituée d'une partie numérique et d'une partie radiofréquence (*front-end*) :

- La partie numérique : constituée d'une machine à états qui a comme tâche d'analyser les requêtes reçues, de coder/décoder les informations et d'envoyer les réponses de ces requêtes au front-end radio. La partie numérique est activée par le front end radio lorsque l'antenne reçoit une énergie suffisante de la part de la station de base.
- La partie radiofréquence (*front-end*) : il s'agit d'un circuit entre l'antenne et la première fréquence intermédiaire qui assume trois fonctions principales : la récupération d'énergie, la réception du signal et la rétro-modulation. Nous présentons un schéma bloc des différentes tâches réalisées par le front-end dans la Figure I.17.

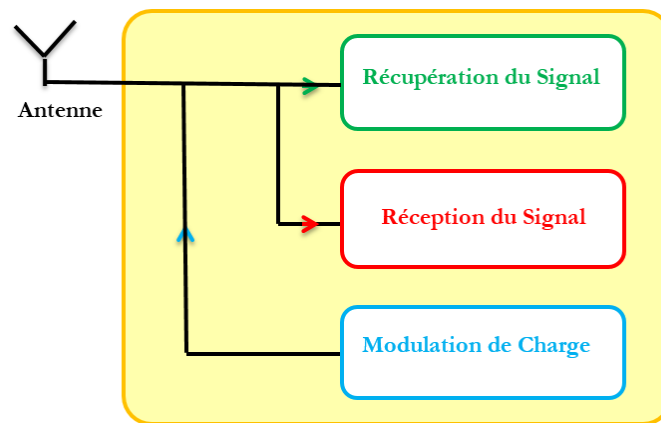


Figure I.17: Schéma bloc d'un front-end d'un tag UHF passif.

Les différentes fonctionnalités de la partie radiofréquence de la puce se résument par :

- En général, la fonction de récupération d'énergie est effectuée par un redresseur qui permet de récupérer une tension continue à partir de la porteuse radiofréquence captée par l'antenne, cette tension est sensée alimenter le tag. Fréquemment, le redresseur est lié à un régulateur ou à un limiteur de tension permettant la stabilité de la tension et la protection de la puce des risques de surtension [12-13]. Le redressement pourrait être réalisé par plusieurs architectures électroniques qui sont présentées et comparées dans la référence [14]. Durant la phase de rétro-modulation, une capacité réservoir en sortie du redresseur garantit l'alimentation de la puce [5].
- La fonction de récupération du signal requête transmis par le lecteur est généralement assurée par une chaîne de réception classique comprenant un démodulateur, un filtre en bande de base et un convertisseur analogique/numérique. Les fonctions de décodage et de traitement de l'information sont réalisées en numérique, le plus souvent à l'aide d'un système logique simple [12,15-16]. Le type de démodulation utilisé est l'ASK (Amplitude Shift Keying).

- En dernier, la fonction de retro-modulation est réalisée par un système de modulation de la charge à l'entrée de l'antenne. Cette dernière est généralement commandée par la partie numérique du tag. Les différentes techniques de modulation de charge seront détaillées ultérieurement.

En récapitulatif de ce que nous venons de voir, nous dressons un schéma bloc représentant un exemple d'architecture d'un tag RFID UHF (Figure I.18). Il est constitué d'une partie radiofréquence (Front-End RF), une partie analogique basse fréquence où se fait le traitement en bande de base et une partie numérique.

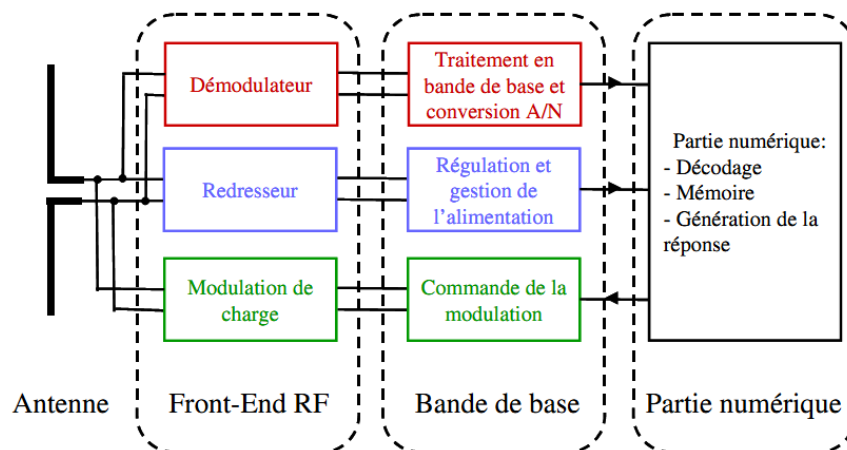


Figure I.18: Schéma bloc de l'architecture d'un Tag RFID UHF.

I.9.3.2 techniques de rétro-modulation

La technique de modulation de charge se définit comme étant une variation du coefficient de réflexion au niveau de l'interface entre l'antenne du tag et la puce. Physiquement, elle se traduit par une variation de l'impédance d'entrée de la puce, créant ainsi une désadaptation d'impédance avec l'antenne. Or, la modification de l'impédance consiste à faire varier sa partie réelle ou sa partie imaginaire. Ainsi, selon le signal binaire commandant la modulation de charge et selon le type de modulation utilisé, le signal incident est plus ou moins réfléchi comme le montre la Figure I.19. Sur cette dernière, l'impédance Z_t représente une charge adaptée à l'impédance de l'antenne. Si nous effectuons une modulation de la partie réelle de la charge Figure I.19 (a), alors nous réalisons une modulation en amplitude ASK (**A**mplitude **S**hift **K**eyping) et s'il s'agit de modifier la partie imaginaire Figure I.19 (b), on obtient une modulation en phase de type PSK (**P**hase **S**hift **K**eyping).

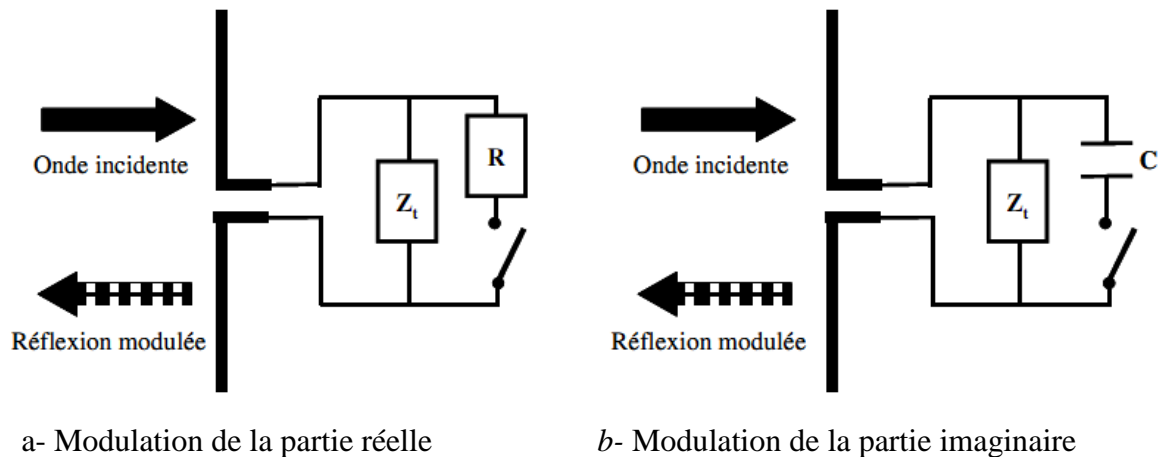


Figure I.19: Réflexion de l'onde incidente [17].

La qualité de la modulation dépend de la facilité avec laquelle nous pouvons différencier les deux états binaires lors de la démodulation. En ce qui concerne la modulation ASK, avoir une différence d'amplitude maximum entre l'état haut et l'état bas est le cas idéal. Ce cas est obtenu, lors du passage de l'adaptation parfaite de l'antenne au cas où l'antenne est court-circuitée. Tandis que, dans le cas où il y a réflexion totale de l'onde incidente, la récupération d'énergie devient impossible ; raison pour laquelle l'indice de la modulation ASK est souvent choisi de manière à avoir un compromis entre la récupération de l'énergie et la qualité de la transmission de données.

Cependant, dans la modulation PSK, c'est un déphasage maximum qu'on cherche à obtenir pour différencier l'état haut de l'état bas. Cette technique présente l'avantage de générer la même quantité d'énergie au tag, quel que soit l'état binaire du signal modulant au détriment d'une détection difficile de la rétro-modulation et d'un coût plus important au niveau du lecteur [18].

Les normes autorisent les deux types de modulation cités auparavant (ASK et PSK) pour la rétro-modulation. Cependant, lors de la modulation, il est très pénible d'obtenir une variation purement réelle ou purement imaginaire [17]. En industrie, la plupart des tags RFID UHF existants réalisent une modulation mixte, en amplitude et en phase.

Pour la grande majorité des tags UHF commercialisés, le dispositif assurant la rétro-modulation utilise un interrupteur commandé par le signal numérique modulant. Cependant, il existe certaines architectures utilisant plutôt des dispositifs à base de capacités variables pour réaliser la rétro-modulation.

Notons que, quelle que soit la technique de rétro-modulation choisie, la qualité de la réponse du tag dépend directement de l'antenne associée à la puce RFID.

I.9.3.3 packagings de la puce RFID

L'assemblage ou « Packaging » du tag RFID influe directement sur son impédance d'entrée. Selon la technologie de packaging utilisée, des effets parasites de nature résistive, capacitive ou inductive sont obtenus et doivent donc être pris en compte lors de la conception du tag. Nous y reviendrons en détail dans la partie évoquant la fabrication des tags RFID.

I.9.3.4 fabrications des tags RFID UHF passifs

Comme nous venons de le mentionner, un tag RFID UHF passif est constitué d'une puce électronique, d'une antenne et d'un packaging. Le choix de chaque paramètre dépend intrinsèquement de l'application désirée. Le critère de choix de la puce est en fonction de la fréquence de travail convoité et de ses performances. Les paramètres favorisant l'utilisation d'une antenne à la place d'une autre est le gain, l'efficacité mais surtout les dimensions de celle-ci. En ce qui concerne le packaging, c'est bien ses caractéristiques mécaniques telles que la robustesse, la tenue en température et en humidité qui le déterminent. En outre, le paramètre coût reste toujours à considérer, en effet, les fabricants ont tendance à utiliser des procédés bas coût pour aboutir aux objectifs des industriels.

Chaque puce dispose de certaines caractéristiques propres à elles. C'est la raison pour laquelle chaque antenne de tag RFID fonctionne avec une puce bien particulière. Afin de concevoir un tag pour telle ou telle application, il faudra bien choisir la puce adéquate selon les critères suivants :

- La norme : nombreuse sont les normes qui mettent en œuvre différents protocoles de communication. Le tag RFID devra répondre à une certaine norme qui impose le choix d'un certain type de puce RFID, afin d'assurer une certaine application et permettre l'interopérabilité avec les lecteurs.
- La capacité mémoire : la plupart des applications RFID exigent l'enregistrement d'information sur le tag. Ainsi les puces RFID doivent disposer d'une certaine capacité mémoire, qui diffère d'une application à autre selon les besoins.
- Le coût : étant un critère très important, les concepteurs doivent en tenir compte en utilisant un simple procédé de fabrication et en choisissant un type de packaging non onéreux.
- Les performances : lors de leurs fonctionnements, les puces RFID consomment plus ou moins de puissance, ce qui détermine leurs portées.

La plupart des puces RFID sont dotées d'un seul port d'entrée, il sert à connecter une antenne. Toutefois, il existe un autre type de puces comportant deux ports d'entrée permettant

la connexion de deux antennes. Ce dernier type favorise la diversité en polarisation et en diagramme de rayonnement du tag RFID et contribue à l'amélioration de la lecture. Il est approprié à certaines applications où l'orientation du tag RFID est incertaine. Ceci dit, ce type de puce est très intéressant mais au désavantage du coût de ce tag, qui s'est élevé non seulement à cause de l'utilisation de ce type de puce mais aussi par la présence de deux antennes [5].

En industrie, il existe des puces RFID rassemblés sous plusieurs types de packaging dont :

- ✚ Le packaging die : généralement, c'est le type de packaging le plus utilisé, il est caractérisé par sa petite taille. Il implique l'utilisation d'un matériau adhésif pour connecter l'antenne.
- ✚ Le packaging en boîtiers standards : très peu déployé, il consiste à connecter la puce à l'antenne par une soudure à l'étain ou un ICP (Isotropic Conductive Paste) une colle conductrice isotropique.
- ✚ Le packaging strap : la fixation de l'antenne se réalise soit par l'utilisation d'un adhésif, ou encore par un procédé ultrasonique.
- ✚ Le packaging ring : ce dernier type consiste à réaliser la connexion par un couplage inductif entre la puce et l'antenne.

Le choix du packaging de la puce RFID a des conséquences directes sur le procédé d'assemblage du couple antenne – puce, ainsi que sur le coût final du tag.

I.10 APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE RFID

Aujourd'hui, l'utilisation de systèmes RFID se développe rapidement. Alors, nous pouvons trouver cette technologie dans diverses applications de tous les jours. Les applications de la technologie RFID peuvent être classées dans deux catégories :

- ✚ Applications de la communication RFID en champ proche NFC (Near Field Communication) tels que le paiement par téléphone portable ou d'une carte bancaire, la lecture des articles de marchandises emballées, contrôle d'accès (badges d'entreprise, clés de voiture, cartes de transport...),
- ✚ Applications de la communication RFID en champ lointain FFC (Far Field Communication) tels que la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la gestion des biens, les contrôles d'accès et le suivi et à la traçabilité de produits.

Selon le cabinet IDTechEx, en 2013, le marché de la RFID a atteint 7,77 Milliards de dollars et 6,96 milliards de dollars en 2012 contre 4,93 milliards en 2007. Le marché de la RFID est en pleine explosion, les estimations prédisent un volume de ventes de l'ordre de 8.89 milliards de dollars en 2014. Selon le directeur général d'IDTechEx, au début de 2014,26

milliards de Tags RFID ont été vendus contre seules 6 milliards qui ont été vendus en 2013. Ceci grâce au développement de tags faibles coûts (< 0,001 \$). Nous entrons dans une période de très forte croissance pour le marché de la RFID. Compte tenu de cet énorme potentiel, IDTechEx prévoit que nous entrons dans une période de très forte croissance et que le marché de la RFID devrait progresser pour atteindre 27,31 milliards de dollars en 2024, et donc sera presque triplé en 10 ans. La Figure I.20 présente les prévisions en 2013 et en 2018 du marché de la RFID [19].

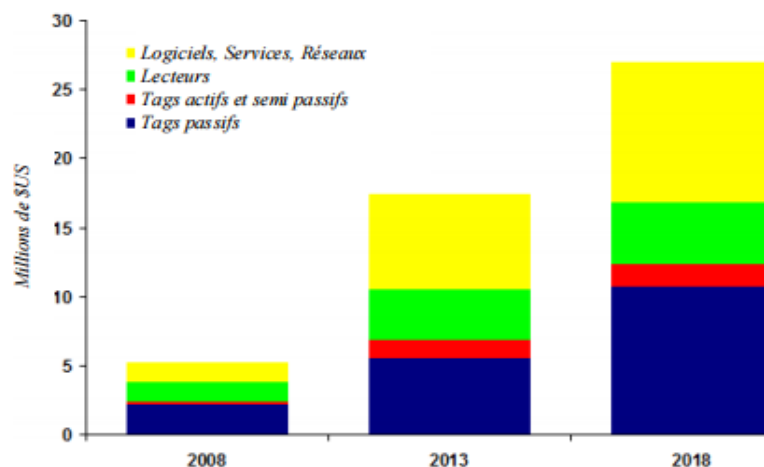


Figure I.20: Prévision de l'évolution du marché de la RFID.

La demande pour les Tags actifs et passifs, ainsi qu'aux lecteurs, les logiciels et les services, augmentera dans l'ensemble, en raison de diverses applications. RFID est clairement une technologie qui va jouer un rôle majeur dans presque tous les secteurs, y compris les systèmes UHF passifs pour le marché des vêtements de détail, qui a encore du chemin à faire avec la technologie RFID, la pénétration étant seulement d'environ 7 % du marché adressable en 2014.

I.11 AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UN SYSTEME RFID

I.11.1 AVANTAGES

✓ La capacité de mise à jour du contenu par les intervenants

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

✓ Une plus grande capacité de contenu

Dans une étiquette radio fréquence une capacité de 1000 caractères est aisément stockable, et peut atteindre sans difficulté particulière 10 000 caractères.

✓ La vitesse de marquage

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

✓ Une sécurité d'accès au contenu

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

✓ Une plus grande durée de vie

Dans les applications où un même objet peut être utilisé plusieurs fois, comme l'identification des supports de manutention, ou la consignation du contenant, une étiquette radio fréquence peut être réutilisée 10 000 de fois.

✓ Une plus grande souplesse de positionnement

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

✓ Une moindre sensibilité aux conditions environnementales

Les étiquettes RFID n'ont pas besoin d'être positionnées à l'extérieur de l'objet à identifier. Elles peuvent donc être mieux protégées des agressions liées aux stockages, aux manutentions ou au transport. De plus leur principe de fonctionnement ne les rend pas sensibles aux souillures, ou taches diverses qui nuisent à l'utilisation du code à barres [19].

I.11.2 INCONVENIENT**✓ Le coût**

Les prix restent nettement supérieurs à ceux des étiquettes code à barres pour les unités consommateurs. Utiliser les étiquettes radio fréquence en lieu et place du code à barres sur les produits de grande consommation, n'est donc pas aujourd'hui économiquement réaliste.

✓ La perturbation par l'environnement physique

La lecture des étiquettes radio fréquences est perturbée par la présence, par exemple, de métaux dans leur environnement immédiat. Des solutions doivent être étudiées au cas par cas pour minimiser ces perturbations.

✓ Les perturbations induites par les étiquettes entre elles

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

✓ La sensibilité aux ondes électromagnétiques parasites

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

✓ Les interrogations sur l'impact de la radio fréquence sur la santé

Cette question fait débat depuis quelques années, au particulier concernant les portiques d'antivol et les téléphones portables. Les étiquettes passives ne présentent aucun risque quel que soit leur nombre puisqu'elles ne sont actives que lorsqu'elles se trouvent dans le champ d'un lecteur. Les études portent donc essentiellement sur les lecteurs et visent à définir les critères de régulation de leur puissance d'émission afin d'éviter qu'ils ne créent des perturbations sur les équipements de santé tels que les pacemakers, mais aussi sur l'organisme humain [3].

I.12 CONCLUSION

Ce chapitre permet d'avoir une vue d'ensemble sur la technologie RFID. Cette technologie permet de recueillir des informations sans pour autant avoir le tag en visuel, de modifier ces données, d'exécuter plusieurs lectures... Tant d'avantages qu'elle apporte en comparaison aux autres technologies telles que le code barre. Certes cette technologie est en plein essor, elle est mise en avant dans le secteur commercial mais ses applications sont colossales : prenant le domaine médical où la RFID est en cours de développement, que ce soit pour identification et localisation des patients, personnel, nourrissons ou des équipements et instruments chirurgicaux. Malgré la forte réglementation du secteur de la santé, des changements législatifs en faveur de la RFID à l'USA ont beaucoup contribué à son adoption, estimant ainsi le marché de la RFID dans cette industrie à environ 2,4 milliards de dollars avec un taux de croissance de 29,9 % Le chapitre suivant concerne les antennes RFID.

CHAPITRE II : LES ANTENNES RFID

II.1 INTRODUCTION

Les antennes constituent des éléments essentiels dans la chaîne de communication, car incontournables, elles sont situées à l'interface entre l'émetteur ou le récepteur et le milieu de propagation. Toutefois de nombreuses technologies d'antennes existent et répondent à la plupart des besoins pour les communications en bande étroite ou modérée.

L'antenne est l'élément qui est utilisé pour diffuser les ondes électromagnétiques par rayonnement. Elle joue deux rôles réciproques : la transmission et la réception.

Ainsi, Dans un système de communication, l'antenne est toujours le premier élément dans une chaîne de réception ou le dernier élément dans celle d'émission. Il y a une grande variété de techniques pour réaliser des antennes, chacune d'elles possède ses propres caractéristiques et sert à une application bien déterminée.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord énumérer les différents paramètres et caractéristiques des antennes, ainsi que leurs performances. Des exemples de structures d'antennes utilisées dans les tags RFID passifs seront présentés par la suite.

II.2 LES PARAMETRES FONDAMENTAUX DES ANTENNES

On peut classer les principaux paramètres d'une antenne en deux catégories : les paramètres circuits et les paramètres de rayonnement.

- ❖ Paramètres électriques : permet la description des caractéristiques et des performances des antennes, l'antenne est considérée comme un élément de circuit électrique.
- ❖ Paramètres de rayonnement : permettent de propager des ondes électromagnétiques.

II.2.1 LES PARAMETRES CIRCUITS

II.2.1.1 L'impédance

Dans une approche circuit, une antenne est caractérisée par son impédance complexe Z_a . Cette impédance est composée d'une partie réelle R_a et d'une partie imaginaire X_a .

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (\text{II.1})$$

La partie réelle est composée de la résistance de rayonnement R_r et de la résistance de pertes R_l (II.1). L'énergie dissipée par R_r correspond à l'énergie rayonnée par l'antenne.

L'énergie dissipée par R_l correspond quant à elle aux pertes de conduction, aux pertes diélectriques et aux pertes d'onde de surface de l'antenne.

$$R_a = R_r + R_l \tag{II.2}$$

Dans le cas de l'émission, un générateur connecté à l'antenne possède également une impédance de sortie Z_g constituée d'une partie réelle R_g et d'une partie imaginaire X_g .

$$Z_g = R_g + jX_g \tag{II.3}$$

Le schéma équivalent d'une antenne en transmission est représenté sur la Figure II.1.

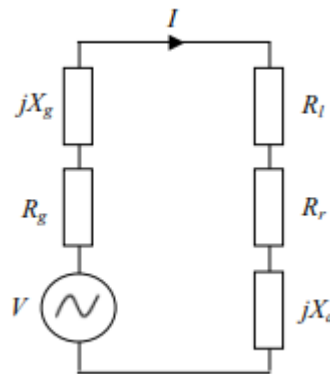


Figure II.1: Schéma équivalent d'une antenne en transmission.

Dans le cas de la réception, l'antenne est connectée à une charge ayant une impédance Z_l composée pareillement d'une partie réelle R_l et d'une partie imaginaire X_l .

$$Z_l = R_l + jX_l \tag{II.4}$$

Le schéma équivalent d'une antenne en réception est représenté sur la Figure II.2.

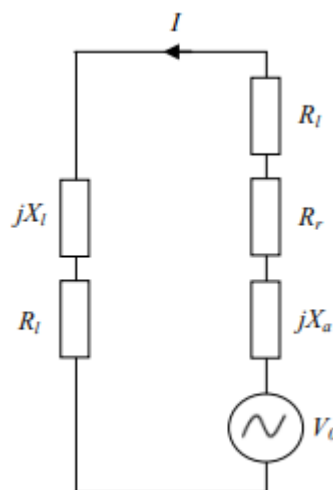


Figure II.2: Schéma équivalent d'une antenne en réception.

Sur la Figure II.2, V_0 est la tension aux bornes de l'antenne. Elle est reliée à la densité de puissance S de l'onde incidente par :

$$\frac{|V_0|^2}{8R_a} = S \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (\text{II. 5})$$

Où G est le gain de l'antenne que nous introduirons par la suite,
 λ est la longueur d'onde à la fréquence considérée.

II.2.1.2 Le coefficient de réflexion

Communément, une antenne est conçue pour être adaptée à l'impédance caractéristique Z_0 réelle d'une ligne de transmission (généralement 50Ω ou 75Ω) afin de minimiser le taux d'onde stationnaire (TOS). On définit alors le coefficient de réflexion d'une antenne Γ par :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (\text{II. 6})$$

Le TOS est quant à lui donné par :

$$\Gamma = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (\text{II. 7})$$

Dans le cas où il n'y a pas de ligne de transmission entre l'antenne et une charge qui peut ne pas présenter une impédance réelle. Il faut dans ce cas maximiser la puissance transmise à la charge. On définit donc le coefficient de réflexion en puissance Γ^* par (II.7) [20].

$$\Gamma^* = \frac{Z_l - Z_a^*}{Z_l + Z_a} \quad (\text{II. 8})$$

Γ^* représente le rapport entre la puissance réfléchiée par une charge et la puissance totale maximum pouvant lui être transmise.

Z_l	$-jX_a$	Z_a^*	∞
Γ^*	-1	0	1

Table II. 1: présente quelques valeurs de Γ^* en fonction de l'impédance Z_l .

Dans le cas où la charge est complexe conjuguée à l'impédance de l'antenne ($Z_l = Z_a^*$), le maximum de la puissance lui est transmise ($\Gamma^* = 0$). Si on considère une antenne sans pertes ($R_l = 0$), elle correspond alors à la moitié de la puissance totale reçue par l'antenne. L'autre moitié étant rayonnée par la résistance de rayonnement R_r .

On peut définir l'impédance normalisée d'une charge, Z_l par :

$$Z_l = \frac{R_l}{R_a} + j \frac{X_l + X_a}{R_a} \quad (\text{II. 9})$$

Alors à partir de l'équation (II.8) et (II.9), on peut exprimer Γ^* en fonction de Z_l .

$$\Gamma^* = \frac{z_l - 1}{z_l + 1} \quad (\text{II. 10})$$

Ainsi on peut tracer Γ^* sur un abaque de Smith tel qu'illustré sur la Figure II.3. La distance entre le centre de l'abaque et Z_l correspondant à $|\Gamma^*|$. Nous utiliserons cet abaque par la suite afin de représenter d'autres caractéristiques importantes d'une antenne directement connectée à une charge.

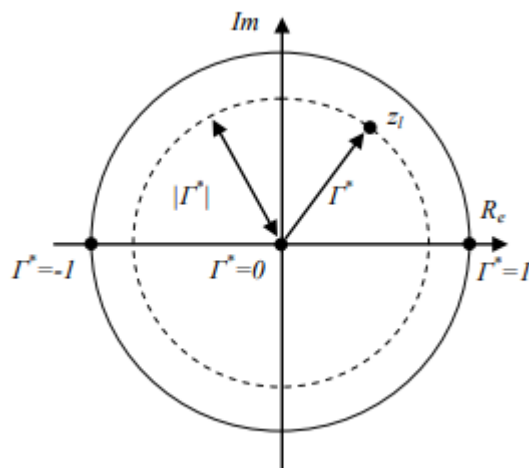


Figure II.3: Représentation de Γ^* sur un abaque de Smith.

II.2.1.3 Le coefficient de transmission

On peut définir le coefficient de transmission en puissance T par (II.11). Il correspond au rapport de la puissance transférée à une charge sur la puissance totale maximum pouvant lui être transférée.

$$T = 1 - |\Gamma^*|^2 \quad (\text{II. 11})$$

Sur l'abaque de Smith (Figure II.3), T est maximum au centre de l'abaque pour $\Gamma^* = 0$ et minimum sur la périphérie de l'abaque pour $|\Gamma^*| = 1$. $|\Gamma^*|^2$ correspond aux pertes d'insertions.

A partir de (II.8) et (II.11), on peut déterminer la relation (II.12) reliant le coefficient de transmission aux impédances d'une antenne et de sa charge (Z_a et Z_l) en considérant l'antenne en réception (Figure II.2). Cette relation est très utile en RFID, car elle correspond au rapport de la puissance transférée à une puce RFID sur la puissance totale maximum pouvant lui être transférée.

$$T = \frac{4R_a R_l}{|Z_l + Z_a|^2} \quad (\text{II. 12})$$

II.2.1.4 La bande passante

La bande passante d'une antenne est définie comme étant une plage de fréquence sur laquelle les performances de l'antenne sont conformes à certaines spécifications. La définition

de la bande passante dépend donc de l'application. En général, dans le domaine de la conception d'antenne, la bande passante est définie comme étant la bande de fréquence sur laquelle 90% de la puissance incidente est transmise (correspondant à $|\Gamma^*|^2 = -10$ dB). En fait ce pourcentage dépend de ce qui est acceptable pour une application donnée. Ainsi pour les antennes de téléphones cellulaires, la bande passante est souvent définie comme la plage de fréquence pour laquelle 75% de la puissance est transmise (correspondant à $|\Gamma^*|^2 = -6$ dB).

En RFID, la bande passante est directement reliée aux critères de performances attendues pour un tag RFID. Le niveau de puissance transmis acceptable (T est donc $|\Gamma|^2$ à travers (II.10) est défini en fonction de la distance de lecture souhaitée pour une application donnée.

II.2.1.5 Le coefficient de qualité

Le coefficient de qualité Q d'un circuit résonant est défini comme étant égal à 2π fois le rapport de l'énergie emmagasinée sur l'énergie perdue dans un cycle. Pour une antenne, l'énergie perdue correspond à l'énergie rayonnée et à l'énergie dissipée par les pertes de conduction et par les pertes diélectriques.

$$Q = 2\pi \frac{\text{énergie stockée par cycle}}{\text{énergie rayonnée et dissipée par cycle}} \quad (\text{II. 13})$$

Q indique si une antenne est capable d'emmagasiner de l'énergie et détermine sa sélectivité en fréquence. Une bonne approximation du facteur de qualité d'une antenne est donnée par :

$$Q = \frac{fr}{\Delta f} \quad \text{pour } Q \gg 1 \quad (\text{II. 14})$$

Où fr est la fréquence de résonance, Δf la bande passante.

Cependant l'équation (II.14) ne prend pas en compte la désadaptation de l'antenne. Une définition plus appropriée est donnée par l'équation (II.15). Cette dernière prend en compte une bande de fréquences sur laquelle le TOS est inférieur à une valeur désirée (en général $\text{TOS} < 2$) [21].

$$Q = \frac{fr\sqrt{\text{TOS}}}{\Delta f(\text{TOS} - 1)} \quad \text{pour } Q \gg 1 \quad (\text{II. 15})$$

II.2.2 LES PARAMETRES DE RAYONNEMENT

II.2.2.1 les régions du champ électromagnétique

Le champ électromagnétique rayonné par une antenne peut être divisé en plusieurs régions telles qu'illustré sur la Figure II.4, où a désigne la plus grande dimension de l'antenne.

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

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{a^3}{\lambda}} \quad (\text{II. 16})$$

$$R_2 = \frac{2a^2}{\lambda} \quad (\text{II. 17})$$

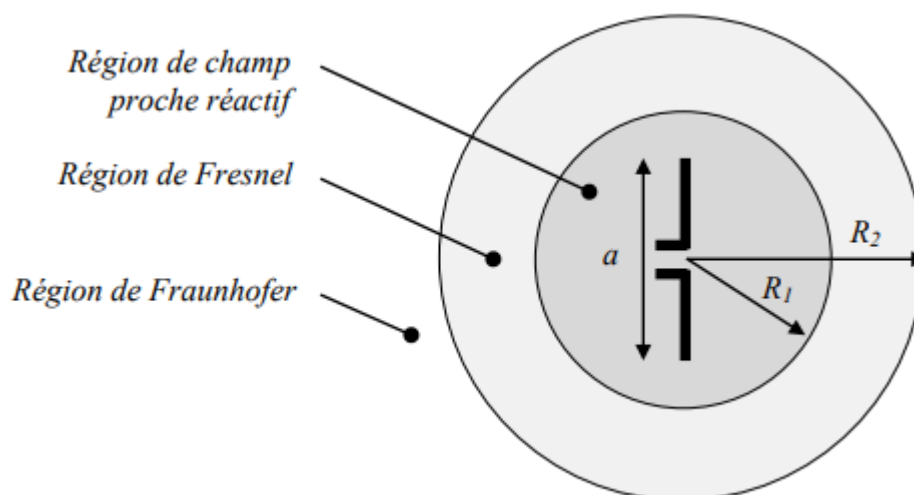


Figure II.4: Illustration des régions du champ électromagnétique d'une antenne.

La région de champ proche réactif est la région immédiatement entourant une antenne. Dans cette région le champ réactif est dominant. Pour une petite antenne, cette région est communément comprise dans une sphère de rayon $\lambda/2\pi$.

La région de Fresnel (ou région de champ proche radiatif) est une région intermédiaire entre la région de champ proche et la région de Fraunhofer. Si l'antenne a une dimension petite comparée à la longueur d'onde cette région peut ne pas exister. Dans cette région, la distribution du champ électromagnétique est dépendante de la distance par rapport à l'antenne.

La région de Fraunhofer (ou région de champ lointain) est définie comme étant la région où le champ électromagnétique d'une antenne est indépendant de la distance par rapport à l'antenne.

II.2.2.2 La directivité et le 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 :

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction } (\theta, \varphi)}{\text{puissance rayonnée totale}} \quad (\text{II. 18})$$

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 (II.19). 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) [22].

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{\text{intensité de puissance rayonnée dans la direction } (\theta, \varphi)}{\text{puissance totale accepté}} \quad (\text{II. 19})$$

II.2.2.3 L'efficacité de rayonnement

L'efficacité de rayonnement totale, e_t d'une antenne est utilisée dans le but de prendre en compte les pertes à l'entrée de l'antenne ainsi que dans la structure de cette dernière. En effet, les pertes peuvent être causées par les réflexions provenant d'une mauvaise adaptation de l'antenne au circuit qui lui est associée, mais également par les propriétés des Matériaux diélectriques et conducteurs qui la constituent. e_t est donnée par :

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (\text{II. 20})$$

Où, e_r, e_c, e_d , sont respectivement les efficacités dues à la désadaptation, aux pertes de conduction et aux pertes diélectriques.

Il est difficile de dissocier les efficacités conductrices et diélectriques. De ce fait, ces dernières sont regroupées en un seul terme e_{cd} .

La puissance rayonnée par une antenne, P_{rad} , est donc reliée à la puissance acceptée par l'antenne, P_{in} à travers e_{cd} :

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \quad (\text{II. 21})$$

La relation entre le gain d'une antenne et sa directivité est donc donnée par :

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd} D(\theta, \varphi) \quad (\text{II. 22})$$

On peut également définir le coefficient de qualité de rayonnement Q_{rad} en fonction du coefficient de qualité Q d'une antenne par :

$$Q = e_{cd} Q_{rad} \quad (\text{II. 23})$$

On voit à partir de l'équation (II.23), qu'en augmentant les pertes d'une antenne, le coefficient de qualité d'une antenne diminue et donc sa bande passante s'agrandit (II.14), (II.15).

L'efficacité e_{cd} est reliée aux paramètres circuits de l'antenne. Elle est définie comme étant le rapport entre la puissance dissipée par la résistance de rayonnement sur la puissance totale dissipée :

$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_l} \quad (\text{II. 24})$$

II.2.2.4 Le 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.

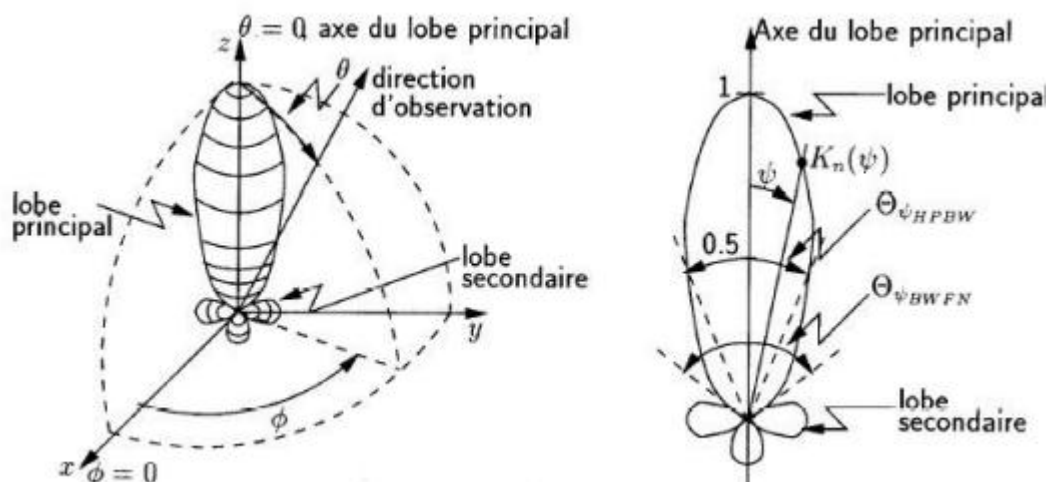


Figure II.5: Illustration du diagramme de rayonnement d'une antenne [21].

L'angle d'ouverture est défini, dans un plan contenant la direction du faisceau maximal, comme l'angle entre les deux directions dans lesquelles l'intensité de rayonnement est la moitié de la valeur maximale du faisceau (-3 dB). Une antenne de type dipôle présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel.

II.2.2.5 La polarisation

La polarisation, en un point et dans une direction donnée, est définie comme étant la propriété d'une onde électromagnétique décrivant la variation dans le temps de la direction et

de l'amplitude relative du vecteur champ électrique \vec{E} transverse à la direction de propagation d'une onde plane (Figure II.6). Il est possible de décomposer le vecteur champ électrique d'une onde plane TEM (pour Transverse Electromagnétique) se propageant dans la direction +z en deux composantes telles qu'exprimées dans :

$$\vec{E}(z, t) = \hat{a}_x E_x(z, t) + \hat{a}_y E_y(z, t) \quad (\text{II. 25})$$

Où

$$E_x(z, t) = \text{Re}(E_{x0} e^{j(\omega t - kz)}) = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \quad (\text{II. 26})$$

$$E_y(z, t) = \text{Re}(E_{y0} e^{j(\omega t - kz + \delta)}) = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \delta) \quad (\text{II. 27})$$

Avec E_{x0} et E_{y0} , les magnitudes respectives de la composante en x et en y du champ électrique,

δ , la différence de phase entre les deux composantes,

\hat{a}_x et \hat{a}_y , les vecteurs unitaires.

On définit le taux d'ellipticité AR correspondant au rapport de b/l'axe majeur sur a/l'axe mineur de l'ellipse (Figure II.6). Le taux d'ellipticité varie entre $1 < AR < \infty$.

$$AR = \frac{b}{a} = \frac{1}{\tan\left(\frac{1}{2} * \arcsin\left(\frac{2 * E_{x0} * E_{y0} * \sin \delta}{E_{x0}^2 + E_{y0}^2}\right)\right)} \quad (\text{II. 28})$$

On distingue trois types de polarisations :

- ❖ La polarisation linéaire. Une onde électromagnétique est polarisée linéairement si à chaque instant son champ électrique est orienté selon une même direction. Elle correspond à un taux d'ellipticité $AR = \infty$.
- ❖ La polarisation circulaire. Une onde électromagnétique est polarisée circulairement si son champ électrique décrit un cercle dans le temps. Elle correspond à un taux d'ellipticité $AR = \infty$. Cependant, on considère communément que la polarisation est circulaire pour $1 < AR < 2$ (soit $AR_{(\text{dB})} < 3\text{dB}$).
- ❖ Et la polarisation elliptique. Une onde électromagnétique est polarisée elliptiquement si son champ électrique décrit une ellipse dans le temps. Elle correspond à un taux d'ellipticité $1 < AR < \infty$ (communément $2 < AR < \infty$).

II.3 TYPES D'ANTENNE RFID

Selon le type de lecture, le type d'étiquette, l'utilisation du système RFID, les conditions de lecture, etc., le type d'antenne à intégrer au lecteur est différent. Ainsi, deux types principaux d'antennes se distinguent [23] :

- ❖ Les antennes intégrées : elles sont intégrées au lecteur, leur utilisation est conseillée pour les lecteurs de basse fréquence à portée limitée ;
- ❖ Les antennes externes : elles ne font pas partie du lecteur, elles sont plus puissantes et s'avèrent donc utiles pour obtenir une plus grande portée.

II.3.1. ANTENNES UNIVERSELLES

Les antennes standard UHF RFID fonctionnent dans des applications multiples et systèmes RFID. Les antennes intérieures sont utilisées principalement pour le stockage ou les processus industriels [24].

Les antennes des fréquences UHF peuvent capturer des tags jusqu'à 14 mètres de distance. Néanmoins, la portée de l'antenne dépend aussi de la performance du lecteur et des caractéristiques de l'étiquette. Les antennes standard UHF RFID existent pour les fréquences ETSI de l'UE (865-868 MHz) et FCC de l'US (902-928Mhz).



Figure II.6: Antenne universelle RFID laird 980.

II.3.2. ANTENNES RFID LARGE PORTÉE

Les antennes RFID UHF longue portée permettent son utilisation dans de multiples applications et systèmes. Ce sont des antennes utilisées à la fois en intérieur et en extérieur.

Pour les fréquences UHF préparées pour capturer des étiquettes jusqu'à 18 mètres, pouvoir réguler la portée en fonction des performances du lecteur et de l'étiquette Disponible pour les fréquences globales 860 - 960 MHz, ETSI (UE): 865-868 MHz et FCC (US) 902-928 MHz [24].



Figure II.7: Antenne RFID large portée.

II.3.3. ANTENNES RFID DE COURTE PORTÉE

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

Dans ce type d'antennes, les points morts n'existent pas, ainsi qu'elle détecte tout ce qui se trouve dans la surface de l'antenne et réagit parfaitement aux objets métalliques.

Disponible pour les fréquences UHF de L'EU, ETSI (865-868 Mhz) et de l'US, FCC (902-928Mhz).



Figure II.8: Antenne RFID courte portée.

II.3.4. ANTENNES RFID ROBUSTES

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

Dipôle propose ce dont vous avez besoin, y compris les poteaux de lecture pour l'extérieur ou une antenne spécifique pour un chariot élévateur ou un véhicule industriel.

Disponible pour les fréquences UHF de L'EU, ETSI (865-868 Mhz) et de l'US, FCC (902-928Mhz) [24].



Figure II.9: Antenne RFID robustes.

II.3.5. ANTENNES RFID DU SOL

Les antennes RFID du sol existent dans différentes polarités et tailles. Pour bien choisir les antennes il est essentiel de connaître sa fonction et l'environnement dans lequel ces antennes seront utilisées. Les antennes du sol sont utilisées pour des événements sportifs, des événements en général, dans les usines, les hôpitaux, etc. Une Pour les antennes placées au sol, il est primordial qu'elles soient bien protégées dans une structure solide qui garantit sa durabilité.

Disponible pour les fréquences UHF de L'EU, ETSI (865-868 Mhz) et de l'US, FCC (902-928Mhz) [24].

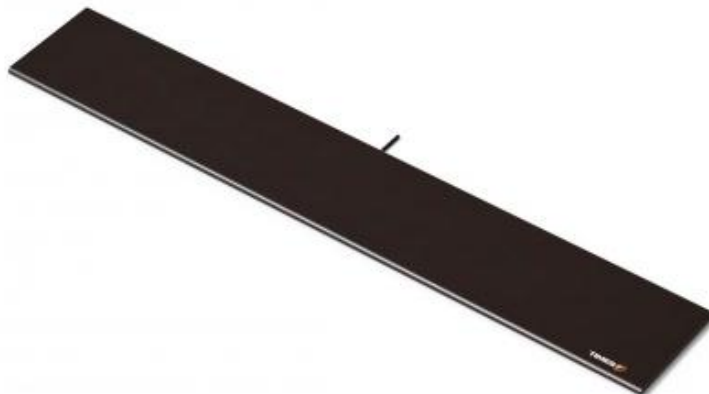


Figure II.10: Antenne RFID du sol.

Les tags RFID et l'antenne du lecteur RFID doivent avoir la même fréquence pour communiquer ensemble.

II.4 TYPE DES TAGS RFID PASSIFS

II.4.1 TAG EN BOUCLE

L'antenne boucle est très utilisée dans le domaine de la technologie RFID, surtout lorsqu'on parle d'une communication à champ proche [25]. C'est une solution basée sur un couplage inductif entre l'interrogateur et le tag. L'interrogateur envoie un champ magnétique qui alimente le tag et permet ainsi d'envoyer ces données. Cette technique est utilisée pour les courtes distances ($<1\text{m}$, basses fréquences 125KHz et hautes fréquences 13.5 MHz). Elle est très utilisée dans le contrôle d'accès (figure II.11) et le paiement électronique (figure II.12).

Les antennes boucles sont moins utilisées dans la bande ill-IF (860-960MHz) pour les RFID passifs. La distribution du courant à travers la boucle fait face à des inversions de phase et le courant s'annule, ce qui affaiblit l'efficacité de l'antenne comme rapporté dans [25]. Cependant, il y a beaucoup de tags boucles dans la bande UHF utilisés pour les longues portées [26-27], où la boucle possède une polarisation circulaire permettant ainsi une bonne couverture et une bonne adaptation à différents milieux.

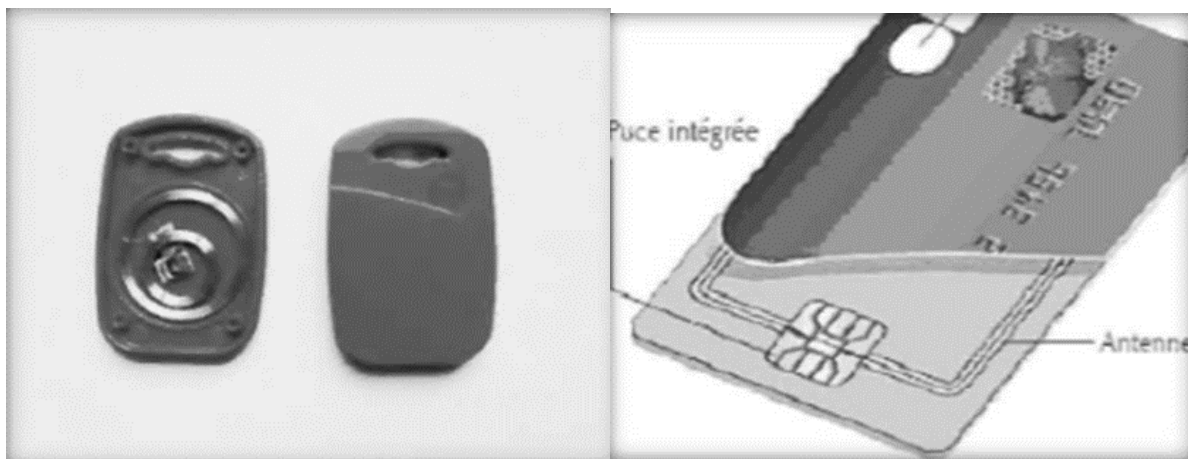


Figure II.11: Contrôle d'accès.

Figure II.12: Paiement électronique.

L'antenne Tag boucle possède une structure simple et sa taille reste un bon choix pour les bandes basses et hautes fréquences (LF et HF).

II.4.2 L'ANTENNE TAG DIPOLE

L'antenne Tag Dipôle existe sous plusieurs formes. Théoriquement, chacun des deux pôles est d'une longueur de $\lambda/4$ [28].

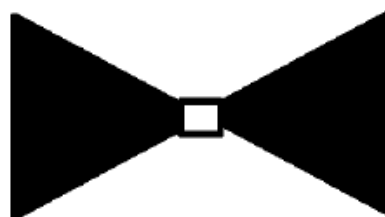


Figure II.13: Antenne Dipôle.

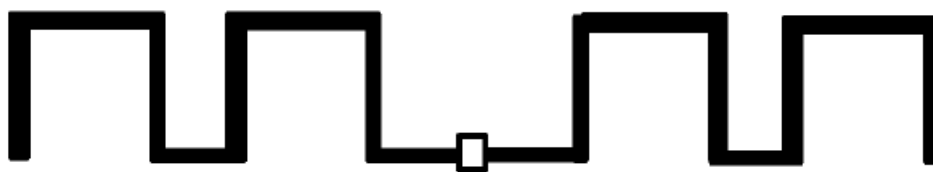
Récemment, la forme du dipôle a été modifiée pour s'adapter à différentes utilisations et pour réduire la taille, ce qui est très requis en technologie RFID. On trouve le dipôle replié « Folded dipôle » (figure II.14 a), « dipôle en cravate » (figure II.14b) et « dipôle en méandre » (figure II.14c). Ces antennes peuvent être utilisées dans la gestion des chaînes logistiques, identification et traçabilité [29]



a) Dipôle replié.



b) dipôle en cravate.



c) Dipôle en méandre.

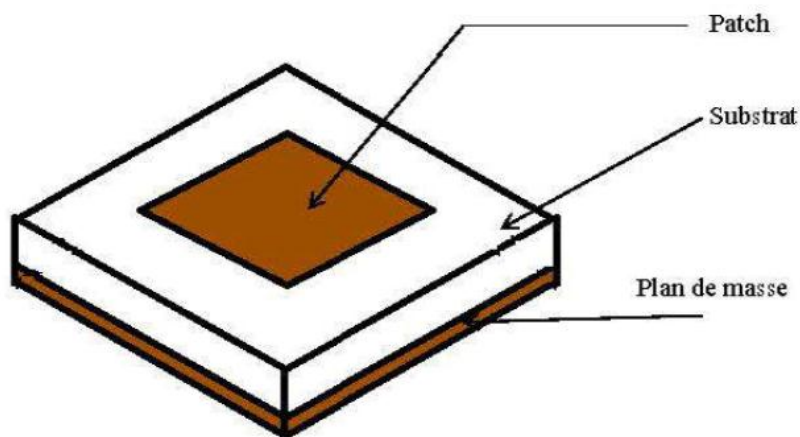
Figure II.14: Types des tags RFID dipôle.

Cependant, ces antennes sont très sensibles à la polarisation (polarisation linéaire) et présentent toujours un rayonnement omnidirectionnel.

II.4.3 PATCH TAGS

Les antennes patch sont caractérisées par leur faible coût, simplicité de fabrication, poids léger et la facilité de les intégrer avec d'autres composants ou matériaux [30].

L'antenne dans sa forme la plus simple est constituée de trois couches principales. Le patch et le plan de masse sont les deux couches conductrices de l'antenne. Ces deux plans sont séparés par un substrat diélectrique d'épaisseur h (Figure II.15).

**Figure II.15:** Structure de l'antenne patch.

II.4.3.1 Substrat

Les caractéristiques essentielles d'un substrat sont : la constante diélectrique, la tangente de perte ($\tan \delta$) et l'épaisseur h . Le constant diélectrique ϵ_r est défini comme l'aptitude d'un substrat à retenir la charge. Alors, la tangente de perte ($\tan \delta$) désigne la puissance perdue de

l'antenne. Ce qui veut dire qu'un substrat avec un constant diélectrique élevé et un $\tan \delta$ minimal réduira les pertes d'énergie et améliorera ainsi le gain.

Après le choix du diélectrique et de la tangente de perte du substrat, le seul paramètre modifiable dans le substrat est l'épaisseur h . Le rapport entre la largeur du patch et l'épaisseur W/h , pour un substrat donné, détermine la résistance du rayonnement de l'antenne. Par conséquent, des substrats plus épais sont préférés car ils augmentent la puissance rayonnée, réduisent les pertes dû aux conducteurs et améliorent ainsi la bande passante.

En outre, avec la variété et le nombre élevé des substrats disponible sur le marché, un autre critère peut affecter le choix d'avoir un substrat optimal, est l'environnement ou le lieu d'utilisation de l'antenne. Pour le domaine de RFID un bon choix de substrat rend l'antenne plus adaptée et utile dans un environnement défavorable comme les milieux souterrains [28].

II.4.3.2 Dimensions de l'antenne

L'épaisseur du substrat diélectrique h doit être plus petite que la longueur d'onde de l'antenne mais pas plus petit que $\lambda/40$, une limite à partir de laquelle les performances de l'antenne risque de se dégrader significativement [34]. Dans l'équation (II.29), on peut noter également que l'épaisseur du substrat, la longueur L et la largeur W influent sur la valeur de la bande passante.

$$B \propto \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \frac{W}{L} h \quad (\text{II. 29})$$

En général, la longueur électrique de l'antenne microstrip est plus grande que sa longueur physique. La longueur L dépend de la constante diélectrique et la fréquence de résonance.

$$L \approx \frac{1}{2f_c \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} \quad (\text{II. 30})$$

La largeur W de l'antenne contrôle l'impédance d'entrée. D'autres paramètres de l'antenne peuvent affecter l'impédance et la fréquence de résonance comme les dimensions du plan de masse et l'épaisseur des couches conductrices (patch et le plan de masse).

II.5 LES PUCES RFID

Les puces RFID existent sous plusieurs formes :

- ❖ Le format standard : elle n'est plus utilisée dans le domaine du RFID.
- ❖ Le format die (mort) nécessite une grande concentration lors de l'intégration avec l'antenne RFID.

- ❖ Boucle inductive est très difficile à l'intégrer manuellement. Elle est sophistiquée et demande beaucoup du temps lors de la fabrication.
- ❖ Le format strap est le plus utilisé. Il offre une grande flexibilité lors du processus d'intégration avec l'antenne [28].

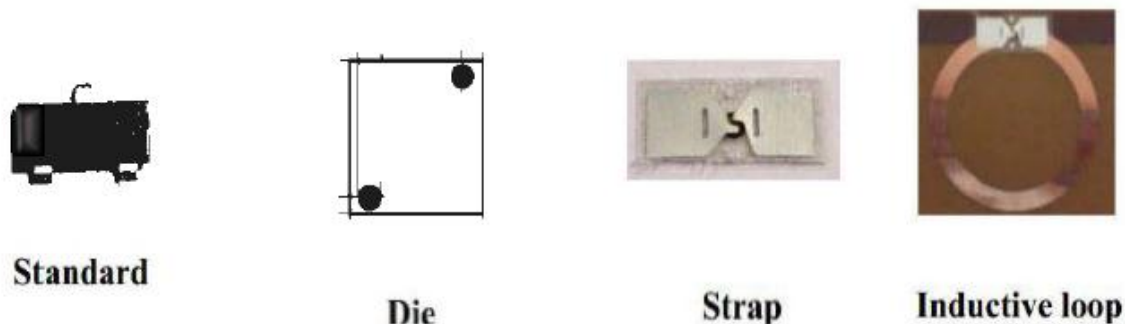


Figure II.16: Les puces RFID.

II.6 CLASSIFICATION DES ANTENNES

Nous pouvons classer des antennes selon leur type d'utilisation dans trois différentes catégories [31].

II.6.1 ANTENNES OMNIDIRECTIONNELLES

Les antennes omnidirectionnelles ont un modèle de rayonnement de 360 degrés autour d'elles (plan horizontal) et fonctionnent normalement comme concentrateur ou passage central d'un réseau. Elles ont un champ électromagnétique verticalement polarisé et utilisées en association avec des points d'accès pour les liaisons Point à Multi Point [31].

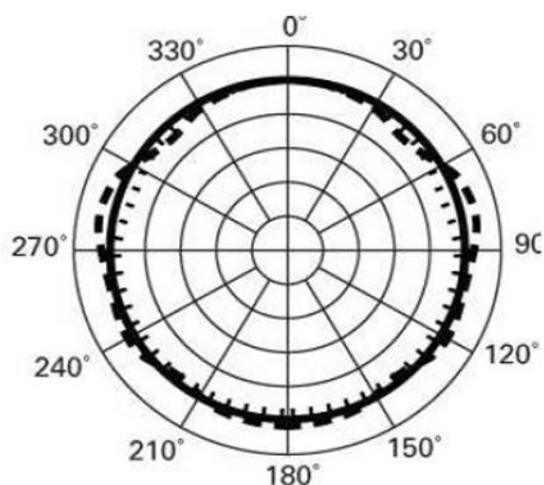


Figure II.17: Diagramme de rayonnement d'une antenne omnidirectionnelle Isotrope.

II.6.2 ANTENNES SECTORIELLES

Sont conçus pour fonctionner avec un gain plus élevé que les antennes omnidirectionnelles et couvrent seulement un secteur de l'azimut –typiquement de 60° à 120°.

Ces antennes peuvent être trouvées avec la polarisation verticale ou horizontale selon les techniques de construction utilisées.

Elles sont aussi comme les antennes omnidirectionnelles utilisées en association avec des points d'accès pour les liaisons Point à Multi Point (PTMP) [31].

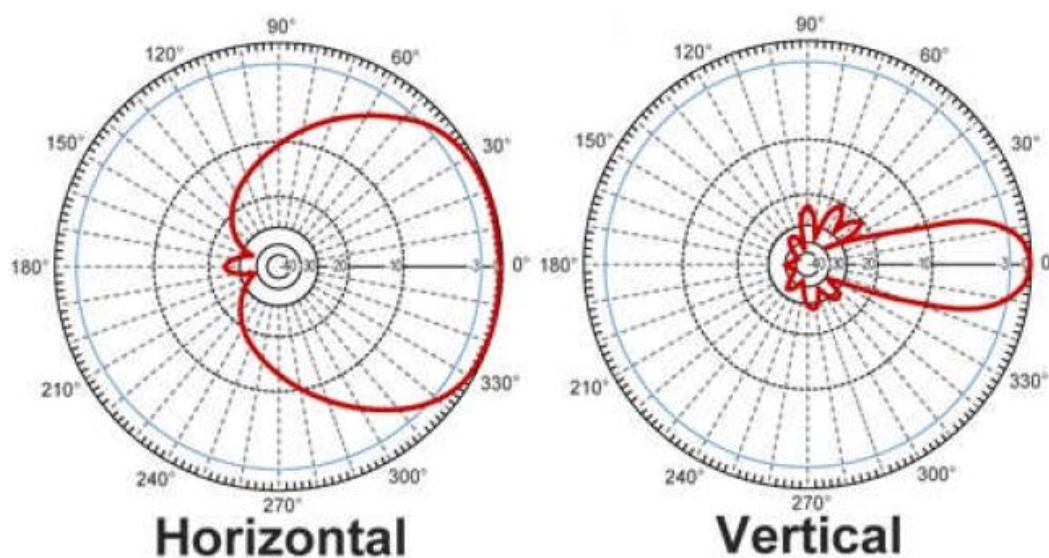


Figure II.18: Diagramme de rayonnement d'une antenne sectoriel.

II.6.3 ANTENNE DIRECTIONNELLE (DIRECTIVES)

Elles ont un gain élevé et sont dirigées vers le point d'accès et elles ont un angle d'ouverture faible. Ces antennes sont également utilisées pour établir des liaisons point à point longue distance [31].

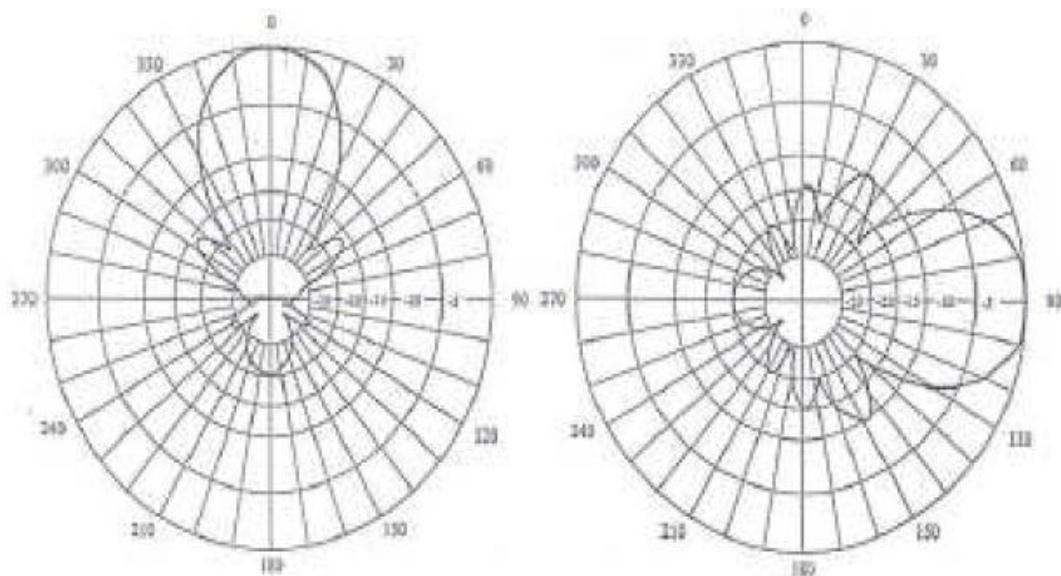


Figure II.19: Diagramme de rayonnement d'une antenne Directionnelle.

II.7 DOMAINE D'UTILISATION

Les avantages de ces antennes les rendent particulièrement intéressantes pour les systèmes de télécommunication, de mobiles terrestres, de télédétections et de télémessure telle que : les radars embarqués, Satellites, Avions, Fusés, Portables, Missiles, Bateaux, les récepteurs GPS, Navires, véhicules routiers et RFID, etc. ils sont utilisés, aussi lorsqu'on veut réduire l'encombrement d'une antenne [32].

II.8 ADAPTATION D'IMPEDANCE DES ANTENNES DIPOLES

Le premier avantage de l'adaptation d'impédance entre l'antenne du tag et la puce est de récupérer suffisamment d'énergie pour générer une tension continue suffisante pour alimenter la puce RFID (en particulier l'unité de traitement numérique qui gère le protocole de communication) [33].

II.8.1 ADAPTATION D'UNE ANTENNE DIPOLE PAR UNE INDUCTANCE SERIE

Les dipôles sont les antennes les plus employées dans le domaine de la RFID grâce à leurs caractéristiques structurales. Pour adapter ce type d'antenne, un circuit d'adaptation est mis en œuvre, et pour des raisons financières une adaptation par un élément discret est appliquée. Dans la première approche, l'intégration d'éléments distribués, au motif de l'antenne est une étape très importante. Elle est réalisée en ajoutant des éléments inductifs distribués en série à la partie imaginaire, négative, de la puce RFID.

La figure II.20 présente un modèle en circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée avec une inductance en série.

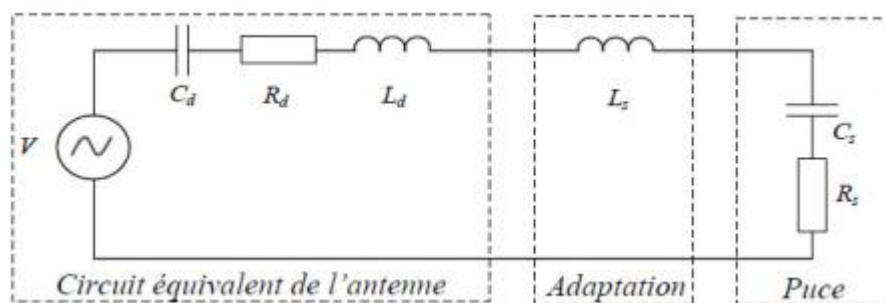


Figure II.20: Modèle circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée avec une inductance en série.

Comme le montre la figure II.21, l'antenne est adaptée par un élément série, ce dernier est physiquement réalisé par l'adjonction d'un méandre.

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

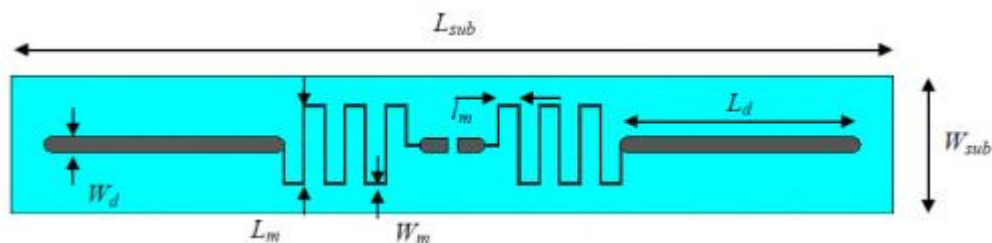


Figure II.21: Géométrie de l'antenne dipôle adaptée par une inductance série.

II.8.2 ADAPTATION D'UNE ANTENNE PAR UNE INDUCTANCE PARALLELE

Dans cette deuxième technique d'adaptation, la même démarche que la précédente est suivie, sauf que, cette fois ci on considère des éléments inductifs distribués en parallèle.

La figure II.22 représente un modèle circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée par une inductance parallèle sans perte.

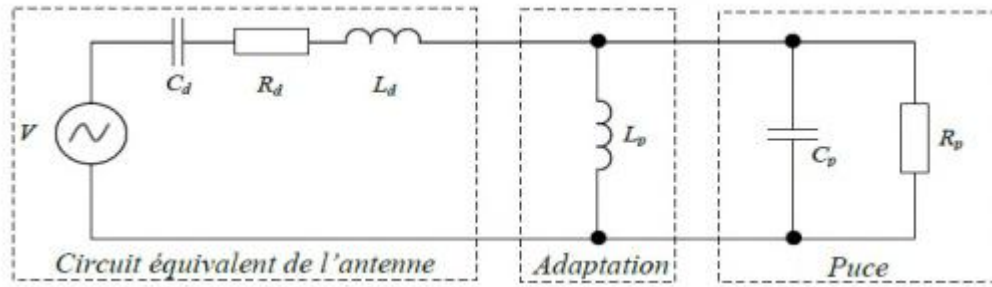


Figure II.22: Modèle circuit d'un tag RFID constitué d'une antenne dipôle adaptée par une inductance parallèle.

L'adaptation physique d'une antenne peut être réalisée par l'adjonction d'un ou plusieurs courts circuits en parallèle avec le port d'entrée. Les dimensions de l'antenne ajustée, sont la largeur W_{short} et la longueur des courts circuits. A travers les paramètres L_{short} et R_{short} on se permet de trouver une valeur d'inductance conduisant à l'adaptation du dipôle.

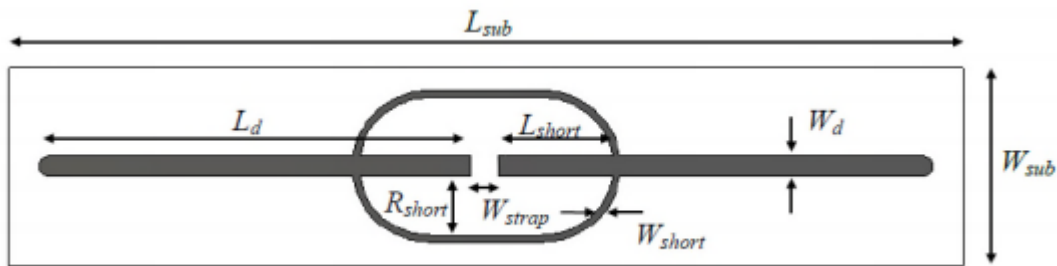


Figure II.23: Géométrie de l'antenne dipôle adaptée par une inductance parallèle.

II.8.3 ADAPTATION D'IMPEDANCE PAR COUPLAGE

Elle est consacrée dans le cas des packagings à couplage inductif. Comme le montre la figure 2.8, le modèle circuit d'un tag RFID, constitué d'une antenne dipôle adaptée par couplage sans perte, a une boucle inductive. Ces deux éléments inductifs sont en face

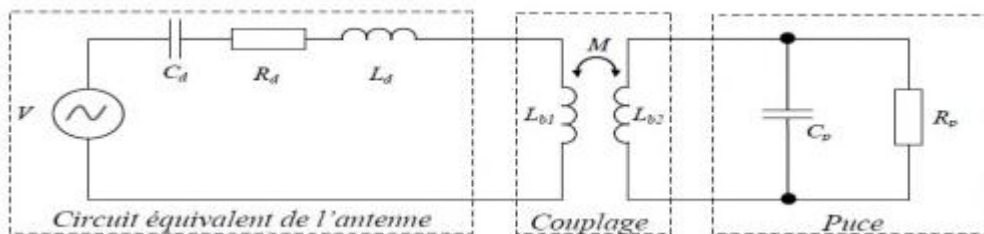


Figure II.24: Prototype de tag composé d'une antenne dipôle adaptée par couplage magnétique.

Les figures a et b représentent une géométrie d'une antenne réalisée, il est possible d'avoir une adaptation par couplage si l'antenne est réalisé sur un circuit double face tel que

l'antenne dipôle est sur la première face et la seconde face la boucle d'alimentation avec le port de connexion a la puce RFID.

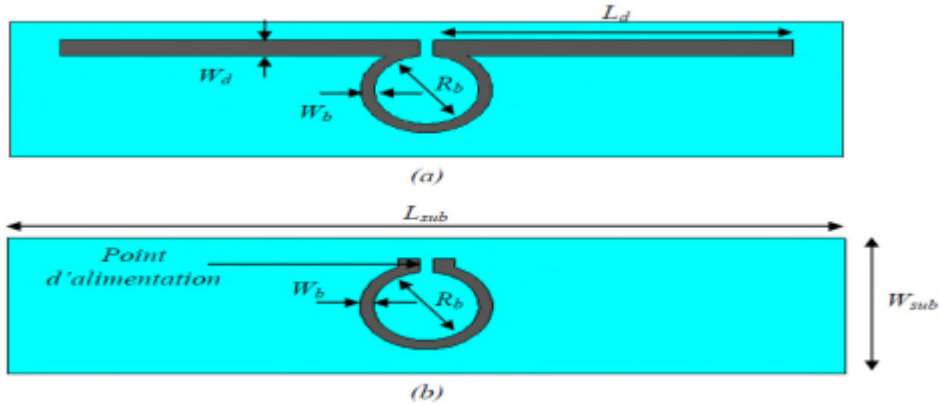


Figure II.25: Antenne dipôle adaptée par couplage.

II.8.4 ADAPTATION D'IMPEDANCE PAR T-MATCH STRUCTURE

Une approche possible pour l'adaptation d'une antenne à la puce RFID qui a généralement une Impédance capacitive, est d'ajouter une structure d'adaptation inductive. Une structure possible utilise une combinaison d'inductances en parallèle et en série. Une telle approche est montrée à la figure II.26. Les inductances parallèle et série sont réalisées par des longueurs de ligne conductrice raccordant l'antenne à la puce [34].

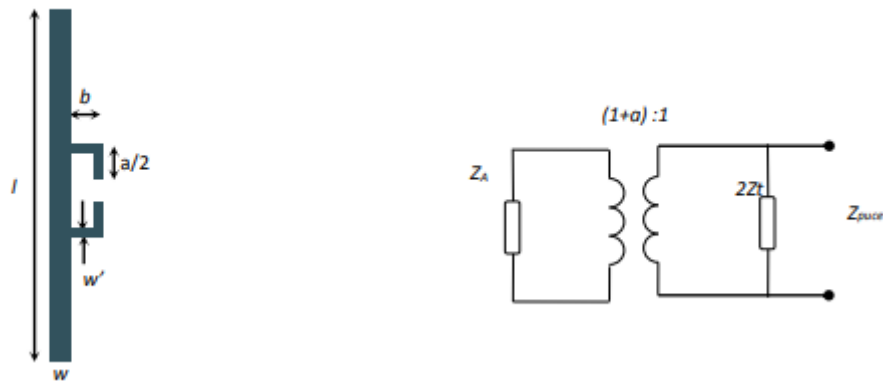


Figure II.26: la configuration T-Match et le circuit équivalent.

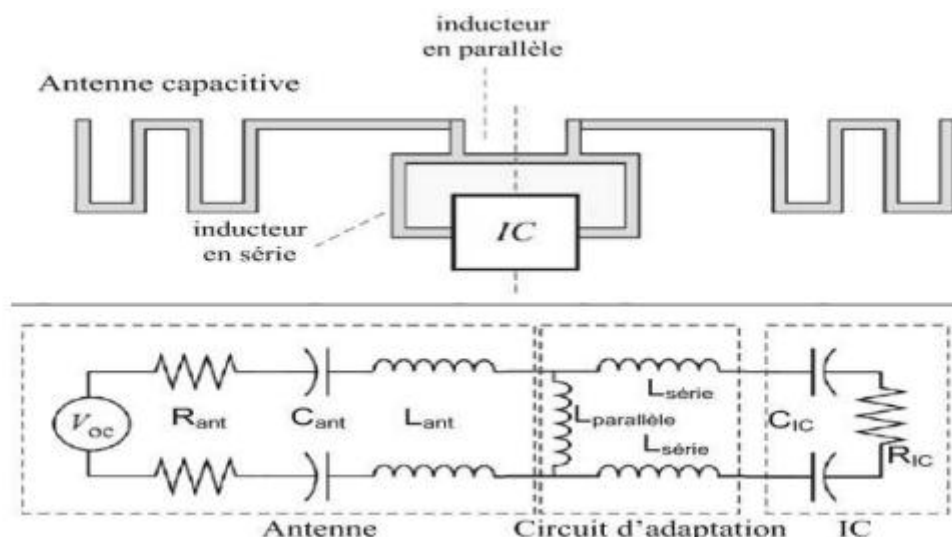


Figure II.27: Le model de circuit équivalent de la configuration T-Match.

L'impédance équivalente vue à partir de la puce :

$$z_{in} = \frac{2z_t(1 + a)^2z_a}{2z_t + (1 + a)^2z_a} \tag{II. 31}$$

Où z_t est l'impédance de stub et z_a l'impédance équivalente de l'antenne.

La configuration T-Match fonctionne comme un adaptateur de l'impédance. Les dimensions de la largeur et de la longueur des pistes conductrices peuvent être ajustées pour que l'adaptation de l'impédance entre la puce et l'antenne soit assurée.

II.9 CONCLUSION

Les antennes ont des propriétés et des caractéristiques, selon lesquelles elles sont valorisées. Plusieurs techniques existent pour les réaliser. Alors, pour assurer un bon fonctionnement, il faut choisir celle la plus adaptée à l'application envisagée. Dans le cas de la technologie RFID les antennes UHF et ULB sont les plus utilisées.

Le chapitre suivant concerne la simulation et la conception d'antenne pour lecteur RFID

**CHAPITRE III : CONCEPTION ET
SIMULATION D'ANTENNES POUR
SYSTEME RFID**

III.1 INTRODUCTION

La RFID constitue la norme la plus utilisée dans l'identification par radiofréquence. Un système RFID se compose principalement de deux composants qui sont le tag et le lecteur. Un élément clé de ce dernier est l'antenne car sa performance influe directement sur la portée de lecture.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser différentes structures d'antennes imprimées associées à des tags RFID, en utilisant le logiciel CST MICROWAVE STUDIO (Computer Simulation Technologie) [34].

Dans ce chapitre nous allons présenter différentes structures d'antennes pour la RFID Conçues et simulées sous l'environnement CST. En général, les concepteurs d'antennes commencent par des structures simples. Les dimensions sont calculées à partir de formules empiriques afin d'avoir la fréquence d'opération désirée. Par la suite, il est envisageable de modifier certains paramètres de l'antenne dans le but de répondre aux exigences de l'application en question, à savoir, le gain, la bande passante, l'impédance d'entrée de l'antenne, etc....

III.2 LA METHODOLOGIE DE CONCEPTION D'ANTENNES DE TAGS RFID PASSIFS

La conception d'antennes du tag RFID passif demande de mettre en œuvre une méthodologie de développement, qui est présentée sur la figure III.1.

La conception de ces antennes nécessite dans un premier temps de déterminer les propriétés de l'antenne du tag en fonction de l'application visée. Ensuite, il faut déterminer la puce RFID qui convient avec le packaging approprié à la technologie de fabrication et déterminer l'impédance d'entrée optimale de l'antenne. Par la suite, il est nécessaire de déterminer les propriétés des matériaux constituant l'antenne mais également ceux compris dans l'environnement de l'application. Il convient aussi de sélectionner un type d'antenne susceptible de répondre aux besoins de l'application et réalisable par la technologie de fabrication sélectionnée.

Ensuite, il faut déterminer en fonction de ces caractéristiques si l'antenne peut permettre par une modification de ces paramètres physiques d'avoir une impédance d'entrée désirée. Si ce n'est pas le cas, il faut mettre en œuvre une technique permettant de réaliser son impédance. Il convient ensuite de réaliser la simulation de l'antenne du tag RFID. Enfin, il faut réaliser le test des performances de l'antenne obtenue [5].

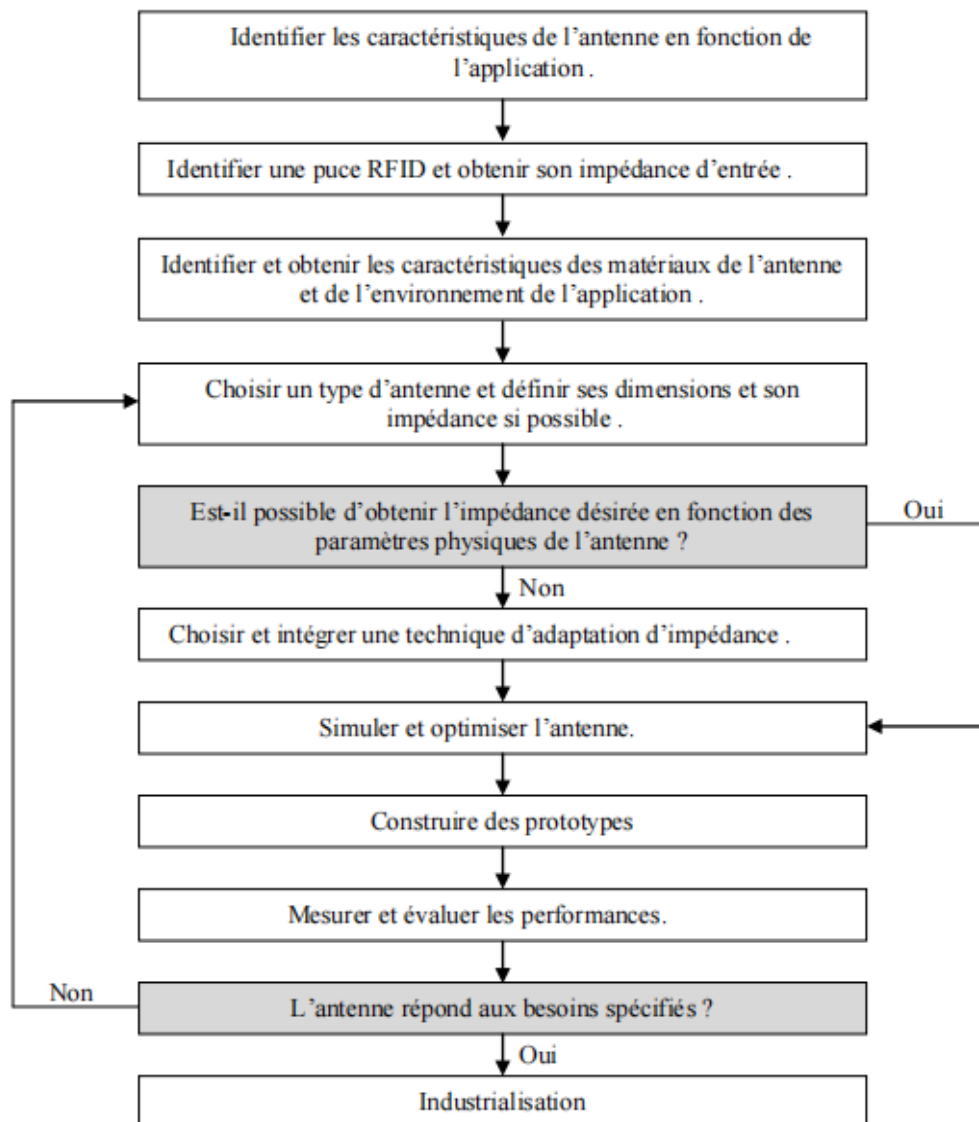


Figure III.1: Méthodologie de conception d'antennes de tags RFID passifs.

III.3 ANTENNE PATCH HEXAGONALE MONO BANDE POUR RFID

L'antenne imprimée choisie est de forme hexagonale travaillant à la fréquence 5.8 GHz de la RFID, alimentée par une ligne micro-ruban. La figure III.2 représente la géométrie de cette antenne qui est constituée d'un patch hexagonale imprimé d'épaisseur $t=0.035$ sur un substrat de type FR-4 (lossy), et un plan de masse rectangulaire de l'autre côté du substrat qui est caractérisé par une constante diélectrique $\epsilon_r=4.3$, de tangente de pertes $\tan \delta= 0.02$ et d'épaisseur $h = 1.5mm$.

III.3.1 ANTENNE HEXAGONALE DE DÉPART

Le modèle de simulation d'une telle structure est celui illustré sur la figure III.2. La largeur (W_k) ainsi que La longueur (L_k) de la ligne d'excitation de type micro-rubanant été prise respectivement égale à 6mm et à 12.86 mm afin D'assurer une impédance caractéristique de 50Ω . Les dimensions analytiques de cette antenne sont résumées dans le tableau III.1.

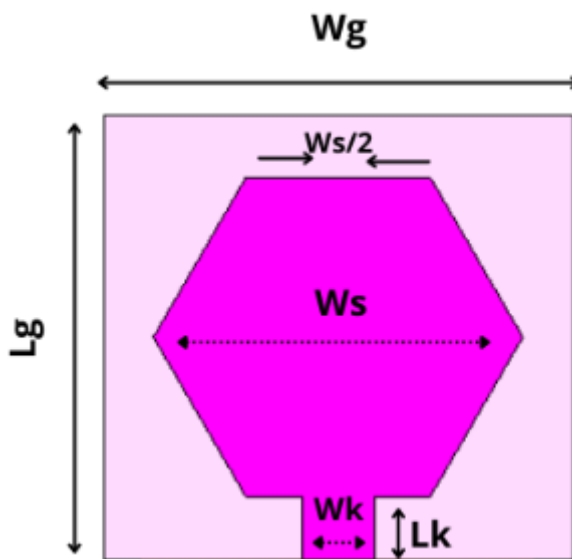


Figure III.2: Géométrie de l'antenne patch hexagonale de départ.

Paramètres	L_g	W_g	W_s	W_k	L_k
Valeur (mm)	37	39	30	6	12.85

Table III.1: Dimensions de l'antenne hexagonale de départ.

Le coefficient de réflexion à l'entrée de cette antenne hexagonale ayant les dimensions théoriques du tableau III.1 est illustré sur la figure III.3.

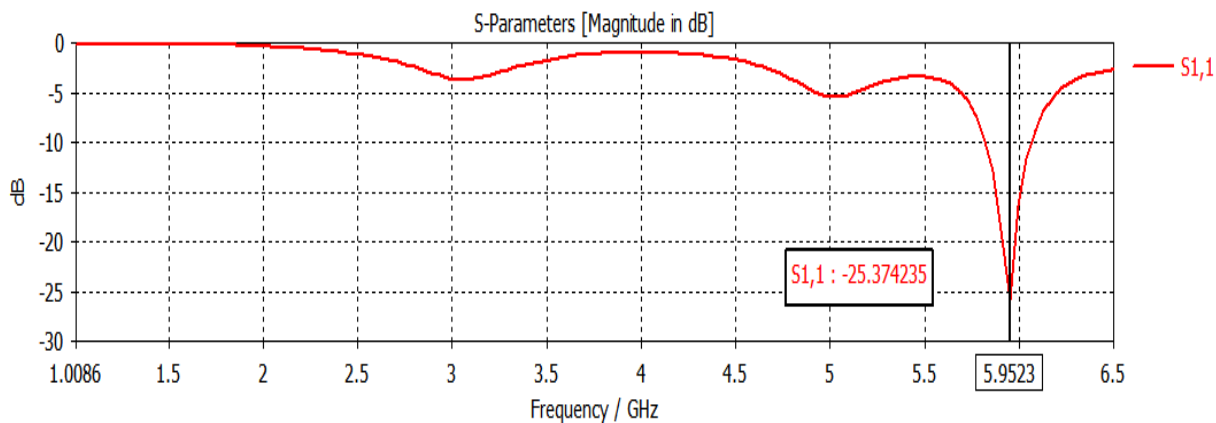


Figure III.3: Coefficient de réflexion de l'antenne hexagonale de départ.

La figure III.3 montre une fréquence de fonctionnement de 5.95 GHz. Avec une petite augmentation de la taille de l'hexagonale (W_s) on va provoquer un décalage de la fréquence de fonctionnement vers la gauche pour atteindre la valeur de 5.8 GHz.

Les nouvelles dimensions optimisées pour tomber sur la fréquence de fonctionnement de 5.8 GHz sont données sur le tableau III.2 et le coefficient de réflexion de l'antenne optimisée est montré sur la figure III.4.

Paramètres	L_g	W_g	W_s	W_k	L_k
Valeur (mm)	37	39	30.7	6	13.2

Table III.2: Dimensions de l'antenne hexagonale après optimisation.

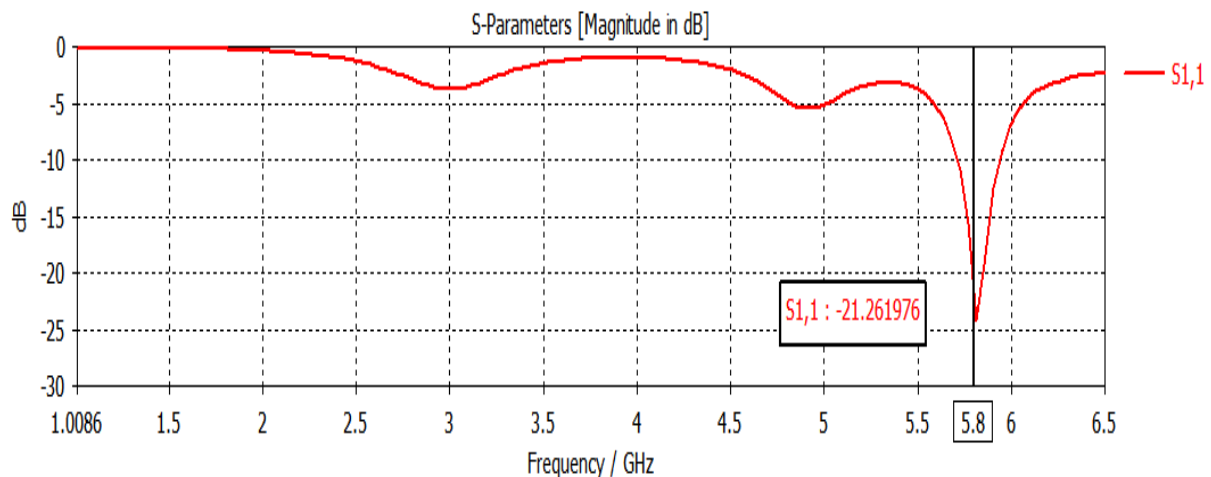


Figure III.4: Coefficient de réflexion de l'antenne hexagonale optimisée.

La simulation de la dernière structure par le logiciel CST a donné un coefficient de réflexion de valeur bien adapté de -21.26 dB à la fréquence 5.8 GHz comme il est montré sur la figure III.4.

Les diagrammes de rayonnement sont montrés sur la figure III.5.

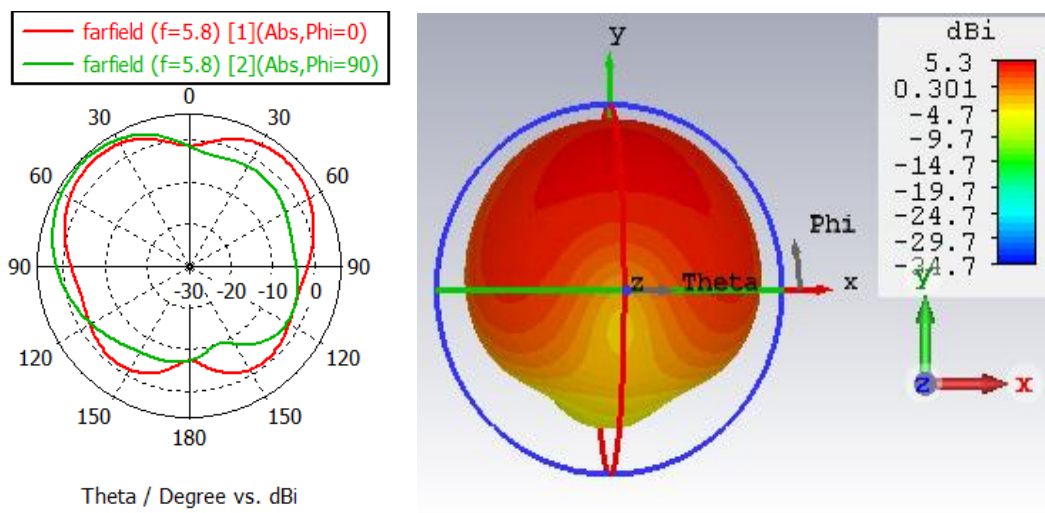


Figure III.5: Diagramme de rayonnement 2D&3D (Directivité) à $f=5.8\text{GHz}$ pour l'antenne hexagonale.

Nous pouvons dire que l'antenne présente un rayonnement quasi-omnidirectionnel dans les deux plans : le plan $x-z$ ($\Phi=0$) et le plan $y-z$ ($\Phi=90$) comme celui d'un dipôle, avec un gain de 5.3 dBi à la fréquence de résonance 5.8 GHz.

III.4 ANTENNE PATCH BI-BANDE POUR RFID

Le fonctionnement multi-bande est très attrayant, du fait qu'avec une seule antenne nous puissions servir plusieurs applications en même temps. Pour cette raison, nous avons trouvé Intéressant de concevoir une antenne bi-bande travaillant aux fréquences 2.45 et 5.8 GHz de la RFID.

III.4.1 ANTENNE RECTANGULAIRE DE DEPART

Dans cette partie nous partons par une antenne patch rectangulaire mono-bande avec encoches, le substrat est le FR4 ($\epsilon_r=4.4$, épaisseur=1.5mm) et un plan de masse complet de mêmes dimensions. La géométrie de l'antenne est montrée sur la figure III.6.

L'objectif ici est de faire rayonner cette antenne à la fréquence 5.8 GHz de la RFID, pour cela nous avons effectué une étude paramétrique qui est abouti aux résultats optimisés des dimensions de l'antenne comme il est montré sur le tableau III.3.

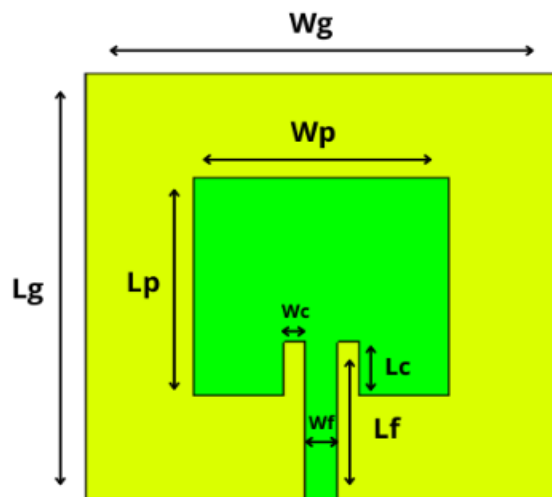


Figure III.6: Géométrie de l'antenne patch rectangulaire mono-bande.

Paramètres	Wg	Lg	Wp	Lp	Wf	Lf	Wc	Lc
Valeurs (mm)	44	41	23.75	21	3	10	2	5.2

Table III.3: Dimensions optimisées de l'antenne patch rectangulaire mono-bande

Le coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire mono-bande ayant les dimensions optimisées du tableau III.3 est illustré sur la figure III.7.

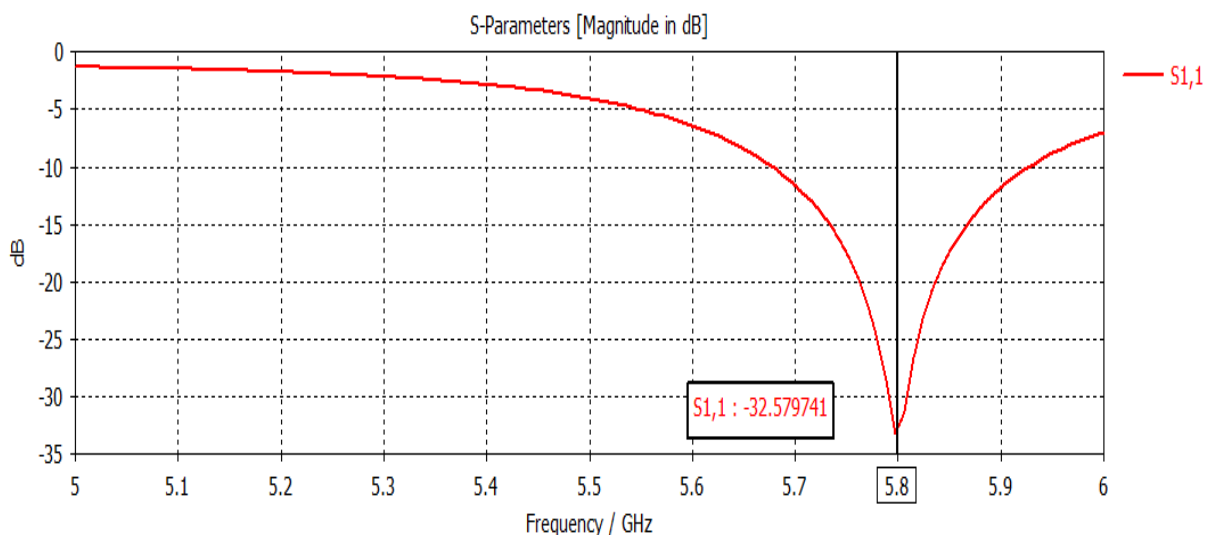


Figure III.7: Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire mono-bande.

L'effet des encoches sur l'adaptation est clairement montré sur la figure III.7 qui est traduit par une valeur du coefficient de réflexion de -32.5 dB à la fréquence 5.8GHz.

III.4.2 ANTENNE BI-BANDE

L'étape suivante consiste en la conception d'une antenne bi-bandes à partir de l'antenne mono-bandes précédente. Il s'agit de l'ajoute de deux fentes rectangulaires, l'une dans le patch et l'autre dans le plan de masse pour provoquer la propagation de modes d'ordres supérieurs.

La figure III.8 et le Tableau III.4 illustre et montre les dimensions et l'emplacement des deux fentes rectangulaires sur le patch et le plan de masse qui aboutit à une antenne qui travaille sur deux fréquences 2.45 GHz et 5.8 GHz du système RFID.

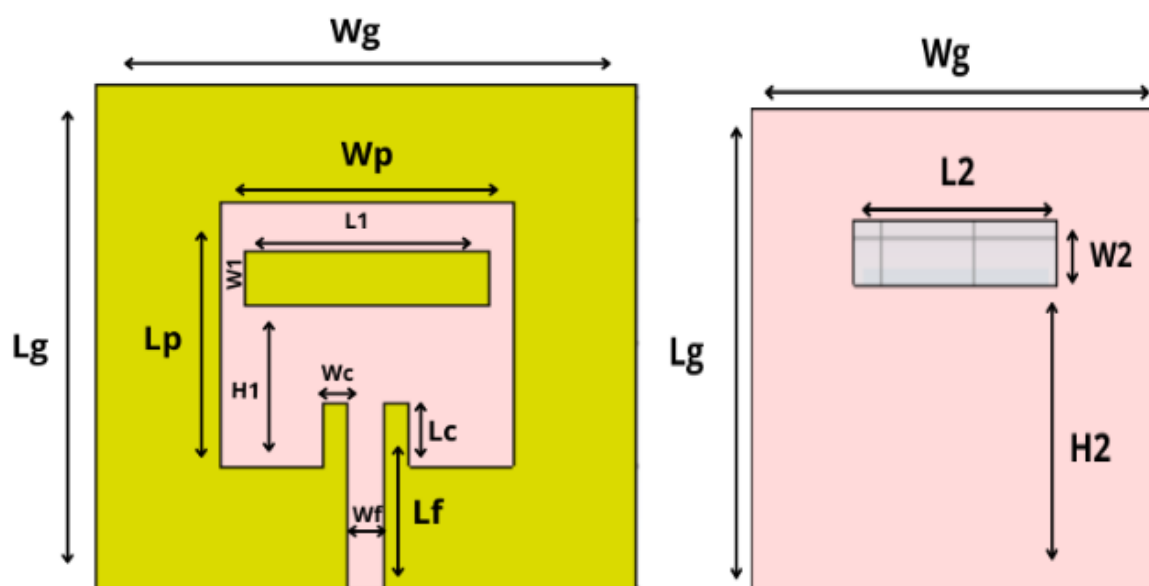


Figure III.8: Géométrie de l'antenne patch rectangulaire bi-bande.

Paramètres	Wg	Lg	Wp	Lp	Wf	Lf	Wc	Lc	W1	L1	H1	W2	L2	H2
Valeurs (mm)	44	41	23.75	21	3	10	2	5.2	4.5	20	13	5.5	22	26

Table III.4: Dimensions optimisées de l'antenne patch rectangulaire bi-bande

De la figure III.9 qui représente le coefficient de réflexion en fonction de fréquence, on peut tirer la remarque que l'antenne fonctionne sur deux fréquences du système RFID. La première fréquence 2.45 GHz se situe à un niveau de $|S_{11}| = -30.13$ dB, la seconde fréquence 5.8 GHz se situe à un niveau de $|S_{11}| = -18.50$ dB.

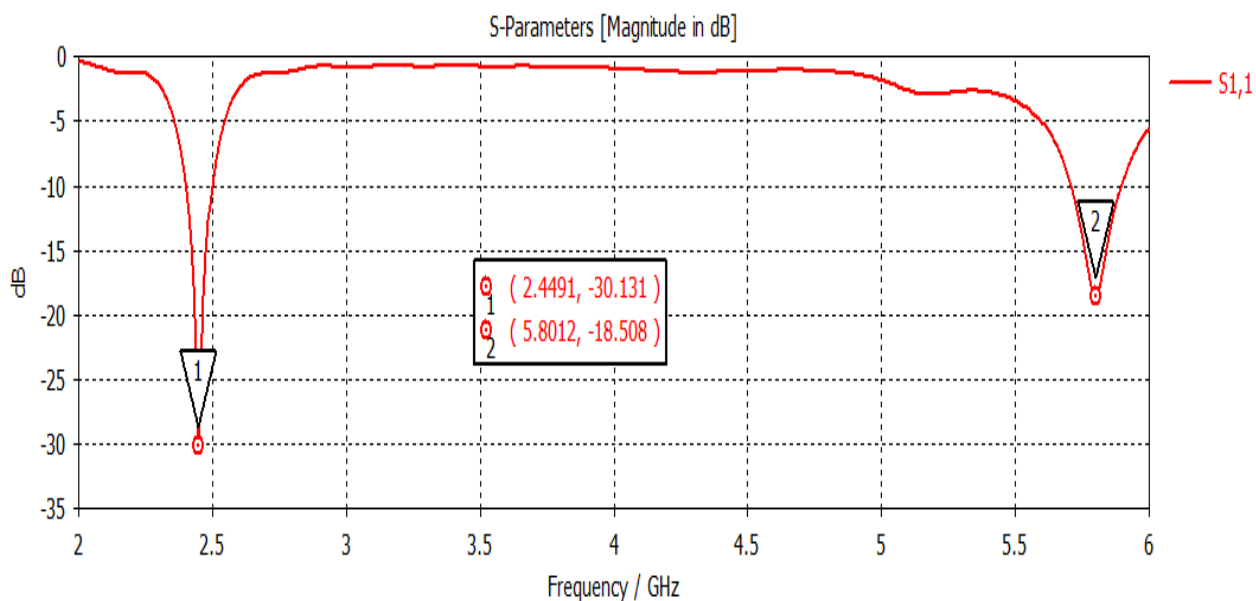


Figure III.9: Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire bi-bandes (2.45&5.8 GHz).

La Figure III.10 présente les diagrammes de rayonnement de l'antenne dans les deux fréquences de résonnances, elle présente des diagrammes bidirectionnels sur l'un des deux plans principaux et omnidirectionnels sur l'autre avec une directivité de 4.61dBi et 6.01 dBi aux fréquences 2.45GHz et 5.8GHz respectivement.

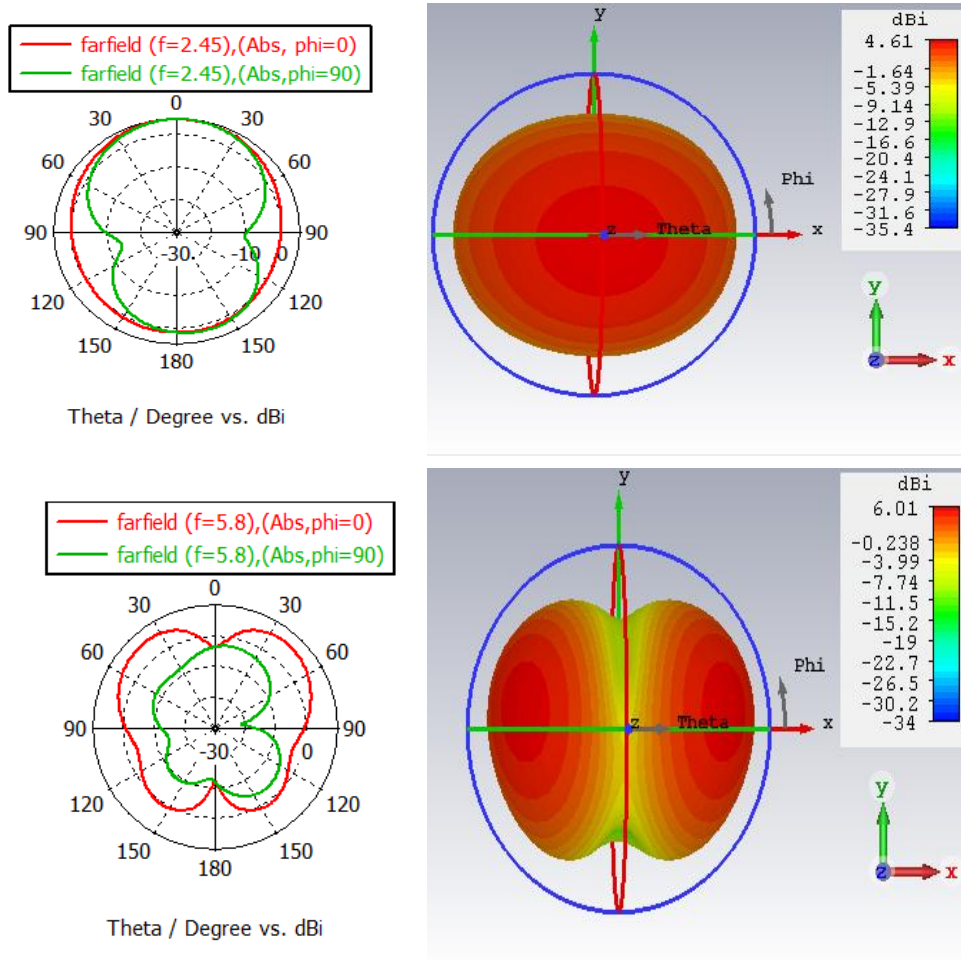


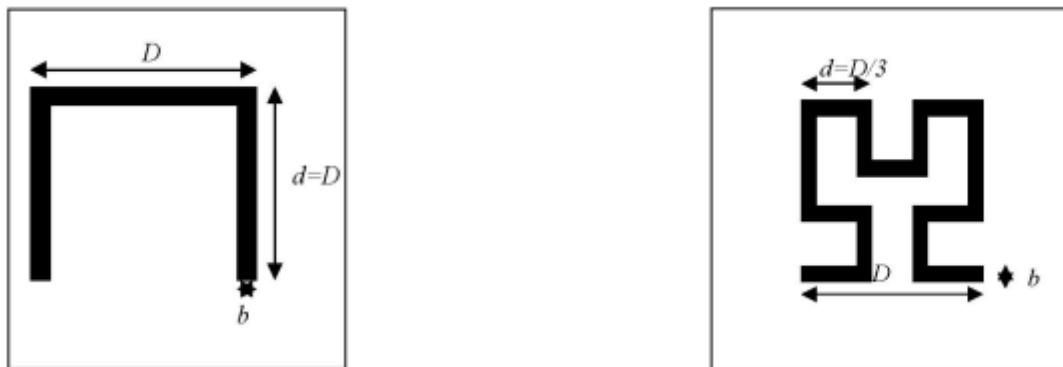
Figure III.10: Diagramme de rayonnement 2D&3D dans les deux fréquences 2.5 GHz et 5.8 GHz pour l'antenne patch rectangulaire bi-bandes.

III.5 ANTENNE DIPOLE FRACTALE RFID ADAPTEE A 50 Ω

III.5.1 FRACTALE DE HILBERT A L'ITERATIONS DEUX [35,36]

Il existe de nombreux types de formes fractales qui ont été proposées après leur formulation, et des formes géométriques ont été créées en motifs répétitifs, la courbe de Hilbert a été proposée en 1891[35].

La Figure III.11 illustre la structure de configuration d'antenne courbe de Hilbert. D, d et b sont respectivement la largeur de l'antenne, le segment ou l'espace fractal et la largeur de la ligne d'antenne.



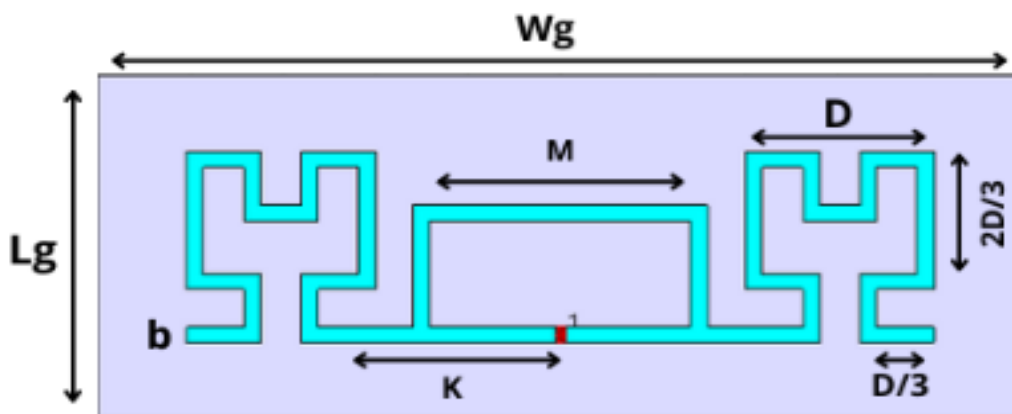
a) structure de premières itérations.

b) structure de deuxièmes itérations.

Figure III.11: Géométrie de Hilbert à l'itération deux.

III.5.2 ANTENNE DIPOLE FRACTALE RFID

La géométrie de cette antenne se présente sous la forme d'un dipôle en forme de fractale de Hilbert. Cette antenne est destinée à fonctionner à la fréquence 2.45 GHz normalisée pour les applications RFID. Elle est déposée sur un substrat de type FR4 de permittivité de $\xi_r = 4.3$, d'une hauteur de $h = 1.5\text{mm}$ et un plan de masse complet.

**Figure III.12:** Structure de l'antenne dipôle fractale.

Nous avons fait une étude paramétrique pour voir l'influence des paramètres (six paramètres) sur les caractéristiques de l'antenne. Pour résumer l'étude et à titre d'exemple on peut montrer l'influence du paramètre « b » sur la figure III.13.

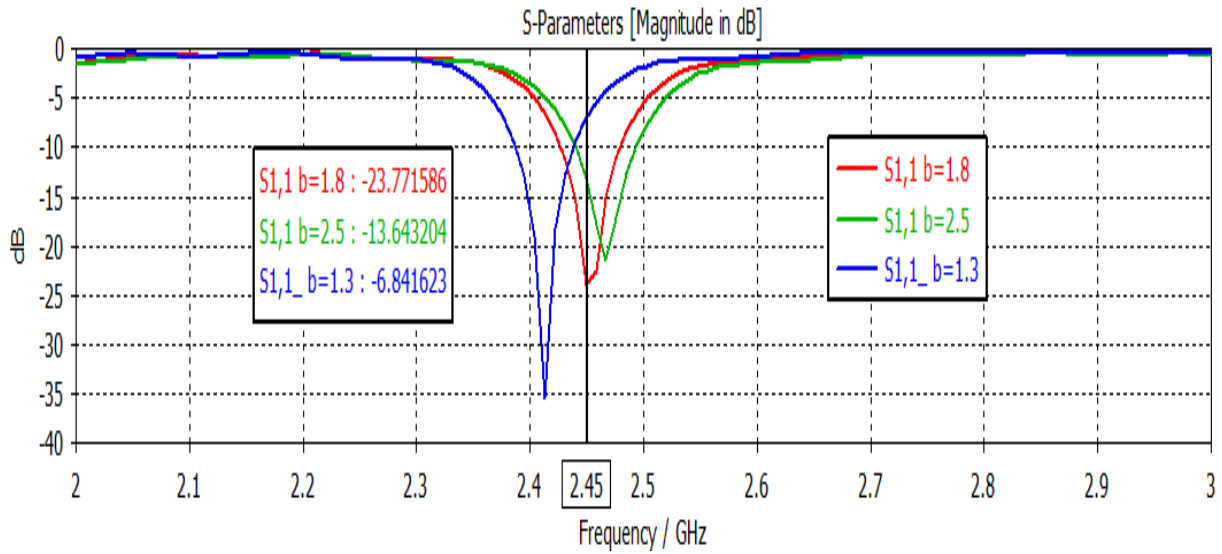


Figure III.13: Influence du paramètre « b » sur l’antenne.

La figure III.13 montre bien l’influence de la largeur « b » sur l’antenne dipôle fractale. Pour la fréquence 2.45 GHz la meilleure valeur du « b » est de 1.8 mm la plus adaptée $|S_{11}| = -23.77$ dB, toutes les dimensions optimisées de cette antenne sont résumées et récapitulées sur le Tableau III.5.

Paramètres	Wg	Lg	D	2D/3	D/3	K	M	b
Valeur (mm)	100	40	24	16	8	19.5	31.8	1.8

Table III.5: Dimensions optimisées de l’antenne dipôle fractale.

Le coefficient de réflexion de l’antenne dipôle fractale ayant les dimensions théoriques du tableau III.5 est illustré sur la figure III.14.

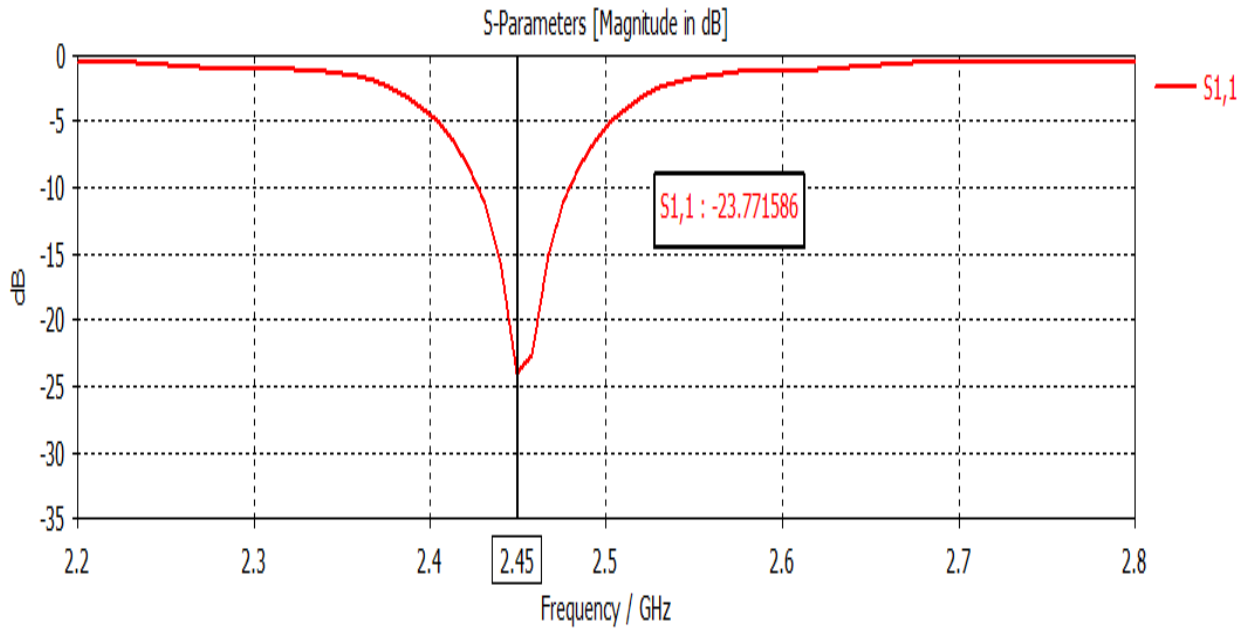


Figure III.14: Coefficient de réflexion de l’antenne dipôle fractale.

La Figure III.15 illustre le diagramme de rayonnement de l’antenne dipôle fractale à la fréquence de résonance 2.45GHz. Nous représentons ce rayonnement en polaire sur les deux plans principaux (plan E « Phi=0 » et plan H « Phi=90 ») ainsi qu’une représentation en 3D. Nous pouvons dire que l’antenne présente un rayonnement quasi-omnidirectionnel sur les deux plans, avec une directivité de 5.34dBi.

Cette structure a un bon rendement en termes de coefficient de réflexion évalué à -10dB ainsi qu’un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel à la fréquence 2.45 GHz.

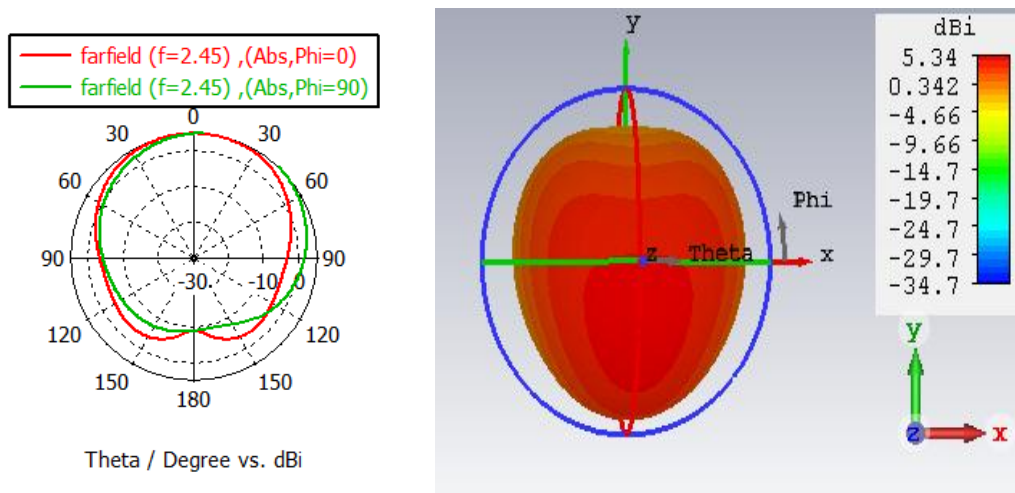


Figure III.15: Diagrammes de rayonnement de l’antenne dipôle fractale à la fréquence 2.45 GHz.

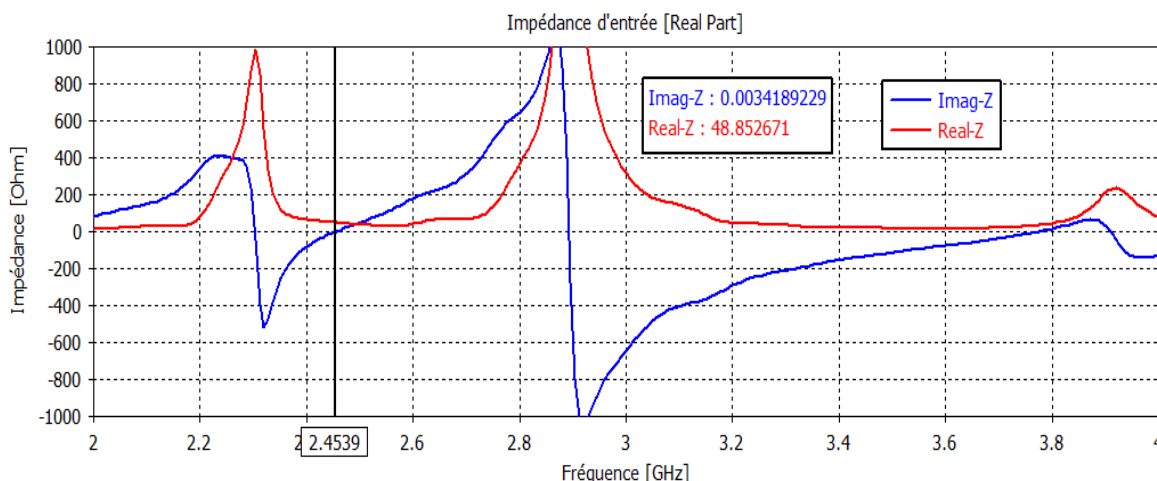


Figure III.16: Impédance d'entrée de l'antenne dipôle fractale.

La figure III.16 représente la variation de l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence pour l'antenne dipôle fractale. Cette dernière donne à la fréquence 2.45 GHz une impédance d'entrée purement réelle autour de 50 Ohm, ce qui implique que c'est une fréquence de résonance.

III.6 REALISATION

Après avoir simulé notre antenne dans l'environnement CST et étudié leurs caractéristiques électriques et de rayonnement, on a voulu valider nos résultats avec la mesure, pour cela on a procédé à la réalisation de l'antenne dipôle fractale étudié.

La réalisation de la structure est faite dans notre laboratoire des circuits imprimés du département d'électronique et télécommunications (Université 08 Mai 1945). Pour cela en va présenter l'outil de réalisation, c'est une machine ProtoMat S103 fourni par un logiciel qui s'appelle Circuit Pro.

III.6.1 DESCRIPTION DU MATERIEL

Le graveur de circuits imprimés LPKF ProtoMat S103 pour le prototypage de circuits imprimés et la production de petites quantités, est configuré spécifiquement pour les exigences des applications RF et micro-ondes. Le limiteur de profondeur pneumatique sans contact permet en outre le traitement des substrats tendres et flexibles dotés de surfaces fragiles. Le ProtoMat S103 permet également de d'égrapper soigneusement les circuits imprimés flexibles aux formes irrégulières hors des circuits plus grands [37].



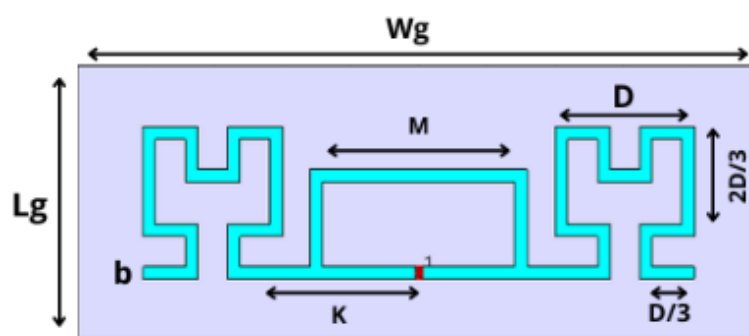
Figure III.17: La machine ProtoMat S103.

La commande de systèmes de prototypage modernes sans logiciel sophistiqué est impensable. LPKF CircuitPro est la dernière génération de logiciels de FAO et de machines puissants, combinant le traitement de données et la commande de système dans un seul programme. Déjà au cours de l'installation, LPKF CircuitPro interroge les composants de prototypage disponibles et les prend en compte dans le processus de production. LPKF CircuitPro reprend les données de conception des systèmes CAD / EDA. Par exemple, l'assistant de planification de processus demande le nombre de couches, le matériau utilisé et le type de traitement ultérieur. Pas à pas, le cadre du projet est créé [38].

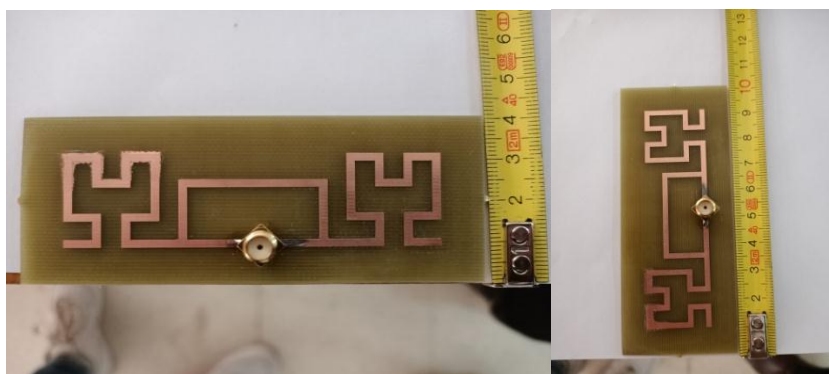
III.6.2 LE MODELE REALISÉ

Notre antenne est réalisée en utilisant le FR4 de permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$ et d'épaisseur $h=1.5\text{mm}$ pour le substrat et le cuivre d'épaisseur $t=0.035\text{ mm}$ pour l'élément rayonnant.

Antenne dipôle fractale <<optimisée>>



(a)

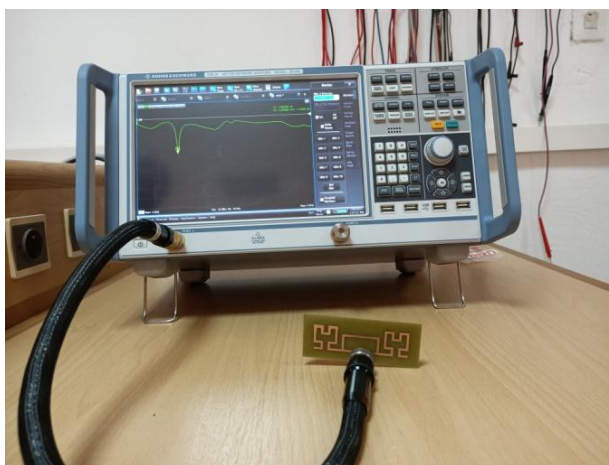


(b)

Figure III.18: (a) antenne dipôle fractale simulée, (b) antenne dipôle fractale réalisée.

III.6.3 MESURES EXPERIMENTALES

Les mesures sont effectuées par un analyseur de réseau vectoriel (Rohde & Schwarz R & S® ZNB20 Vector Network Analyzer) de 100 KHz à 20 GHz fréquence limite de l'analyseur.

**Figure III.19:** Analyseur de réseau vectoriel.

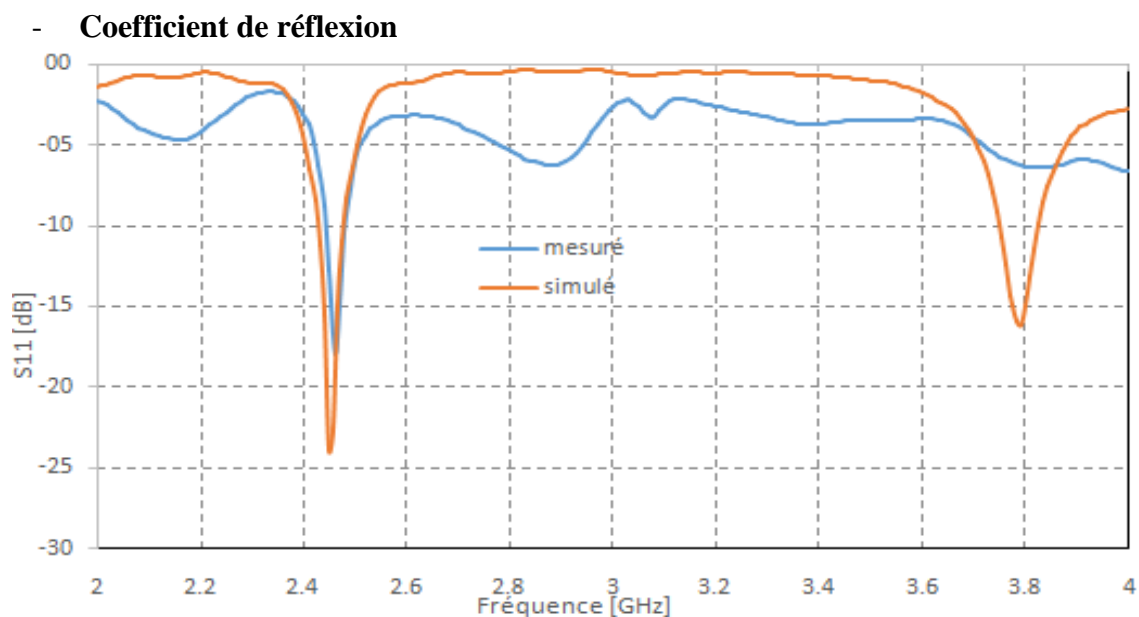


Figure III.20: Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle fractale simulé et mesuré.

Les résultats de mesures du S11 obtenus par l'analyseur de réseaux vectoriel sont plus proches avec les résultats simulés, et plus précisément autour de la fréquence de résonance 2.45 GHz .

III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons simulé et analysé quelques types d'antennes imprimées par le logiciel CST. Nous avons abordé les grandes familles d'antennes mises en œuvre dans les systèmes RFID passifs : les dipôles, les antennes patch. Ces antennes ont été illustrées par différents exemples, Les différentes étapes de conception et de simulation de ces antennes ont été présentées en détail. Nous avons suivi ces étapes afin de faire notre nouvelle structure avec ses nouveaux paramètres. L'optimisation dans le but d'obtenir des bons résultats dont une adaptation entre l'antenne et la puce dans le cas où on a un tag avec puce, nous avons aussi présenté les résultats de simulation de toutes les antennes conçues dans le but de montrer l'effet des différents paramètres géométriques et physique.

Une fois nos modèles sont optimisés, Nous avons opté à l'étape de réalisation avec la machine à gravure mécanique LPKF ProtMAT S103. Les mesures effectués par l'analyseur de réseaux vectoriel (VNA), ont montrés un grand accord avec les résultats trouvés par simulation en terme de coefficient de réflexion, et plus précisément autour de la fréquence de résonance 2.45 GHz du RFID.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

La RFID est une technologie majeure qui connaît depuis plus d'une dizaine d'années un essor considérable en termes d'applications dans de très nombreux domaines. Dans ce travail de projet de fin d'études, nous avons dimensionné, simulé, réalisé trois antennes de type patch rectangulaire pour lecteur et Tag RFID UHF et SHF ainsi que RFID Micro-ondes.

Nous avons abordé les grandes familles d'antennes mises en œuvre dans les systèmes RFID passifs : les dipôles, les antennes patch. Ces antennes ont été illustrées par différents exemples, Les différentes étapes de conception et de simulation de ces antennes ont été présentées en détail. Nous avons suivi ces étapes afin de faire notre nouvelle structure avec ses nouveaux paramètres. L'optimisation dans le but d'obtenir des bons résultats dont une adaptation entre l'antenne et la puce dans le cas où on a un tag avec puce, nous avons aussi présenté les résultats de simulation de toutes les antennes conçues dans le but de montrer l'effet des différents paramètres géométriques et physique.

Une fois nos modèles sont optimisés, Nous avons opté à l'étape de réalisation avec la machine à gravure mécanique LPKF ProtMAT S103. Les mesures effectués par l'analyseur de réseaux vectoriel (VNA), ont montrés un grand accord avec les resultats trouvées par simulation en terme de coefficient de réflexion, et plus précisément autour de la fréquence de résonance 2.45 GHz du RFID.

REFERENCES

- [1] **Mondher Dhaouadi**, « Conception et optimisation des antennes RFID UHF en vue d'améliorer la fiabilité des systèmes RFID », thèse de doctorat, Ecole Supérieure des Communications de Tunis, 2014.
- [2] **Mossaab DAIKI**,« Contribution au développement d'antennes lecteur champ proche pour les systèmes RFID UHF passifs », thèse de doctorat, École Doctorale EEATS,2015.
- [3] **Rodrigues Oliveira Joao Gabriel**,« Projet RFID », Projet De Fin D'étude, Télécom Sud paris, Le 25 Janvier 2011.
- [4] **Nemmiche Adila, Daliyoucef Wahiba**, « Etude et intégration d'un dispositif d'identification basé sur la technologie RFID », mémoire e projet de fin d'études, Universities Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2013.
- [5] **Anthony Ghiotty**, « Conception D'antenne De Tag RFID UHF, Application a réalisation par jet de matière », thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, novembre 2008.
- [6] **Klaus Finkenzeller**,« RFID Handbook : fundamentals and applications in contactless Smart Cards and Identification », John Wiley, Inc, New York, 2003.
- [7] **Rafael Antonio Quiroz Moreno**, « Solutions novatrices pour l'amélioration du taux de lecture de tags RFID UHF dans des environnements complexes », thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2014.
- [8] **Benoit Pascal, Franchi Jean Christophe**, « RFID et Service Haute Débit Wimax», Rapport d'étude, université de Nice, 2014.
- [9] **P. Hauet**, "L'Identification par Radiofréquence (RFID) Techniques et Perspectives", article invité, REE No.10, Novembre 2006.
- [10] **D. Paret**, "Identification Radiofréquence et Cartes à Puce Sans Contact", Dunod, 2001.
- [11] **R. Vauche**, «A Remotely UHF Powered UWB Transmitter For High Precision Localization Of RFID Tag,» IEEE Journal Of Solid-State Circuits, vol. 40, pp. 1193- 2202, November 2005.
- [12] **I. Vita**, «Design Criteria for the RF Section of UHF and Microwave Passive RFID Transponders,» IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, vol. 53, pp. 2978-2990, September 2005.
- [13] **Z. Zheng**, «Brief Comparison of Different Rectifier Structures For HF And UHF RFID,» University of Adelaide, 2004.

- [14] **U. Karthaus**, «Fully Integrated Passive UHF RFID Transponder IC With 16.7 mW Minimum RF Input Power,» *IEEE Journal Of Solid-State Circuits*, vol. 38, pp. 1602- 1608, October 2005.
- [15] **W. G. Yeoh**, «A CMOS 2.45-GHz Radio Frequency Identification Tag IC with ReaWrite Memory,» *Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, Digest of Papers, IEEE*, pp. 365-368, 2005.
- [16] **F. Klaus**, *RFID Handbook Fundamentals And Applications In Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification And Near-Field, Communication, USA: John Wiley & Sons*, 2010.
- [17] **C. Jari-Pascal**, «Analysis and Optimization of Passive UHF RFID Systems,» *Thèse de Doctorat, Lausanne, EPFL*, 2006.
- [18] **Epcglobal France** « L'identification Par Radio Fréquence Principe Et Applications », Version 4.01, Mars 2004.
- [19] **D. M. Pozar**, "Microwave Engineering", John Wiley & Sons, second edition, 1998.
- [20] **C. A. Balanis**, "Antenna Theory: Analysis and Design", John Wiley & Sons, second edition, 1997.
- [21] **IEEE**, "Standard Definitions of Terms for Antennas", *IEEE Std. 145-1993*, March 1993.
- [22] **des Auteurs spécialisés Ooreka**, *Antenne RFID*, Ooreka.
www.rfid.ooreka.fr/comprendre/antenne-rfid (Consulté le 04/05/2021).
- [23] **Dipole|RFID**, *Antennes RFID*, <https://www.dipolerfid.fr/Antennes-RFID>, date: 07/06/202.
- [24] **M. T. Zhang, Y. C. Jiao, F. S. Zhang and W. T. Wang**, "Design of Antennas for RFID Application, Development and Implementation of RFID Technology", *Cristina Turcu (Ed.)*, ISBN: 978-3-902613-54-7, 2009.
- [25] **B. Wang, H. Liu, C. Liu, L. Zhang, J. Pan and Y. Okuno**, "A UHF RFID reader antenna with near field inductive wireless power transfer feature", *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai, pp. 1319-1322, 2016.
- [26] **C. H. Tsai, H. D. Chen, H. W. Yang and R. B. Tsai**, "Design of circularly polarized loop tag antenna for UHF band RFID application", *International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings*, Kaohsiung, pp. 493-494, 2014.
- [27] **Iyadh Gammoudi**, *Application Des Antennes RFID À Base De Liquide Crystal Polymère Dans Un Environnement Souterrain. Mémoire Présenté Comme Exigence Partielle De La maîtrise En Ingénierie. Université Du Québec En Abitibi-Témiscamingue*, Aout 2017.

- [28] **M.B. Eunni**, *A Novel Planar Microstrip Antenna Design for UHF RFID*, Thesis May 2004
- [29] **B. R Waterhouse**, *Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [30] **Emmanuel Rodes** , « Nouveaux Concepts D'antenne A Base De Materiaux BieMetalliques. Application Aux Reseaux De Telecommunications », Université De Limoges Faculté Des Sciences Et Techniques, 28 Novembre 2006. "Accueil." Chronelec, www.chronelec.com/fr/produits/boucles-antennes/antenne-rfid/.
- [31] **Benarradj Hanane**, Antennes UHF et antennes ULB pour des applications RFID passives, Mémoire de Master, université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, juin 2013.
- [32] **H. Kwon and B. Lee**, "Compact slotted planar inverted-F RFID tag mountable on metallic objects", *IEE Electronics Letters*, November 2005.
- [33]. G. Marrocco, "The art of UHF RFID antenna design: impedance-matching and size reduction techniques," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 50, no.1, pp.66-79, 2008.
- [34] <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/cst-studio-suite/>.
- [35] Noor Asniza Murad, Mazlina Esa, Mohd Fairus Mohd Yusoff and Siti Hajar Aminah Ali, "Hilbert Curve Fractal Antenna for RFID Application", 2006 INTERNATIONAL RF AND MICROWAVE CONFERENCE PROCEEDINGS, PUTRAJAYA, MALAYSIA ,SEPTEMBER 12 - 14, 2006.
- [36] Mandelbrot, B., "The Fractal Geometry of Nature", W.H. Freeman and Company, New York, 1983.
- [37] <http://www.directindustry.fr/prod/lpkf-laser-electronics/product-9183-435759.html>.
- [38] <https://www.lpkf.com/de/branchen-technologien/forschung-in-house-pcb-prototyping/intelligente-software>.