

Sommaire

Introduction général.....	01
Chapitre I : Généralités sur la technologie RFID	
I. Introduction.....	04
II. Historique	04
III. Les systèmes RFID.....	07
III.1 Fréquence de fonctionnement.....	07
III.2 Lecteurs RFID.....	08
III.3 Tag.....	10
IV. Principe général de fonctionnement.....	13
IV.1 Emetteur	14
IV.2 Récepteur.....	15
IV.3 Le lien radio d'un point de vue électromagnétique.....	16
V. Etat de l'art des systèmes RFID UHF passif.....	19
V.1 Architecture des lecteurs RFID UHF.....	19
V.2 Architecture des tags RFID UHF passifs.....	21
VI. Système RFID UHF passif champ proche.....	22
VII. Applications de la technologie RFID.....	23
Conclusion.....	28
Références.....	29
Chapitre II : Propriétés et caractéristiques générales des antennes	
I. Introduction.....	32
II. Les paramètres fondamentaux d'une antenne.....	32
II.1. Les paramètres de rayonnement.....	32
II.2 Les paramètres circuits.....	40
III. Distribution du champ électromagnétique autour de l'antenne.....	43
III.1 Définition des limites des zones de champ.....	43
III.2 Cas de l'antenne dipôle.....	45
III.2.1 Etude de la distribution du champ électromagnétique autour d'une antenne dipôle.....	45
III.2.2 Energie	48

IV. Antenne boucle.....	50
IV.1 Expressions du champ électromagnétique.....	50
IV.2 Zones de rayonnement.....	51
IV.3 Diagramme de rayonnement	52
IV.4 Directivité et gain.....	53
IV.5 La résistance de rayonnement	53
IV.6 Le facteur de qualité	53
Conclusion	54
Références.....	55
Chapitre III : Caractérisation des systèmes RFID UHF champ proche.....	56
I.Introduction	57
II. Particularité de la liaison.....	57
II.1. Zones de fonctionnement.....	57
II.2. Transfert des données par couplage inductif.....	58
III. Modélisation d'une communication RFID UHF champ proche.....	59
IV. Critères d'évaluation.....	60
IV.1. Critère 1 : adaptation/gain.....	61
IV.2. Critère 2 : portée de l'antenne.....	61
V Etat de l'art sur la caractérisation de systèmes RFID UHF.....	61
V.1 Caractérisation en champ proche.....	61
V.2 Caractérisation en champ lointain.....	64
Conclusion.....	65
Référence.....	66
Chapitre IV : Conception et réalisation d'une antenne lecteur pour les systèmes RFID UHF champ proche	
I. Introduction.....	68
II. Boucle magnétique pour les systèmes RFID UHF champ proche.....	68
II.1. Boucle pour les applications RFID.....	68
II.2. Technique de segmentation utilisée pour la réalisation de l'antenne lecteur UHF champ proche.....	69
III) Conception d'une antenne lecteur RFID UHF champ proche.....	71
III.1 Le simulateur électromagnétique HFSS.....	71
III.1.1 Principe de fonctionnement de HFSS (High Frequency Structure Simulator).71	
III.1.2 Les avantages et les inconvénients de HFSS	72

III.1.3 Modélisation par HFSS	72
IV.Réalisation et mesure	76
IV.1) Rappel sur les paramètres S	76
IV.2 Les mesures et les calculs.....	77
Conclusion.....	79
Référence.....	80
Conclusion générale.....	82
Annexe.....	84

Introduction générale :

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.

La liaison entre le lecteur et le tag étant réalisée par couplage électromagnétique pour les réseaux en ultra hautes fréquences, l'impact de l'environnement sur la propagation des ondes entraîne la dégradation des signaux provenant du lecteur lorsque la ligne directe est obstruée et lorsque la proximité d'objets métalliques ou de liquide, conduisant ainsi à la désadaptation de l'antenne du tag.

La RFID UHF en champ proche est une solution efficace pour ce type d'environnement perturbé parce qu'elle réunit plusieurs avantages. Le couplage magnétique étant moins sensible à la proximité de métaux ou de liquides cette technologie permet de lire plusieurs tags empilés en conservant le même taux d'échange de données et de lecture des systèmes UHF

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons de façon générale les systèmes RFID. Après un bref historique sur la technologie, nous rappelons les différentes composantes et les caractéristiques de ces systèmes, nous décrivons ensuite les principes de fonctionnements. Nous présentons ensuite l'état de l'art des systèmes RFID UHF en décrivant l'architecture des lecteurs, et l'architecture des tags. Nous citons également les principaux avantages et inconvénients de la technologie RFID. Nous nous intéressons dans ce mémoire à la RFID UHF passif en champ proche.

Dans le deuxième chapitre, nous commençons par rappeler les propriétés fondamentales des antennes. Ensuite une étude théorique de la distribution des champs électromagnétiques dans les zones de champ proche et de champ lointain est présentée. A titre d'exemple, la répartition du champ électromagnétique créée par le dipôle élémentaire est calculée. Enfin l'antenne boucle élémentaire est traité complètement.

Le chapitre III concerne les systèmes RFID UHF champ proche. Dans ce chapitre, nous reviendrons en détail sur la particularité de la liaison entre lecteur et tag dans ces systèmes.

Les zones de fonctionnement sont définies et des critères d'évaluation sont énoncés. Puis un état de l'art sur la caractérisation des systèmes RFID passifs opérant en zone de champ proche et en zone de champ lointain est présenté.

Dans le quatrième chapitre nous cherchons à réaliser une antenne lecteur RFID UHF en champ proche. Nous rappelons l'intérêt du couplage inductif entre le lecteur et les Tags. Nous montrons que l'antenne boucle traditionnelle utilisée en BF et en HF n'est pas adaptée. La technique de segmentation est alors utilisée pour générer un champ magnétique fort et assez uniforme autour de l'antenne. Une antenne lecteur UHF zone proche est conçue avec cette technique. Elle est simulée à l'aide du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator), ensuite réalisée et testée avec l'analyseur de réseaux vectoriel Protec333.

I. Introduction:

L'abréviation RFID signifie "Radio Frequency Identification", c'est une technologie intelligente très performante et flexible. La RFID est une méthode d'identification automatique qui utilise les ondes radio pour lire les données contenues dans des dispositifs appelés étiquettes ou Tags RFID. Elle combine des avantages non disponibles avec d'autres technologies d'identification comme les codes à barres. La technologie RFID est utilisée pour surveiller, identifier et suivre des objets, des animaux et des personnes à distance en utilisant les ondes radio. Les Tags RFID sont plus chères que les codes-barres, mais le rapport bénéfice-coût est généralement favorable.

Ce premier chapitre a pour but de faire une présentation générale des systèmes RFID . Nous rappellerons tout d'abord l'historique de la RFID puis les différentes composantes de système RFID, nous décrivons ensuite les principes de fonctionnements et les caractéristiques de cette technologie RFID ainsi que la communication entre ses composantes (Tag/lecteur), état de l'art des systèmes RFID UHF en présentant l'architecture des lecteurs, et l'architecture des tags. Nous attirons l'attention sur les avantages et les inconvénients de la technologie RFID. et Nous nous intéressons à la RFID UHF passif en champ proche

II. Historique :

L'origine de la technologie RFID (Radio Frequency Identification) est largement controversée selon différentes sources. La technologie RFID selon l'approche échafaudée sur la base du principe de fonctionnement, a vu le jour vers les années **1920**

En **1940** : La notion de RFID (identification par fréquences radio) date de la 2ème guerre mondiale ; elle est liée au développement de la radio et du radar. Pour savoir si les avions qui arrivaient dans l'espace aérien britannique étaient amis ou ennemis, les alliés plaçaient dans leurs avions d'imposantes balises, ou transpondeurs, afin de répondre aux interrogations de leurs radars [1]. Ce système, dit IFF (Identify : Friend or Foe ; de nos jours, le contrôle du trafic aérien reste basé sur ce principe), est la première utilisation de la RFID. La première étude dont on dispose sur le sujet est un travail Harry Stockman [2], qui sera suivi notamment par les travaux de F. L. Vernon [3] et ceux de D.B. Harris. Ces deux derniers articles sont considérés comme les fondements de la RFID et décrivent les principes qui sont toujours utilisés aujourd'hui.

Dans les années 60 les premiers exemples d'identification par radio fréquences (RFID) ont été développés et brevetés. Crump (Figure I.1) propose un récepteur « transponder » ou « tag » utilisant l'énergie RF, une fois rectifiée, pour alimenter l'oscillateur, retourne un signal de fréquence différente de celle reçue.[4]

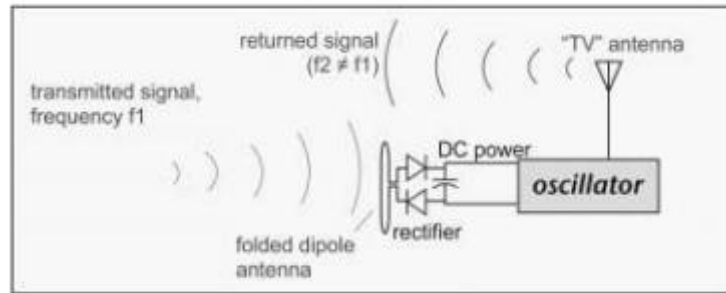


Figure I.1. Modèle d'identification par radio fréquence développé par Crump [24]

Ces premiers prototypes travaillaient à très basses fréquences (dizaines de KHz jusqu'à 10MHz), la distance de détection « read range » ne dépassant pas le mètre. Les systèmes RFID par couplage magnétique ont alors été privilégiés principalement pour la simplicité et le faible coût de circuits tels que celui de la Figure I.2 réalisé par Charles Walton, qui a aussi breveté d'autres tags inductifs au début des années 70.

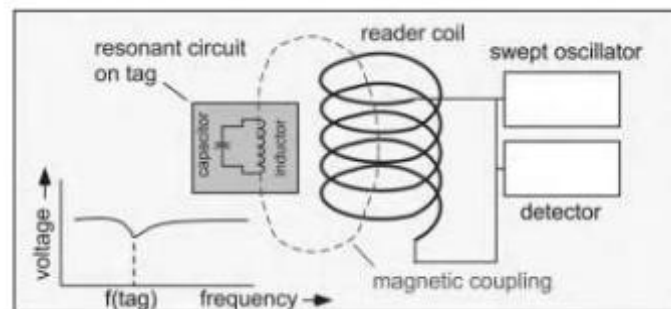


Figure I.2. Système RFID par couplage magnétique [9]

Ces tags basés sur un circuit résonateur LC ont conduit à la première grande implémentation commerciale de la RFID par Schlage Lock Company (USA) dans les années **1972-1973**.

Au niveau de l'UHF, le travail réalisé par les Sandia National Laboratories à la fin des années 70 [KOE75] (Figure I-3) a abouti à un système proche des caractéristiques actuelles de la RFID. Le système de la figure 1-3 travaillait à 1 GHz avec une puissance d'émission égale à 4W, en incluant le principe de rectification des ondes RF émises par le lecteur et l'utilisation de la tension DC convertie pour activer le circuit du tag. On retrouve également le concept de la modulation de charge de l'antenne et de la rétro-modulation du signal réfléchi vers l'antenne lecteur.

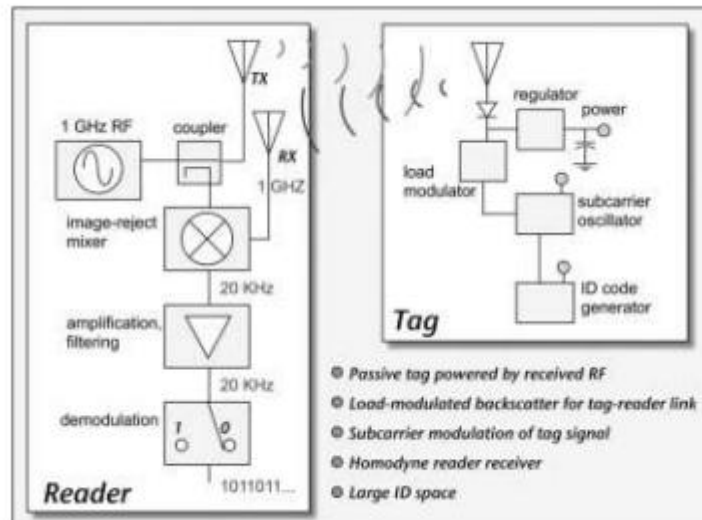


Figure I.3. Système d'identification développé par Sandia National Laboratories

Avant les années **1980**, les systèmes RFID restent donc une technologie confidentielle, à usage militaire pour le contrôle d'accès aux sites sensibles, notamment dans le nucléaire.

Dans les années **1980**, les avancées technologiques permettent l'apparition du tag passif qui s'affranchit de source d'énergie embarquée sur l'étiquette, réduisant de ce fait son coût et sa maintenance.

1983 : Le premier brevet associé à la RFID est déposé.

Les années 1990 voient le début de la normalisation pour une interopérabilité des équipements RFID. Les dates clés suivantes sont :

1997 : Intégration de la RFID dans des figurines Star Wars.

1999 : Fondation par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) de l' Auto-ID center : centre de recherches spécialisé en identification automatique (entre autre RFID).

2000 : C'est un « boom » des applications. Grâce la miniaturisation de la technologie quelques années.

2004 : La mise en place du standard EPC pour la RFID UHF sous la norme ISO 18000-6C

[7,9].

A partir de **2005** : Les technologies RFID sont aujourd'hui largement répandues dans quasiment tous les secteurs industriels (aéronautique, automobile, logistique, transport, santé, vie quotidienne, etc.). L'ISO (International Standard Organisation) a largement contribué à la mise en place de normes tant techniques qu'applicatives permettant d'avoir un haut degré d'interopérabilité voire d'interchangeabilité.

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.

Les phases de développement de la technologie RFID ainsi que les principaux événements seront brièvement décrits dans la Figure I.4 ci-dessous.

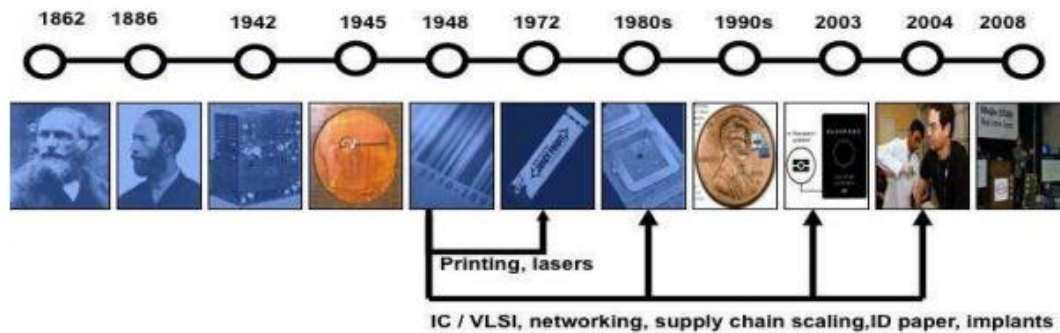


Figure I.4 les phases de développement de la technologie RFID

III. Les systèmes RFID

Les systèmes RFID sont étroitement liés aux cartes intelligentes. Ces dernières sont des systèmes de stockage de données, avec une possibilité de capacité additionnelle (carte à microprocesseur), et sont, par commodité, intégrés dans une carte plastique de la taille d'une carte bancaire. Ainsi, dans un système RFID, les données sont stockées dans un dispositif électronique : le transpondeur. Cependant, au contraire des cartes intelligentes, le transfert de données ne s'effectue pas par contact métallique mais via les ondes (électriques, magnétiques, électromagnétiques voire même acoustiques).

III.1 Fréquence de fonctionnement

La fréquence sous laquelle le lecteur envoie de l'énergie et des commandes au tag est définie comme la fréquence d'opération ou fréquence de fonctionnement du système RFID. En effet, tout le système est configuré selon la fréquence de fonctionnement : antenne du lecteur et antenne du tag, station de base et puce du tag.

La RFID utilise quatre plages de fréquences dans les bandes de fréquence radio :

- LF : 125 kHz - 134,2 kHz : basses fréquences,
- HF : 13,56 MHz : hautes fréquences,
- UHF : 860 MHz - 960 MHz : ultra hautes fréquences,
- SHF : 2,45 GHz : super hautes fréquences.

Voici un aperçu des fréquences de la RFID dans le tableau I.1

Tableau I.1 - Principales caractéristiques des bandes de fréquences dédiées à la RFID.[11]

Fréquence	<135KHz LF	13,56 MHz HF	433/860-960 MHz & 2,45 GHz UHF	5,8 GHz SHF
Portée maximum	0,5 m	1 m	3 à 6 m	1 m (passif)
Caractéristiques générales	-Tag relativement chers même pas gros volumes. -Faible dégradation des performances en milieu métallique ou liquide.	-Tags moins chers que les tags LF. -Bien adapté aux applications à courte portée. -Fréquence unique dans le monde. -Les plus utilisés actuellement.	-Tags moins chers que les tags HF et LF en gros volume. -Performances dégradées par rapport à la HF en milieu métallique ou aqueux. -Adapté au lecteur en volume à longue distance.	-Tags les plus chers dus à la présence d'une source interne d'énergie (tag actif). -Très forte sensibilité aux métaux et liquides. -Liaison lecteur/tag plus directive. -échanges de données plus importants.

III.2 Lecteurs RFID :

Un lecteur RFID est un appareil qui est utilisé pour interroger le Tag RFID, joue le rôle d'émetteur et de récepteur. Il émet des ondes radio et des champs magnétiques, puis écoute les réponses des tags qui se trouvent dans son champ de lecture. 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 le traitement.

La communication du 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 [7]. Le lecteur RFID communique juste avec des Tags qui sont dans son champ de lecture.

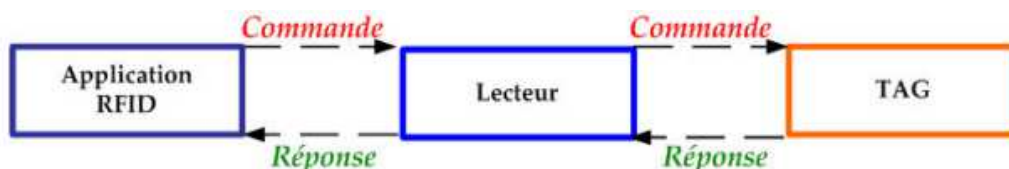


Figure I.5 : Relation maître-esclave dans la communication RFID [5]

Le lecteur RFID peut se présenter sous deux formes : portable ou fixe.

➤ **Lecteur portable :**

Les lecteurs doivent être peu encombrants pour être maniés par un utilisateur. Ils sont composés d'une antenne et d'un système d'exploitation qui permet d'identifier les tags.



Figure I.6 : tag(s) passant dans la zone d'interrogation d'un lecteur portable

➤ **Lecteur fixe**

Le lecteur RFID fixe est implanté dans des systèmes de portique à travers lesquels les tags transitent. Pour pouvoir détecter les tags, l'antenne du lecteur doit respecter un cahier des charges: une polarisation circulaire, un rayonnement directif avec de faibles lobes secondaires afin de ne pas détecter des tags à proximité de la zone de lecture et un gain suffisamment élevé pour pouvoir détecter les tags à une distance raisonnable.[8]

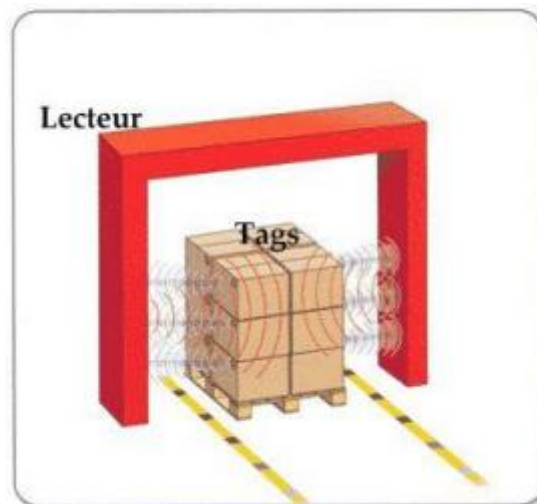


Figure I.7 : tag(s) passant dans la zone d'interrogation d'un lecteur fixe [5]

III.3 Tag

Plusieurs critères peuvent être utilisés pour classifier ou caractériser un tag RFID. Dans cette section les principaux sont rappelés.

III.3.1 Type d'alimentation

Les tags RFID peuvent être différenciés entre eux selon le type d'alimentation qu'ils utilisent pour leur fonctionnement. Trois catégories sont possibles :

➤ **Tags passifs :**

Les tags passifs ne disposent pas de batterie; toute l'énergie nécessaire à leur fonctionnement leur est fournie par le lecteur. En conséquence, les étiquettes passives transmettent des données seulement quand « s'est réveillé » par un lecteur.

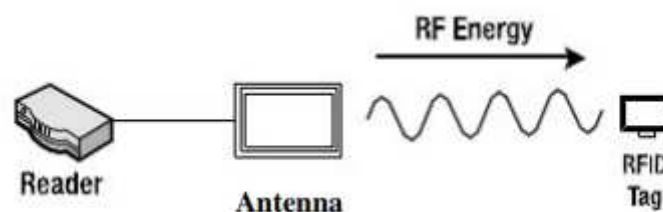


Figure I.8 : alimentation de tag passif

Les tags passifs utilisent différentes bandes de fréquences radio selon :

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

Les applications où la technologie de RFID passive offre un avantage certain sont nombreuses et diverses, prenons l'exemple de l'identification d'animaux, veiller à la sécurité des nouveaux nés ainsi que la traçabilité des déchets et la gestion des stocks.

➤ **Tags semi-actifs ou semi-passifs :**

Les tags sont assistés par une source d'alimentation interne embarquée, de type pile ou batterie. Le but de cette source d'énergie est de fournir une tension d'alimentation suffisante à la puce. La transmission de données vers le lecteur est réalisée par rétro-modulation ou modulation de charge comme pour les tags passifs. La présence de la source embarquée permet alors d'augmenter la portée de lecture jusqu'à une distance de 30 m, et offre aussi l'avantage de permettre l'intégration de capteurs à la puce RFID et ainsi collecter des données environnementales. La mémoire de stockage est aussi plus importante que celle des tags passifs.

➤ Tags actifs :

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.

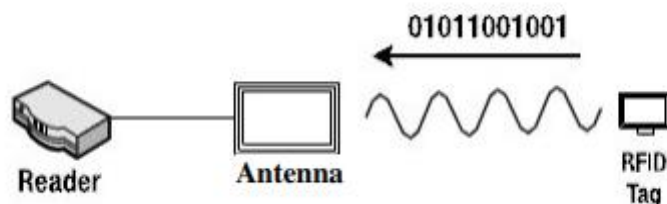


Figure I.9: Transmission des données vers le lecteur. [10]

III.3.2 Caractéristiques des tags et fréquences de fonctionnement:

La classification des tags RFID peut aussi se faire selon la fréquence de fonctionnement LF, HF, UHF :

- Les tags RFID UHF à 900 MHz possèdent des antennes imprimées ou gravées. En technologie passive, ils peuvent être lus à plusieurs mètres. Ils sont plus sensibles à l'environnement (métal, eau) du fait de la fréquence utilisée. Cependant des designs particuliers d'antenne et de packaging permettent de les utiliser sur des supports métalliques. Les fréquences UHF réservées à la RFID n'étant pas harmonisées dans toutes les régions du monde (entre 860 et 960 MHz), les tags doivent généralement présenter des bandes passantes importantes qui réduisent leurs performances.
- Les tags RFID HF 13.56 MHz sont utilisés dans des applications de logistique et de traçabilité. Les antennes boucle peuvent être imprimées ou gravées ce qui rend les tags particulièrement fins. Ils sont largement répandus dans les applications de transport et d'identité (passeport, pass Navigo, cartes sans contact). Cette technologie est à la base des applications NFC (Near Field Communication) que l'on trouve dans de plus en plus de smartphones.
- Les tags RFID LF 125 kHz sont adaptés aux applications de logistique et traçabilité. Les caractéristiques physiques de ces tags, d'un poids et une taille réduits, font d'eux des candidats idéaux pour être intégrés dans tout type de matériaux, textiles, métaux, plastiques, etc.

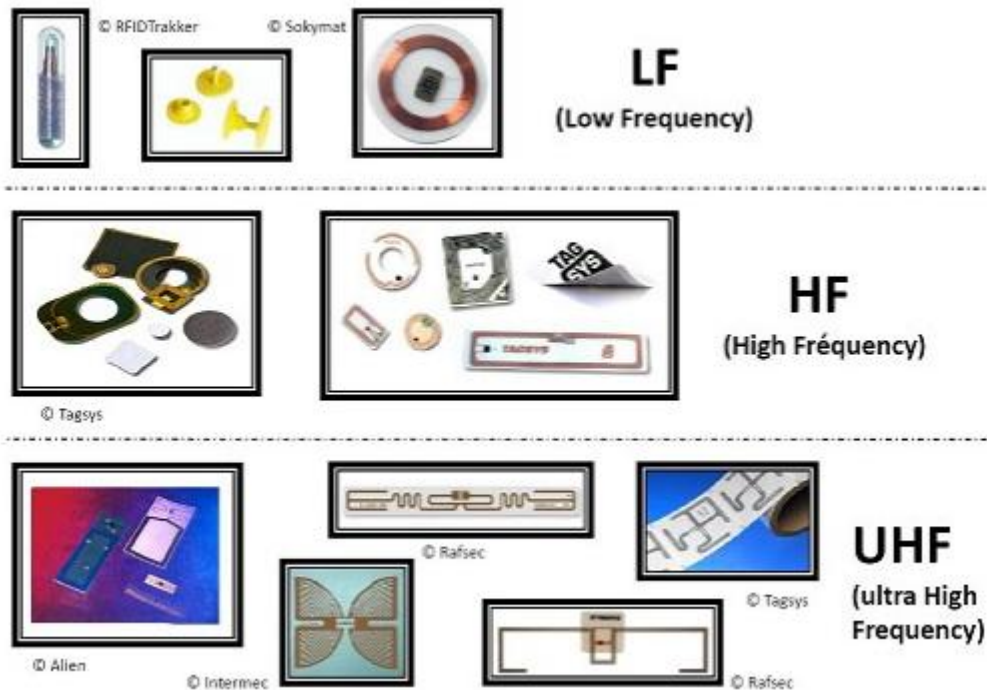


Figure I.10 : Principales caractéristiques des tags passifs RFID dans les trois bandes de fréquences les plus utilisées.

Les tags RFID sont généralement conçus pour opérer dans une bande de fréquences unique. Mais on peut aussi avoir des tags configurés pour fonctionner dans deux bandes de fréquences simultanément. Ces types de tags disposent d'une puce électronique dont l'architecture permet une activation en présence d'un signal LF tandis que le signal de retour, porteur des données du tag, est envoyé sur une fréquence HF. Cette solution permet la transmission de données entre tag et lecteur à haute vitesse (une fois la connexion établie en fréquence supérieure) dans des environnements hostiles à la pénétration des ondes électromagnétiques. Dans la référence [12], les auteurs montrent la faisabilité d'employer une seule puce RFID pour le design d'une antenne dual bande HF et UHF. Une autre configuration possible est l'utilisation de deux puces à fréquences distinctes assemblées sous un même substrat. Chaque puce a alors une antenne adaptée à sa fréquence de fonctionnement, comme dans le travail présenté par [13].

Les différents types de tags sont classifiés selon la figure suivante.

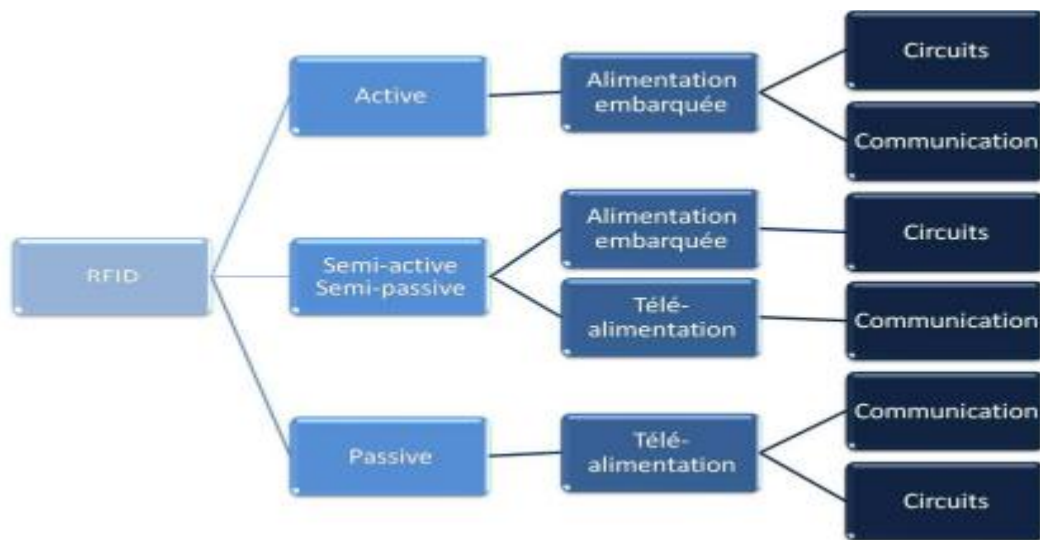


Figure I.11 : Classification des tags.

IV. Principe général de fonctionnement

D'une façon générale, un système RFID est composé d'un émetteur et d'un récepteur. L'émetteur a comme rôle de fournir au récepteur à la fois de l'énergie radiofréquence (RF) et des informations et/ou commandes. Le récepteur, qui comporte l'information nécessaire pour identifier le bien auquel il est attaché, reçoit l'énergie et la commande transmises par l'émetteur, puis envoie son « information » (c'est-à-dire son identifiant). Dans l'univers de la RFID, l'émetteur est appelé la station de base ou plus fréquemment lecteur (dont la fonctionnalité est non seulement de lire mais aussi d'émettre, comme souligné précédemment), et le récepteur est généralement appelé tag (anglicisme répandu), étiquette, ou transpondeur RFID. [14]

La Figure I.12 représente le principe de fonctionnement d'un système RFID.

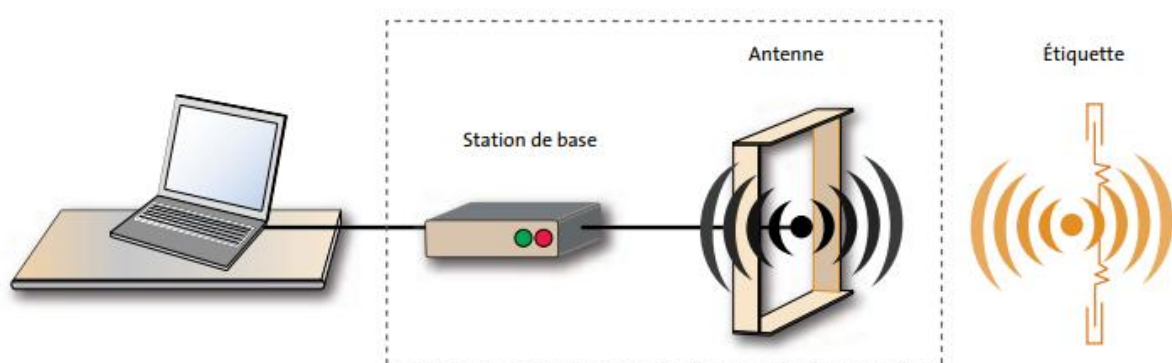


Figure I.12 : Principe de fonctionnement d'un système RFID.

IV.1 Emetteur :

L'émetteur ou lecteur est constitué des trois éléments suivants : une antenne, une station de base et un système hôte, Figure I.13.

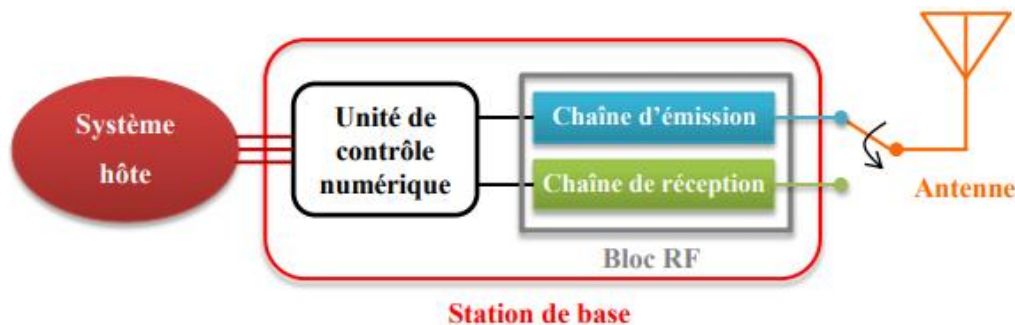


Figure I.13: Schéma fonctionnel du récepteur RFID

IV.1.1 Antenne

L'antenne est un composant RF qui a pour rôle la conversion de l'énergie guidée (dans des câbles RF par exemple) en énergie rayonnante qui se propagera dans l'espace libre, et réciproquement de convertir l'énergie RF présente en sa proximité en énergie guidée. L'énergie transmise ou récupérée par l'antenne contient les informations respectivement transmises par le tag et le lecteur.

Dans un système RFID, les échanges d'informations se réalisent de façon bidirectionnelle à travers deux liaisons : la liaison montante (informations du lecteur transmises au tag) et la liaison descendante (informations, notamment l'identifiant, envoyées par le tag vers le lecteur). L'information reçue par l'antenne lecteur est ensuite dirigée vers la station de base pour le décodage et le traitement de l'information.

IV.1.2 Station de base

La station de base (SB) est le cœur du lecteur RFID. Elle transfère, traite, traduit les commandes et les informations reçues pour le système hôte. Les fonctions de base de la SB sont [25] :

- Envoyer et fournir l'énergie RF pour réveiller le tag ;
- Lire les informations stockées et/ou écrire de nouvelles informations dans le tag ;
- Transmettre les informations reçues au système hôte et les commandes de celui-ci au tag..

L'architecture de la SB peut être divisée en deux blocs principaux : l'unité de contrôle numérique (UCN) et le bloc RF (Figure I.13).

Le bloc RF contient la chaîne d'émission et la chaîne de réception des signaux RF. La partie émission est responsable de générer la porteuse sur laquelle le signal est modulé par le signal numérique envoyé par l'UCN, d'amplifier ce signal et de le transmettre à l'antenne. La chaîne

de réception traite le signal reçu de la liaison descendante. Elle est notamment composée d'un démodulateur I/Q et d'un convertisseur analogique numérique. L'UCN est responsable du traitement des signaux numérisés, du transfert d'informations entre l'application (système hôte) et le tag, et de la gestion de l'exécution des tâches définies par le système hôte [11].

IV.1.3 Système hôte

Le système hôte est le système de contrôle responsable de la gestion de l'application à laquelle le système RFID est appliqué. Il s'agit du cerveau du système, l'endroit où les informations acquises par la SB seront intégrées dans la base de données. Le système hôte est aussi responsable du contrôle du réseau de toutes les SBs qui lui sont connectées pour les applications pour lesquelles plusieurs lecteurs sont utilisés. Ce système peut se présenter sous la forme d'un logiciel intégré dans l'ensemble du lecteur ou d'une interface ordinateur extérieure à la station de base et à l'antenne.

IV.2 Récepteur

Le tag RFID est la « cible » du système et contient la clé, c'est-à-dire le code unique, qui permettra au lecteur d'identifier l'objet (ou la personne) auquel le tag est attaché. Le tag, dans sa configuration la plus classique, est composé d'une antenne et d'une puce électronique assemblées dans un même packaging semblable à une étiquette plastique avec un côté adhésif comme illustré Figure I.14.

L'antenne est responsable de la récupération de l'énergie RF qui sera transmise vers la puce lors de la liaison montante, et du renvoi d'une partie de cette énergie incluant les informations du tag lors de la liaison descendante. Une fois que l'énergie reçue atteint le seuil de réveil de la puce, celle-ci se mettra en fonctionnement et pourra alors envoyer les informations stockées dans sa mémoire non volatile. Le lecteur accède à ces informations au travers de commandes ordonnant au tag de communiquer son identifiant, d'effacer ou d'écrire de nouvelles informations en mémoire. Avec l'antenne, le tag réalise trois fonctions principales [15] :

- Récupérer l'énergie pour alimenter la puce ;
- Acquérir les données envoyées par le lecteur ;
- Renvoyer les informations demandées au lecteur.

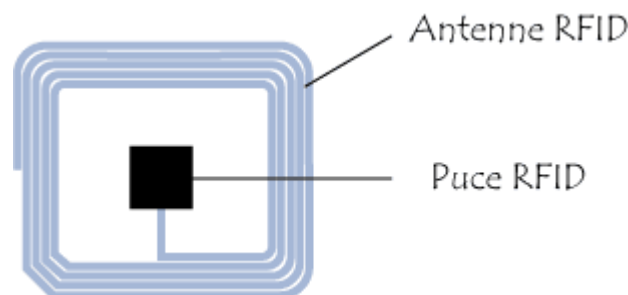


Figure I.14 : Structure d'un tag RFID.

IV.3 Le lien radio d'un point de vue électromagnétique

Le principe physique de fonctionnement de la RFID est basé sur les interactions électromagnétiques entre le lecteur et le tag. Les échanges d'informations peuvent se passer dans une des deux régions de propagation des champs électromagnétiques : zone de champ proche (CP) ou zone de champ lointain (CL).

Les champs électromagnétiques d'une antenne ordinaire présentent des propriétés différentes selon deux régions principales : une région proche de l'antenne appelée champ proche et l'autre plus éloignée dite champ lointain. La région de champ proche peut être divisée en deux autres zones : une région champ proche réactif (CP-Re) et une région champ proche radiatif (CPRa).

La région de l'espace qui limite les champs est définie selon le rapport entre la dimension la plus grande de l'antenne, D , et la longueur d'onde, λ , comme représenté par la Figure I.15. Il est important de noter que les antennes électriquement petites ($D \ll \lambda$) n'ont pas de zone de CP-Ra et que la zone de CP-Re est très réduite.

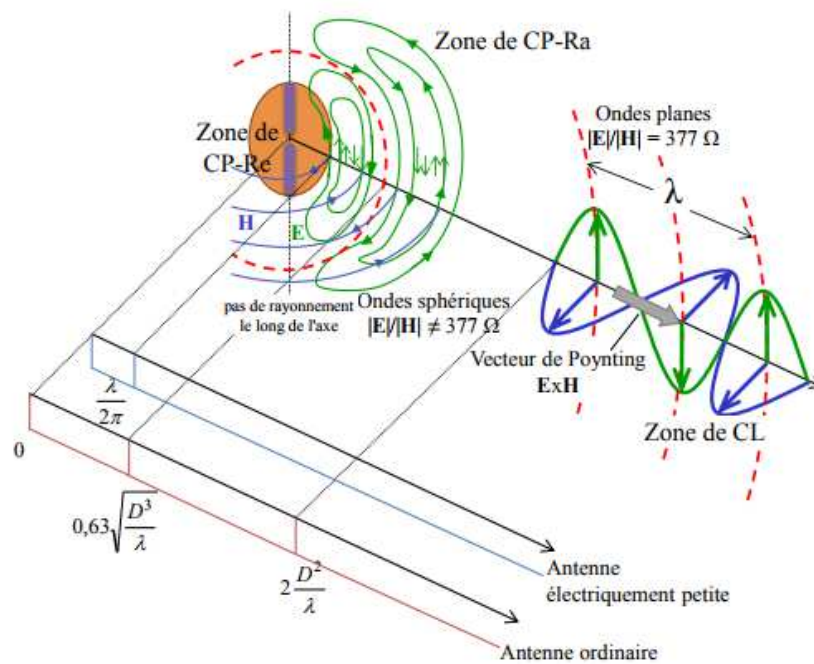


Figure I.15 : Définition des zones de champs

Dans la zone de CP-Re (ou région évanescente), le vecteur champ électrique, E , et le vecteur champ magnétique, H , sont prédominants : l'énergie est imaginaire (réactive) et la distribution angulaire des champs dépend de la distance.

La zone de CP-Ra (ou zone de Fresnel ou encore zone de champ intermédiaire) est caractérisée par la présence d'une composante longitudinale prépondérante du champ électrique, et le flux d'énergie n'est pas entièrement radial.

Dans la zone de CL (ou région de Fraunhofer), la distribution angulaire des champs ne dépend pas de la distance, les champs E et H sont transversaux, et le flux d'énergie est radial et sortant de l'antenne. Le flux d'énergie est défini à partir du vecteur de Poynting, résultat du produit vectoriel du vecteur champ E par le vecteur champ H .

La direction du vecteur Poynting donne la direction de propagation (rayonnement de l'onde) et son module mesure, à une constante près, l'énergie du flux. Dans chaque région, l'amplitude, la phase et l'énergie des champs se comportent de façon particulière.

IV.3.1 Système RFID en champ proche :

Dans cette situation, il est plus naturel de parler de couplage électromagnétique entre un tag et le lecteur. Ce couplage est souvent assuré par deux bobines, une au niveau du lecteur et l'autre au niveau du tag comme montré dans la figure I.16. 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.

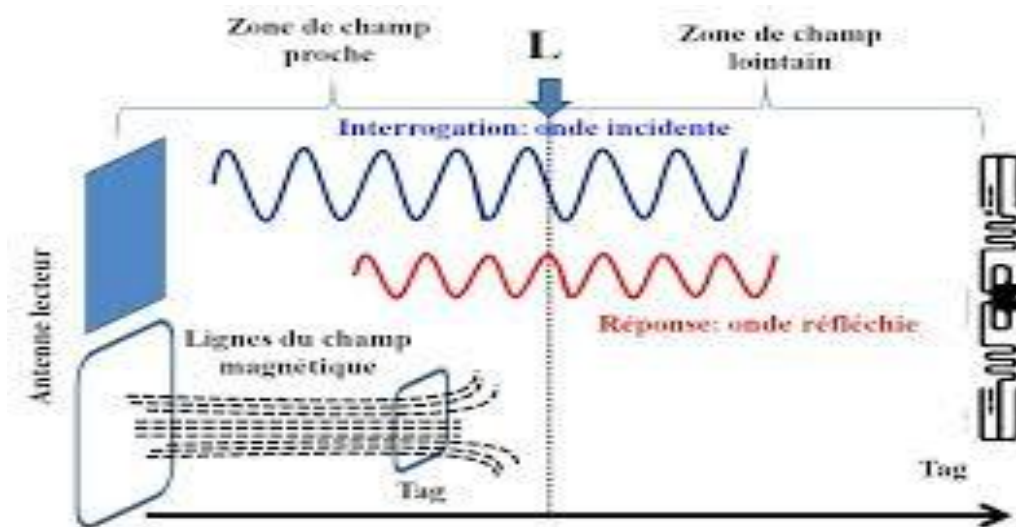


Figure I.16 : Configuration en zone proche et en zone lointaine.

Le mode de fonctionnement en couplage magnétique concerne les systèmes travaillant aux fréquences entre 9kHz et 135kHz en basses fréquences et 13.56MHz en haute fréquence. Pour les systèmes RFID en couplage magnétique, l'énergie de l'induction est une fonction de la distance à partir de la bobine d'antenne. Le champ magnétique décroît avec un taux de $1/r^3$, où r est la distance entre le lecteur et l'étiquette. Pour la vision de l'antenne du lecteur, l'intensité du champ magnétique de la composante perpendiculaire au plan de l'antenne du lecteur est très forte, alors que l'intensité du champ de la composante parallèle au plan de l'antenne du lecteur est très faible ou même nulle. Par conséquent, si le tag est placé parallèlement au champ magnétique de l'antenne du lecteur, le lecteur ne sera pas possible à l'identifier car il n'y a pas de flux magnétique qui s'écoule à travers le tag.

IV.3.2 Système RFID en champ lointain

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.

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.[23]

Les performances des systèmes RFID sont résumées dans le tableau I.2.

Tableau I.2 – Classement des tags RFID par le champ de rayonnement

Fréquence	Distance de lecteur	Application
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
Système RFID en champ lointain		
433.92 MHz	1 m jusqu'au 30 m dépendant des applications	Les systèmes RFID actifs aux fréquences UHF
860 MHz – 960 MHz	≈ 5 m jusqu'au 10m	Les systèmes RFID passifs aux fréquences UHF
2.45 GHz	1 m jusqu'au 6m	Les systèmes de péage, Actifs
5.8 GHz	Inférieur à 1 m	Pas encore beaucoup d'exploitation

V. Etat de l'art des systèmes RFID UHF passifs

V.1 Architecture des lecteurs RFID UHF

Un lecteur RFID est l'interface entre une application hôte et les tags RFID. Un lecteur est composé de différentes fonctions comme montre dans la Figure I.17 :

- ✓ 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.
- ✓ 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.
- ✓ Antennes : transmettre et de recevoir les données, et de propager l'énergie radiofréquence télé-alimentant les tags. [16]

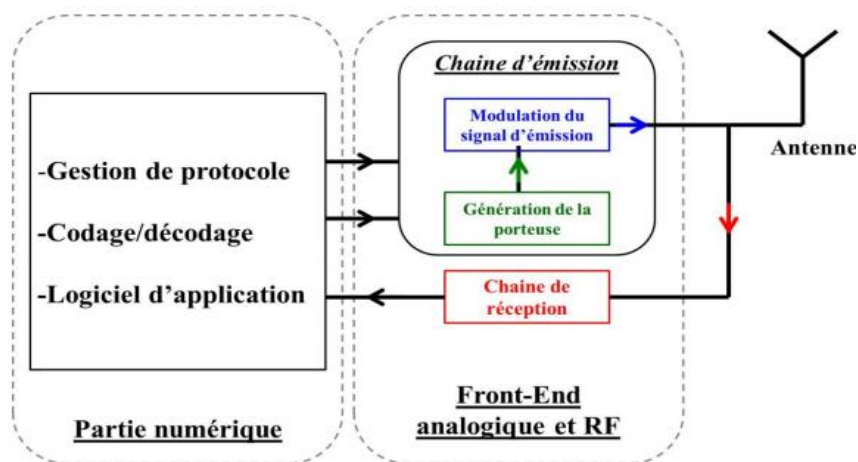


Figure I.17 : Architecture d'un lecteur RFID UHF.

V.1.1 Description de la chaîne d'émission

Un schéma bloc simplifié d'une chaîne d'émission d'un lecteur RFID est donné en Figure I.18.

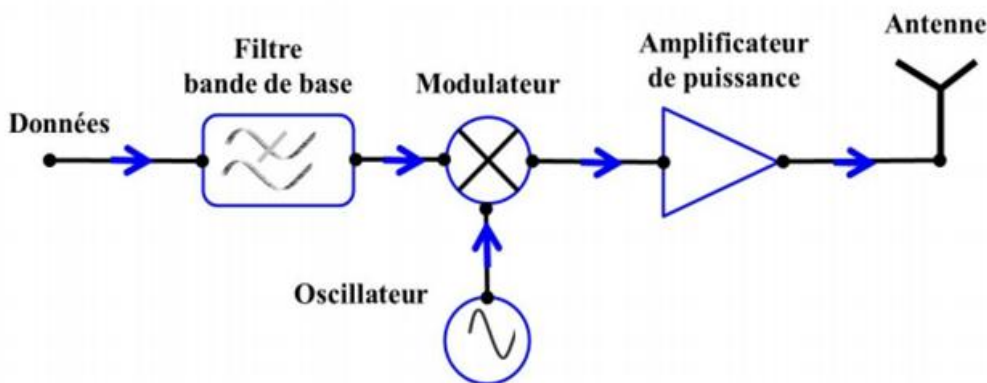


Figure I.18 : chaîne d'émission d'un lecteur RFID UHF classique

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.

V.1.2 Description de la chaîne de réception

Un schéma bloc simplifié de l'architecture d'un récepteur est donné en Figure I.19.

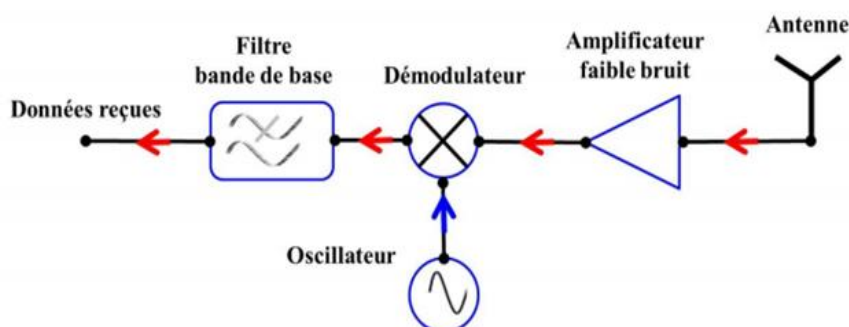


Figure I.19 : chaîne de réception d'un lecteur RFID UHF classique.

Le signal reçu est d'abord amplifié à l'aide d'un amplificateur faible, filtré, démodulé et numérisé par un convertisseur analogique / numérique.

V.1.3 Emission 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. Ce type d'architecture est dit bistatique. Il demande une bonne isolation entre les deux antennes.
- ✚ Par l'utilisation d'une seule antenne réalisant l'émission et la réception. Ce type d'architecture est dit monostatique. La séparation des signaux émis et reçus se fait à l'aide d'un coupleur directionnel ou d'un circulateur.

V.2 Architecture des tags RFID UHF passifs

V.2.1 Description de l'architecture d'un tag RFID UHF passif

Un tag RFID UHF passif est constitué d'une antenne et d'une puce électronique (Figure I.20).

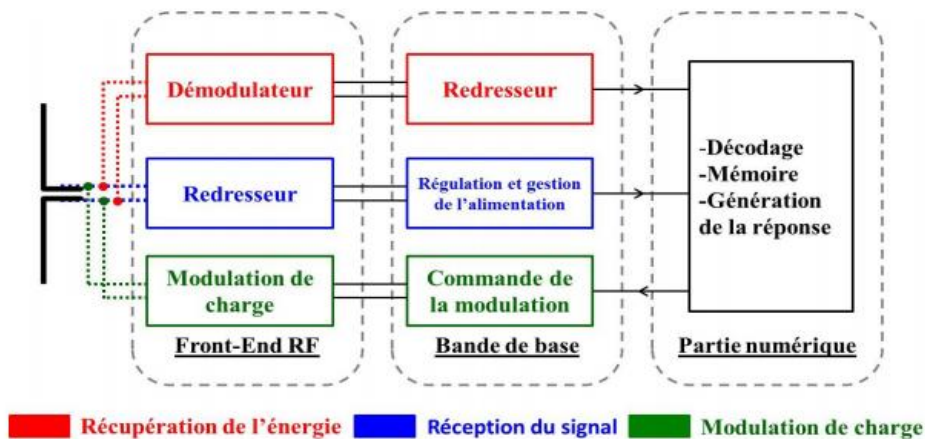


Figure I.20 Schéma fonctionnel d'une puce RFID.

La partie numérique est généralement constituée d'une machine à états qui a pour rôle d'analyser les instructions reçues, de coder/décoder les informations et de répondre en envoyant ces données au front-end radio.

V.2.2 Description du front-end radio d'une puce RFID

Le front-end radio a trois fonctions principales : la récupération d'énergie, la réception du signal et la rétro-modulation (Figure I.21).

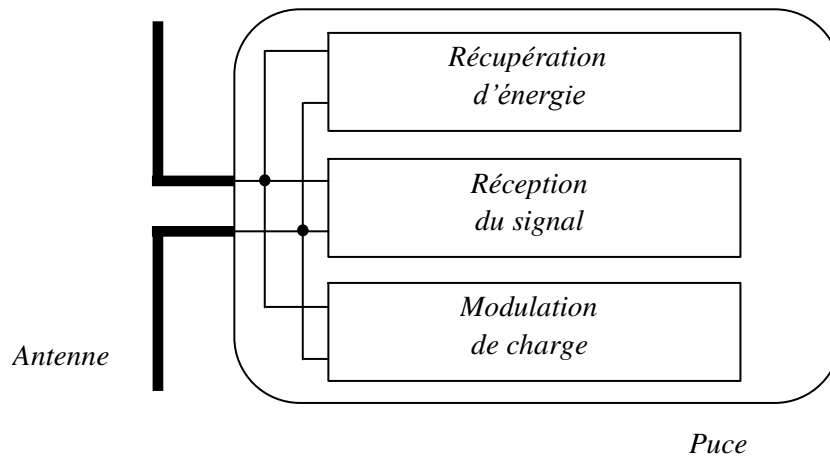


Figure I.21 : Schéma bloc fonctionnel du front end radio d'un tag RFID UHF.

VI. Système RFID UHF passif champ proche

La RFID UHF champ proche correspond à une application RFID UHF passive classique dans laquelle le tag est placé et lu dans la zone de champ proche réactif et/ou radiatif de l'antenne lecteur. L'utilisation de la RFID UHF CP a été initialement présentée comme une alternative pour résoudre les problèmes d'interférence dans le milieu de propagation lorsque des objets perturbateurs sont à proximité du tag ou placés sur la ligne de visée du lecteur, comme montré dans [19].

La RFID UHF CP est une solution intéressante qui réunit plusieurs avantages : le couplage magnétique est moins sensible à proximité de métaux ou de liquides, et de plus permet de lire plusieurs tags empilés, cela en conservant le même taux d'échange de données et de lecture des systèmes UHF.

Les types d'antenne lecteur généralement employés dans la RFID UHF CP sont la boucle segmentée [20], l'antenne à onde progressive [21]- [22] ou encore l'antenne à onde de fuite.

Les systèmes RFID UHF CP peuvent utiliser les mêmes composantes qu'un système RFID UHF CL comme proposé par [24], et quatre configurations sont alors possibles pour déployer le système en CP :

- 1) Lecteur classique (CL) et tag de courte portée, ou comme défini en [17], [18] tag hybride, le lecteur fonctionnant à puissance maximale : deux types de tag peuvent être utilisés dans cette configuration.
 - Le premier concerne les tags conçus pour fonctionner à courte portée (< 1 m).
 - Le deuxième type de tags concerne les tags conçus pour être adaptés quand ils sont attachés à un matériau perturbateur RF (par exemple métal ou verre).
- 2) Lecteur (CL) et tag (CL) où le lecteur opère à basse puissance d'émission : cette configuration est analogue à la précédente à la différence que la puissance d'émission du lecteur est réglée à un niveau minimum nécessaire pour lire le tag à une distance donnée dans la zone de champ proche.

Cette solution est réalisée afin d'éviter que le lecteur ne lise des tags placés dans la zone de champ lointain.
- 3) Lecteur et tag avec antennes spécialement conçues pour les applications champ proche et adaptées aux fréquences UHF: dans cette configuration, l'antenne du lecteur est conçue pour fournir un champ magnétique ou un champ électrique fort dans la zone de champ proche. L'antenne du tag est conçue pour récupérer un maximum d'énergie du champ généré par l'antenne du lecteur.
- 4) Lecteur (CL) et tag (CL) où le lecteur opère à puissance maximale : dans cette configuration, les antennes du lecteur et du tag sont des antennes classiques où le tag est lu dans la zone de champ proche de l'antenne du lecteur. La puissance d'émission du lecteur est réglée au maximum pour permettre la lecture du tag lorsque celui est attaché à un matériau perturbateur des ondes RF

VII. Applications de la technologie RFID

La RFID permet de répondre à un grand nombre de besoins impliquant l'identification, la traçabilité, l'analyse des données, le contrôle des accès etc. Nous citons simplement ici quelques exemples des possibilités offertes par cette technologie.

VII.1 La RFID comme outil de paiement :

Le paiement est un des défis importants de la RFID. Parmi les applications de la RFID dans ce domaine, le modèle Pidion BIP-1300 se présente comme un PDA durci, qui accepte des techniques de paiement diverses, comme les cartes bancaires à puce ou à bande. Il est également équipé d'un module RFID permettant la lecture de cartes sans contact.

La connexion WiFi 802.11b/g, Bluetooth Class 2 ou encore GSM Edge lui permet de communiquer en direct avec les banques et les instituts de paiement.



Figure I.22 : Le dispositif de paiement Pidion BIP-1300

VII.2 RFID comme la carte de fidélité

Le sans contact trouve également son application dans le secteur des cartes de fidélité. Reebok a ici choisi un système de borne avec une station d'accueil sans contact.

Equipés d'une carte de fidélité avec un tag RFID, les clients peuvent utiliser la borne pour connaître leur nombre de points ou se voir proposer des réductions. Le système est aussi lié au téléphone portable du client, qui peut recevoir des messages par SMS de la part de Reebok.



Figure I.23 : Les cartes de fidélité peuvent être renouvelées par le système RFID.

VII.3 La RFID dans les gestions de transport :

Une des applications les plus connues et les plus démocratisées de la technologie RFID reste la carte de transport sans contact. L'usager du métro passe sa carte sur une base (généralement apposée à des tourniquets d'accès), qui l'authentifie, valide son titre de transport, et lui donne accès au réseau.

3,4 millions de titres de transport sans contact circulaient en juin 2008 sur le réseau de transport en commun parisien de la RATP. Ce système fonctionne également dans des villes telle que Londres, Helsinki ou encore Tokyo.



Figure I.24 : La RFID dans les transports en commun

VII.4 La RFID et les documents d'identité :

L'identification des individus passe aussi par l'authentification des papiers d'identité comme dans la figure I.25. La RFID est alors un moyen d'une part de s'assurer de la validité des documents, mais aussi de s'assurer que les informations contenues dans le passeport sont également sous forme de données numérique [23]. Il est à noter que des questions de sécurité importantes se posent quant à la l'intégrité des données contenues dans les tags RFID des passeports.



Figure I.25 : - La RFID est présente dans les documents d'identité.

VII.5 Le RFID pour améliorer l'hôpital

Dans le domaine de la santé, la localisation des patients et le suivi des processus de soins trouvent une synergie toute particulière grâce aux applications rendues possibles par la RFID.

La société Versus Technology a intégré des tags RFID dans ses solutions logicielles de suivi des plannings et de la logistique à destination des cliniques et des hôpitaux. Personnel comme patients sont ainsi équipés de tags qui permettent à la fois de les situer précisément dans l'établissement, et de vérifier que les parcours de soins sont correctement effectués.



Figure I.26: Un tag pour chaque personne au sein de l'hôpital.

VII.6 L'implant RFID

Le contrôle et la surveillance des patients peut également s'effectuer par le biais de puces RFID implantées dans le corps humain de manière sous cutanée. C'est ce que propose la société Verichip, qui implante chez des patients volontaires des puces le temps de leur hospitalisation.

Mais cette technologie est très décriée pour son potentiel de surveillance de l'individu, et l'intrusivité de son concept. Il est à noter que des sociétés comme Nonatec proposent ce type de produit pour des animaux domestiques ou d'élevage.



Figure I.27 : Le RFID peut s'implanter dans le corps humain

VII.7 La RFID pour la logistique

Un des secteurs d'activité dans lequel la technologie RFID est utilisée depuis le plus longtemps est celui de la logistique. Rapidement, les codes à barre ont été remplacés par les tags RFID, et ce dans des domaines aussi divers que la fabrication de médicaments, ou encore ici dans celui de la gestion de containers maritimes.

L'avantage de la RFID est ici déterminant, puisque la fréquence d'onde permet de repérer des tags à plusieurs centaines de mètres. Cela permet par exemple d'effectuer des inventaires et de surveiller les containers en temps réel.



Figure I.28 : - La RFID permet de faciliter la logistique

VII.8 Le RFID pour suivre les animaux domestiques

La société Sniftag propose d'adapter le RFID pour les besoins des animaux de compagnie, et de leur maîtres. Accroché au collier d'un chien, un boîtier contenant un tag RFID permet de constituer des historiques des différentes activités, de son alimentation, ou encore de son état de santé.

Il est également possible de suivre son chien à distance, via un portail Internet, pour connaître l'activité d'un animal pendant que le maître est absent.



Figure I.29 : Suivre l'activité de son chien à distance

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue générale sur la technologie RFID et ses avantages, notamment dans les applications civiles. Nous avons en outre présenté la structure, les normes d'un système RFID et brièvement les architectures des lecteurs et des tags.

I. Introduction :

Une antenne est un transducteur entre une ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu où l'onde va se propager. Ainsi, on peut définir une émission ou en réception selon le mode de fonctionnement. Une antenne en émission est un composant qui assure la transmission de l'énergie entre source et l'espace libre dans lequel cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne en réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propage dans l'espace à un appareil récepteur.

Dans ce chapitre nous présentons les principales propriétés et caractéristiques d'une antenne. La répartition du champ électromagnétique autour de l'antenne est montrée et analysée. Les zones champ proche (CL) et champ lointain (CL) sont définies. Les exemples de l'antenne dipôle et de l'antenne boucle élémentaires sont traités. Cette étude est une étape importante pour la compréhension du principe du couplage entre l'antenne lecteur et l'antenne du tag.

II. Les paramètres fondamentaux d'une antenne

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. [1]

II.1. Les paramètres de rayonnement

La représentation graphique en trois dimensions, paramétrée en fonction de la direction, permet de présenter au mieux les caractéristiques de rayonnement figure II.1.

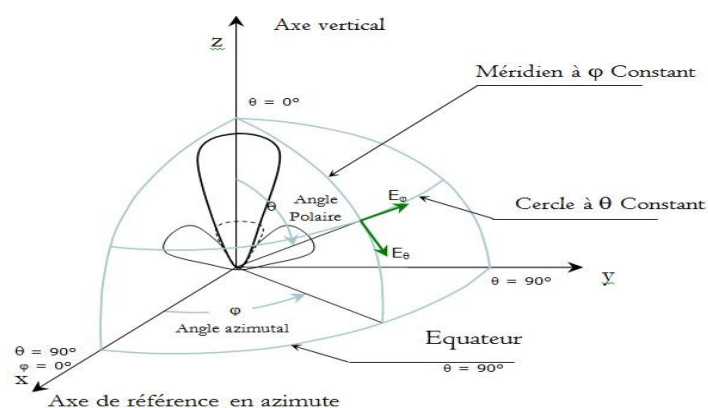


Figure II.1 : Système des coordonnées pour l'analyse d'antenne

A grande distance r d'une antenne supposée à l'origine du système de référence, l'onde rayonnée est sphérique et présente localement les propriétés d'une onde plane. Dans le système des coordonnées sphériques, le champ électrique s'écrit sous la forme suivante

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = \alpha \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r} \cdot (E_\theta(\theta, \varphi) \cdot \vec{u}_\theta + E_\varphi(\theta, \varphi) \cdot \vec{u}_\varphi) \quad (\text{II.1})$$

- (r, θ, φ) : les coordonnées du point M dans un repère de coordonnées sphériques associé au point O ;
- \vec{k} est le vecteur d'onde : $\vec{k} = 2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot \vec{u}_r$;
- $\vec{u}_\theta, \vec{u}_\varphi$ et \vec{u}_r : les vecteurs attachés à M et correspondant au repère précédemment illustré ;
- E_θ et E_φ : deux composantes du champ électrique ne dépendant que de (θ, φ) ;
- α : un coefficient complexe indépendant de r, θ et φ .

On définit la caractéristique de rayonnement de l'antenne par la fonction caractéristique

$\vec{F}(\theta, \varphi)$, telle que :

$$\vec{F}(r, \theta, \varphi) = E_\theta(\theta, \varphi) \cdot \vec{u}_\theta + E_\varphi(\theta, \varphi) \cdot \vec{u}_\varphi \quad (\text{II.2})$$

II.1.1. Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser les lobes d'émission dans les trois dimensions, dans le plan horizontal ou dans le plan vertical incluant le lobe le plus important. La proximité et la conductibilité du sol ou des masses conductrices environnant l'antenne peuvent avoir une influence importante sur le diagramme de rayonnement. Les mesures sur les antennes sont effectuées en espace libre. Comme l'indique sur Figure II.2 Cette distribution est exprimée le plus souvent par la fonction caractéristique. Il est cependant plus intéressant de considérer l'intensité de rayonnement (proportionnelle au carré de la norme de \vec{E}), en fonction des angles de déviation (θ, φ) dans l'espace. [2]

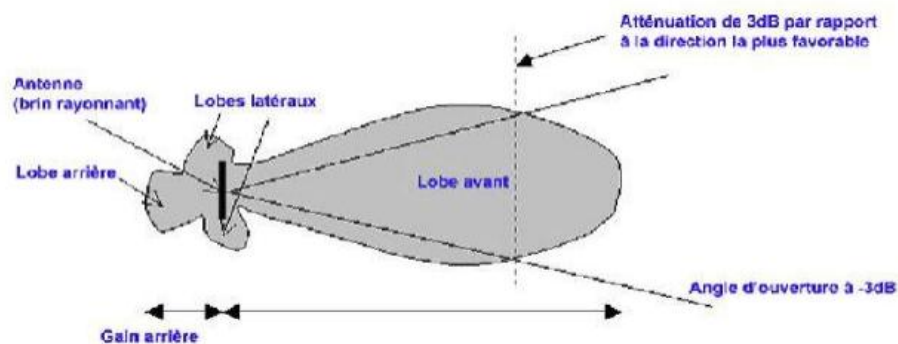


Figure II.2 : Tracé du diagramme en puissance et caractérisation des lobes

- Le lobe principal

Comme le montre la Figure II.2, la quasi-totalité de la puissance est concentrée dans la direction du maximum de rayonnement, formant ce qu'on appelle le lobe principal, caractérisé par sa largeur totale et sa largeur à mi- puissance, ou à -3 dB (ou à 1/2 pour un diagramme en amplitude).

- Lobes secondaires

Appelés également lobes latéraux, ils correspondent à des remontées du diagramme de rayonnement en dehors du lobe principal. Ils sont caractérisés par leur niveau relatif et éventuellement par leur forme et leur position (Figure II.2).

Le diagramme de rayonnement permet de localiser les zones de l'espace entourant l'antenne et les directions où le rayonnement est intense ou faible. Même si chaque diagramme de rayonnement est différent en fonction des antennes, il est possible de différencier trois formes typiques de diagramme de rayonnement : isotrope, omnidirectionnel et directif.

- Une antenne isotrope est une antenne qui rayonne son énergie uniformément dans toutes les directions de l'espace. Cette antenne reste purement théorique et sert de référence pour établir la directivité ou le gain d'une antenne réelle.
- Une antenne omnidirectionnelle se caractérise par la faculté à rayonner de manière égale dans toutes les directions contenues dans un plan. L'antenne dipôle que nous présenterons par la suite est un exemple d'antenne omnidirectionnelle.
- A l'inverse, une antenne directive est une antenne qui va concentrer l'énergie qu'elle rayonne dans une direction de l'espace.

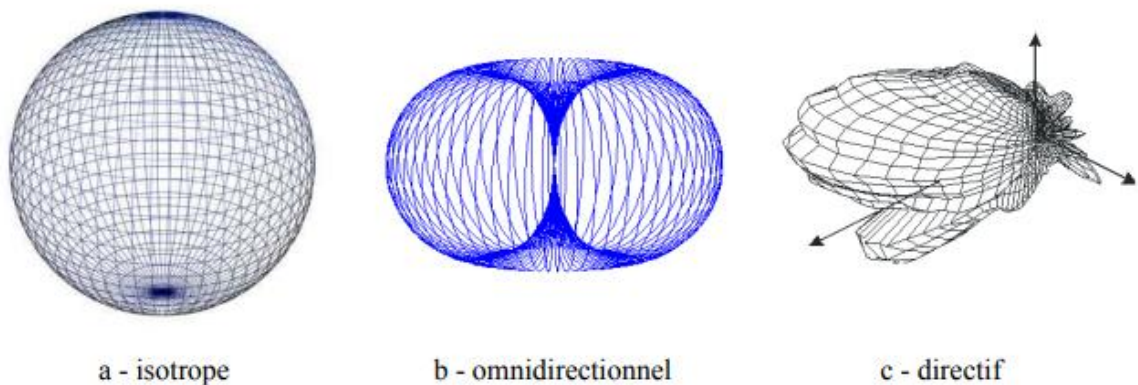


Figure II.3. Exemples de diagramme de rayonnement d'antenne

II.1.2 La polarisation

La polarisation du champ électromagnétique rayonné par une antenne est donnée par la direction et la variation du champ électrique \vec{E} ou magnétique \vec{H} par rapport au temps.

La décomposition du vecteur champ électrique \vec{E} d'une onde plane TEM (Transverse Electro Magnétique) qui se propage dans la direction +z se présente sous la forme de deux composantes (selon x et selon y) [1]:

$$\vec{E}(z,t) = \hat{a}_x E_x(z,t) + \hat{a}_y E_y(z,t) \tag{II.3}$$

Où :

$$E_x(z,t) = \text{Re}(E_{x0} e^{j(\omega t - kz)}) = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \tag{II.4}$$

$$E_y(z,t) = \text{Re}(E_{y0} e^{j(\omega t - kz + \delta)}) = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \delta) \tag{II.5}$$

Avec :

- E_{x0} et E_{y0} , sont les amplitudes respectives de la composante en x et en y du champ électrique ;
- δ est la différence de phase entre les deux composantes ;
- \hat{a}_x et \hat{a}_y sont les vecteurs unitaires selon les deux directions.

Afin de connaître le type de polarisation, on définit un paramètre de taux d'ellipticité AR correspondant au rapport de b l'axe majeur sur a l'axe mineur de l'ellipse (Figure II.4).

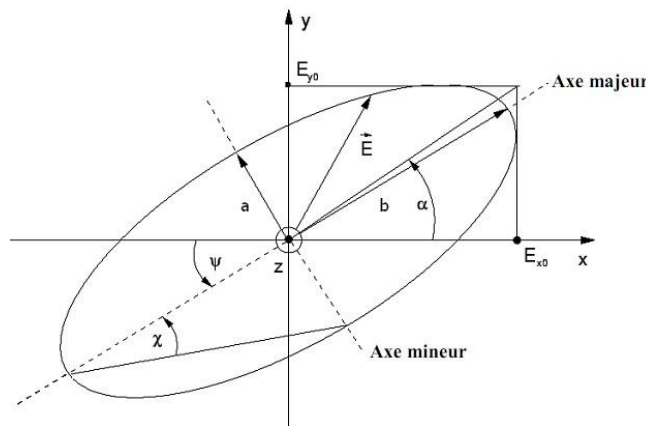


Figure II.4 : Représentation de la rotation dans le temps du vecteur champ électromagnétique d'une onde plane dans le plan xy ($E_z = 0$)

Le taux d'ellipticité est compris entre $1 < AR < \infty$.

$$AR = \frac{b}{a} = \frac{1}{\tan\left(\frac{1}{2} \sin^{-1}\left(\frac{2 E_{x0} E_{y0} \sin \delta}{E_{x0}^2 + E_{y0}^2}\right)\right)} \tag{II-6}$$

Selon la valeur de AR, Il existe trois types de polarisations:

- **La polarisation rectiligne ou linéaire** : La polarisation de l'onde est dite rectiligne ou linéaire lorsque le champ électrique E se propage en maintenant une direction constante dans le temps.
- **La polarisation circulaire** : La polarisation de l'onde est dite circulaire lorsque le champ électrique E décrit une hélice à section droite circulaire au cours du temps.
- **La polarisation elliptique** : Dans ce cas, l'extrémité du vecteur E décrit une ellipse lorsque de sa projection dans un plan orthogonal à la propagation. on distingue la polarisation elliptique droite et gauche.

II.1.3 Le gain

Le gain est une quantité descriptive de la performance d'une antenne. Il se définit comme le rapport de l'intensité maximale de rayonnement obtenue au sommet du lobe principal sur l'intensité de rayonnement dans la même direction qui serait produite pour une source électromagnétique isotrope alimentée par la même puissance d'entrée. Il se résume par la formule suivante [6] :

$$G_{\max} = 4\pi \frac{\text{Densité de puissance rayonnée dans la direction du maximum/unité d'Angle solide}}{\text{Puissance totale acceptée}} \quad (\text{II.7})$$

Le gain est une grandeur sans dimension, il est généralement exprimé par sa valeur en décibels :

$$G_{dB} = 10 \cdot \text{Log}_{10}(G) \quad (\text{II.8})$$

II.1.4 Directivité

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans des directions privilégiées. Suivant ce critère, il est possible de distinguer les antennes peu directives (dont le rayonnement est largement réparti dans l'espace) des antennes directives (où le rayonnement est localisé dans une région réduite de l'espace).

Pour la direction de rayonnement maximal, la directivité est définie comme étant le quotient entre l'intensité de rayonnement dans cette direction et la valeur moyenne de cette intensité de rayonnement pour toutes les directions de l'espace [4].

$$D_{\max}(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{\text{l'intensité du maximum de rayonnement}}{\text{puissance totale rayonnée}} \quad (\text{II.9})$$

Comme le gain, cette grandeur est également mesurée en décibels :

$$D_{dB} = 10 \cdot \text{Log}_{10}(D_{\max}(\theta, \varphi)) \quad (\text{II.10})$$

II.1.5 L'efficacité de rayonnement

L'efficacité de rayonnement totale e_t d'une antenne est utilisée pour prendre en considération 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 qui proviennent d'une mauvaise adaptation de l'antenne au circuit qui lui est associé, mais également par les propriétés intrinsèques des matériaux diélectriques et conducteurs qui la constituent. Elle est donnée par [5] :

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (\text{II.11})$$

Où :

e_r, e_c, e_d sont les efficacités dues à la réflexion, aux propriétés conductrices et aux propriétés diélectriques respectivement.

Il reste toujours difficile de dissocier les efficacités diélectriques et conductrices d'un matériau, c'est la raison pour laquelle elles ont été rassemblées en un seul terme e_{cd} .

Donc l'équation (II.11) devient :

$$e_t = e_r e_{cd} \quad (\text{II.12})$$

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

$$P_{\text{rad}} = e_{cd} P_{\text{in}} \quad (\text{II-13})$$

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

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd} D(\theta, \varphi) \quad (\text{II-14})$$

Le coefficient de qualité de rayonnement Q_{rad} peut également être défini en fonction du coefficient de qualité Q d'une antenne, il est exprimé par :

$$Q = e_{cd} Q_{\text{rad}} \quad (\text{II-15})$$

L'efficacité e_{cd} est reliée aux paramètres électriques de l'antenne, elle est définie comme le rapport entre la puissance dissipée par la résistance de rayonnement sur la puissance totale dissipée, de ce fait :

$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (\text{II-16})$$

Ou :

R_r : Résistance de rayonnement

R_p : Résistance exprimant les pertes par conduction

II.1.6 Les régions du champ électromagnétique

La structure du champ électromagnétique est différente en fonction des régions comme illustré sur la Figure (II.5) Ces régions sont délimitées par des sphères de rayon R_1 et R_2 qui sont décrites par les expressions (II.17) et (II.18) respectivement, et où a correspond à la plus grande longueur de l'antenne et λ est la longueur d'onde. [3-6].

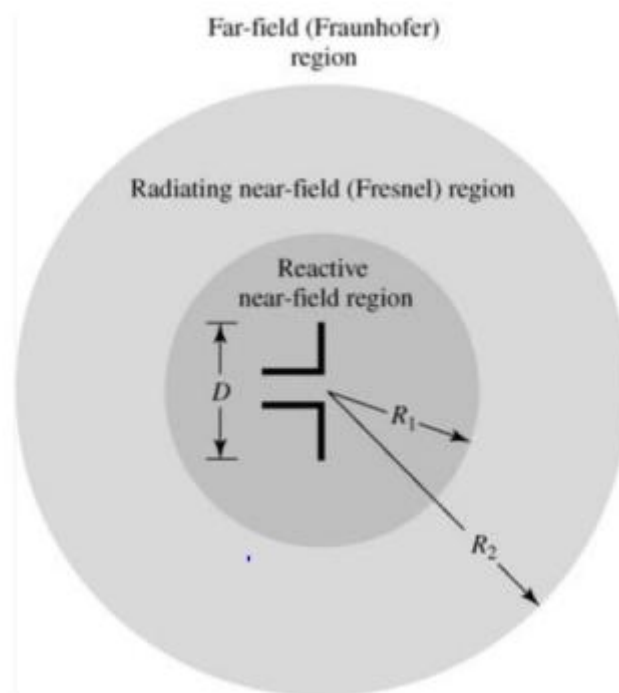


Figure II.5 : Illustrations des régions du champ électromagnétique d'une antenne

Ces régions sont délimitées par les sphères de rayon R_1 et R_2 respectivement définies par [7] figure(I.15):

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (\text{II.17})$$

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (\text{II.18})$$

- Le champ électromagnétique dans la zone proche dite zone de **Rayleigh**, est de nature quasi-statique.
- La zone de **Fresnel** (ou région de champ proche radiatif), est une région intermédiaire entre la région du champ proche et la région du champ lointain. Cette zone peut ne pas exister s'il s'agit d'une antenne de taille miniature $< \frac{\lambda}{4}$

Dans cette région, la distribution du champ électromagnétique dépend de la distance par rapport à l'antenne.

- La zone de **Fraunhofer** (ou région de champ lointain) est définie comme étant la zone pour laquelle le champ électromagnétique rayonné par l'antenne ne dépend pas de la distance par rapport à elle.

II.1.7 Affaiblissement d'une liaison Radio

L'affaiblissement d'une liaison entre deux antennes séparées par une distance « R » en espace libre est exprimé par l'équation de FRIIS. La distance en question est supposée suffisamment grande pour permettre l'utilisation de l'expression à champ éloigné. De plus, les polarisations des antennes sont supposées de même nature. Les gains des deux antennes sont notés par G_e et G_r [3].

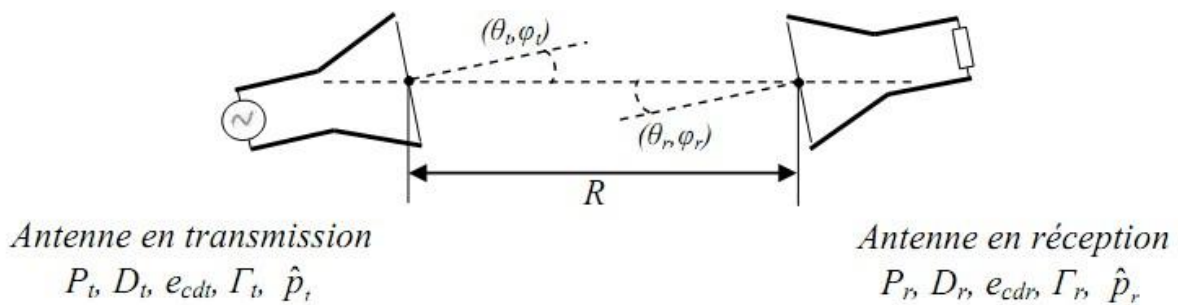


Figure II.6 : Illustration d'antennes d'émission et de réception

La formule complète de FRIIS est donnée par :

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt}e_{cdr}(1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2)\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 D_t(\theta_t, \phi_t)D_r(\theta_r, \phi_r)|\hat{P}_t \cdot \hat{P}_r|^2 \quad (II.19)$$

Ou P_t et P_r : représentent la puissance de transmission et de réflexion respectivement.

D_t et D_r : représentent la directivité de l'antenne en transmission et de réflexion.

Γ_t et Γ_r : représentent le coefficient de réflexion de l'antenne en transmission et en réflexion.

\hat{P}_t et \hat{P}_r : représentent les vecteurs unitaires de l'onde transmise et réfléchie respectivement.

Le terme $\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$ est appelé facteur de perte en espace libre (ou PL pour Path Loss).

II.2 Les paramètres circuits

La connaissance des paramètres électriques (circuits) est cruciale pour déterminer les caractéristiques d'adaptation de l'antenne.

II.2.1 L'impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée est une grandeur de première importance pour la conception du circuit associé à l'antenne. Sa connaissance est nécessaire, notamment pour adapter l'antenne au générateur qui l'alimente ou, en réception, pour un transfert maximum de puissance active à la charge [8].

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 .

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (\text{II.20})$$

La partie réelle dans l'équation (II.20) est composée de la résistance de rayonnement R_r et de la résistance des pertes R_l . L'énergie dissipée dans 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.

$$R_a = R_r + R_l \quad (\text{II.21})$$

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

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (\text{II.22})$$

Le schéma équivalent d'une antenne en transmission est représenté sur la Figure 2.7a.

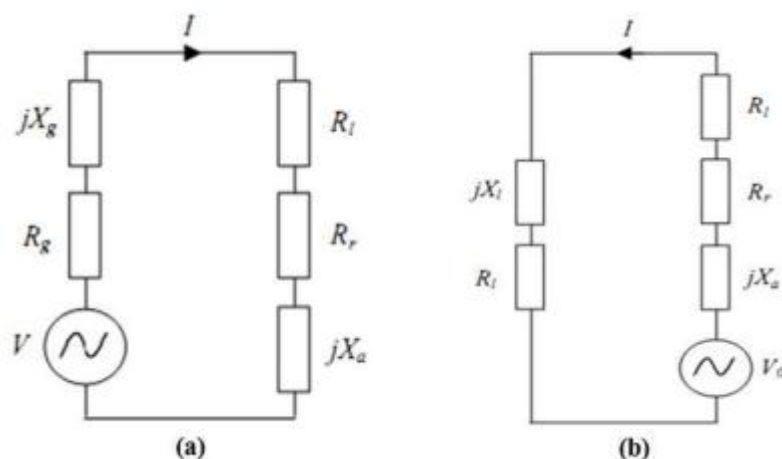


Figure II.7 : Schémas équivalents d'une antenne en: (a) Transmission et (b) Réception

Dans le cas de la réception, l'antenne est connectée à une charge ayant une impédance Z_1 composée pareillement d'une partie réelle R_1 et d'une partie imaginaire X_1 .

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (\text{II.23})$$

Le schéma équivalent d'une antenne en réception est représenté sur la Figure 2.7b. Dans le cas de l'adaptation, elle est reliée à la densité de puissance S de l'onde incidente par l'équation [5] :

$$\frac{|V_0|^2}{8R_a} = S \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (\text{II.24})$$

Où

V_0 : Représente la tension générée aux bornes de l'antenne en mode reception.

G : le gain de l'antenne.

λ : la longueur d'onde à la fréquence considérée.

S : vecteur de poynting

II.2.2 Adaptation d'une antenne

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 la relation suivante [4] :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (\text{II.25})$$

Le TOS est quant à lui donné par relation suivante :

$$TOS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{II.26})$$

L'adaptation de l'antenne à sa ligne d'alimentation est obtenue lorsque $Z_a = Z_c^*$. Dans ce cas, il n'y a pas de perte de puissance. Ainsi à l'émission, la puissance fournie par l'émetteur est la même que celle délivrée à l'antenne. A la réception, la puissance captée par l'antenne est égale à la puissance fournie au récepteur.

L'adaptation d'une antenne peut être aussi caractérisée par le Rapport d'Ondes Stationnaires (R.O.S.). L'expression de celui-ci est la suivante :

$$R. O. S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{II.27})$$

Dans le cas où il n'existe pas de ligne de transmission entre l'antenne et la charge, qui présente une impédance complexe, il faut maximiser la puissance transmise à la charge. Le coefficient de réflexion en puissance Γ^* est défini par [7-8] :

$$\Gamma^* = \frac{Z_l - Z_a^*}{Z_l + Z_a} \quad (\text{II.28})$$

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

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 :

$$Z_l = \frac{R_l}{R_a} + j \frac{X_l + X_a}{R_a} \quad (\text{II.29})$$

Le coefficient de réflexion est un nombre sans dimension et son équivalent en décibel est le coefficient S_{11} , toujours de signe négatif.

$$S_{11} = 20 \log(\Gamma) \quad (\text{II.30})$$

II.2.3 Le coefficient de transmission

La formule (II-29) définit le coefficient de transmission en puissance T. Il correspond au rapport de la puissance transférée à une charge sur la puissance totale maximum pouvant lui être transférée.

$$T = 1 - |\Gamma^*|^2 \quad (\text{II.31})$$

Le coefficient de transmission peut également être exprimé en fonction des impédances d'une antenne et de sa charge Z_a et Z_l en considérant l'antenne en réception (Figure II.7b). Cette relation est d'une grande importance en RFID, parce qu'elle correspond au rapport entre la puissance transférée à une puce RFID et la puissance totale maximum pouvant lui être transmise.

$$T = \frac{4R_a R_l}{|Z_l + Z_a|^2} \quad (\text{II.32})$$

II.2.4 La bande passante

La largeur de bande d'une antenne est considérée comme étant l'ensemble des fréquences comprises entre une fréquence minimale f_{\min} et f_{\max} la fréquence maximale. C'est un paramètre exprimé en pourcentage (%) est qui se calcule en générale de la façon suivante :

$$Bw = \frac{\Delta f}{f} \cdot 100 \quad (\text{II.33})$$

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 défini en fonction de la distance de lecture souhaitée pour une application donnée.

II.2.5 Le coefficient de qualité

Le coefficient de qualité Q d'un circuit résonant est exprimé par [7]:

$$Q = 2\pi \frac{\text{energie stockée par cycle}}{\text{energie rayonnée et dissipée par cycle}} \quad (\text{II.34})$$

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 (Equation (II.34)).

III. Distribution du champ électromagnétique autour de l'antenne

III.1 Définition des limites des zones de champ

Dans cette section les conditions pour déterminer les distances qui délimitent la zone de champ lointain et la zone de champ proche d'une antenne sont développées. Pour cela nous utilisons une approche pour laquelle les lignes de champs sortant de l'antenne sont interprétées telles que des lignes ou des rayons géométriques.

La région de champ lointain d'une antenne est définie comme la région où la distribution angulaire de champ est indépendante de la distance à un point quelconque dans la région de l'antenne. La forme des ondes électromagnétiques qui partent de l'antenne est sphérique, et dans cette région les ondes sont considérées comme planes. Pour que cela soit vrai, la différence de phase entre le front d'onde et une surface plane ne doit pas excéder $22,5^\circ$. La différence de phase correspond à la longueur $\lambda/16$ ($2\pi/\lambda \cdot \lambda/16 = \pi/8 \text{ rad} = 22,5^\circ$).

Pour déduire les régions de champ proche et de champ lointain nous considérons l'exemple de la Figure II-8. En considérant un point P dans le plan $y-z$ extérieur à la superficie de l'antenne, les deux rayons R et r sont tracés respectivement à partir d'un point à l'extrémité de l'antenne et d'un point au centre de l'antenne. A partir de la relation de cosinus nous pouvons écrire que:

$$R = \sqrt{r^2 + z^2 - 2zr\cos\theta} \quad (\text{II.35})$$

Si on applique le théorème binomial, l'équation (II-33) peut être développée tel que :

$$R = r - z\cos\theta + \frac{z^2\sin^2\theta}{2r} + \frac{z^3\sin^2\theta\cos\theta}{2r^2} + \dots \quad (\text{II.36})$$

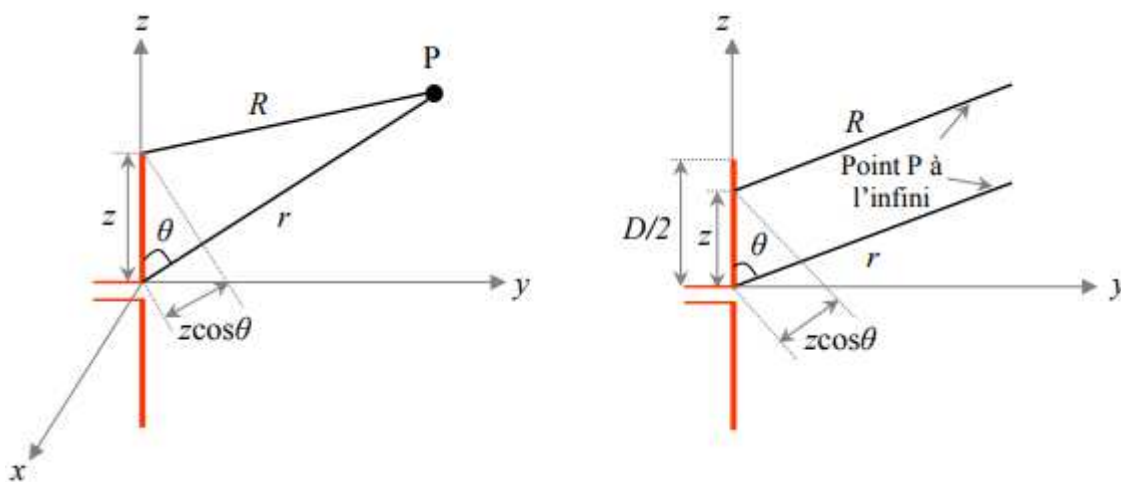


Figure II.8 : Approximation géométrique des rayons R et r pour la définition des limites de zones de champ d'une antenne.

La condition idéale pour définir la région de champ lointain serait de considérer que les rayons R et r sont parallèles l'un à l'autre. Toutefois, cette condition n'est valable qu'à l'infini. Une solution est donc de faire une approximation en prenant en compte une erreur maximale en (II-36), avec laquelle le principe des rayons parallèles peut être utilisé pour déterminer la région de champ lointain. La distance qui détermine le début de la zone de champ lointain (r_{CL}) correspond à la valeur de r pour laquelle l'erreur en R due à la négligence du troisième terme de (II.34) équivaut à $\lambda/16$ [11] :

$$R/r \approx k \frac{z^2 \sin^2 \theta}{2r} \leq \frac{\pi}{16} \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} \frac{z^2 \sin^2 \theta}{2r} \leq \frac{\pi}{16} \Rightarrow \frac{z^2 \sin^2 \theta}{2r} \geq \frac{\lambda}{16} \quad (\text{II.37})$$

Ainsi, si on suppose que $z=D/2$, où D est la plus grande dimension de l'antenne, nous pouvons trouver la valeur de r_{CL} pour le cas d'une erreur maximale quand $\theta = 90^\circ$. En remplaçant ces deux termes en (2.36) nous trouvons que :

$$\frac{(D/2)^2 \sin^2(90^\circ)}{2r_{CL}} = \frac{\lambda}{16} \quad (\text{II.38})$$

$$r_{CL} \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (\text{II.38a})$$

Pour déduire la distance qui définit le début de la zone de champ proche radiatif (r_{CP-Ra}), ou la fin de la zone de champ proche réactif, le point d'observation P doit être pris à une distance inférieure à (II.37a). A ce point, pour considérer la condition d'une erreur de phase maximale dans l'approche de R à r, nous devons considérer les trois premiers termes les plus significatifs et négliger le quatrième terme de (II.34). Pour réaliser cette approche, il faut d'abord trouver pour quelle valeur de θ nous avons une erreur maximale lorsqu'on omet le quatrième terme, en faisant :

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{z^3 \sin^2 \theta \cos \theta}{2r^2} \right] = 0 \quad (\text{II.39})$$

Deux solutions sont possibles pour (II-37) : $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = \tan^{-1}(\pm\sqrt{2})$.

- ✓ La solution $\theta = 0^\circ$ est écartée car elle accorde à (II-37) un minimum local.
- ✓ La solution $\theta_{\max} = \tan^{-1}(\pm\sqrt{2}) = \pm 54,73^\circ$ est donc retenue.

Une fois définie la valeur de θ , nous pouvons trouver la valeur de r_{CP-Ra} pour laquelle l'erreur de phase maximum sera inférieure à $\pi/8$ ($\lambda/16$) par omission du quatrième terme :

$$\left. \frac{z^3 \sin^2 \theta \cos \theta}{2r_{CP}^2} \right|_{\substack{\theta = \pm 54,73^\circ \\ z = D/2}} \leq \frac{\lambda}{16} \quad (\text{II.40})$$

$$\frac{(D/2)^3}{2r_{CP-Ra}^2} \sin^2(54.73^\circ) \cos(54.73^\circ) \leq \frac{\lambda}{16} \quad (\text{II.40a})$$

$$r_{CP-Ra} \geq 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (\text{II.40b})$$

Pour les antennes électriquement petites, les champs proches radiatifs sont minimaux. Nous considérons donc pour ce type d'antennes seulement deux zones : champ proche réactif et champ lointain. La limite entre ces deux zones est définie par :

$$r_{CP} \leq \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{II.41})$$

Dans le Tableau 2-1 nous pouvons résumer les distances qui limitent chaque région de champ

TABLEAU 2-1 – LES LIMITES DE LA ZONE DE CHAMP PROCHE REACTIF, CHAMP PROCHE RADIATIF ET CHAMP LOINTAIN.

Antenne	Région	Distance à l'antenne r
Antenne ou $D \gg \lambda$	Champ proche réactif	0 à $0.62\sqrt{D^3/\lambda}$
	Champ proche radiatif	$0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ à $2D^2/\lambda$
	Champ lointain	$2D^2/\lambda$ à ∞
Antenne ou $D \ll \lambda$	Champ proche réactif	0 à $\lambda/2\pi$
	Champ lointain	$\lambda/2\pi$ à ∞

Dans cette section on a utilisé la définition la plus communément de la distance qui limite les zones d'action de champ rayonné d'une antenne. D'autres critères peuvent être employés pour délimiter les limites des régions champ proche et champ lointain, tels que la taille de l'antenne de transmission par rapport à l'antenne de réception, les erreurs de mesure acceptées, ou encore le type d'antenne mesurée. Plus de détails sont donnés dans [12]. Nous utiliserons dans ce mémoire la définition présentée dans cette section, car selon à la bande de fréquences dans laquelle nous travaillons (800 MHz – 1000 MHz) cette définition est suffisante pour la délimitation des zones [10].

III.2 Cas de l'antenne dipôle

III.2.1 Etude de la distribution du champ électromagnétique autour d'une antenne dipôle

Dans cette section, nous présentons les éléments théoriques importants pour la compréhension du comportement électromagnétique des champs dans les régions de champ proche réactif, champ proche radiatif et champ lointain. Pour cela, nous avons choisi d'analyser les équations d'un dipôle infinitésimal (de longueur, l telle que $l \ll \lambda$) comme représenté sur la Figure II-9. Les équations du champ magnétique et du champ électrique sont rappelées ci-dessous :

$$H_r = H_\theta = 0 \quad (\text{II.42a})$$

$$H_\phi = j \frac{kI_0 l \sin\theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (\text{II.42b})$$

$$E_r = \eta \frac{I_0 l \cos\theta}{2\pi r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (\text{II.43a})$$

$$E_\theta = j\eta \frac{kI_0 l \sin\theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (\text{II.43b})$$

$$E_\phi = 0 \quad (\text{II.43c})$$

Où $k = 2\pi/\lambda$ est la constante de phase d'onde plane, η est l'impédance intrinsèque du milieu dont la valeur dans l'espace libre est égale à 120π et I_0 est la valeur de courant circulant dans le dipôle. Comme il s'agit d'un dipôle infinitésimal le courant a une valeur constante. Les équations du champ magnétique (II.42a)-(II.42b) et du champ électrique (II.43a)-(II.43c) sont valides dans toutes les régions de l'espace sauf dans la source de l'antenne [9].

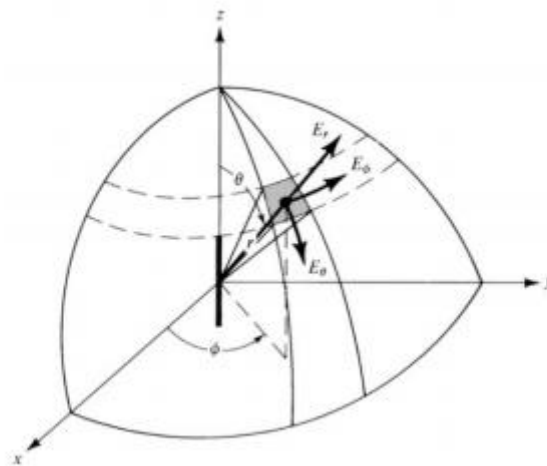


Figure II.9 : Représentation de l'orientation des composantes de champ électrique d'un dipôle infinitésimal en coordonnées sphériques.

III.2.1.1 Région de champ proche réactif

La première région d'action des champs électromagnétiques partant de l'antenne immédiatement autour de l'antenne est La région de champ proche réactif. Dans cette région, nous considérons la condition $kr \ll 1$. Les termes dominants dans les équations de E et H sont ceux avec la plus grande puissance inverse de r.

Les équations (II.40a)-(II.41c) sont réduites à:

$$H_r^{cp-re} = H_\theta^{cp-re} = E_\phi^{cp-re} = 0 \quad (\text{II.44a})$$

$$H_\phi^{cp-re} = \frac{I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r^2} \sin \theta \quad (\text{II.44b})$$

$$E_r^{cp-re} = -j\eta \frac{I_0 l e^{-jkr}}{2\pi k r^3} \cos \theta \quad (\text{II.44c})$$

$$E_\theta^{cp-re} = -j\eta \frac{I_0 l e^{-jkr}}{4\pi k r^3} \sin \theta \quad (\text{II.44d})$$

où l'indice cp-re fait référence au terme champ proche réactif. La variation de champ E (II.44c)- (II.44d) est proportionnelle à $1/r^3$ et ses caractéristiques se rapprochent d'un dipôle électrostatique de charges +q et -q séparées de l [10].

Les composantes de champ E, E_r et E_θ , sont en phase, mais en quadrature de phase avec la composante du champ H, H_ϕ . Les caractéristiques du champ magnétique se rapprochent du champ magnétique d'un élément de courant d'amplitude constante (statique) multiplié par le terme exponentiel e^{-jkr} [9].

Les équations (II.44a)-(II.44d) sont appelées champ stationnaire et elles s'évanouissent très rapidement avec l'augmentation de r. Le terme stationnaire apparaît du fait que les champs restent stockés et oscillant autour de l'antenne, ils ne se propagent pas.

III.2.1.2 Région de champ proche radiatif

Dans la région de champ proche radiatif, le produit kr devient modéré ($kr > 1$) et les termes dominants dans la région de champ proche réactif tendent à être négligeables. Les équations peuvent être simplifiées en négligeant les termes $1/r$ entre parenthèses dans (II.42b) et (II.43a). Pour l'équation (II.41b) le premier terme entre les parenthèses devient plus dominant que les autres. A partir de ces considérations, nous pouvons écrire les équations de champs électromagnétiques d'un dipôle idéal dans la zone de champ proche radiatif telles que:

$$H_r^{cp-ra} = H_\theta^{cp-ra} = E_\phi^{cp-ra} = 0 \quad (\text{II.45a})$$

$$H_\phi^{cp-ra} = j \frac{k I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (\text{II.45b})$$

$$E_r^{cp-ra} = \eta \frac{I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r^2} \cos \theta \quad (\text{II.45c})$$

$$E_{\theta}^{cp-ra} = j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (\text{II.45d})$$

Où l'indice cp-ra fait référence au terme champ proche radiatif.

Les composantes du champ E ne sont plus en phase et tendent à être en quadrature de phase. Les deux composantes, E_r et E_{θ} , même si leurs amplitudes ne sont pas égales, forment un vecteur tournant dont l'extrémité trace une ellipse. Ce comportement est analogue à la configuration de polarisation du champ E dans la région de champ lointain, sauf qu'ici le vecteur, habituellement dénommé champ croisé, tourne dans un plan parallèle à la direction de propagation [9].

La composante longitudinale E_r , encore présente dans cette région même si elle s'évanouit à une vitesse $1/r^2$, est importante à considérer car elle contribue à améliorer le couplage du type capacitif dans cette région. Outre la particularité des champs de cette zone de propagation, avec l'augmentation de r les composants H_{ϕ} et E_{θ} deviennent en phase, ce qui correspond au début de la formation des champs rayonnants.

III.2.1.3 Région de champ lointain

Quand le produit kr devient important ($kr \gg 1$), tous les termes est proportionnels à $1/r^2$ sont négligés. Pour cette région les équations (II.42a)-(II.43c) se résument à :

$$H_r^{cl} = H_{\theta}^{cl} = E_{\phi}^{cl} = E_r^{cl} = 0 \quad (\text{II.46a})$$

$$H_{\phi}^{cl} = j \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (\text{II.46b})$$

$$E_{\theta}^{cl} = j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (\text{II.46c})$$

Où l'indice cl fait référence au terme champ lointain.

Comme montré dans les équations, le champ magnétique et le champ électrique sont transversaux (perpendiculaires entre eux) et perpendiculaires à la direction radiale de propagation d'onde électromagnétique. La forme des champs ne dépend plus de la distance radiale, r . Le rapport entre la composante de champ E et la composante de champ H détermine l'impédance d'onde, Z_w , et à cette distance elle se rapproche de l'impédance intrinsèque 120π :

$$Z_w = \frac{E_{\theta}}{H_{\phi}} = \eta = 120\pi \quad (\text{II.47})$$

III.2.2 Energie

L'énergie des champs électromagnétiques peut être représentée sous la forme du vecteur complexe de Poynting, S :

$$S = \frac{1}{2} E \times H^* \quad (\text{II.48})$$

Le terme $1/2$ est employé pour dire que nous n'utiliserons pas la valeur efficace RMS (Root Mean Square) de E et H. Le vecteur de Poynting est donné sous l'unité $W.m^2$. Ce

vecteur évalue le flux d'énergie dans les régions de propagation des champs en donnant l'amplitude et la direction du flux d'énergie. L'énergie se porte de façon distincte dans chaque région de champs électromagnétiques. En se basant sur l'équation (II.48) nous analyserons comment se comporte l'énergie dans les trois zones.

III.2.2.1 Energie de champ proche réactif

Pour l'analyse du vecteur de Poynting dans la zone de champ proche réactif nous calculons (II.46) à partir de (2.43a)-(II.42d) :

$$S^{cp-re} = \frac{1}{2} \left[E_{\theta}^{cp-re} H_{\phi}^{cp-re*} \hat{r} - E_r^{cp-re} H_{\phi}^{cp-re*} \hat{\theta} \right] \quad (\text{II.49})$$

$$S^{cp-re} = -j \frac{\eta}{2k} \left(\frac{l_0 l}{4\pi} \right)^2 \frac{1}{r^5} \left[\sin^2 \theta \hat{r} + \cos \theta \sin \theta \hat{\theta} \right] \quad (\text{II.49a})$$

Les champs proches réactifs sont dominants et l'énergie oscille autour de l'antenne en se déplaçant dans les directions radiale et transversale. Le vecteur de Poynting est absolument imaginaire, et cela signifie que l'énergie est réactive. Le signe négatif de (II.47a) indique que l'énergie est de type capacitif. Du fait que le champ H et le champ E est en quadrature de phase, l'énergie est stockée à un instant donné sous la forme d'un champ électrique à proximité de la région où les charges sont maximales.

Dans le cas d'un dipôle, l'énergie est concentrée près des extrémités. Tandis qu'un quart de période plus tard, l'énergie est concentrée sous la forme d'un champ magnétique, et dans les régions où le courant est maximum, c'est-à-dire dans le cas du dipôle au centre [10].

III.2.2.2 Energie de champ proche radiatif

De façon analogue, nous calculons le vecteur de Poynting à partir des équations (II.45a)- (II.45d) pour la région de champ proche radiatif :

$$S^{cp-ra} = \frac{1}{2} \left[E_{\theta}^{cp-ra} H_{\phi}^{cp-ra*} \hat{r} - E_r^{cp-ra} H_{\phi}^{cp-ra*} \hat{\theta} \right] \quad (\text{II.50})$$

$$S^{cp-ra} = \eta k \left(\frac{l_0 l}{4\pi} \right)^2 \frac{1}{r^2} \left[\frac{k}{2} \sin^2 \theta \hat{r} - j \frac{1}{r} \cos \theta \sin \theta \hat{\theta} \right] \quad (\text{II.50a})$$

Nous observons que dans cette région le vecteur de Poynting est un vecteur complexe. La partie réelle de (II.48a) indique la formation d'un flux d'énergie qui se déplace dans la direction radiale à l'antenne et qui correspond en fait au flux d'énergie rayonnée.

III.2.2.3 Energie de champ lointain

Avec l'augmentation de la distance radiale, le deuxième terme de (II.51a) devient négligeable et les composantes de champs E et champ H ont une configuration transversale. Le calcul du vecteur de Poynting dans cette région conduit à :

$$S^{cl} = \frac{1}{2} \left[E_{\theta}^{cp-ra} H_{\phi}^{cp-ra*} \hat{r} \right] \quad (\text{II.51})$$

$$S^{cl} = \frac{\eta k^2}{2} \left(\frac{I_0 l}{4\pi}\right)^2 \frac{1}{r^2} \sin^2 \theta \hat{r} \quad (\text{II.51a})$$

Le flux d'énergie est purement réel, ce qui veut dire que toute l'énergie est rayonnée par l'antenne. Afin de connaître la quantité de puissance totale rayonnée (P_{ray}) par l'antenne, nous devons intégrer le flux total qui passe par une sphère fermée s de rayon égale à r tel que suit :

$$P_{ray} = \oint S \cdot ds \quad (\text{II.52})$$

$$P_{ray} = \eta \frac{\pi}{3} \left(\frac{I_0 l}{\lambda}\right)^2 \quad (\text{II.52a})$$

P_{ray} est une puissance réelle ce qui indique que la puissance est dissipée de l'antenne dans l'espace loin de l'antenne. Il faut remarquer que cette puissance ne dépend pas de la distance r ; en effet, si nous intégrons donc S cl sur une sphère de rayon plus large que r , la même valeur de puissance rayonnée est retrouvée.

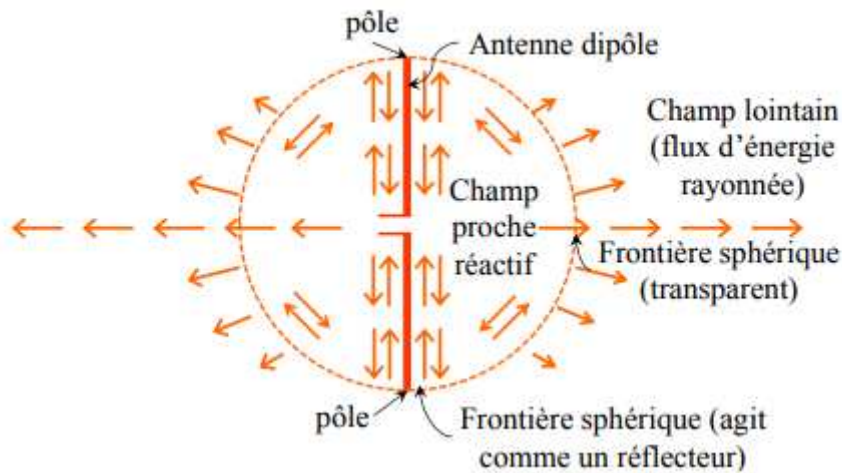


Figure II.10 : Représentation du flux d'énergie proche de l'antenne dipôle

IV. Antenne boucle

Les boucles constituent le deuxième type d'antenne le plus courant. Nous allons considérer le cas d'une boucle circulaire dont le rayon b est petit devant la longueur d'onde.

IV.1 Expressions du champ électromagnétique

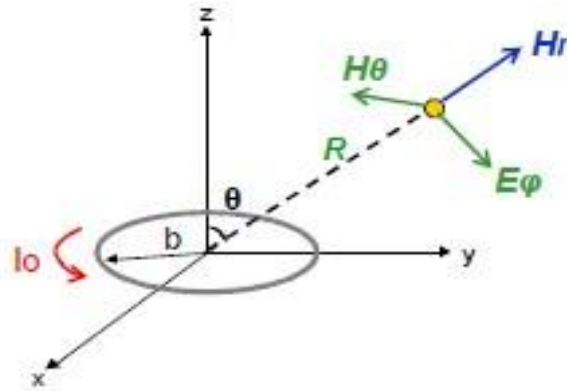


Figure II.11 : Champ rayonné par une boucle

Les expressions générales des champs électriques et magnétiques générées par cette antenne :

$$H_r \approx j \frac{2\omega\mu\beta_0^2}{4\pi\eta_0} \times I\pi b^2 \times \cos\theta \times \left(\frac{1}{\beta_0 r} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r} \quad (\text{II. 53})$$

$$H_\theta \approx j \frac{\omega\mu\beta_0^2}{4\pi\eta_0} \times I\pi b^2 \times \sin\theta \times \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) \times e^{-j\beta_0 r} \quad (\text{II. 54})$$

$$H_\theta \approx j \frac{\omega\mu\beta_0^2}{4\pi\eta_0} \times I\pi b^2 \times \sin\theta \times \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) \times e^{-j\beta_0 r} \quad (\text{II. 55})$$

$$E_\phi = j \frac{\omega\mu\beta_0^2}{4\pi\eta_0} \times I\pi b^2 \times \sin\theta \times \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} \right) \times e^{-j\beta_0 r} \quad (\text{II. 56})$$

$$H_\phi = E_r = E_\theta \quad (\text{II. 57})$$

L'antenne présente une symétrie de révolution puisque le champ ne dépend pas de ϕ . Les expressions sont proches de celles du dipôle électrique. La boucle élémentaire est aussi appelée dipôle magnétique. Les équations du champ font aussi apparaître des termes réels et imaginaires, qui vont correspondre à la puissance active (onde progressive) et réactive (onde stationnaire). [13]

IV.2 Zones de rayonnement

IV.2-a Région de champ proche ($kr \ll 1$)

Les observations sont faites dans le champ proche ($kr \ll 1$). En ce qui concerne le dipôle infinitésimal, le terme prédominant dans chaque expression du champ dans la région proche de la zone. Ainsi, pour $kr \ll 1$:

$$\left. \begin{aligned} H_r &\approx \frac{b^2 \beta_0 e^{-jkr}}{2r^3} \cos \theta & (a) \\ H_\theta &\approx \frac{b^2 \beta_0 e^{-jkr}}{4r^3} \sin \theta & (b) \\ H_\phi &= E_r = E_\theta = 0 & (c) \\ E_\phi &\approx -j \frac{b^2 k \beta_0 e^{-jkr}}{4r^2} \sin \theta & (d) \end{aligned} \right\} kr \ll 1 \quad (II.58)$$

Les deux composantes H-champ sont en temps-phase. Cependant, ils sont en quadrature temporelle avec celles du champ électrique. Cela indique que la puissance moyenne (puissance réelle) est égale à zéro, ce qui est pour le dipôle électrique infinitésimal. La condition de $kr \ll 1$ peut être satisfaite à des distances modérées de l'antenne à condition que la fréquence de fonctionnement soit très faible. Les champs de (II.58a) - (II.58d) sont généralement appelés quasi-stationnaire [15].

VI.2-b Région de champ lointain ($kr \gg 1$)

L'autre espace d'intérêt où les champs peuvent être estimés est la région de champ lointain ($kr \gg 1$). Contrairement au champ proche, pour $kr \gg 1$ est la première dans les parenthèses. Étant donné que pour $kr > 1$ la composante H_r sera inversement proportionnelle à r^2 alors H_θ sera inversement proportionnelle à r . Pour les grandes valeurs de kr ($kr \gg 1$), la composante H_r sera faible par rapport à H_θ . Par conséquent, on peut supposer qu'elle est à peu près égale à zéro. Par conséquent, pour ($kr \gg 1$),

$$\left. \begin{aligned} H_\theta &\approx \frac{k^2 b^2 \beta_0 e^{-jkr}}{4r} \sin \theta = -\frac{\pi S \beta_0 e^{-jkr}}{\lambda^2 r} \sin \theta & (a) \\ E_\phi &\approx \eta \frac{k^2 b^2 \beta_0 e^{-jkr}}{4r} \sin \theta = \eta \frac{\pi S \beta_0 e^{-jkr}}{\lambda^2 r} \sin \theta & (b) \end{aligned} \right\} kr \gg 1 \quad (II.59)$$

$$H_r \approx H_\phi = E_r = E_\theta = 0 \quad (c)$$

Où $S = \pi b^2$ est la surface géométrique de la boucle.

L'impédance d'onde peut être écrite comme suit :

$$Z_w = -\frac{E_\phi}{H_\theta} \approx \eta \quad (II.60)$$

Où

Z_w = impédance d'onde

η = impédance intrinsèque

En ce qui concerne le dipôle infinitésimal, les composants E- et le champ d_H de la boucle dans la Région de champ lointain ($k_r \gg 1$) sont perpendiculaires les unes aux autres et transversalement à la direction de propagation. Ils forment un champ Electro magnétique Transverse (TEM) dont l'impédance d'onde est égale à l'impédance intrinsèque du milieu. Les équations (II.59a) - (II.59c) peuvent également être obtenues en utilisant la procédure décrite et les relations développées dans le livre [14].

IV.3 Diagramme de rayonnement

La fonction caractéristique de rayonnement est égale à :

$$r(\theta) = \sin^2(\theta) \quad (\text{II.61})$$

On peut tracer le diagramme de rayonnement de la figure II.12.

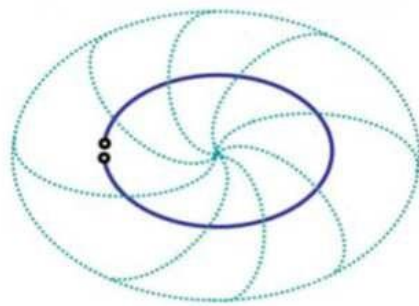


Figure II.12 : Diagramme de rayonnement de la boucle élémentaire.

La boucle élémentaire est parfois appelée "doublet magnétique" parce que nous avons une forme de tore, pour le doublet (électrique), mais avec le nul dans la direction du champ H au lieu de celle du champ E avec le doublet. Mais il y a une différence lorsque la longueur d'un doublet augmente, il conserve un nul dans sa direction lorsque le diamètre de la boucle augmente, le nul disparaît peu à peu. En effet, quand le diamètre augmente, on ne peut plus considérer un courant et une phase constants dans la boucle et il n'y a plus de compensation dans une direction perpendiculaire à son plan. Quand une boucle carrée (alimentée au centre d'un côté) atteint une longueur égale à $\lambda/4$ (quad), le maximum de rayonnement a lieu dans une direction perpendiculaire à son plan et il y a un nul. [13]

IV.4 Directivité et gain

La directivité de l'antenne est égale à

$$D(\theta) = \frac{3}{2} \sin^2(\theta) \quad (\text{II.62})$$

Elle est identique à celle du dipôle électrique.

Si les pertes sont négligeables, le gain de l'antenne est de 1.5 ou 1.76 dBi. L'angle d'ouverture à 3 dB est de 90° .

IV.5 La résistance de rayonnement

Soit S la surface de la boucle, la résistance de rayonnement est égale à :

$$R_{\text{rad}} = 31170 \times \left(\frac{S}{\lambda^2}\right)^2 \quad (\text{II.63})$$

Plus le rapport entre la surface de la boucle sur la longueur d'onde augmente, plus le rayonnement ne devient plus efficace.

IV.6 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité d'une petite boucle créée avec un fil de rayon r_w est donné par

$$Q = \frac{\frac{6}{\pi} \left(\ln \frac{b}{r_w} - 2\right)}{(\beta r)^3} \quad (\text{II.64})$$

Conclusion :

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés tout d'abord aux différents paramètres fondamentaux des antennes, en mettant l'accent sur quelques paramètres importants en systèmes RFID passif, notamment l'équation de FRIIS.

Le fonctionnement d'une antenne en une fréquence est déduit à partir de ses paramètres d'impédance, de coefficient de réflexion et le rapport d'onde stationnaire. Il existe également un autre ensemble de performances d'antennes qui font référence aux rayonnements dont le diagramme de rayonnement, le gain, la directivité...

Ensuite dans la seconde partie nous avons présenté une étude théorique sur la distribution des champs électromagnétiques dans les trois zones de propagation et les particularités de chaque zone.

I. Introduction :

Dans ce chapitre, nous reviendrons en détail sur la particularité de la liaison entre lecteur et tag dans ces systèmes. Des critères d'évaluation sont énoncés. Puis un état de l'art sur la caractérisation des systèmes RFID passifs opérant en zone de champ proche et en zone de champ lointain est présenté.

II. Particularité de la liaison

II.1. Zones de fonctionnement

La Figure III.1 montre 3 zones distinctes de fonctionnement caractérisées par la position r en fonction de la dimension maximale de l'antenne L et la longueur d'onde λ :

- ✚ les zones « champ proche » (composées des zones de Rayleigh et de Fresnel)
- ✚ la zone de « champ lointain » (encore notée zone de Fraunhofer).

La forme du champ EM varie fortement d'une zone à une autre.

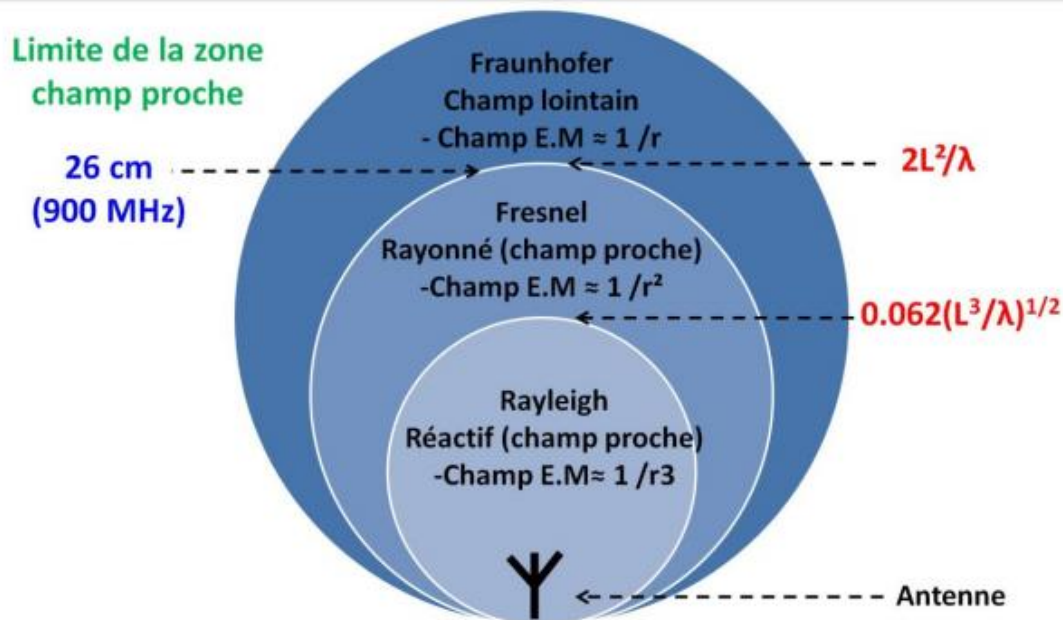


Figure III.1: Différentes zones de fonctionnement de la RFID UHF champ proche.

Description des différentes zones :

- **Zone de Rayleigh** : Dans cette zone de champ proche (ou zone de Rayleigh), il y a échange d'énergie réactive entre l'antenne et le milieu extérieur. A courte distance (par rapport à la longueur d'onde) pour $r = 0.062 * \sqrt{\frac{L^3}{\lambda}}$ où λ est la longueur d'onde. la densité de puissance est quasi constante.
- **Zone de Fresnel** : elle se situe entre $0.062 * \sqrt{\frac{L^3}{\lambda}} < r < \frac{2 * L^2}{\lambda}$. L'intensité du champ décroît en $1/r^2$. L'énergie EM est très peu rayonnée. La densité de puissance est plutôt fluctuante. Les phénomènes rencontrés dans cette zone sont difficiles à modéliser.
- **Zone de champ lointain (Fraunhofer)** : Dans la zone du champ lointain (ou de Fraunhofer), à grande distance par rapport à la longueur d'onde, les champs sont rayonnés sous la forme d'une onde quasiment plane, elle est définie à partir de $r > \frac{2 * L^2}{\lambda}$. L'intensité du champ décroît plus lentement en fonction de la distance (en $1/r$).

II.2. Transfert des données par couplage inductif

Le champ électrique étant fortement sensible aux matériaux ainsi qu'aux métaux, son utilisation comme vecteur de communication dans la zone de champ proche n'est donc pas à privilégier [4]. Le transfert des données se fait le plus souvent par couplage inductif. Le champ magnétique est en effet beaucoup moins sensible à ces mêmes matériaux diélectriques et les objets du quotidien ont plus rarement une perméabilité différente de 1.

La lecture se fait pas couplage inductif.

Les antennes boucles sont les plus adaptées pour ce type de transmission.

Le principe du couplage inductif est montré à la figure III.2. Une première bobine (antenne boucle lecteur) parcourue par un courant alternatif crée un champ magnétique qui interagit avec une deuxième bobine (antenne boucle Tag). Un courant induit apparaît sur la bobine Tag. La densité d'énergie s'écrit

$$W = \frac{1}{2} * (\vec{E} \wedge \vec{H}^*) \quad (\text{III.1})$$

$$\vec{H} = \left(\frac{1}{\mu}\right) * \vec{B} \quad (\text{III.1a})$$

Ou

\vec{E} : Le vecteur champ électrique.

\vec{B} : Le vecteur champ magnétique.

μ : La perméabilité magnétique du milieu.

\vec{H} : L'excitation magnétique.

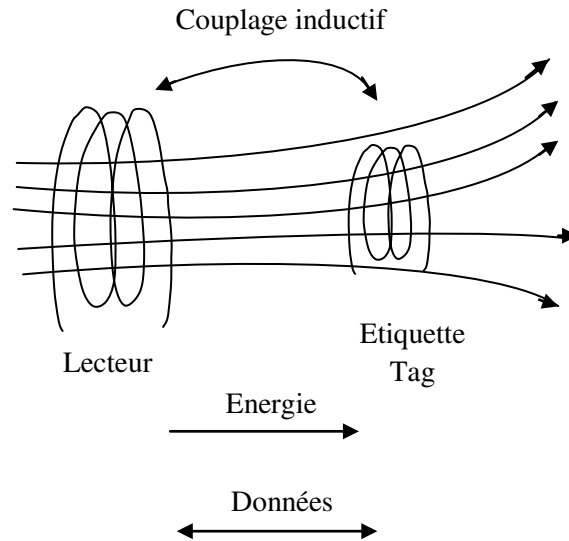


Figure III.2: Principe du couplage inductif

III. Modélisation d'une communication RFID UHF champ proche

Une communication RFID UHF en champ proche peut être modélisée en se basant sur le schéma électrique équivalent présenté sur la Figure III.3 [3].

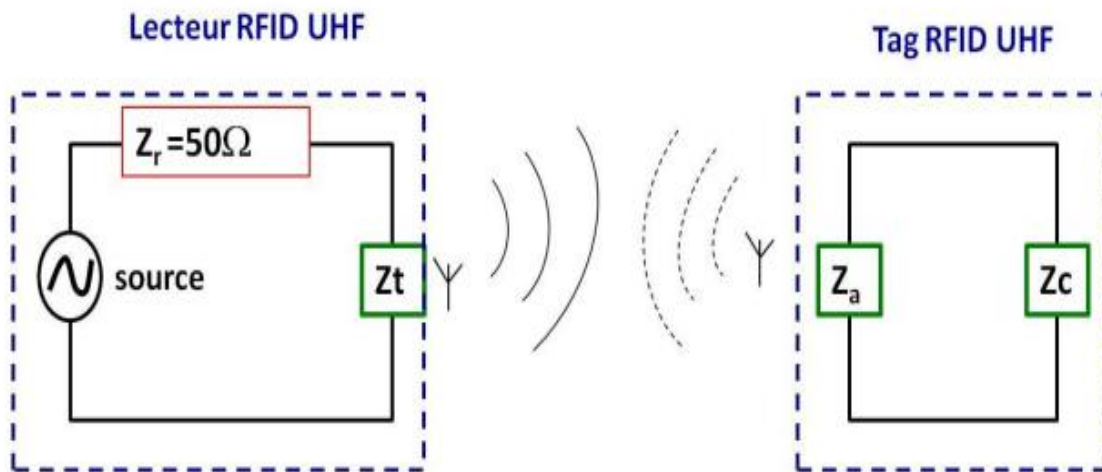


Figure III.3: Mécanisme de couplage dans les systèmes RFID.

Dans la Figure III.3 :

- ✓ Z_r : L'impédance de la source (50Ω).
- ✓ Z_t : L'impédance de l'antenne du lecteur.
- ✓ Z_a : L'impédance de l'antenne du tag.
- ✓ Z_c : L'impédance de la puce.

La puissance reçue par le tag RFID est obtenue en utilisant l'expression générique suivante [2]:

$$P_{tag} = P_{lecteur} * \rho * C * \tau \quad (III.2)$$

- ✓ $P_{lecteur}$: la puissance de sortie du lecteur.
- ✓ ρ : le coefficient de transmission entre le lecteur et son antenne.
- ✓ C : le coefficient de couplage (la perte de transmission de puissance) entre les deux antennes de lecture et d'étiquetage orientées arbitrairement.
- ✓ τ : le coefficient de transmission entre la puce d'étiquette et son antenne.

Ces différentes grandeurs s'expriment comme suit, en fonction des impédances des éléments du système :

$$\rho = \frac{4R_r R_t}{|Z_r + Z_t|^2}, \tau = \frac{4R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2}$$

- $Z_r = R_r + jX_r$.
- $Z_t = R_t + jX_t$.
- $Z_c = R_c + jX_c$.
- $Z_a = R_a + jX_a$.

Dans le cas d'antennes boucles, si l'on considère que les tags sont suffisamment petits pour ne pas perturber le champ magnétique créé par l'antenne lecteur, on peut alors définir le coefficient de couplage C comme suit [1]

$$C \cong f^2 * N^2 * S^2 * B^2 * \alpha \quad (III.3)$$

Avec :

- ✓ F : la fréquence de fonctionnement.
- ✓ N : le nombre de spires pour l'antenne tag.
- ✓ S : la section du tag (antenne boucle).
- ✓ B le champ magnétique produit par l'antenne lecteur.
- ✓ α les pertes d'alignement entre l'antenne du tag et du lecteur.

IV. Critères d'évaluation

Les performances des structures seront évaluées suivant deux critères introduits et discutés ci-dessous. On recherchera à avoir la meilleure adaptation possible sur la bande de fréquence souhaitée.

- Le premier critère n'est autre que le coefficient de réflexion en entrée de l'antenne.
- Le deuxième critère concerne l'estimation de la portée maximale de lecture assurée par l'antenne.

IV.1. Critère 1 : adaptation/gain

La bande passante de l'antenne (à -10 dB) est déterminée à partir de coefficient S_{11} de l'antenne.

La conception d'antenne consiste à adapter l'impédance d'entrée de l'antenne à celle du générateur. Il convient ici d'apporter la précision suivante. Par définition, on appelle une antenne un dispositif permettant de rayonner (émetteur) ou de capter (récepteur), les ondes électromagnétiques. Or, dans l'application qui nous intéresse, nous cherchons avant toute chose à travailler en champ proche (en raison du cahier des charges), et non en régime de champ lointain par propagation d'ondes électromagnétiques. Il est à noter que ce point (communication en champ proche) n'est pas simplement un problème de vocabulaire. En effet, c'est bien la démarche de conception dans son ensemble qui est différente. Ainsi, le champ magnétique en champ proche dépend d'avantage de la répartition des courants que de l'intensité du courant et donc du paramètre S_{11} (la désadaptation va impacter directement l'amplitude du courant en non sa répartition dans l'espace qui est liée à la forme de l'antenne).

IV.2. Critère 2 : portée de l'antenne

Pour pouvoir estimer la portée de l'antenne, nous nous intéressons à l'intensité du champ magnétique en particulier la composante Hz qui est la normale à la surface de l'antenne et qui définit la direction de lecture du tag positionné dans un plan parallèle à celui de l'antenne lecteur.

V. Etat de l'art sur la caractérisation de systèmes RFID UHF :

V.1 Caractérisation en champ proche

La caractérisation RFID UHF CP repose sur le couplage électromagnétique entre l'antenne du lecteur et l'antenne du tag, réalisable par un couplage du type magnétique ou du type électrique.

Dans la zone de CP, les champs émis par l'antenne se présentent de façon plus complexe par rapport aux champs rayonnants dans la zone de CL. Cette complexité est associée à l'évanouissement de l'amplitude de champ très rapidement avec l'accroissement de la distance r en des proportions en $1/r^3$ contre $1/r$ en zone de CL, et aux composantes de champs dans les directions longitudinales qui ne sont alors plus négligeables. L'énergie peut osciller autour de l'antenne (elle n'est pas rayonnée) à courte distance, ou bien être concentrée dans des champs rayonnants dont la distribution angulaire dépend de la distance.

Une introduction aux systèmes RFID UHF CP est présentée en [5]. Les théories sur la distribution des champs autour de l'antenne et leurs évanouissements sont rappelés ainsi que les différents types de systèmes RFID UHF CP. Le couplage entre lecteur et tag UHF est présenté par une approche basée sur un modèle de couplage inductif en LF/HF. Le transfert de puissance du lecteur vers le tag est maximal quand le coefficient de couplage, C , est égal à 1.

L'analyse du transfert de puissance entre l'antenne du lecteur et le tag est une approche simple pour évaluer la performance d'un système RFID UHF CP qui permet de s'affranchir d'analyses plus complexes basées sur la distribution et l'intensité des champs.

V.1.1 Path Gain, PG

Pour évaluer l'immunité du système en champ proche, le rapport des puissances sous la dénomination de Path Gain (PG) est considéré. Le PG est modélisé comme le rapport entre la puissance incidente aux terminaux de l'antenne du tag, (P_{TAG}), et la puissance envoyée par le lecteur, (P_{READER}), comme présenté en (III.4).

$$PG = \frac{P_{TAG}}{P_{READER}} \quad (III.4)$$

Comme l'accès à la puissance reçue aux bornes du tag sans que le dispositif de mesure ne perturbe son fonctionnement est très difficile à réaliser, Cette puissance est fournie par les fabricants des puces RFID, et représente le niveau de puissance minimum avec laquelle la puce RFID puisse être lue.

Pour les tests proposés, trois systèmes ont été évalués [5], à savoir :

- système 1 : antenne lecteur CL et tag CL ;
- système 2 : antenne lecteur CL et tag CP ;
- système 3 : antenne CP et badge CP.

V.1.2 Efficacité du transfert de puissance, PTE

Toujours dans l'idée d'utiliser la relation entre la puissance envoyée par le lecteur et la puissance reçue par le tag pour caractériser le système RFID UHF en CP, les auteurs de [6] introduisent le concept d'efficacité du transfert de puissance PTE (Power Transfert Efficiency) comme paramètre quantitatif pour analyser le couplage électromagnétique entre le lecteur et le tag (figure III.4).

Ce paramètre est défini notamment en fonction de l'impédance mutuelle, Z_{21} et de la charge adaptée à l'antenne du tag, Z_L :

$$PTE = \frac{P_{TAG_IN}}{P_{READER}} = |Z_{21}|^2 \frac{\Re\{Z_L\} / \Re\{Z_{in}\}}{|Z_L + Z_{21}|^2} \quad (III.5)$$

- ✓ Z_{in} : l'impédance d'entrée du réseau quand il est connecté (adapté) à l'impédance.
- ✓ $\Re\{\cdot\}$: la partie réelle de l'expression considérée.
- ✓ Z_{11} et Z_{22} : sont respectivement les impédances d'entrée de l'antenne du lecteur et de l'antenne du tag, quand les antennes sont considérées à une distance supérieure à quelques centimètres

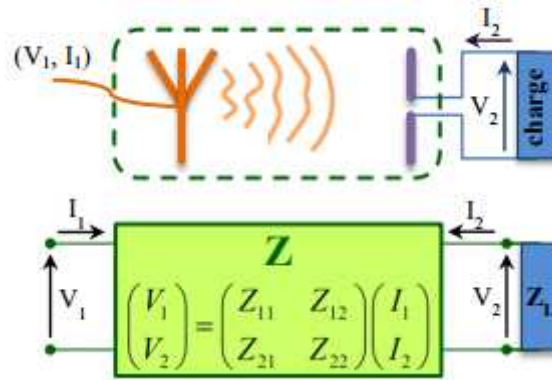


Figure III.4 – Modèle utilisé par Buffi et al [7].

Des analyses numériques ont été réalisées pour évaluer le transfert de puissance. Dans une première configuration, une antenne boucle a été modélisée pour simuler le lecteur, et deux modèles de tags commerciaux ont été choisis. Dans une seconde configuration seulement les antennes tags ont été considérées, la même antenne tag ayant été utilisée pour simuler le côté lecteur et le côté tag. De ces travaux, il est possible de déduire que la valeur maximale de PTE est obtenue lorsque l’antenne du lecteur et l’antenne du tag sont identiques et qu’elles sont placées à une distance de séparation équivalente à la distance où l’impédance mutuelle est maximale. Ce résultat semble être cohérent car dans le cas où Z_{21} est maximal, les lignes de champs sont fortement couplées permettant un transfert de puissance optimal.

V.1.3 Impédance de transfert, Z_{tr}

Toujours basés sur le théorème de la réciprocité pour modéliser les interactions entre lecteur et tag, les travaux de Bolomey et al proposent une approche générale valable dans la zone de CP ainsi que dans la zone de CL [8]. Les auteurs introduisent l’impédance de transfert (Z_{tr}), comme paramètre clé pour évaluer le système RFID, laquelle ne dépend pas de la charge connectée à l’antenne mais de l’environnement qui entoure le lecteur et le tag. Cette impédance de transfert est définie comme le rapport entre le carré de la tension de circuit ouvert au tag, V_{CO} , (c’est-à-dire la puissance en boucle ouverte vue au niveau du tag) et la puissance rayonnée par l’antenne du lecteur, P_a :

$$Z_{tr} = \frac{V_{CO}^2}{2P_a} \tag{III.6}$$

A partir de l’impédance de transfert, le coefficient de réflexion différentiel ($\Delta\rho$) est introduit et est défini par :

$$\Delta\rho = Z_{tr} \frac{Z_{p2} - Z_{p1}}{(Z_{aTAG} + Z_{p1})(Z_{aTAG} + Z_{p2})} \tag{III.7}$$

Le coefficient de réflexion différentiel exprime les effets de l’environnement (à partir de Z_{tr}) et de la modulation de charge à partir des impédances concernant l’état d’absorption Z_{p1} et l’état de réflexion Z_{p2} de la puce RFID sur la puissance réfléchi par le tag. Le coefficient de réflexion est une contrepartie du paramètre généralement utilisé pour caractériser le tag UHF dans la zone de CP, la surface équivalente radar (SER, σ) différentielle ($\Delta\sigma$). L’avantage

du coefficient de réflexion sur la surface équivalente radar différentielle est qu'il peut être calculé dans les zones de CP et CL, et également dans la zone de CL quand la condition d'espace libre n'est pas respectée, car il prend en compte les effets de l'environnement sur la rétro-modulation.

V.1.4 Coefficient de couplage, C

Les travaux de Chen et al [9] viennent compléter la liste des travaux les plus significatifs pour la caractérisation des systèmes RFID UHF en CP. Dans cette étude, une formulation analytique est proposée pour calculer le coefficient de couplage de deux antennes arbitrairement orientées en fonction de la distance de séparation entre elles. Pour cela, les vecteurs tridimensionnels (3D) du diagramme de rayonnement de l'antenne lecteur et de l'antenne du tag, définis dans la zone de CL, doivent être connus ainsi que l'orientation relative des antennes.

La valeur du coefficient de couplage obtenue par les moyens de mesure est calculée par :

$$C_{(dB)} = -(P_{\text{reader}(dB)} - P_{\text{sensibilité}(dB)} + \tau_{\text{lecteur}} + \tau_{\text{puce}}) \quad (\text{III.8})$$

Où τ_{lecteur} et τ_{puce} sont les coefficients d'adaptation d'impédance de l'antenne du lecteur et de l'antenne du tag respectivement. Une fois connue la valeur attribuée à C la distance de lecture peut être estimée sur la courbe (définie à partir de la formule analytique).

V.2 Caractérisation en champ lointain

V.2.1 Puissance d'activation, $P_{\text{activation}}$

La puissance d'activation ou puissance de réveil est définie comme le seuil minimum de puissance nécessaire pour activer/réveiller et lire le tag à une distance donnée. Pour mesurer cette valeur de puissance, le lecteur doit envoyer une requête à une fréquence fixe au tag en faisant varier le niveau de puissance de sortie jusqu'à ce que le tag réponde. De ce fait, les lecteurs RFID classiques ne sont pas recommandés car le niveau de puissance de sortie n'est pas toujours configurable. La puissance d'activation peut être définie en termes de puissance effective rayonnée (P_{ERP}). La puissance P_{ERP} est calculée dans une direction donnée par :

$$P_{\text{ERP}} = P_{\text{activation}} \cdot D(\theta, \varphi) \quad (\text{III.9})$$

où $D(\theta, \varphi)$ est la directivité de l'antenne lecteur dans la direction (θ, φ) .

La portée de lecture du tag (d) et la puissance d'activation sont directement liées. Moins de puissance un tag a besoin pour être activé, plus longue sera la portée lorsque le niveau de puissance du lecteur est réglé au maximum autorisé. La portée maximale d'un tag RFID, d_{max} , est le critère d'évaluation le plus utilisé pour caractériser un tag. Cette portée maximale est déterminée généralement par le rapport entre la distance maximum de lecture dans l'espace libre et la puissance maximale autorisée $P_{\text{ERP}_{\text{max}}}$ (ou $P_{\text{EIRP}_{\text{max}}}$) [10] :

$$d_{\max} = d \cdot \sqrt{\frac{P_{ERP_{\max}}}{P_{activation}}} \quad (\text{III.10})$$

La portée maximale d'un tag est liée également aux caractéristiques du système RFID car elle dépend de la condition d'espace libre entre lecteur et tag, de la puissance transmise par le lecteur [11], de la sensibilité du tag ainsi que de la sensibilité du récepteur du lecteur.

V.2.2 Surface équivalente radar différentielle, $\Delta\sigma$

Un système RFID UHF CL peut être vu comme un système radar où sa cible (le tag) réfléchit une partie des ondes envoyées par l'émetteur (le lecteur) pour être identifiée. A partir de cette analogie, la surface équivalente radar de l'antenne du tag est souvent utilisée pour calculer la portée du tag et aussi analyser l'intensité du signal re-rayonné par celui-ci. L'analyse de la SER différentielle apparaît aussi comme un paramètre essentiel à prendre en compte pour évaluer la qualité de la modulation du tag RFID. Ce paramètre est généralement évalué en fonction de la fréquence ou en fonction de la puissance à une fréquence fixe.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit les caractéristiques des systèmes RFID UHF en champ proche et champ lointain. Nous avons défini les zones de fonctionnement et les critères d'évaluation de ces systèmes. Le champ magnétique étant beaucoup moins sensible aux matériaux des diélectriques constituant les objets du quotidien dont la perméabilité est rarement différente de 1, le transfert des données par couplage inductif est préféré. Enfin, l'état de l'art sur la caractérisation des systèmes RFID passifs opérant en zone de champ proche et en zone de champ lointain a été présenté.

I. Introduction

Dans la zone de champ proche, le transfert des données se fait le plus souvent par couplage inductif. Les antennes boucles sont les plus adaptées pour ce type de transmission. La technique de segmentation est utilisée pour générer un champ magnétique fort et assez uniforme autour de l'antenne. Une antenne lecteur UHF zone proche est conçue avec cette technique. Elle est simulée à l'aide du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator), ensuite réalisée et testée avec l'analyseur de réseaux vectoriel Protec333.

II. Boucle magnétique pour les systèmes RFID UHF champ proche

II.1. Boucle pour les applications RFID

A l'opposé d'une antenne classique (dipôle, long fil, verticale) qui est en résonance sur la composante électrique uniquement, l'antenne boucle exploite la composante magnétique de l'onde émise et fournit une tension proportionnelle à ce champ.

En général, sur une ligne de longueur physique largement inférieure à la demi-longueur d'onde, le courant garde le même sens. C'est le cas des antennes RFID HF dont la longueur d'onde à 13.56 MHz est de 22.12 m. Pour des raisons avant tout pratiques (dimensions des objets à tagger), les dimensions des tags sont de l'ordre de quelques centimètres de côté. Les géométries sont donc petites comparées à la longueur d'onde. C'est également le cas pour les antennes côté lecteur. Ainsi, le champ magnétique obtenu en champ proche est important et presque uniforme autour de l'antenne. Le type d'antenne boucle montré à la figure IV.1 est couramment utilisé.

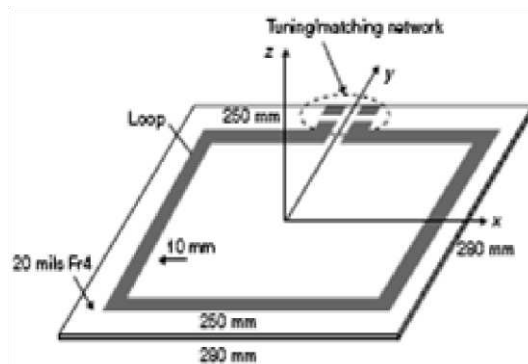


Figure IV.1 Antenne boucle carrée pour une application RFID. [7]

L'antenne boucle est principalement inductive, sa capacité propre est assez faible. Sa fréquence de résonance est généralement fixée à l'aide d'une capacité placée en série :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L C}}$$

L'antenne est caractérisée par un coefficient de surtension très élevé et une résistance de rayonnement très faible [8].

Aux fréquences UHF, et compte tenu des zones de lectures que nous cherchons à couvrir, les dimensions des antennes sont comparables à la longueur d'onde λ . La largeur moyenne de leur côté de 20 cm, soit un périmètre de 80 cm, et la longueur d'onde sur la fréquence centrale de la bande RFID UHF (860-960) 910 MHz est égale à 32 cm dans le vide. Ceci implique que la répartition du courant sur l'antenne n'est plus constante. De ce fait, l'intensité du champ magnétique est fortement dégradée. En effet, le courant s'annule à chaque demi-longueur d'onde tout en changeant de sens.

Les tags UHF champ proche peuvent avoir des dimensions très réduites par rapport aux tags HF. En revanche, coté lecteur, la boucle telle quelle ne va pas pouvoir être utilisée à cause de cette distribution non uniforme du courant la parcourant.

II.2. Technique de segmentation utilisée pour la réalisation de l'antenne lecteur UHF champ proche:

Pour assurer un bon couplage avec l'antenne du tag et éviter des régions de lectures mortes (régions où le tag n'est pas activé), l'antenne lecteur doit générer un champ magnétique fort et assez uniforme autour de l'antenne.

La technique de segmentation est la plus utilisée dans la conception des antennes de type lecteur RFID-UHF en champ proche. Chaque segment génère un champ magnétique individuel. Ces segments sont disposés de telle sorte que les champs magnétiques individuels sont cumulés.

Le défi de la conception d'antennes pour les applications de lecteur RFID UHF à couplage inductif consiste à s'assurer que le courant est de même amplitude et en phase le long de la boucle, pour produire une distribution de champ magnétique forte et uniforme dans la région d'interrogation [1].

En segmentant l'antenne boucle, son périmètre devient supérieur à la longueur d'onde guidée afin d'avoir une répartition uniforme du courant. Par conséquent, un couplage capacitif apparaît entre les segments formant les deux contours, ainsi qu'entre les segments d'un même contour comme le montre la figure (IV.2)

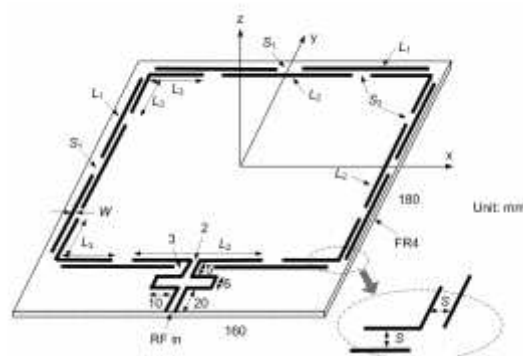


Figure IV.2 Configuration de l'antenne boucle segmentée [2].

Chapitre IV : Conception et réalisation d'une antenne lecteur pour les systèmes RFID UHF champ proche

Les antennes segmentées sont construites pour fonctionner à la fréquence de résonance souhaitée tout en assurant un bon couplage magnétique. [1]

Dans les articles [2,3] les auteurs présentent la conception d'antenne boucle segmentée pour des applications RFID UHF champ proche.

La figure IV.3 représente l'antenne en boucle segmentée réalisé sur un substrat FR4 [2,3]. Les dimensions totales de la boucle sont 16 cm par 18 cm. L'épaisseur de substrat $h = 0,5$ mm, la constante diélectrique $\epsilon_r = 4,4$ et la tangente de l'angle de perte $\tan \delta = 0,02$.

Les dimensions du prototype d'antenne représenté sur la figure IV.1-a sont :

$L1 = 60$ mm, $S1 = 10$ mm, $L2 = 58$ mm, $S2 = 12$ mm, $L3 = 24$ mm, $S = 0,5$ mm et $W = 2$ mm.

Cette antenne couvre une bande passante de 240 MHz, comme le montre la Figure IV.3-b.

La disposition des segments assure une répartition de courant constante le long de la boucle (Figure IV.3-c)

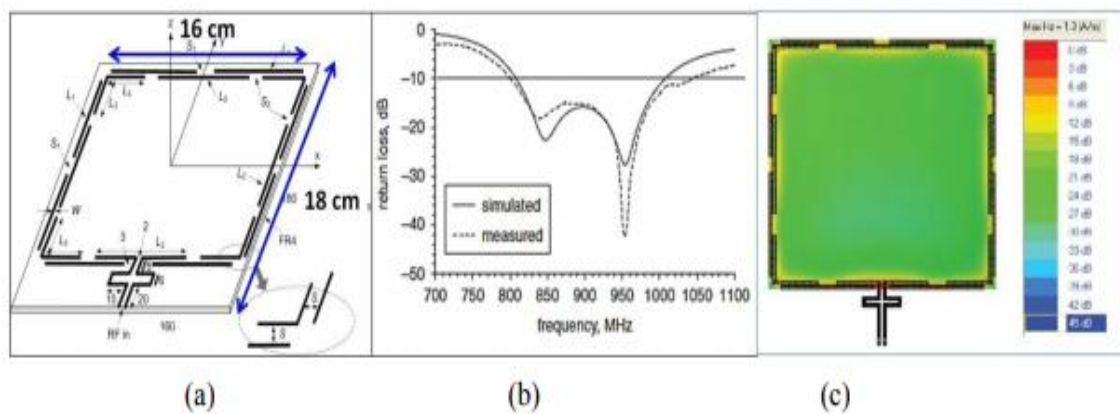


Figure IV.3: (a) antenne boucle segmentée, (b) bande passante de l'antenne, (c) répartition champ magnétique à 915 MHz à $z=0.5$ mm [2,3]

L'antenne est indiquée avec les paramètres géométriques suivants :

- ✓ $L1$ et $L2$: la longueur des sections de ligne segmentées externe / interne.
- ✓ $S1$ et $S2$: l'écart entre les lignes de la série externe / interne.
- ✓ S : la séparation entre les lignes parallèles.
- ✓ W : la largeur des lignes.

Le flux de courant unidirectionnel le long de l'antenne cadre peut être obtenu en optimisant ces paramètres. [2,3]

III. Conception d'une antenne lecteur RFID UHF champ proche :

Le calcul de la répartition du champ électromagnétique ne peut être trouvé de façon exacte que pour des structures d'antenne très simples, en milieu homogène et en zone lointaine. Le calcul analytique devient très complexe (sinon impossible) en zone proche pour des structures réelles. Des logiciels de simulation électromagnétique sont alors utilisés.

III.1 Le simulateur électromagnétique HFSS :

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un outil performant à onde électromagnétique (EM) commercial qui fait la simulation du champ d'un modèle arbitraires en 3D. Il intègre la simulation, visualisation, modélisation des solides, et l'automatisation dans un environnement facile à utiliser où les solutions des problèmes EM 3D sont obtenues rapidement et avec précision. HFSS emploie la méthode des éléments finis (FEM) [4].

Une croissance H.F.S.S peut être utilisée pour calculer des paramètres tels que les paramètres S, les fréquences de résonance et les champs. C'est un outil permettant le calcul du comportement électromagnétique d'une structure. Le simulateur possède des outils de post traitement pour une analyse plus détaillée.

III.1.1 Principe de fonctionnement de HFSS (High Frequency Structure Simulator):

Le simulateur HFSS permet de calculer :

- Les grandeurs de base : champ proche, champ lointain.
- Les impédances caractéristiques des ports et leurs constantes de propagation.
- Les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port spécifique.

Les Différents étapes d'utilisation du logiciel HFSS:

1. Préparation sur papier de la structure à simuler
2. Dessin de la structure : dimensions géométriques des différents objets. (Respect des règles de simulation)
3. Spécification des matériaux pour chaque objet. (Constantes diélectriques, conductivité des matériaux ...)
4. Identification des sources et (ou) ports d'entrée/sortie.
5. Spécification des conditions aux limites
6. Configuration des paramètres de simulation (les Fréquence(s), les paramètres...)
7. Analyse des solutions à une ou plusieurs fréquences.
8. Visualisation des résultats (Le champs, paramètres S (+ paramètres z, y etc.), diagramme de rayonnement)

III.1.2 Les avantages et les inconvénients de HFSS :

+ Les avantages de HFSS :

HFSS travaille sur plusieurs accessoires de communication ; on peut citer les guides d'ondes, les filtres, les câbles coaxiaux, les connecteurs et divers types d'antennes. La simulation effectue le calcul de plusieurs paramètres comme le coefficient de réflexion, champ électrique et magnétique et le rapport de transfert S qui est le rapport entre la puissance de sortie et la puissance fournie à l'entrée. Elle permet en plus la construction des graphes pour le diagramme de rayonnement des antennes et pour la variation des champs E et B. D'autres options sont valides comme la représentation animée de la variation des champs, et on pourra enregistrer cette animation sous un format vidéo AVI. [5]

+ Les inconvénients de HFSS :

- La création des structures géométriques compliquées peut prendre un temps assez long, même chose pour la définition de la fonctionnalité de chaque face et objet élémentaire.
- La modélisation des objets volumiques et surfaciques recommande une maîtrise d'utilisation des différents outils de base et leur manipulation par des opérations arithmétiques. Par exemple pour dessiner un objet caractéristique on doit effectuer des opérations booléennes comme add, subtract et unify.
- On doit faire attention à la définition des faces, et définir chacune selon sa fonctionnalité ; celle qui émule un conducteur électrique doit être définie par PERFECT E et la face considérée comme un conducteur magnétique sera définie comme PERFECT H...
- D'autre pour les structures combinées on doit paramétrer la dimension et les coordonnées d'une forme par rapport aux valeurs d'une autre ce qui recommande de l'utilisateur d'avoir une imagination et d'être doué pour les calculs d'espace et des dimensions
- Les conflits entre les faces géométriques provoquent l'arrêt de simulation avec une notification d'erreur. En fait HFSS utilise la forme différentielle des équations de Maxwell, et il est très important que chaque face projette un champ avec une distribution continue tout au long de sa surface et dont les vecteurs présentent une valeur unique
- Le processus de la simulation pourra prendre beaucoup de temps avant de produire les résultats et tracer les graphes ; ce qui augmente le coût de fabrication pour des projets industriels, et le délai de l'étude pour un projet universitaire. [5]

III.1.3 Modélisation par HFSS :

Dans ce travail, nous avons simulé l'antenne lecteur boucle RFID UHF passif. Nous avons choisi comme type d'antenne, l'antenne boucle segmentée étudiée dans les articles [2,3]. Il est difficile de retrouver les résultats présentés car les informations données sur la structure de l'antenne sont insuffisantes ; des détails importants sur la géométrie manquent. De plus le logiciel qu'ils ont utilisé pour faire la simulation électromagnétique est CST (Compter Simulation Technology) . Il est différent de celui que nous avons à notre disposition.

Nous avons refait la simulation de ce type d'antenne sous l'environnement HFSS avec une épaisseur de substrat FR4 différente 1,6 mm au lieu de 0,5 mm.

Chapitre IV : Conception et réalisation d'une antenne lecteur pour les systèmes RFID UHF champ proche

Nous avons donc modifié les paramètres géométriques de l'antenne en vue d'obtenir une résonance de l'antenne autour de 860 MHz.

Après plusieurs manipulations nous avons obtenu les résultats suivants:

Substrat	ϵ_r	L1	L2	L3	S	S1	S2	W	H
Epoxy FR4	4.4	60 mm	58mm	24mm	1mm	10mm	12mm	2mm	1.6mm

a) Modélisation par HFSS :

Le schéma de l'antenne selon HFSS est présenté dans la Figure (IV.4) :

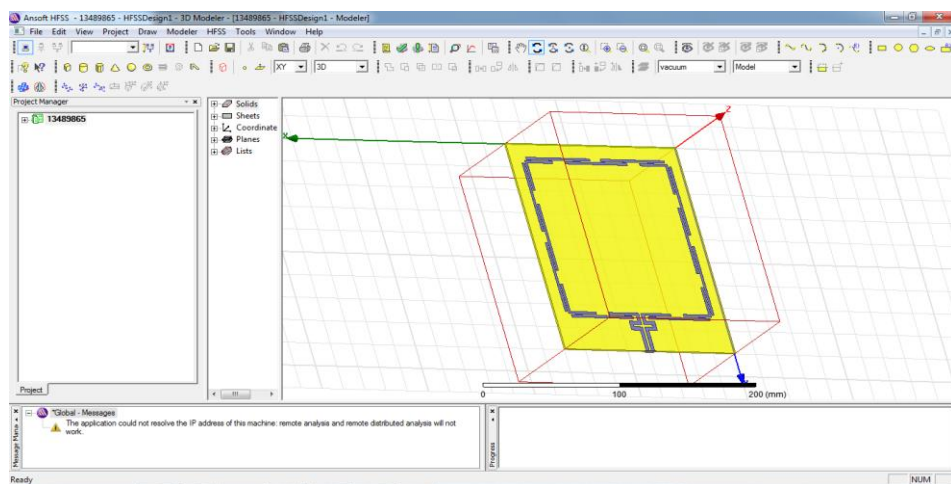


Figure IV.4 : antenne lecteur RFID UHF adapté à 881.7 MHz

b) Coefficient de réflexion :

La figure (4.5), représente la variation du coefficient de réflexion S_{11} à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence f . Nous avons mis en évidence la bande passante à -10 dB.

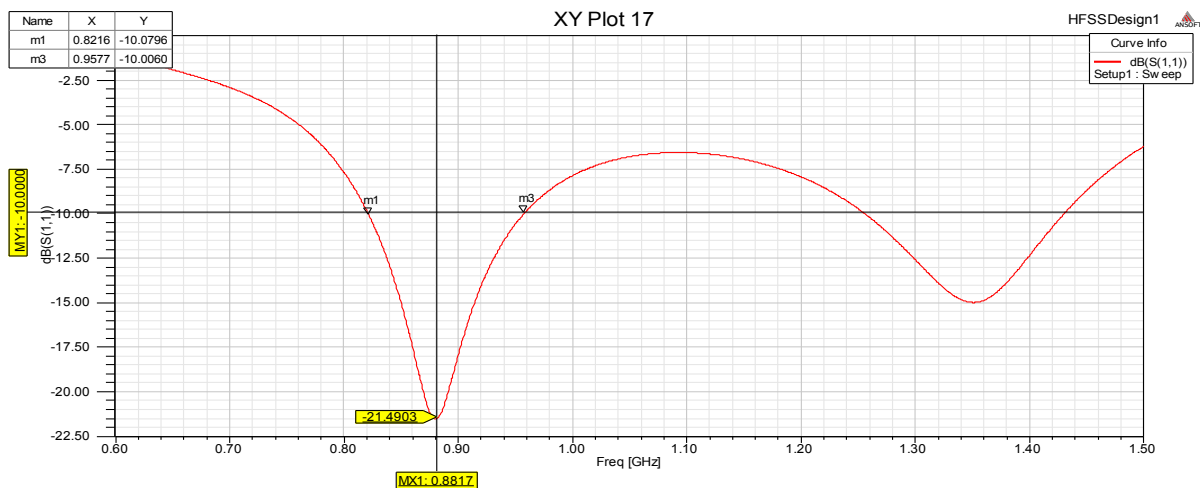


Figure IV.5 : la variation du coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne.

La fréquence de résonance correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible.

Une autre façon de définir la bande passante d'une antenne consiste à considérer le coefficient de réflexion S_{11} , ainsi et de manière générale, la bande passante correspond à la plage de fréquence pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur de -10dB.

D'après les résultats, l'antenne est adaptée à la fréquence 881.7 MHz produisant un coefficient S est de l'ordre de à -21.49 dB à cette fréquence. La bande passante est [957.7-821.6] MHz ou 136.1MHz.

c) le diagramme de rayonnement :

La figure (IV.6) représente le diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne tracé pour la fréquence 881.7 MHz

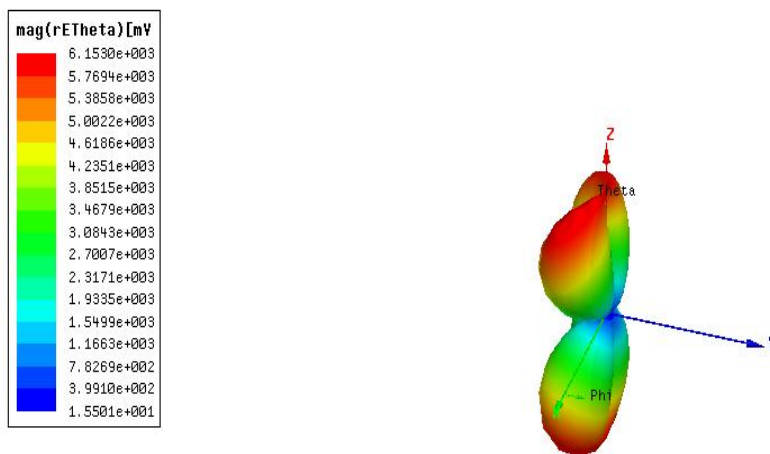


Figure IV.6: Diagramme de rayonnement en 3D

La figure IV.7 illustre les diagrammes de rayonnement de l'antenne à la fréquence 881.7 MHz

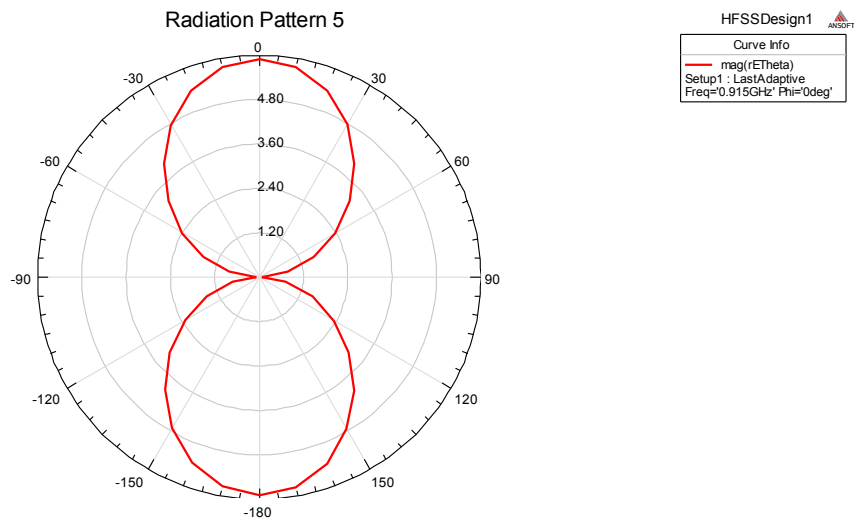


Figure IV.7 : Diagramme de rayonnement

d) le gain :

La figure (IV.8) représenté le gain totale de l'antenne lecteur RFID-UHF

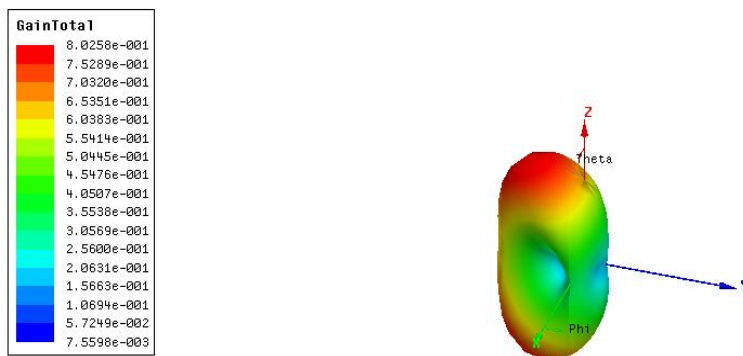


Figure IV.8: le gain total de l'antenne lecteur RFID-UHF

IV. Réalisation et mesure :

IV.1. Rappel sur les paramètres S :

Considérons le quadripôle suivant (figure IV.9) [6] :

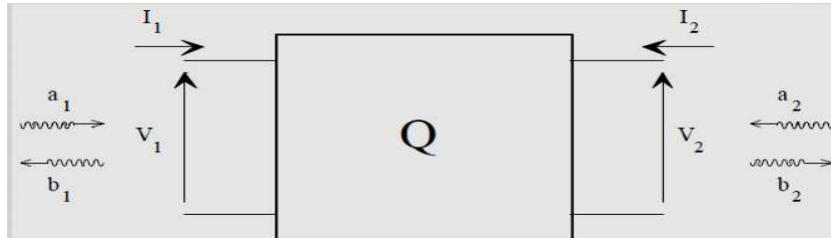


Figure IV.9 : Accès d'un quadripôle.

- ✓ a1 et b1 sont les ondes incidente et réfléchie à l'accès1
- ✓ a2 et b2 sont les ondes incidente et réfléchie à l'accès2

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}$$



Paramètres S

Les paramètres S caractérisant ce quadripôle sont définis par :

$$S_{11} = \frac{\text{signal réfléchi au port 1}}{\text{signal incident au port 1}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad \text{Coefficient de réflexion en entrée}$$

$$S_{21} = \frac{\text{signal transmis au port 2}}{\text{signal incident au port 1}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad \text{Coefficient de transmission entrée-sortie}$$

$$S_{12} = \frac{\text{signal transmis au port 1}}{\text{signal incident au port 2}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad \text{Coefficient de transmission sortie-entrée}$$

$$S_{22} = \frac{\text{signal réfléchi au port 2}}{\text{signal incident au port 2}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad \text{Coefficient de réflexion en sortie}$$

IV.2 Les mesures et les calculs :

IV.2.1 L'antenne lecteur RFID-UHF :

La figure IV.10 montre l'antenne lecteur boucle segmentée réalisée pour des applications RFID UHF zone proche.

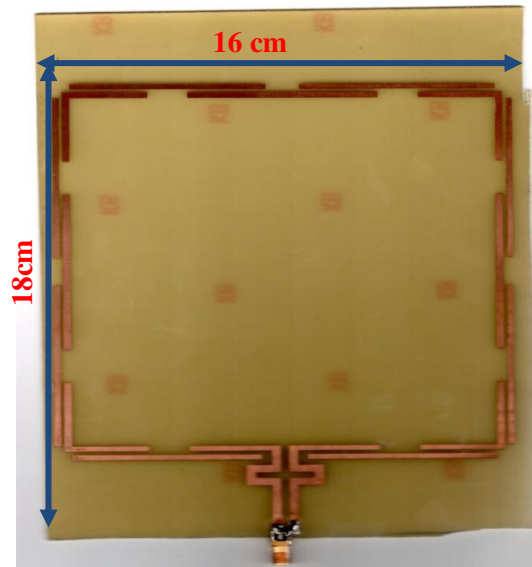


Figure (IV.10) : l'antenne lecteur RFID-UHF

IV.2.2 Mesure du coefficient de réflexion :

La mesure de coefficient de réflexion (S_{11}) d'une antenne est réalisée à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA : Vectorial Network Analyser) Protec300.

Ce paramètre S_{11} est exprimé en décibel (dB).) comme c'est indiqué dans la figure (IV.11)

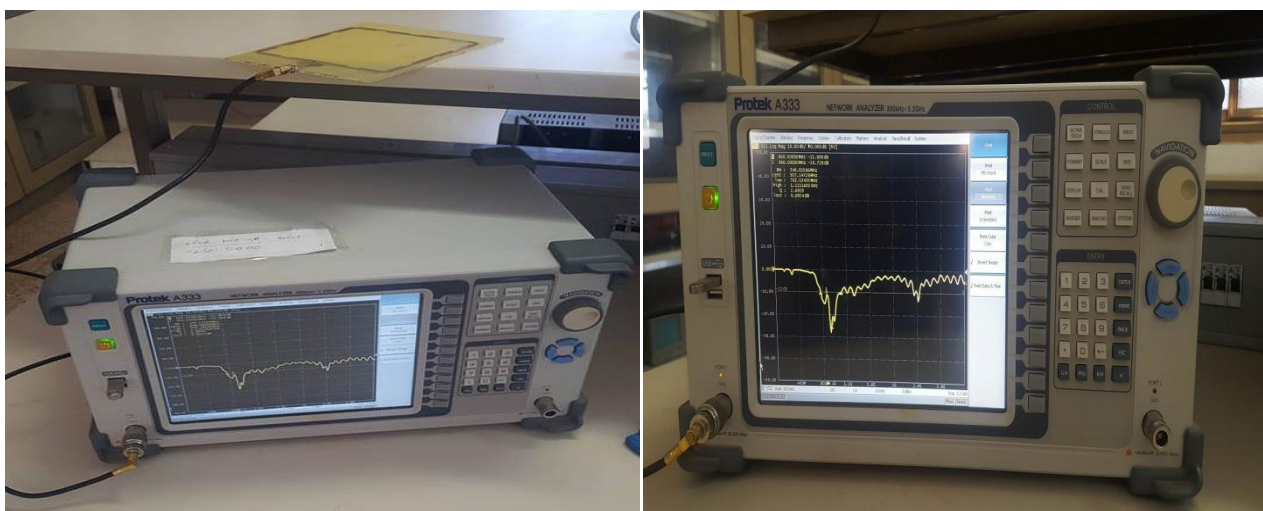


Figure IV.11 l'antenne lecteur RFID-UHF connecté au VNA

La figure IV.12 représente la courbe de variation de coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour l'antenne.

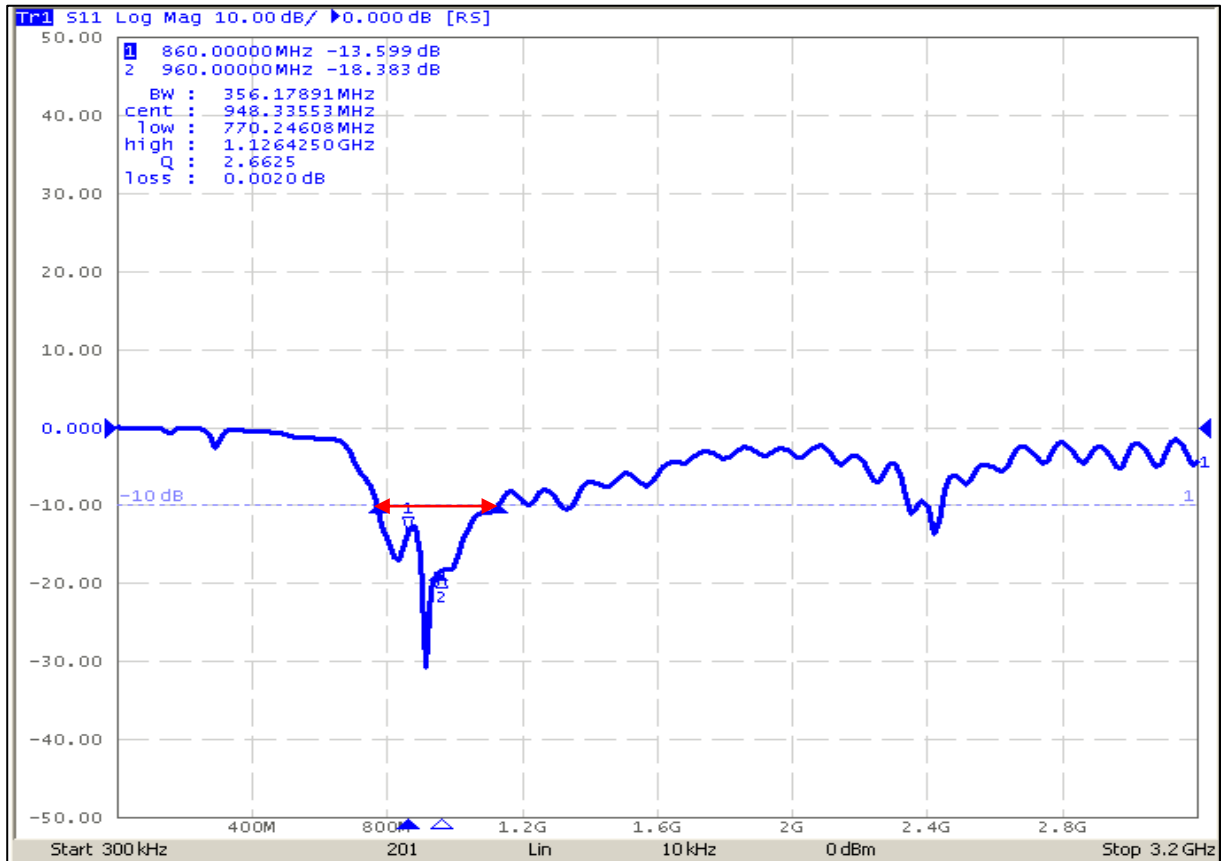


Figure IV.12 : la variation de coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

La Figure IV.12 montre le coefficient de réflexion S11 de l'antenne en fonction de la fréquence f. Les résultats pratiques sont en accord avec ceux de la simulation avec HFSS.

Le seuil utilisé pour juger de l'adaptation est -10 dB. L'adaptation est meilleure pour la fréquence 948.33 MHz ; le coefficient de réflexion S11 est égal à -32dB.

IV.2.3 Les calculs:

L'antenne lecteur RFID UHF zone proche ainsi réalisée fonctionne sur une plage de fréquence de 860 à 960 MHz comme le montre la Figure IV.12.

La Fréquence de résonance d'une antenne lecteur RFID UHF est de 948.33MHz

$$\lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \lambda(m) = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{948.33 \cdot 10^6 \text{ Hz}} \Rightarrow \lambda = 31.63 \text{ m}$$

- Largeur de la bande de fréquence (-10dB) :

$$BW = (f_H - f_L) = [1.126\text{Ghz} - 770.24\text{Mhz}] \quad BW = 356.17 \text{ Mhz}$$

$BW = (f_h - f_l) \geq$ à 25% de la fréquence centrale f_c .

$$BW(\%) = 100 \frac{(f_H - f_L)}{f_c}$$
$$BW(\%) = 100 \frac{(1.126 - 770.24)}{948.33}$$

$BW(\%) = 37.55\%$

IV.2.4 commentaire sur les résultats des mesures :

On observe que les résultats sont proches de ceux obtenus par les simulations et la largeur de bande est celle recherchée. La variation de S11 mesuré en fonction de la fréquence dans la bande [1.126Ghz, 770.24Mhz] a montré que cette structure possède la fréquence de résonance: $f_r=948.33\text{MHz}$.

On remarque aussi que les valeurs de fréquences de résonance mesurées sont très proches de celles simulées. De plus, on a constaté que la valeur de coefficient de réflexion pour la fréquence de résonance est très peu différente de celle qui a été obtenu par simulation

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation et réalisation de l'antenne lecteur RFID UHF en champ proche. Dans la première partie nous présentons l'antenne lecteur RFID UHF en champ proche. Nous donnons leurs caractéristiques et la technique de segmentation. Ensuite, nous avons simulé l'antenne lecteur RFID UHF en champ proche avec logiciel électromagnétique HFSS. Dans le deuxième partie nous présentons les réalisations et les mesures effectuées de l'antenne lecteur RFID UHF, on été utilisés l'instrument : l'analyseur de réseau vectoriel PROTEK A333 dans la bande de fréquence [300 MHz - 3.2 GHz] pour les mesures des paramètres S. les fréquences de fonctionnement, la bande passante ont été mesurés. Les résultats de mesure sont comparés aux résultats théoriques ou de simulation.

Conclusion générale :

Dans ce travail de mémoire nous nous sommes intéressés aux antennes pour les systèmes RFID UHF zone champ proche. Cette technologie commence à être fortement utilisée à cause de la taille réduite des tags RFID UHF, leur coût de fabrication modéré, la facilité des procédés de réalisation et le débit élevé. Jusqu'à présent, on utilisait la bande UHF pour des applications longue portée comme le contrôle des chaînes de production ou des capteurs. L'antenne est l'élément clé entre les composants du système RFID garantissant la bonne transmission des données dans les deux sens. La partie post antenne des systèmes RFID UHF champ proche dans la chaîne de transmission du lecteur demeure identique à celle du système RFID UHF standard.

Dans ce projet de fin d'études, nous avons tenu à étudier, concevoir et fabriquer une antenne lecteur RFID UHF champ proche.

Ce mémoire comprend quatre parties. Dans le premier chapitre, les principes généraux et les applications courantes de la technologie RFID ont été présentés.

Le deuxième chapitre a été dédié aux propriétés et caractéristiques générales des antennes. Nous avons rappelé quelques notions sur les paramètres des antennes (diagramme de rayonnement, polarisation, coefficient de réflexion, impédance d'entrée, gain...). La distribution du champ électromagnétique autour de l'antenne est également analysée. Les antennes dipôle élémentaire et boucle élémentaire ont été traités. Ces rappels ont permis nous l'espérons, de faciliter la compréhension des phénomènes mis en évidence dans ce travail de mémoire.

Par la suite, dans le troisième chapitre, nous avons présentés les caractéristiques d'un système RFID UHF en champ proche et champ lointain. Les zones de fonctionnement de ce système et les critères d'évaluation de la liaison entre émetteur et récepteur sont exposés. Les critères de performance notamment la zone de lecture et la portée sont présentés. Et enfin nous avons présenté l'état de l'art sur la caractérisation des systèmes RFID passifs en zone de champ proche et en zone de champ lointain.

Finalement, dans le quatrième chapitre nous avons présenté l'antenne lecteur RFID UHF en champ proche que nous avons réalisée sur un substrat FR4. C'est une antenne boucle segmentée fonctionnant autour de 900 MHz. Nous l'avons simulée avec le logiciel de modélisation électromagnétique HFSS (High Frequency Structure Simulator) et réalisée. L'analyseur de réseau vectoriel PROTEK A333 fonctionnant dans la bande de fréquence [300MHz - 3.2 GHz] a été utilisé pour la mesure du coefficient de réflexion (paramètre S11) et la bande passante. Les résultats de mesure sont en accord avec la simulation.

- Analyseur de réseau vectoriel (VNA) :

L'analyseur de réseau est un appareil qui permet la mesure de la réponse harmonique de quadripôles linéaires, c'est-à-dire dont les signaux de sortie et d'entrée sont sinusoïdaux et de même fréquence. A cause des phénomènes de propagation d'ondes électromagnétiques, la notion de tension ou de courant perd de son sens en haute fréquence ; la mesure de la réponse harmonique ne se fait donc pas par l'intermédiaire d'une fonction de transfert classique s/e , mais par l'intermédiaire des paramètres S qui caractérisent la réflexion et la transmission des ondes sur chacun des accès (ou "ports") du quadripôle. L'analyseur est vectoriel car il donne accès au module et à la phase de ces paramètres, contrairement à un analyseur scalaire qui ne donne que l'information du module.

Schéma de principe d'un analyseur de réseaux vectoriel

Nous avons vu lors des rappels précédents qu'il est nécessaire pour pouvoir calculer les paramètres S de connaître les signaux réfléchis et transmis mais aussi le signal incident. La figure 3.3 montre un schéma simplifié du prélèvement des signaux

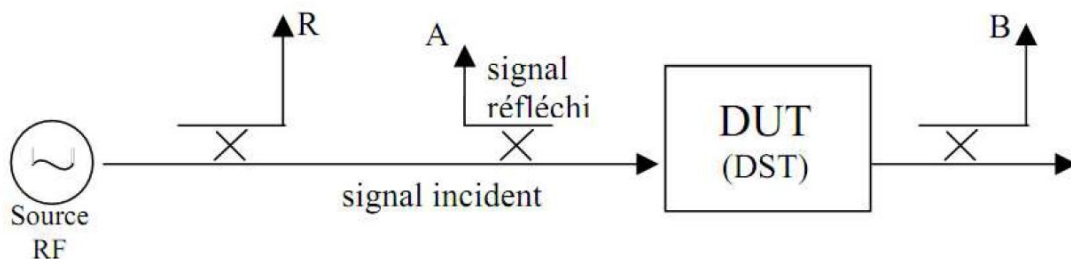


Figure 1: Schéma de base de la mesure des différents signaux.

Le signal émis par une source RF est divisé en deux (en général à l'aide d'un diviseur Wilkinson). La partie prélevée servira de référence (R). L'autre partie attaque le DUT. Une partie est réfléchie et l'autre est transmise (en supposant que le quadripôle est sans perte). A l'aide de coupleurs, nous décrivons une portion des signaux (A et B).

A partir de ces signaux, il est possible de calculer les paramètres S du DUT par les formules suivantes :

$$S_{11} = \frac{A}{B} \quad S_{21} = \frac{B}{R}$$

Pour obtenir les deux autres, on «retourne» les entrées et les sorties.

L'ensemble du travail effectué par l'analyseur est représenté sur le schéma suivant (figure2)

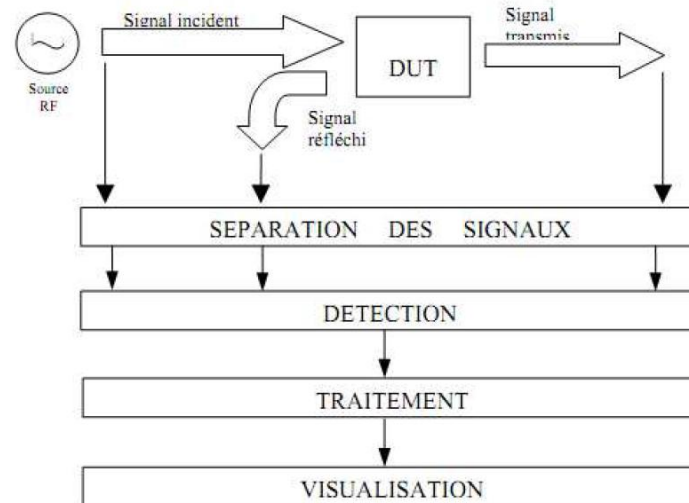


Figure 2 : Schéma de principe d'un analyseur de réseaux vectoriel

En résumé la première étape est de séparer les signaux (à l'aide des coupleurs) puis de mesurer le module et la phase des signaux et enfin la dernière étape est de traiter les données ainsi mesurées (passage domaine temporel, échelle dB,...) à l'aide d'un processeur.

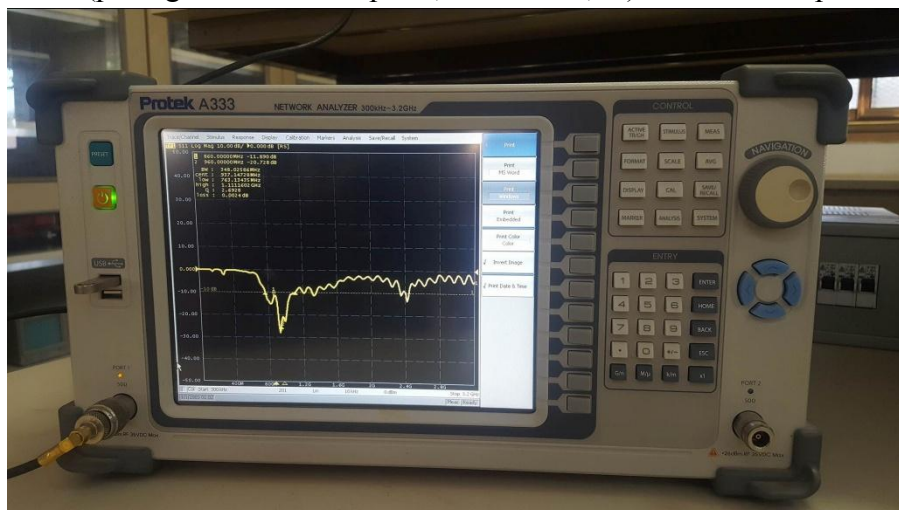


Figure 3 : Analyseur de réseau vectoriel PROTEK A333

L'analyseur de réseau A333 a été développé et fabriqué par la société GS Instrument. Il offre la meilleure résolution en fréquence et l'interface utilisateur la plus conviviale de tous les analyseurs dans cette bande de fréquence. GSI, développe des appareils de mesures et des composants RF depuis plus de 36 ans.

Caractéristiques :

- Gamme de fréquence : 300 KHz à 3.2 GHz
- Impédance : 50 Ohm (75 Ohm)
- Test ports : 2 x type N
- Précision en fréquence : +/- 5ppm
- Résolution en fréquence : 1 MHz
- Nombre de points de tests : 2 à 10001
- Temps de mesure par point : 125 μ s
- IF Band-width : 1 Hz à 30 KHz
- Dynamique de mesure IF BW 10 Hz : 2 à 3200 MHz > 125 dB
- Test port output : -45 à +10 dBm
- Précision : inférieure à 1.0 dB
- résolution : 0.05 dB
- Ecran 10.4 " TFT couleur, tactile
- Disque Dur.
- Interfaces RS 232, 2 x USB, LAN, Imprimante, Vidéo, Clavier/souris
- Dimensions : 426 x 266 x 300 mm

Calibration :

Il est impossible de mesurer directement les paramètres S_{ij} d'un dispositif quelconque, mais seulement des paramètres globaux faisant aussi intervenir, les lignes coaxiales d'amenée et les différents connecteurs. C'est le rôle de l'étalonnage (ou "calibration") de supprimer les contributions parasites afin de ne conserver que la contribution du dispositif seul.

La méthode la plus utilisée est dite "OSL" (de l'anglais "Open -Short-Load") : elle consiste en la mesure de la réponse en fréquence d'un circuit ouvert, d'un court-circuit et d'une charge adaptée (50 ohm+). Ces étalons sont mesurés successivement et les mesures obtenues pour ces éléments de référence sont stockées dans l'analyseur. Ensuite lors de la mesure d'un dispositif inconnu, ces mesures seront automatiquement soustraites de la mesure pour ne conserver que la réponse du dispositif. Ceci étant fait, la dernière étape automatique de calcul permet de définir un "plan de référence" électrique (figure ci-dessus).

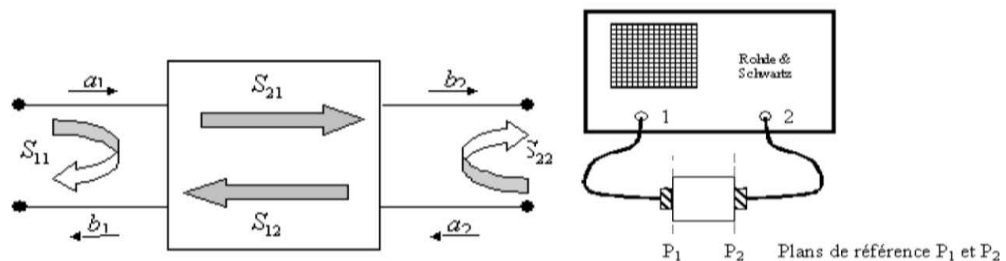


Figure 4 : principe de fonctionnement Analyseur de réseau vectoriel

- **Source:**

- [https://www.rohde-schwarz.com/us/product/fs300_fs315-powerslave_63491-9010.html]
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyseur_de_spectre]

- Liste des figures et tableaux -

- Chapitre I : Généralités sur la technologie RFID.

Figure I.1 : Modèle d'identification par radio fréquence développé par Crump.....	5
Figure I.2: Système RFID par couplage magnétique.....	5
Figure I.3 : Système d'identification développé par Sandia National Laboratories	6
Figure I.4 : les phases de développement de la technologie RFID	7
Figure I.5 : Relation maître-esclave dans la communication RFID	8
Figure I-6 : tag(s) passant dans la zone d'interrogation d'un lecteur portable.....	9
Figure I-7 : tag(s) passant dans la zone d'interrogation d'un lecteur fixe	9
Figure I.8 : alimentation de tag passif.....	10
Figure I.9 : Transmission des données vers le lecteur	11
Figure I.10 : Principales caractéristiques des tags passifs RFID dans les trois bandes de fréquences les plus utilisées.....	12
Figure I.11: Classification des tags	13
Figure I.12 : Principe de fonctionnement d'un système RFID	13
Figure I.13: Schéma fonctionnel du récepteur RFID.....	14
Figure I.14 : Structure d'un tag RFID.....	15
Figure I.15 : Définition des zones de champs.....	16
Figure I.16 : Configuration en zone proche et en zone lointaine.....	17
Figure I.17 : Architecture d'un lecteur RFID UHF.....	19
Figure I.18 : chaîne d'émission d'un lecteur RFID UHF classique.....	20
Figure I.19 : chaîne de réception d'un lecteur RFID UHF classique.....	20
Figure I.20 Schéma fonctionnel d'une puce RFID.....	21
Figure I.21 : Schéma bloc fonctionnel du front end radio d'un tag RFID UHF.....	22
Figure I.22 : Le dispositif de paiement Pidion BIP-1300.....	24
Figure I.23 : Les cartes de fidélité peuvent être renouvelées par le système RFID.....	24
Figure I.24 : La RFID dans les transports en commun.....	25
Figure I.25 : La RFID est présente dans les documents d'identité.....	25
Figure I.26: Un tag pour chaque personne au sein de l'hôpital.....	26
Figure I.27 : Le RFID peut s'implanter dans le corps humain.....	26
Figure I.28 : La RFID permet de faciliter la logistique.....	27

Figure I.29 : Suivre l'activité de son chien à distance.....	27
--	----

Les tableaux :

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques des bandes de fréquences dédiées à la RFID.....	8
--	---

Tableau 1.2 : Classement des tags RFID par le champ de rayonnement.....	18
---	----

- Chapitre II : Propriétés et caractéristiques générales des antennes

Figure II.1 : Système des coordonnées pour l'analyse d'antenne.....	32
Figure II.2 : Tracé du diagramme en puissance et caractérisation des lobes	33
Figure II.3 Exemples de diagramme de rayonnement d'antenne	34
Figure II.4 : Représentation de la rotation dans le temps du vecteur champ électromagnétique d'une onde plane dans le plan xy ($E_z = 0$).....	35
Figure II.5 : Illustrations des régions du champ électromagnétique d'une antenne.....	38
Figure II.6 : Illustration d'antennes d'émission et de réception.....	39
Figure II.7 : Schémas équivalents d'une antenne en: (a) Transmission et (b) Réception.....	40
Figure II.8 : Approximation géométrique des rayons R et r pour la définition des limites de zones de champ d'une antenne.....	43
Figure II.9 : Représentation de l'orientation des composantes de champ électrique d'un dipôle infinitésimal en coordonnées sphériques.....	46
Figure II.10 : Représentation du flux d'énergie proche de l'antenne dipôle.....	50
Figure II.11 : Champ rayonné par une boucle.....	50
Figure II.12 : Diagramme de rayonnement de la boucle élémentaire.....	52

Les tableaux

tableau II.1 : Les limites de la zone de champ proche réactif, champ proche radiatif et champ lointain.....	45
---	----

- Chapitre III : Caractérisation des systèmes RFID UHF champ proche

Figure III.1: Différentes zones de fonctionnement de la RFID UHF champ proche.....	57
Figure III.2: Principe du couplage inductif.....	59
Figure III.3: Mécanisme de couplage dans les systèmes RFID.....	59
Figure III.4 – Modèle utilisé par Buffi et al	63

Chapitre IV : Conception et réalisation d'une antenne lecteur pour les systèmes RFID UHF champ proche

Figure IV.1 Antenne boucle carrée pour une application RFID.....	68
Figure IV.2 Configuration de l'antenne boucle segmentée	69
Figure IV.3: (a) antenne boucle segmentée, (b) bande passante de l'antenne, (c) répartition champ magnétique à 915 MHz à $z=0.5$ mm.....	70
Figure IV.4 : antenne lecteur RFID UHF adapté à 881.7 MHz.....	73
Figure IV.5 : la variation du coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne.....	73
Figure IV.6: Diagramme de rayonnement en 3D.....	74
Figure IV.7 : Diagramme de rayonnement.....	75
Figure IV.8: le gain total de l'antenne lecteur RFID-UHF.....	75
Figure IV.9 : Accès d'un quadripôle.....	76
Figure IV.10 : l'antenne lecteur RFID-UHF.....	77
Figure IV.11 l'antenne lecteur RFID-UHF connecté au VNA.....	77
Figure IV.12 : la variation de coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.....	78

Résumé :

La technologie d'identification par radiofréquence (RFID) a eu un essor très important ces dernières années notamment grâce à sa configuration polyvalente et aux innombrables possibilités d'intégration offertes par cette technologie.

Un système RFID est caractérisé par une station de base ou lecteur cherchant identifier des objets, et d'un tag inséré au niveau de ces objets. Dans ce travail de mémoire nous nous sommes intéressés aux antennes pour les systèmes RFID UHF zone champ proche. Cette technologie commence à être fortement utilisée à cause de la taille réduite des tags RFID UHF, leur coût de fabrication modéré, la facilité des procédés de réalisation et le débit élevé.

Une antenne lecteur boucle segmentée fonctionnant autour de 900 MHz a été étudiée, simulée avec le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator) et réalisée sur un substrat FR4. L'analyseur de réseau vectoriel PROTEK A333 fonctionnant dans la bande de fréquence [300 MHz - 3.2 GHz] a été utilisé pour la mesure du coefficient de réflexion (paramètre S11) et la bande passante. Les résultats de mesure sont en accord avec la simulation.