

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان  
Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen  
كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie  
Département de Télécommunications (TLL)  
UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN



## Projet de fin d'étude

Présenté à :

FACULTE DE TECHNOLOGIE- DEPARTEMENT DES TELECOMMUNICATIONS

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN TELECOMMUNICATIONS

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par :

- BOUHENNA DAOUD

- SAFI CHAHINEZ

le thème

---

### Étude et conception d'une antenne capteur RFID-UHF PASSIF

---

Soutenu publiquement le 19 septembre 2020 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme. Belhadef Yamina	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M. Abdellaoui Ghouti	MCB	Essat. Tlemcen	Examinateur
Mme. Gourari Fatima Zohra	MCB	Univ. Tlemcen	Encadreur

## *Avant Propos*

# الحمد و الشكر لله

## *REMERCIEMENTS*

Le travail présenté dans ce PFE a été réalisé au laboratoire de recherche «LTT» du département de Télécommunication, faculté de technologie à l'Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Je tiens à exprimer mon profond respect et mes remerciements les plus sincères à mon encadreuse, Mme. GOURARI FATIMA ZOHRA maitre de conférence classe B à l'Université de Abou-Bekr Belaïd, pour m'avoir guidé durant mon travail avec une disponibilité incessante.

J'exprime ma profonde gratitude à Mme. BelhadeF Yamina maitre de conférence classe A à l'université de Abou-Bekr Belaïd qui a honoré notre travail en acceptant la présidence du jury.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs les membres du jury : Mr.abdellaoui Ghouti maitre de conférence classe B à l'école supérieur des sciences technique Tlemcen pour avoir accepté d'examiner mon travail et pour leurs remarques enrichissantes.

Enfin, j'adresse mes remerciements à mes collègues mes amis et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

*Nous dédions ce travail aux êtres les plus chers*

*Dédicace 1 :*

*A mes parents « Hafida , Ali »*

*A*

*Mes chères sœurs « Zineb , Ikram , Aya , Kawther »*

*A*

*Mon frère « Mohammed Essadique »*

*A*

*Ma Binôme : Safi chahinez*

*A*

*Tous ceux qui me sont chers « Ines , Rabah, Bachir , Habali ..... »*

*Dédicace 2 :*

*Je dédie ce modeste travail de recherche à ma petite famille  
qui m'a accompagnée et m'a soutenue tout au long de ma  
formation.*

*Je commence tout d'abord avec mes parents :*

*A mon chère papa Mohammed en signe d'amour et de  
gratitude et que je ne remercierai jamais assez de m'avoir  
procuré tout ce dont j'avais besoin*

*A ma chères mère Fatima. Vous êtes considéré comme ma  
vie, les mots ne seront jamais suffisant pour décrire mon amour  
que j'ai pour elle. Elle tous pour moi, elle nous a grandis,  
souffert et combattu le monde pour nous rende heureux  
A mon chère frère Kaddour qui m'a vraiment aidé dans mon  
chemin difficile.*

*A mes chères sœurs : Kaltoum, Esma, Amina.*

*A mes chères frères : Abdjelil, Zakaria.*

*Sans oublier mon binôme Daoud qui m'a partagé les bons  
moments et belles souvenir et ses parents.*



## **Résumé:**

Depuis l'ère industrielle, les sociétés ne cessent de faire des avancées technologiques considérables afin de combler nos besoins et d'améliorer notre confort. A l'heure actuelle, il y a une volonté de tout contrôler ou dans une moindre mesure, de tout superviser de notre environnement proche. Pour y parvenir, le déploiement en masse de dispositifs dits « intelligents » capables d'acquérir, traiter et communiquer des données devient indispensable. Ceci est notamment rendu possible par la miniaturisation des composants électroniques, la diminution de leur consommation, l'identification par radiofréquence (RFID) apparaît comme une technologie ayant un rôle considérable à jouer.

Aujourd'hui la RFID n'est plus inconnue du grand public et cohabite désormais auprès d'autres technologies d'identification automatique plus ancienne telle que le code-barres.

Fort de ce constat, nous nous intéressons dans le cadre de ce projet de fin d'étude à la conception et la caractérisation des antennes capteur afin de contribuer à l'adoption de cette technologie dans des domaines très concurrentiels.

**Mots clés :** RFID UHF, tag, lecteur, Design, capteur.

**Abstract:**

Since the industrial era, societies have been making considerable technological advances to meet our needs and improve our comfort. Nowadays, there is a desire to control or, to a lesser extent, supervise everything in our immediate environment. To achieve this, the mass deployment of so-called "intelligent" devices capable of acquiring, processing and communicating data is becoming essential. This is made possible in particular by the miniaturisation of electronic components, the reduction in their consumption and radio frequency identification (RFID) appears to be a technology with a considerable role to play.

Today, RFID is no longer unknown to the general public and now coexists alongside other older automatic identification technologies such as barcodes.

With this in mind, this end-of-study project focuses on the design and characterisation of sensor antennas in order to contribute to the adoption of this technology in highly competitive fields.

**Key words:** UHF RFID, tag, reader, design, sensor.

## ملخص:

منذ العصر الصناعي، حققت الشركات تطورات تقنية كبيرة لتلبية احتياجاتنا وتحسين راحتنا. في الوقت الحالي، هناك رغبة في التحكم في كل شيء أو بدرجة أقل، الإشراف على كل شيء في بيئتنا المباشرة. ولتحقيق ذلك، يصبح النشر الشامل لما يسمى بالأجهزة "الذكية" القادرة على الحصول على البيانات ومعالجتها ونقلها أمرًا ضروريًا. أصبح هذا ممكنًا على وجه الخصوص من خلال تصغير المكونات الإلكترونية، وتقليل استهلاكها، ويبدو أن تحديد التردد اللاسلكي (RFID) هي تقنية لها دور كبير تلعبه.

اليوم، لم يعد RFID غير معروف لعامة الناس ويتعايش الآن مع تقنيات التعريف الأوتوماتيكية القديمة الأخرى مثل الرموز الشريطية.

بناءً على هذه الملاحظة، نحن مهتمون، في إطار مشروع نهاية الدراسة هذا، بتصميم وتوصيف هوائيات الاستشعار من أجل المساهمة في اعتماد هذه التكنولوجيا في مجالات تنافسية للغاية.

**كلمات البحث:** UHF RFID، بطاقة قارئ، تصميم، جهاز استشعار.

## Table des Matières

<b>REMERCIEMENT</b> .....	<b>I</b>
<b>Dédicace</b> .....	<b>II</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ملخص</b> .....	<b>VI</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b> .....	<b>X</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I</b> .....	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2 Contexte de la RFID</b> .....	<b>4</b>
<b>I.3 Évolution des systèmes RFID</b> .....	<b>7</b>
<b>I.4 Bandes de fréquences RFID</b> .....	<b>9</b>
<b>I.4.1 Bande basse fréquence (BF)</b> .....	<b>9</b>
<b>I.4.2 Bande haute fréquence (HF)</b> .....	<b>10</b>
<b>I.4.3 Bande Ultra Haute Fréquence ( UHF)</b> .....	<b>10</b>
<b>I.4.4 Bande des micro-ondes ou Super haute Fréquence (SHF)</b> .....	<b>10</b>
<b>I.5 Les étiquettes RFID</b> .....	<b>12</b>
<b>I.5.1 Les Tags actives</b> .....	<b>13</b>
<b>I.5.2 Les Tags Passifs</b> .....	<b>14</b>
<b>I.5.3 Étiquettes semi-passives</b> .....	<b>15</b>

<b>I.5.4 Composants de la mémoire des étiquettes RF</b> .....	<b>16</b>
<b>I.6 Les lecteurs RFID</b> .....	<b>17</b>
<b>I.6.1 Couplage magnétique : (Champ proche)</b> .....	<b>18</b>
<b>I.6.2 Couplage électromagnétique :( Champ lointain)</b> .....	<b>19</b>
<b>I.7 Applications RFID</b> .....	<b>19</b>
<b>I.8 conclusion</b> .....	<b>20</b>
<b>Chapitre II</b> .....	<b>21</b>
<b>II.1 Introduction</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2 Définition d'un capteur</b> .....	<b>22</b>
<b>II.3 Rôle de capteur RFID</b> .....	<b>23</b>
<b>II.4 les caractéristiques de capteur</b> .....	<b>23</b>
<b>II.5 Classification des capteurs</b> .....	<b>23</b>
<b>II.6 Les différents types de capteurs</b> .....	<b>24</b>
<b>II.6.1 capteur RFID UHF passif</b> .....	<b>24</b>
<b>II.6.2 Capteurs RFID numérique</b> .....	<b>24</b>
<b>II.6.2.1 capteur RFID interne</b> .....	<b>25</b>
<b>II.6.2.2 capteur RFID externe</b> .....	<b>26</b>
<b>II.6.2.3 Capteur-RFID par l'ajout d'un microcontrôleur</b> .....	<b>27</b>
<b>II.6.2.4 Capteur-RFID par l'ajout d'un composant externe</b> .....	<b>28</b>
<b>II.6.3 Capteurs RFID analogique (avec fonctionnalisation)</b> .....	<b>29</b>
<b>II.6.3.1 Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un simple tag-RFID</b> .....	<b>32</b>
<b>II.6.3.2 Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un substrat sensible</b> .....	<b>32</b>
<b>II.7 Conclusion</b> .....	<b>33</b>

<b>Chapitre III .....</b>	<b>34</b>
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>35</b>
<b>III.2 Notions Fondamentales .....</b>	<b>36</b>
<b>III.2.1 Éléments de Théorie des antennes RFID .....</b>	<b>36</b>
<b>III.2.1.1 Notion d'Adaptation/ Désadaptation d'impédance .....</b>	<b>36</b>
<b>III.2.1.2 Le coefficient de Réflexion et de Transmission.....</b>	<b>37</b>
<b>III.2.1.3 Notions de Gain et de directivité d'une antenne dipôle .....</b>	<b>38</b>
<b>III.2.1.4 Notion de Polarisation .....</b>	<b>39</b>
<b>III.2.1.5 Qu'est-ce que la distance théorique de lecture .....</b>	<b>40</b>
<b>III.2.2 Notion de permittivité diélectriques.....</b>	<b>41</b>
<b>III.2.2.1 Choix d'un bio-polymère comme matériau sensible .....</b>	<b>42</b>
<b>III.3 Design, optimisation et simulation .....</b>	<b>42</b>
<b>III.3.1 Outils de simulation : CST Microwaves Studio.....</b>	<b>43</b>
<b>III.3.2 Présentation du design de l'antenne .....</b>	<b>44</b>
<b>III.3.3 Étude paramétrique et optimisation de l'antenne capteur-RFID.....</b>	<b>45</b>
<b>III.3.3.1 Étude paramétrique de la zone de dépôt .....</b>	<b>45</b>
<b>III.3.3.2 Repliement de l'antenne dipôle .....</b>	<b>48</b>
<b>III.3.3.3 Diagramme de rayonnement et le rapport d'onde stationnaire de l'antenne capteur .....</b>	<b>49</b>
<b>III.4 Conclusion .....</b>	<b>50</b>
<b>CONCLUSIONS GENERALE.....</b>	<b>51</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>52</b>
<b>Abréviations .....</b>	<b>56</b>

## Table des Illustration

### Chapitre I

#### Figures

Figure. I.1 : Composantes d'un système RFID typique .....	5
Figure. I.2 : Portions du spectre électromagnétique RF pour les systèmes RFID conventionnels.....	11
Figure. I.3 : Exemple d'étiquette RFID montrant le circuit intégré CI et son antenne bobine. ....	13
Figure. I.4 : Modèle de communication RFID actif; les étiquettes transmettent les signaux RF modulés de données à leur lecteur .....	14
Figure. I.5 : Modèle de communication RFID passif ; les étiquettes tirent leur puissance opérationnelle de leur lecteur .....	15
Figure. I.6 : Exemple d'étiquettes passives .....	15
Figure. I.7 : Modèle de communication RFID semi-passif.....	16
Figure. I.8 : Exemple d'étiquettes semi-passives .....	16
Figure. I.9 : Exemple d'un lecteur RFID .....	18
Figure. I.10 : Couplage magnétique (champ proche) pour alimenter un transpondeur .....	19
Figure I.11: Applications de la RFID.....	20

#### Tableaux

Tableau I.1 : Analyse comparative des étiquettes RFID et des codes à barres .....	6
Tableau I.2 : Calendrier historique des technologies et des efforts liés au développement de la RFID .....	8
Tableau I.3 : Bandes de fréquences utilisées pour les systèmes RFID .....	9
Tableau I.4 : Résumé des systèmes RFID avec différentes fréquences de fonctionnement...	11

## Chapitre II

### Figures

Figure II.1 : Schéma présentative d'un capteur .....	22
Figure II.2 : Répartition des déférents types de capteur-RFID UHF .....	24
Figure II.3 : a) système Radio Figner tip de détection thermique, b) tag capteur interne. ....	26
Figure II.4 : Différentes méthodes d'alimentation d'un tag composé : d'un microcontrôleur, d'un ou plusieurs capteurs et d'une puce RFID, à l'aide de : a) un circuit de récupération d'énergie, b) une batterie, ou c) de l'énergie récoltée par la puce RFID provenant du lecteur .....	28
Figure II.5 : Tag RFID avec capteur de force externe pour le suivit de produit alimentaire .....	29
Figure II.6 : Famille des capteurs-RFID analogique .....	30
Figure II.7 : Bio-capteur-RFID à détection de seuil : a) vue en coupe du capteur-RFID, b) vue par dessus. ....	33

### Tableaux

Tableau II.1 : Pucés RFID existantes avec capteur de température interne .....	25
Tableau II.2 : Comparaison des pucés RFID du commerce avec entrées capteurs externes ..	27
Tableau II.3 : Capteur-RFID avec auto-tune vendu dans le commerce.....	32

## Chapitre III

### Figures

Figure. III.1 : Stratégie de détection par fonctionnalisation d'antenne du capteur-RFID UHF passif .....	35
Figure. III.2 : Circuit électrique équivalent d'un tag RFID UHF passif.....	36



Figure. III.3 : Diagramme de rayonnement d'un dipôle comparé à celui d'un dipôle isotrope .....	39
Figure. III.4 : Polarisation d'une onde électromagnétique, a) polarisation Verticale, b) polarisation horizontale et c) polarisation circulaire .....	40
Figure. III.5 : Illustration de la distance de lecture entre un lecteur RFID et un tag .....	40
Figure. III.6 : Matériaux en fonction de la résistivité. ....	42
Figure. III.7 : Illustration de la composition de l'antenne capteur proposée .....	43
Figure. III.8 : Design de l'antenne du capteur RFID proposée Avec dépôt du gluten de blé et dimensions.....	44
Figure.III.9 : Fractionnement tire de l'étude appliqué a notre capteur-RFID .....	46
Figure. III.10 : Vue en coupe de la capacité inter digitée : dimensions et épaisseurs optimale .....	47
Figure. III.11 : Coefficient de réflexion S11 (dB) de l'antenne .....	47
Figure. III.12 : Étude de l'effet des variations de l'espace à l'extrémité des doigts (Capacité Cend), simulation avec impédance de la puce (Z puce).....	48
Figure. III.13 : Étude de l'effet des variations de Repliement de l'antenne dipôle (Ld), simulation avec impédance de la puce (Z puce).....	49
Figure. III.14 : Gain réalisé de l'antenne optimisée.....	49
Figure. III.15 : le rapport d'onde stationnaire de l'antenne : <2 à la fréquence 868 MHz.....	50

## **Introduction générale :**

Depuis l'ère industrielle, notre société n'a cessé de faire des progrès technologiques considérables pour répondre à nos besoins et améliorer notre confort. Aujourd'hui, il existe une volonté de tout contrôler ou, dans une moindre mesure, de surveiller tout ce qui se trouve dans notre environnement immédiat. Pour y parvenir, le déploiement massif de dispositifs dits "intelligents" capables d'acquiescer, de traiter et de communiquer des données devient indispensable. Ceci est rendu possible notamment par la miniaturisation des composants électroniques, la réduction de leur consommation et l'augmentation de leurs performances informatiques. Nous nous dirigeons donc vers un monde totalement connecté, jusqu'à l'entité de base : l'objet. C'est ce que l'on appelle l'Internet des objets (IoT)

L'identification par radiofréquence (RFID) apparaît comme une technologie ayant un rôle important à jouer. Aujourd'hui, la RFID n'est plus inconnue du grand public et coexiste désormais avec d'autres technologies d'identification automatique plus anciennes telles que les codes-barres dans de nombreux domaines différents. Un système RFID se compose d'un lecteur RFID et d'une "étiquette" ou "tag" RFID (qui se compose elle-même d'une antenne et d'une puce RFID avec un identifiant unique).

Il existe différentes technologies RFID selon la fréquence d'utilisation (basse fréquence : 125 kHz, haute fréquence : 13,56 MHz, ultra-haute fréquence : 860-960 MHz [UE], haute fréquence : 2,45 ou 5,8 GHz) et selon leur mode d'alimentation (passif, semi-passif ou actif). Par exemple, les dispositifs RFID sont utilisés dans les systèmes de logistique, de chaîne d'approvisionnement, de transport, de fabrication et d'entreposage. Dans notre vie quotidienne, nous utilisons cette technologie dans le domaine du contrôle d'accès et du paiement sans contact. Dans le même temps, plusieurs grandes industries, notamment dans les secteurs de la santé, de la pharmacie et de l'alimentation, exigent une utilisation accrue des systèmes d'identification automatique. Leur intérêt va même au-delà de la fonction principale d'une étiquette RFID, qui est l'identification automatique. Ces industries de haute technologie ont besoin de fonctionnalités supplémentaires pour garantir la qualité des produits tout au long de leur cycle de vie, à un coût moindre. Sur la base de ce constat, nous sommes intéressés par l'ajout de fonctionnalités supplémentaires à une étiquette RFID, telles que la lecture d'un capteur, afin de contribuer à l'adoption finale de cette technologie dans les domaines très concurrentiels mentionnés ci-dessus.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en une contribution sur les capteurs RFID

Le premier chapitre constitue une introduction générale aux systèmes RFID et sert de préalable aux chapitres suivants, dans lesquels les défis des systèmes RFID conventionnels sont examinés et sont présentées.

Le deuxième chapitre rappelle d'abord les principes de base de la technologie RFID avant de donner un aperçu de l'état de l'art sur le concept de capteur RFID. En raison de l'état d'avancement de cette technologie.

Dans le troisième chapitre, nous proposons un concept de capteur RFID UHF passif. Ce capteur est conçu pour recevoir une fine couche d'agro-polymère. Dans la première partie, nous présentons les résultats d'une étude paramétrique réalisée à l'aide d'un simulateur électromagnétique.

Pour conclure, nous discuterons des différentes solutions proposées dans ce mémoire et définirons les perspectives de recherches futures sur le thème des capteurs RFID.

# **Chapitre I**

---

## **Technologie RFID**

---

**I.1 Introduction :**

Avec les récents progrès des communications sans fil, l'identification par radiofréquence La technologie (RFID) devient de plus en plus une réalité en termes d'utilisation généralisée dans diverses applications. Bien que la RFID offre une possibilité générale d'étiquetage et le suivi des objets, et est utilisé depuis des décennies, aucun système RFID ne convient à tous les candidatures. Pour une technologie RFID en termes généraux et continuer dans les chapitres suivants avec des discussions plus détaillées sur les différentes techniques qui peuvent rendre les RFID plus adaptables capable de certaines applications spécialisées qui doivent relever les défis de la RFID classique techniques.

Ce chapitre constitue une introduction générale aux systèmes RFID et sert de préalable aux chapitres suivants, dans lesquels les défis des systèmes RFID conventionnels sont examinés et sont présentées. Dans ce chapitre, nous commençons par un bref aperçu de la technologie RFID et incluons une discussion détaillée sur l'histoire des RFID et leur évolution du début des années 1800 à nos jours. Ensuite, nous abordons les bandes de fréquences RFID et discutons de leurs avantages et de leurs défis pour diverses applications. Les sous-sections de ce chapitre donnent un aperçu complet des différents types d'étiquettes RF et de leurs composants de mémoire, des lecteurs inductifs et à couplage magnétique, avec leurs avantages et leurs limites dans diverses conditions et applications. Nous terminons ce chapitre par un aperçu concis des applications de la RFID. Les paramètres sont classés en fonction de différents secteurs du marché.

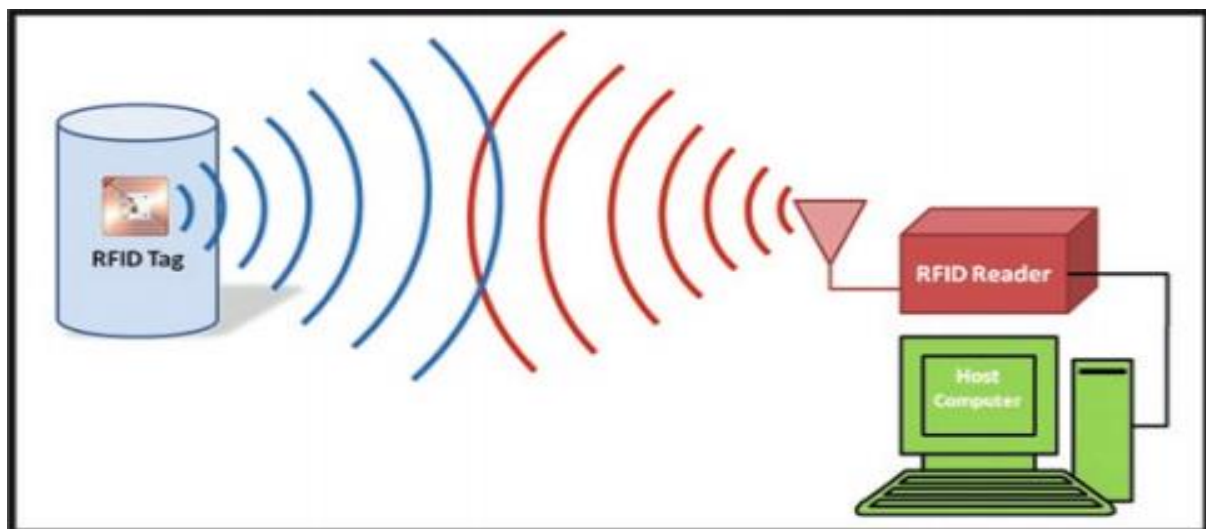
**I.2 Contexte de la RFID :**

L'identification par radiofréquence (RFID) est une technologie permettant de l'identification, la surveillance et le suivi de divers objets d'intérêt à l'aide d'ondes radio transmissions. L'identification automatique des objets est possible grâce à la communication sans fil. Communication entre une étiquette (attachée à un objet) et son lecteur (interrogateur) à un lieu éloigné. La surveillance à distance par RFID peut aller de la détection de la présence et l'absence d'un objet permettant de suivre son mouvement sur de courtes ou de longues distances.

Un système RFID typique se compose des éléments suivants :

- Une ou plusieurs étiquettes ou transpondeurs avec des codes d'identification uniques et une petite antenne intégrée dans chaque étiquette.
- Un lecteur, ou interrogateur, avec une ou plusieurs antennes qui sont connectées à un hôte ordinateur par le biais de divers types d'interfaces comme : USB, PCMCIA, RS232, ou des interfaces sans fil telles que Bluetooth.
- Un logiciel d'application fonctionnant sur un ordinateur hôte pour traduire les a reçu des données pour des messages conviviaux concernant la présence de l'objet marqué et le statut d'absence ou sa localisation.







La **figure I.1** représente un système RFID typique et ses composants.







**Figure I.1** : Composantes d'un système RFID typique.

La RFID est une technologie rapide et fiable qui ne nécessite pas de contact physique ou le lien de visibilité directe entre les articles marqués et les lecteurs, ce qui réduit l'intervention humaine pour le suivi et la surveillance en temps réel des biens.

Bien que les étiquettes RFID soient plus coûteuses que les codes à barres, il existe certains avantages qui rendent la RFID plus attrayante que les codes à barres pour les candidatures. Le **tableau I.1** résume une analyse comparative des étiquettes RFID par rapport aux étiquettes à barres avec une flèche d'avantage pointant sur chaque technologie dans différents cas.

	<b>Etiquettes RFID</b>	<b>Avantage</b>	<b>Codes Barres</b>
<b>Méthode de transfert de données</b> <b>Liaison</b> <b>Nombre d'années d'utilisation</b> <b>Utilisé</b>	Radiofréquence a première fois pendant la Seconde Guerre mondiale (1942) pour distinguer les avions amis des avions ennemis.		Liaison optique Première utilisation commerciale en 1974 à Marsh supermarché à Troy, Ohio (premier produit scanné Wrigley's chewing gum) [1].
<b>Automatisation</b>	Système entièrement automatisé une fois installer.		Entièrement dépendant d'un opérateur humain pour scanner les items un par un.
<b>Obligation de visibilité directe</b>	Les articles peuvent être détectés dans n'importe quelle orientation au sein de la plage de lecture		Une orientation spécifique est nécessaire pour lire les étiquettes.
<b>Capacité de lecture/écriture</b>	Les informations peuvent être écrites et mises à jour de manière dynamique sur une balise		Lecture seule sans possibilité de mise à jour
<b>Capacité de détection de plusieurs éléments (taux de lecture)</b>	Des milliers d'étiquettes peuvent être détectées simultanément.		Les étiquettes doivent être lues une à la fois.
<b>Robustesse</b>	Relativement élevé. Les étiquettes peuvent être fixées à l'intérieur et protégé contre l'éloignement.		Facile à retirer ou à altérer. Salissures externes ou la graisse peut obstruer le signal.

<b>Sécurité</b>	Les étiquettes peuvent être conçues avec un cryptage,		Facile à contrefaire.
<b>Capacité de surveillance à distance</b>	La présence ou l'absence, et dans certains cas la localisation possible des objets peuvent être détectées à partir une distance (en fonction de la portée).		Nécessite un contact de près, en ligne de mire, pour balayer le point.
<b>Mobilité (à lire pendant qu'un objet est en mouvement)</b>	Les balises RF permettent une surveillance en temps réel, quels que soient les mouvements.		Doit être immobile dans le champ de vision du scanner.
<b>Coût</b>	coût plus élevé (selon les capacités de l'étiquette)		Très faible

**Tableau I.1 :** Analyse comparative des étiquettes RFID et des codes à barres.

Comme l'illustre le **tableau I.1**, la RFID présente de nombreux avantages par rapport à un code à barres classique. La comparaison entre les deux modèles révèle un net avantage de la RFID par rapport aux codes à barres dans les applications de télésurveillance. En outre, la RFID, en tant que technologie, offre plus de possibilités, de caractéristiques et de fonctions qu'un code à barres, et ce à un coût plus élevé.

### **I.3 Évolution des systèmes RFID :**

Malgré l'idée fausse qui prévaut, la RFID n'est pas une nouvelle technologie. L'identification d'objets au moyen d'ondes radio réfléchies a été largement utilisée par les Européens pendant la Seconde Guerre mondiale (1940) pour détecter les avions amis des avions ennemis qui entraient dans leur ciel. Les pilotes allemands manœvraient leurs avions pour générer un signal réfléchi unique pour les radars au sol afin de se différencier des avions ennemis. Cela explique essentiellement le premier système passif d'identification par radiofréquence. Peu après, les Britanniques ont affiné l'idée et développé le système actif IFF



(Identification, Friend or Foe) dans lequel un transpondeur (de la taille d'une valise) était fixé [1].

Une décennie plus tard, en 1948, la première idée derrière la RFID a été publiée par Harry Stockman, dans un article intitulé "Communication by Means of Reflected Power" [2]. Cependant, le véritable ancêtre des systèmes RFID est connu sous le nom de première invention RFID active enregistrée par Mario Cardullo en 1969 [3,4]. Dans son brevet, Cardullo fait référence à une étiquette d'identification active à mémoire réinscriptible utilisant des signaux RF, acoustiques ou lumineux. Cette invention a été suivie par l'invention du premier système RFID passif en 1973 par Charles Walton de Proximity Devices à Sunnyvale, CA [5] pour le premier système d'entrée sans clé utilisant une carte avec un transpondeur intégré pour communiquer avec un lecteur fixé à une porte.

Malgré tous les efforts de recherche et de développement des RFID dans les premières années, l'utilisation de cette technologie n'a été possible que dans les années 1990, lorsque les progrès des matériaux et de la technologie des semi-conducteurs ont permis d'améliorer les performances des puces à semi-conducteurs tout en réduisant leur taille et leur coût. Les systèmes RFID commerciaux doivent entrer dans le courant dominant et être largement utilisés dans une variété des applications comprenant la sécurité et le contrôle d'accès, les transports, les systèmes de péage, et la gestion et le suivi de la chaîne d'approvisionnement.

Il est important de noter qu'avant les années 1990, les systèmes RFID étaient tous des solutions propriétaires pour diverses applications, à une époque où aucune norme n'était définie pour l'interopérabilité entre les systèmes RFID, ce qui constituait un obstacle à la croissance de cette technologie. La période 1990-2000 a été considérée comme la décennie de l'émergence des normes RFID, où plusieurs organisations telles que les normes internationales.

1800–1900	Faraday, Maxwell, Hertz : premières découvertes de l'énergie et des ondes électromagnétiques
1901	Marconi a fait la démonstration de la première transmission radio UWB au-dessus de l'océan Atlantique
1925	Naissance du radar
1939	Premier concept de RFID pour les systèmes IFF pendant la Seconde Guerre mondiale

1948	La première idée technique derrière la RFID a été publiée par Harry Stockman
1969	Mario Cardullo a inventé le premier système RFID actif
1973	Charles Walton a inventé le premier système RFID passif
1975	Recherche et développement approfondis sur les RFID passives/semi-passives à Los Laboratoire national d'Alamos
1980-1990	Mise en œuvre de systèmes RFID propriétaires
1990-2000	La technologie RFID se généralise, émergence des normes RFID
2002	La FCC a approuvé la technologie UWB pour des applications commerciales
2003	Adoption de la technologie EPC par Walmart et le ministère de la défense, mise au point de la première RFID UWB par MSSSI
2003- aujourd'hui	Des années de progrès techniques pour surmonter les défis pratiques de la RFID

**Tableau I.2 :** Calendrier historique des technologies et des efforts liés au développement de la RFID.

#### I.4 Bandes de fréquences RFID :

La fréquence de fonctionnement d'un système RFID influence directement sa portée de lecture et donc son application cible. Le **tableau I.3** présente les quatre principales bandes spectrales attribuées aux systèmes RFID commerciaux.

Basse fréquence (BF)	Haute fréquence (HF)	Ultra haute fréquence (UHF)	Fréquence des micro-ondes
125-134 KHz	13,56 MHz	868-928 MHz	2,4 GHz

**Tableau I.3 :** Bandes de fréquences utilisées pour les systèmes RFID.

##### I.4.1 Bande basse fréquence (BF) :

Cette bande de fréquences couvre le spectre RF de 125-134 KHz et fournit une bonne pénétration du signal à travers une série de matériaux, y compris le corps humain ou divers des murs et des barrières. Les étiquettes RFID fonctionnant dans ces basses fréquences ont l'avantage de bien fonctionner autour d'une variété de matériaux conducteurs et diélectriques comme le métal, le sol et l'eau. Par conséquent, les étiquettes BF sont de bons candidats pour le suivi des animaux ainsi que dans l'industrie automobile.

Les systèmes RFID BF sont moins sensibles aux interférences externes, car les bandes de fréquences inférieures sont moins encombrées par les services radio.

#### **I.4.2 Bande haute fréquence (HF) :**

Les systèmes RFID HF passifs fonctionnent à 13,56 MHz et sont utilisés lorsque le débit de données (de l'ordre de Kbps) et les courtes portées de lecture (<1 m) sont suffisants pour des applications telles que les cartes à puce, le suivi des articles à courte portée comme le suivi des livres dans les bibliothèques, etc. Leurs performances en présence d'eau et de métaux sont inférieures à celles des balises basse fréquence BF mais meilleures que celles des balises à plus haute fréquence telles que l'UHF et des étiquettes pour micro-ondes.

Les balises HF ont la capacité de stocker une plus grande quantité de données et de communiquer plus rapidement. Les vitesses de communication que les balises BF, ce qui leur permet de détecter plusieurs balises à la fois. En outre, ces balises ont des longueurs d'onde plus courtes que les balises BF, ils disposent donc d'antennes plus petites et moins coûteuses. Comme les balises BF, les balises HF, les étiquettes utilisent également le couplage inductif pour communiquer avec leurs lecteurs.

#### **I.4.3 Bande Ultra Haute Fréquence ( UHF) :**

Les étiquettes RF fonctionnant dans la bande UHF (868-928 MHz) utilisent la technologie de rétrodiffusion pour leurs communications avec le lecteur d'étiquettes, où l'étiquette réfléchit le signal électromagnétique qu'elle reçoit de son lecteur. Les étiquettes UHF offrent une plus grande portée (généralement 3 à 10 m) et une vitesse de lecture plus élevée, permettent de détecter simultanément un plus grand nombre d'étiquettes que les systèmes BF et HF, et nécessitent enfin des antennes plus petites.

#### **I.4.4 Bande des micro-ondes ou Super haute Fréquence (SHF) :**

La bande micro-ondes (2,4 GHz / 5.8GHz), qui offre des taux de transfert de données élevés (Kbps) et de longues distances (~30 m), est généralement utilisée dans les applications de perception de péages. Les systèmes RFID sur cette bande de fréquence sont coûteux et nécessitent une transmission en visibilité directe. La raison en est que, dans ces hautes fréquences, les signaux hors ligne de visée souffrent davantage des effets de propagation tels que les interférences par trajets multiples et la diffraction du signal. En outre, les étiquettes à

micro-ondes ne pénètrent pas dans de nombreux matériaux et leurs performances de lecture souffrent considérablement du fait qu'elles sont adjacentes à des métaux et à l'eau.

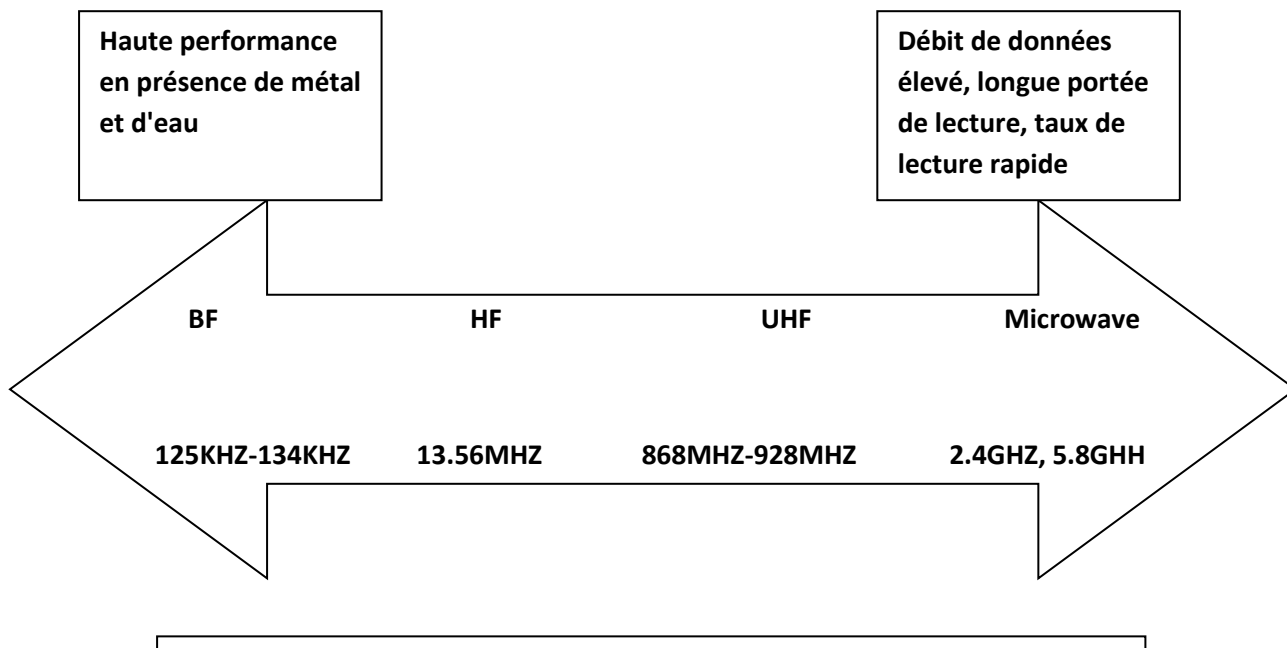


Figure. I.2 : Portions du spectre électromagnétique RF pour les systèmes RFID conventionnels.

Fréquence	Avantage	Désavantage	Application
<b>BF (125-134 KHz)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins de vulnérabilité pour signaler la dégradation par les liquides et les métaux</li> <li>- Hautes propriétés de pénétration</li> <li>- Robuste pour interférence</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible vitesse de lecture</li> <li>- Faible capacité de mémoire</li> <li>- Grandes antennes</li> <li>- Coût de production élevé</li> <li>- Portée de lecture limitée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle d'accès</li> <li>- Identification de l'animal</li> </ul>
<b>HF (13.56 MHz)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un coût de production plus faible</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestion de l'inventaire à court terme au niveau des</li> </ul>

	- Augmentation de la capacité de stockage des données		articles
<b>UHF (868-928 MHz)</b>	- Amélioration de la portée de lecture	- Restriction d'utilisation dans différents pays - Les étiquettes et les lecteurs doivent être conçus pour différentes parties du monde	- Cartes à puce - Gestion de la chaîne d'approvisionnement
<b>Micro-ondes (2.4 GHz , 5.8 GHz)</b>	• Plus longue portée	- Vulnérable aux interférences des signaux involontaires à proximité - Problèmes de propagation du signal (LOS, effet d'ombre) - Atténuation par l'eau	- Contrôle de la palette des entrepôts - Contrôle des péages de transport

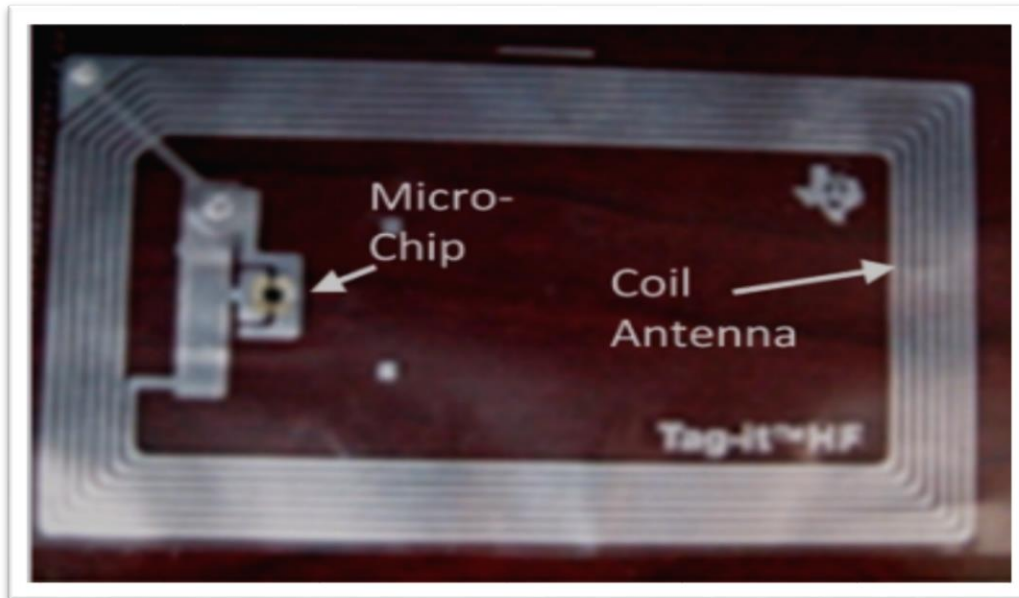
**Tableau I.4 :** Résumé des systèmes RFID avec différentes fréquences de fonctionnement.

### **I.5 Les étiquettes RFID :**

Une étiquette ou un transpondeur RFID est un petit dispositif (généralement plus petit que la taille d'une carte de crédit) qui se compose d'une petite antenne fixée à une micro puce et d'un circuit intégré (CI) pour stocker les informations propres à l'objet auquel il est fixé. L'antenne de l'étiquette est une petite bobine de fils recouverte d'une couche protectrice et permet les communications sans fil entre l'étiquette et son lecteur, comme le montre la **figure I.3**.

Le circuit intégré de l'étiquette offre une série de fonctionnalités telles que : la logique de base pour assurer la détection de plusieurs étiquettes, le stockage des données en mémoire et la modulation des données. Les étiquettes RFID peuvent être intégrées à des articles individuels ainsi qu'à des palettes et des conteneurs remplis de nombreux articles. D'un point

de vue fonctionnel, les étiquettes RFID sont classées en quatre grandes catégories : active, semi-active, passive et semi-passive. Nous discutons ces catégories dans les sous-sections suivantes.



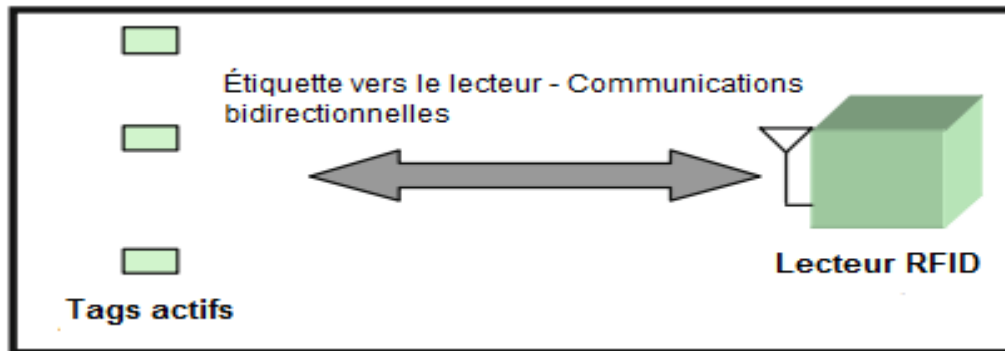
**Figure. I.3 :** Exemple d'étiquette RFID montrant le circuit intégré CI et son antenne bobine.

### I.5.1 Les Tags actifs :

Les étiquettes RFID actives nécessitent une source d'énergie embarquée (batterie) pour alimenter leurs communications. Le modèle de communication de la RFID active n'est pas différent de tout autre système de communication sans fil où les émetteurs (étiquettes) communiquent avec les récepteurs (lecteurs) par une liaison sans fil utilisant des ondes radio. Les étiquettes actives peuvent donc initier des communications avec leur lecteur pour diffuser des informations. La **figure I.4** illustre un modèle de communication RFID actif.

La portée de communication des étiquettes actives est relativement longue, quelques centaines de pieds environ, ce qui leur permet de fournir à leurs utilisateurs une capacité de positionnement pour suivre les articles étiquetés en plus de détecter leur présence ou leur absence. En outre, les étiquettes actives présentent des caractéristiques intéressantes, telles qu'une grande mémoire définie par l'utilisateur et la possibilité d'ajouter des capteurs. Toutefois, comme les étiquettes actives nécessitent une source d'énergie embarquée et des circuits de transmission/réception, elles sont de grande taille, lourdes.

En outre, leur durée de vie est limitée par la durée de vie de leur batterie, car elles consomment de l'énergie en permanence, qu'elles sont en présence ou non d'un lecteur. Les étiquettes actives sont généralement utilisées pour le suivi d'articles de grande valeur pour des applications à longue distance, comme les véhicules et les grands conteneurs.

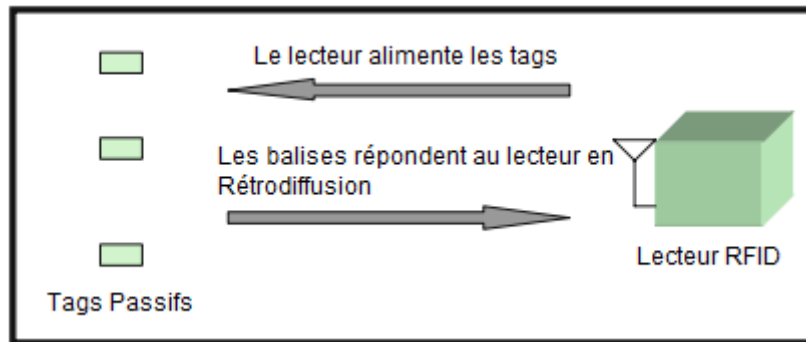


**Figure. I.4 :** Modèle de communication RFID actif; les étiquettes transmettent les signaux RF modulés de données à leur lecteur.

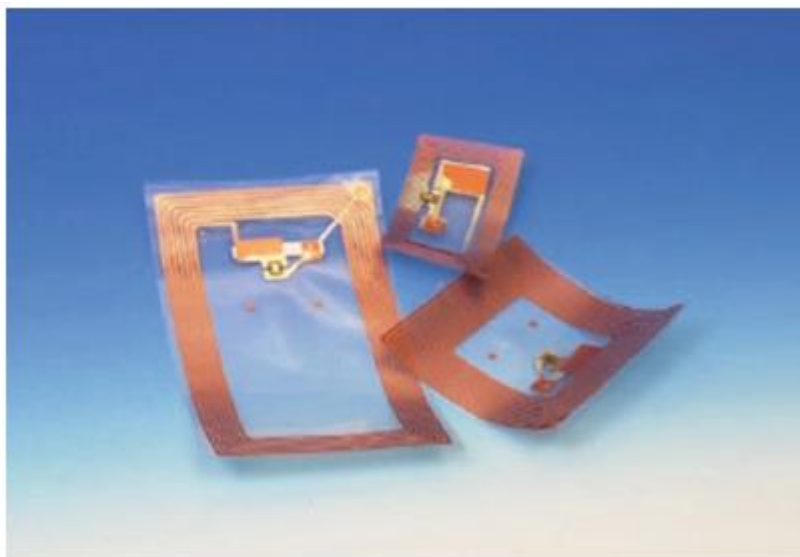
### I.5.2 Les Tags Passifs :

Les étiquettes RFID passives n'ont pas de source d'énergie telle qu'une batterie ; elles tirent leur puissance opérationnelle de la collecte d'énergie électromagnétique émise par leur lecteur à proximité. Ce système d'alimentation à distance, est communément appelé technique d'induction électromagnétique. Les étiquettes stockent temporairement une petite quantité d'énergie émise par le lecteur, la convertissent en courant continu afin d'alimenter leurs micropuces et de générer leur réponse. La **figure I.5** illustre un modèle de communication RFID passif.

Les étiquettes passives peuvent être fabriquées en très petites quantités, et sont plus légères et moins coûteuses que les étiquettes actives et semi-actives. Toutefois, leur portée de communication est plus courte que celle des étiquettes à piles. Les étiquettes passives sont généralement utilisées pour le suivi de grandes quantités d'articles de moindre coût, en bref **figure. I.6.**



**Figure. I.5 :** Modèle de communication RFID passif ; les étiquettes tirent leur puissance opérationnelle de leur lecteur.



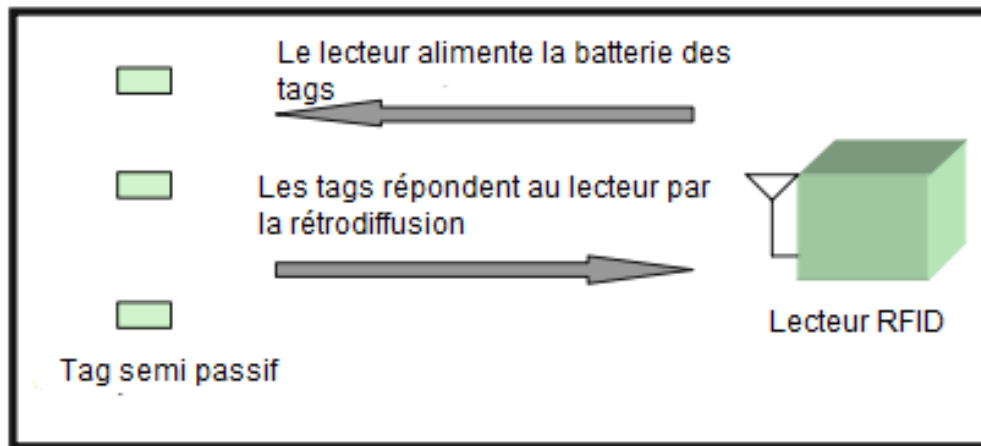
**Figure I.6 :** Exemple d'étiquettes passives.

### I.5.3 Étiquettes semi-passives :

Les étiquettes RFID semi-passives comprennent une source d'énergie qui n'est activée que lorsque les étiquettes sont "réveillées" par leur lecteur. Par conséquent, leur batterie dure plus longtemps que les étiquettes actives et leur portée de lecture est plus longue que celle des étiquettes passives. La source de batterie des étiquettes semi-passives est uniquement utilisée pour alimenter le circuit de l'étiquette, mais ces étiquettes ne transmettent pas activement de signaux RF et ne peuvent pas lancer la communication entre l'étiquette et le lecteur.

La communication entre le lecteur et l'étiquette dans les systèmes semi-passifs est basée sur la méthode de rétrodiffusion (tout comme les étiquettes passives). La **figure I.7** illustre un modèle de communication RFID semi-passif.





**Figure. I.7 :** Modèle de communication RFID semi-passif .



**Figure. I.8 :** Exemple d'étiquettes semi-passives.

#### 1.5.4 Composants de la mémoire des étiquettes RF :

Outre l'antenne et le circuit d'alimentation, les étiquettes RFID comportent un composant mémoire dans leur puce pour stocker des informations uniques. En fonction de leurs applications, les capacités de mémoire des étiquettes peuvent varier :

- Lecture seule
- Écrire une fois, lire beaucoup (WORM)
- Lire/écrire

Les étiquettes à lecture seule sont programmées avec une identification unique qui est stockée sur elles pendant le processus de fabrication. Ces étiquettes ne sont pas réinscriptibles et leurs informations ne peuvent jamais être modifiées.

Les tags en lecture/écriture peuvent être écrits et lus plusieurs fois pour mettre à jour leur base de données. L'utilisateur peut ajouter des informations supplémentaires ou écraser les informations existantes pour des applications spécifiques.

Les étiquettes WORM (Write-Once-Read-Many) ne peuvent être écrites qu'une seule fois pour ajouter des informations supplémentaires au-delà de leur identifiant unique et elles deviennent des balises en lecture seule après l'écriture d'abord. Les étiquettes WORM offrent un niveau de sécurité plus élevé que les balises de lecture/écriture où ils peuvent être modifiés à tout moment en dehors du contrôle du fabricant.

### **I.6 Les lecteurs RFID :**

Un lecteur ou interrogateur RFID typique est une radio spécialisée dont l'antenne recueille les signaux envoyés par les étiquettes actives et semi-actives ou les signaux réfléchis (rétrodiffusés) des étiquettes passives et semi-passives. En d'autres termes, le lecteur sert de pont entre le logiciel d'application et les étiquettes qui transfèrent les informations.

Les lecteurs RFID peuvent être équipés de plusieurs antennes pour obtenir une plus grande portée ou une plus grande zone de couverture.

Les lecteurs peuvent être placés dans une position fixe, comme dans les applications de portail, ou être portable à main pour de nombreuses applications de numérisation. La **figure I.9** montre un examen- d'un lecteur RFID disponible dans le commerce.



**Figure. I.9 :** Exemple d'un lecteur RFID.

Les lecteurs RFID passifs alimentent leurs étiquettes avec deux méthodes de couplage EM

- Couplage par champ magnétique
- Couplage des champs électromagnétique

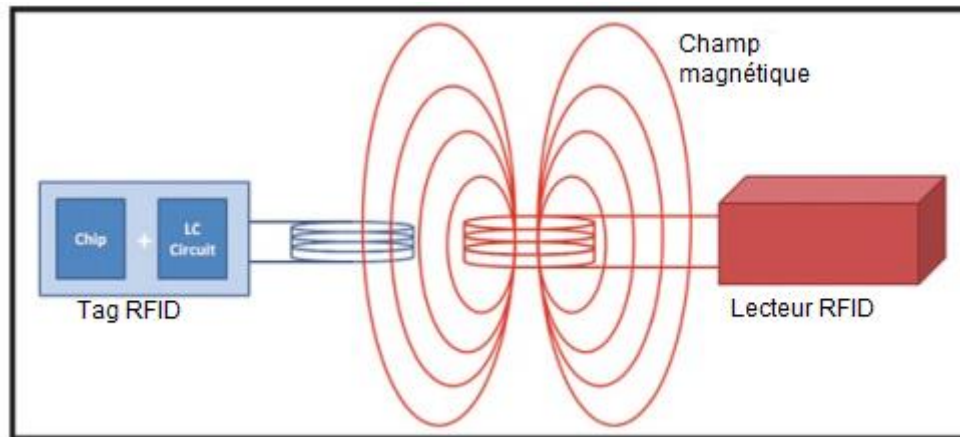
Chacune de ces méthodes de couplage a une influence sur la portée des communications des systèmes RFID et est décrite plus en détail dans les sous-sections suivantes.

### **I.6.1 Couplage magnétique : (Champ proche)**

En champ proche ou en couplage magnétique, l'antenne de l'étiquette est couplée par induction avec le puissant champ électromagnétique (EM) autour de la bobine d'antenne du lecteur. C'est le même principe utilisé dans les transformateurs où, d'après la loi de Faraday, l'alternance le champ magnétique (bobine primaire) génère une tension dans l'antenne de l'étiquette (secondaire bobine) [6].

Le couplage en champ proche se produit principalement dans les systèmes RFID BF et HF où la distance entre l'étiquette et l'antenne du lecteur est beaucoup plus petite que leur onde (c'est-à-dire que 13,56 MHz a une longueur d'onde de 22,1 m).

Par conséquent, ce type de couplage offre des portées de lecture très limitées pour les systèmes RFID. **La figure I.10** illustre le concept de l'alimentation des tags par couplage magnétique.



**Figure. I.10** : Couplage magnétique (champ proche) pour alimenter un transpondeur.

### I.6.2 Couplage électromagnétique : (Champ lointain)

Le couplage électromagnétique est utilisé dans les étiquettes à haute fréquence (UHF et micro-ondes) et offre aux systèmes RFID une portée de communication beaucoup plus longue que la technique de couplage magnétique. se propagent dans l'espace libre sous la forme d'une onde électromagnétique combinée. [6].

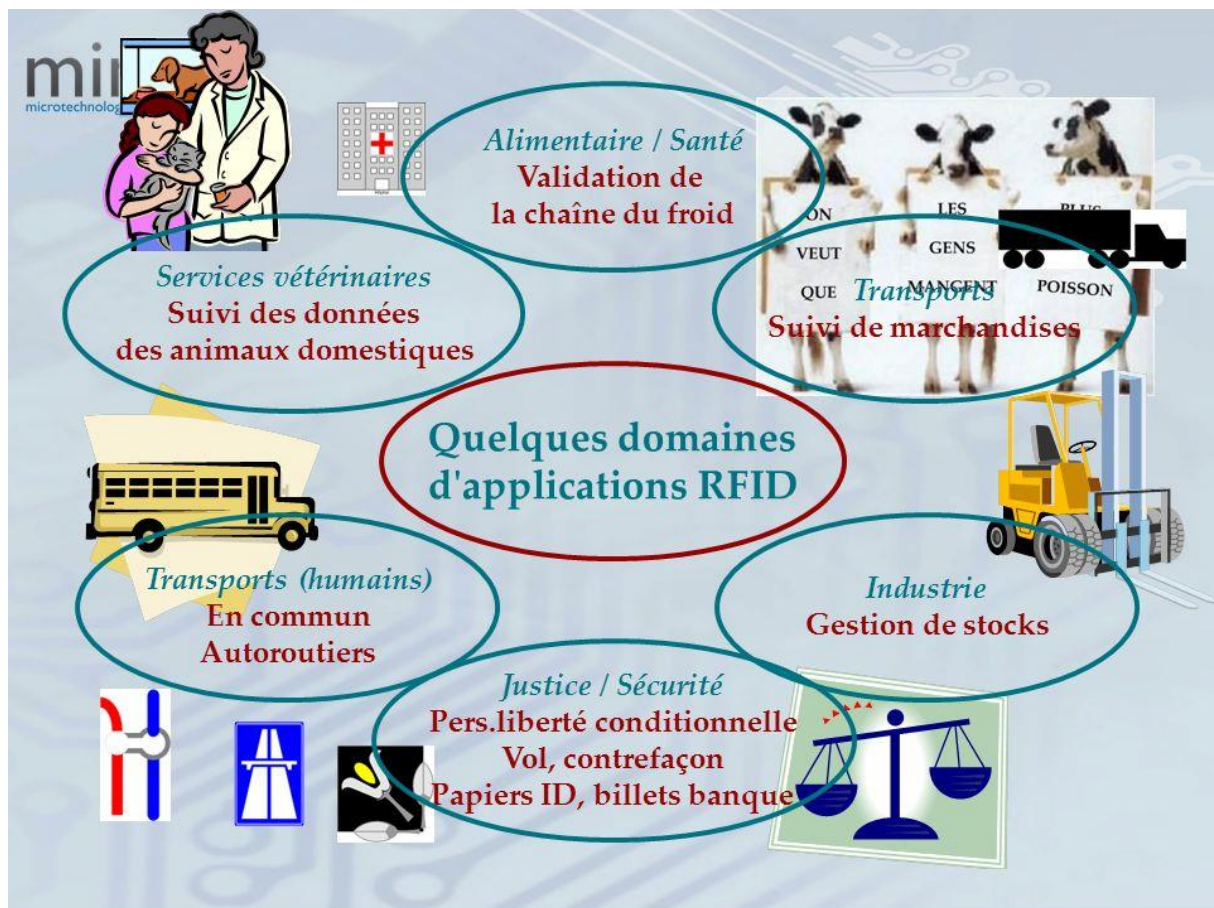
Le couplage de champ électromagnétique utilise le même principe que le radar où le transpondeur est alimenté par le fort champ électrique généré par son lecteur et réfléchit (rétrodiffuse) le signal reçu.

Dans le couplage électromagnétique, les communications étiquette-lecteur se produisent par des variations de l'impédance de charge de l'antenne d'étiquette résultant en un signal rétrodiffusé unique qui peut être décodé par le lecteur.

## I.7 Applications RFID :

La RFID est une technologie polyvalente qui a sa place dans de nombreuses applications. La capacité de marquer et de suivre des biens avec une identité unique peut créer le futur concept de "l'Internet des objets" [7-8] qui aura un grand impact sur notre vie quotidienne.

Bien que les solutions RFID jouent déjà un rôle essentiel dans de nombreuses applications commerciales et militaires, la technologie doit encore évoluer considérablement pour être largement utilisée. Certains paramètres tels que le coût ainsi que des questions techniques comme la consommation d'énergie, la portée de lecture, les performances en présence de liquides et de métaux sont encore les facteurs limitant le déploiement de la RFID dans toute son ampleur. La **figure I.11**, représente Les applications de la technologie RFID .



**Figure I.11:** Applications de la RFID.

**I.8 conclusion :**

Grâce aux récents progrès réalisés dans le domaine des matériaux et de la technologie des dispositifs à semi-conducteurs, les systèmes RFID sont devenus plus matures et plus rentables pour améliorer l'efficacité des entreprises dans de nombreuses applications. Dans ce chapitre, nous avons abordé un bref historique et le contexte ainsi que le concept de base des systèmes RFID. Le chapitre a également abordé les composants de la RFID, notamment les types d'étiquettes, les types de couplage de la communication RFID et finalement nous avons cité quelques applications.

# **Chapitre II**

---

## **État d'avancement technologique des capteurs RFID**

---



## II.1 Introduction :

Les capteurs sont les premiers éléments dans une chaîne de mesure. Ils transforment les grandeurs physiques ou chimiques d'un processus ou d'une installation en signaux électriques au départ presque toujours analogiques [9]. Cette transformation doit être le reflet aussi parfait que possible de ces grandeurs. Au cours des dernières années, le grand intérêt porté aux systèmes RFID ce système il a vu des développements dans ses appareils. A la fois la puce RFID, l'étiquette et le lecteur RFID. Cette technologie elle possède plusieurs avantages comme :

- La lecture simultanée et sans visibilité directe de plusieurs étiquettes RFID
- La possibilité de lecture à grande distance (en UHF)
- Le niveau élevé de sécurité de lecture
- La protection des données encodées dans la puce
- le suivi des stocks

## II.2 Définition d'un capteur :

Le capteur est généralement défini comme étant un dispositif qui reçoit et répond à un signal ou à un stimulus extérieur. Le stimulus est le paramètre physique à détecter (également appelé paramètre cible ou mesure). De manière générale, un capteur sans fil est un dispositif qui combine les capacités d'un capteur et d'un dispositif RF ou sans fil et est donc capable de détecter, de traiter des données, de transmettre et/ou de communiquer à d'autres dispositifs sans fil [10].

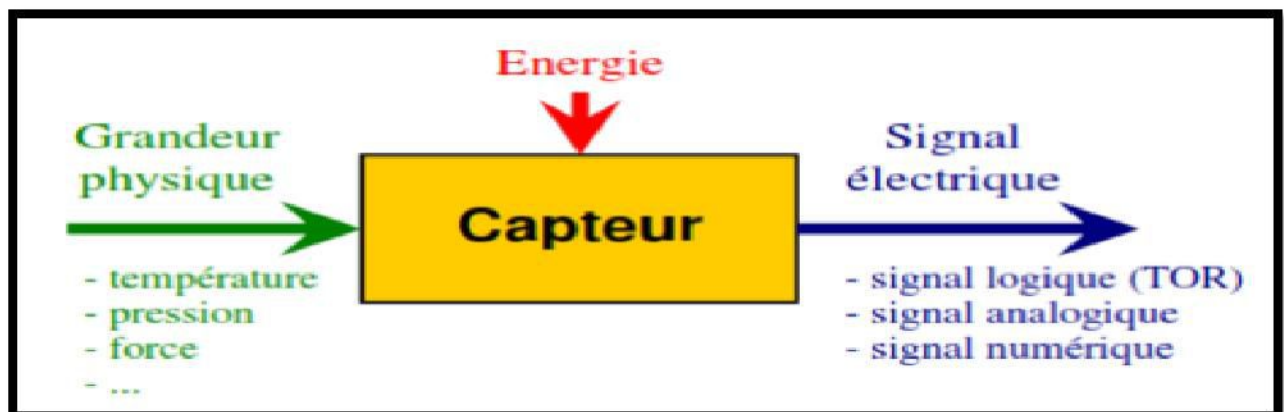


Figure II.1 : Schéma représentatif d'un capteur.



### II.3 Rôle d'un capteur RFID :

L'objectif des capteurs-RFID est donc de créer un système capable non seulement de suivre, mais de surveiller. La technologie RFID passive, en tant que technologie à faible cout et longue durée de vie, offre un grand potentiel de transmission de données capteur combiné avec l'EPC. Ceci est d'autant plus vrai pour les tags fonctionnant en bande UHF.

### II.4 les caractéristiques d'un capteur:

Cela concerne l'incertitude de la mesure un bon capteur obéit aux règles suivantes :

- il est sensible a la propriété mesurée.
- Il est insensible a autre propriété.
- Elle n'influence pas la propriété mesurée.

**Etendue de mesure :** Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur. Exemple : un capteur de température capable de mesurer des températures de  $-25^{\circ}\text{C}$  à  $+150^{\circ}\text{C}$

**La linéarité :** est une considération importante dans cette catégorie. Les capteurs idéaux sont conçus pour être linéaire. Le signal de sortie d'un tel capteur est linéairement proportionnel a la valeur de la propriété mesurée.

**Sensibilité :** Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

**Résolution :** Plus petite variation de grandeur physique d'entrée mesurable par le capteur.

**Précision :** Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.

**Rapidité :** Temps de réaction du capteur.

### II.5 Classification des capteurs :

Les capteurs peuvent être classés de plusieurs manières :

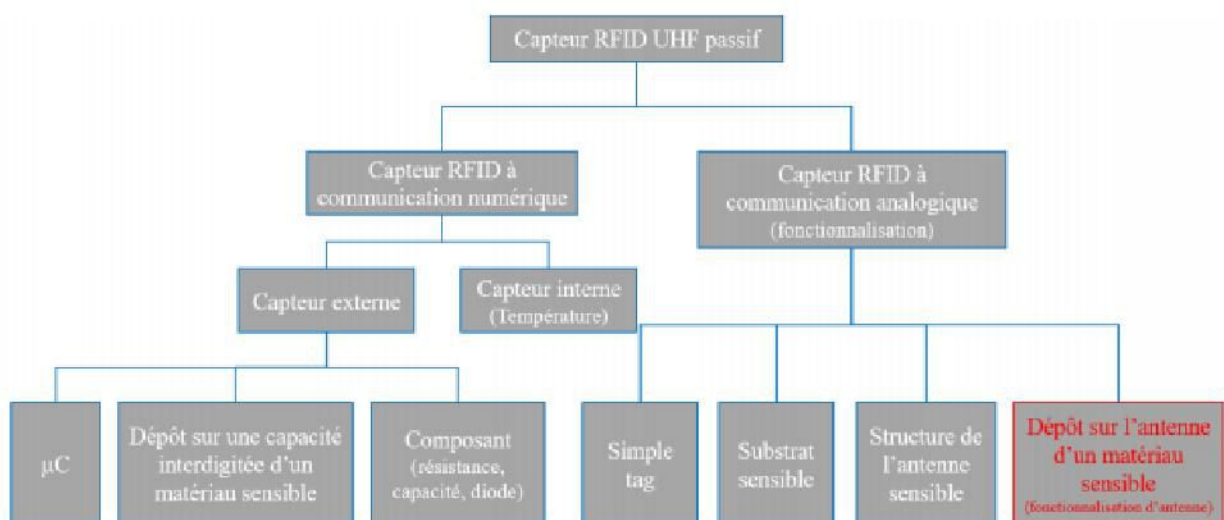
- Par le mesurande qu'il traduit (capteur de position, température, etc.) ;
- Par son rôle dans le processus industriel (contrôle finis, de sécurité, etc.) ;
- par le signal qu'il fournit en sortie qui peut être numérique, analogique, logique ou digital.

- par leur principe de traduction du mesurande (capteur résistif, etc.).
- par leur principe de fonctionnement : capteur Actif ou Passif.

## II.6 Les différents types de capteurs :

### II.6.1 capteur RFID UHF passif :

Le capteur passif est intégré dans un circuit électrique alimenté en énergie, il s'agit d'une impédance dont l'un des paramètres (résistance, condensateur, inductance) est sensible à la grandeur physique mesurée. Il existe deux type de capteur RFID passif le premier c'est : capteur RFID numérique et le secondaire capteur RFID analogique comme il montre la **figure II.2** suivant :



**Figure II.2** : Répartition des différents types de capteur-RFID UHF.

### II.6.2 Capteurs RFID numérique :

La première famille, présentée en **figure II.2** concerne les capteurs-RFID numérique, les informations du capteur étant renvoyées au lecteur sous forme numérique (lecture d'un registre). Les capteurs sont disposés soit à l'intérieur, dans le cas de certaines puces, soit à l'extérieur, par exemple à l'aide d'un capteur commercial [11]. La famille des capteurs-RFID numérique peut être très coûteuse, car les puces utilisées sont les plus chères, elles

embarquent plusieurs dispositifs électroniques (un ADC par exemple). En ajoutant des dispositifs externes (un capteur du commerce), alimentés par la puce, la consommation électrique peut très vite dégrader la sensibilité du capteur. C'est pourquoi des études ont été menées sur les moyens de récupérations et de stockages d'énergies efficaces. Ce qui permet ainsi d'avoir des dispositifs RFID dit semi passifs garantissant une portée de détection plus importante et fiabilisant la récupération de la donnée capteur. C'est le choix de la puce qui détermine le type de capteur, nous avons reparti ces puces en deux sous-familles : les puces RFID avec capteur interne et les puces RFID avec capteur externe.

### II.6.2.1 capteur RFID interne :

Les fabricants de puce RFID ne sont pas nombreux a intégrer directement dans leur produit. Dans le **tableau II.1**, nous avons listé les puces RFID qui embrquent un capteur de température interne.

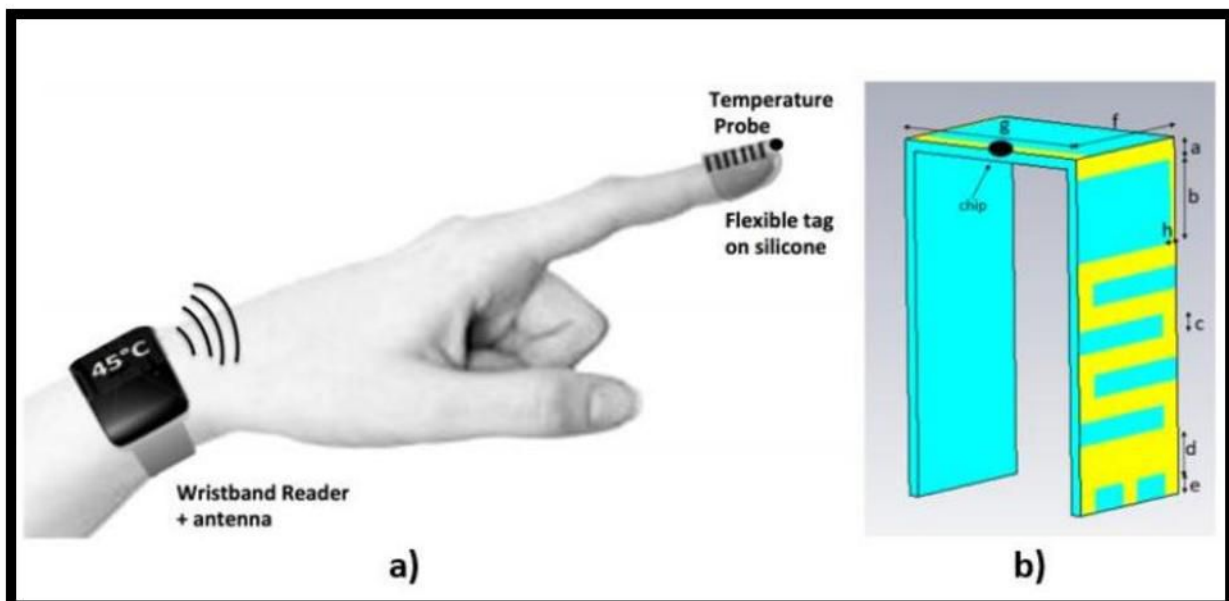
Référence	Fabricant	Puissance d'activation	Plage de détection	Résolution du capteur
SL900A	AMS	-7 dBm	-29°C à 58°C	± 1 °C
PE3001	Productivité Engineering	-6 dBm	-20°C à 50°C	± 0.5 °C
EM4325	EM Micro-électronique	-8.3 dBm	-40°C à 64°C	± 1 °C

**Tableau II.1 :** Puces RFID existantes avec capteur de température interne.

Nous prendrons un exemple de RFID-FAD, les dispositifs augmentés par les doigts(FAD) identifient une technologie portable particulière appropriée pour transformer les doigts humains en surfaces de détection améliorées pour des interfaces homme-ordinateur avancées. La faisabilité d'un FAD UHF RFID intégré au corps est ici étudiée pour la première fois. Le système vise à fournir aux personnes handicapées souffrant d'un manque de sensation thermique, du a des troubles pathologiques, une rétroaction en temps réel de la température détectée par le bout des doigts. Le système «Radio Fingertip», comprenant une antenne lecteur placée sur le poignet et un tag RFID placé au bout du doigt, est illustré **figure II.3 a)**.



En **figure II.3 b)** est présenté le tag capteur-RFID, qui utilise le capteur de température de la puce EM4325.



**Figure II.3 :** a) Système Radio Fingertips de détection thermique,

b) Tag capteur interne.

### II.6.2.2 capteur RFID externe :

Il est également acceptable de connecter un capteur en externe à une puce-RFID de trois manières :

-La première méthode consiste à connecter un capteur numérique ou un microcontrôleur disposant d'un bus de communication à accès série (SPI ou I2C). La solution faisant appel à un microcontrôleur permet d'augmenter les capacités de la puce par l'ajout de capteurs. Cette méthode pour inconvénient d'augmenter largement la consommation et de réduire énormément les performances du tag.

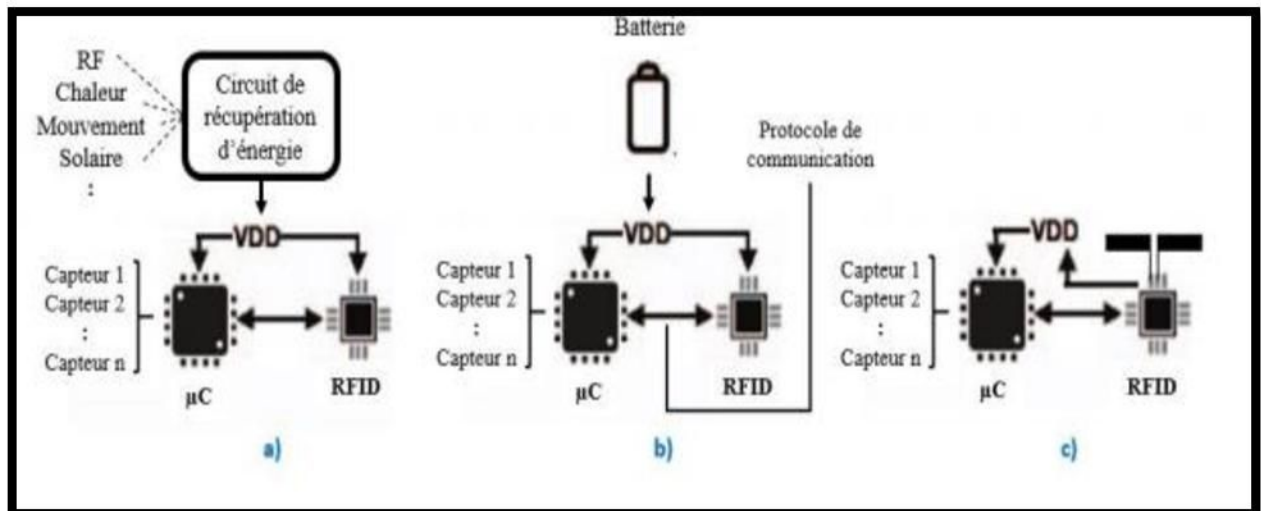
-La deuxième solution se base sur l'utilisation d'une interface de conversion analogique numérique (ADC). Par exemple la puce AMS L900A dispose de deux entrées analogiques à quoi il est possible de connecter des capteurs capacitif, résistifs .

Référence	Fabricant	Entrée capteur externe	Possibilité de connecter un $\mu$ contrôleur
SL900A	AMS	2 entrée dédiées aux capteurs externes de type résistif, capacitif ou optique (diode)	Protocole de communication SPI
EM4325	EM Microelectronic	Pas d'entrée capteur mais possibilité de détection d'arrachement (entrée tout ou rien)	Protocole de communication SPI maitre
EM4324	EM Microelectronic	Pas d'entrée capteur mais possibilité de détection d'arrachement	X
UCODE G2iM, G2iM+ et G2i	NXP		
UCODE I2C	NXP	X	Protocole de communication I2C

**Tableau II.2 :** Comparaison des puces RFID du commerce avec entrées capteurs externes.

### II.6.2.3 Capteur-RFID par l'ajout d'un microcontrôleur :

L'un des plus grands défis de l'ajout d'un microcontrôleur a un tag RFID, est son alimentation. En **figure II.4** sont illustrées les trois méthodes d'alimentation d'un tag avec microcontrôleur. Les études sont surtout orientées sur les tags RFID avec circuits de récupération d'énergie, par exemple la récupération de chaleur corporelle [12], malgré cela, ces systèmes doivent encore être améliorés, car ils sont encombrants, alimentés par batterie et nécessitent donc une maintenance [13]. Par contre, les tags RFID sans batterie, représenté dans la **Figure II.4 c)**, ont une durée de vie illimitée et sont moins encombrant.

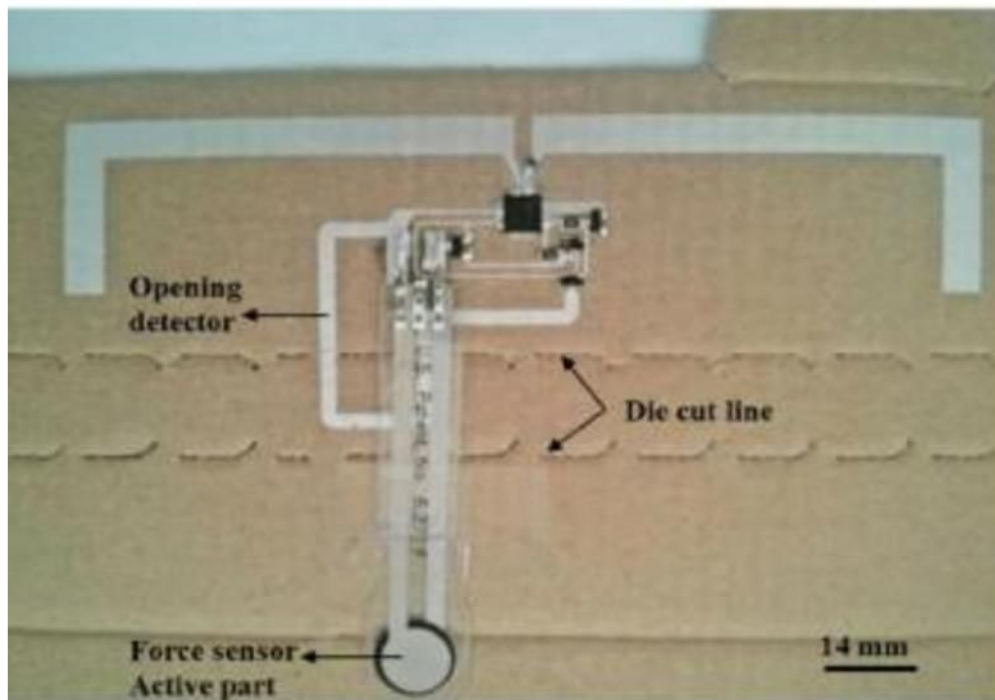


**Figure II.4 :** Différentes méthodes d'alimentation d'un tag composé : d'un microcontrôleur, d'un ou plusieurs capteurs et d'une puce RFID, à l'aide de :

- a)** un circuit de récupération d'énergie, **b)** une batterie, ou **c)** de l'énergie récoltée par la puce RFID provenant du lecteur.

#### II.6.2.4 Capteur-RFID par l'ajout d'un composant externe :

Cette méthode pour réaliser un capteur-RFID est des plus simples à mettre en œuvre, car il suffit de connecter un capteur du commerce en externe sur une puce RFID ayant un ADC, permettant ainsi de convertir l'information analogique avant de la transmettre au lecteur RFID. On remarque dans le **Tableau II.2** la puce RFID AMS SL900A la seule qui possède deux entrées externes dédiées pour les capteurs. C'est donc à l'aide de cette puce RFID que dans la littérature est exposée : un capteur de luminosité dans [14], des capteurs RFID pour des applications médicales. Par exemple l'étude référencée [15] porte sur un capteur flexible de mouvement des doigts pour le suivi de la réhabilitations après un AVC. Une autre étude dans [11] un travail de recherche porte sur le suivi de produit alimentaire, qui cumule : un capteur de pression pour détecter les chutes du produit, et un capteur d'ouverture voir **Figure II.5** Dans cette étude l'ajout d'un capteur externe et le substrat en carton dégrade fortement les performances de détection du capteur RFID avec une puissance d'activation de -2dBm.



**Figure II.5 :** Tag RFID avec capteur de force externe pour le suivi de produit alimentaire.

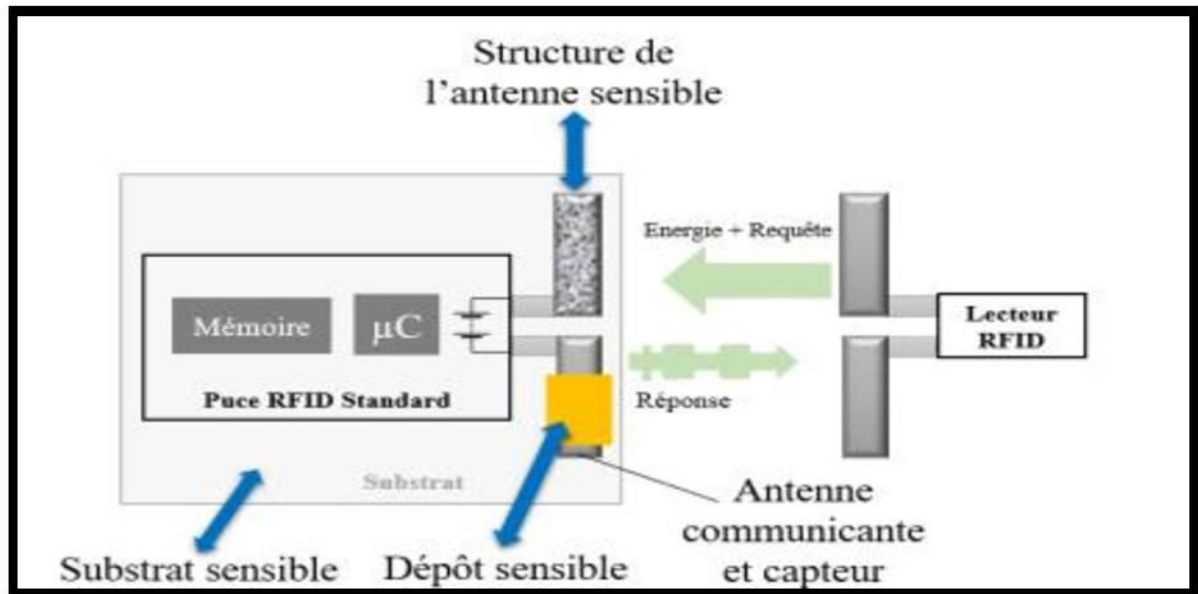
### II.6.3 Capteurs RFID analogique (avec fonctionnalisation) :

Cette partie concerne les capteurs RFID analogique qui traduisent des valeurs de position, de pression, de température sous forme d'un signal (tension ou courant) évoluant constamment entre deux valeurs limites. Ces capteurs elle apporte des solutions technologiques bas coût pour des applications spécifiques. Elle transmettent une information correspondant à un mesurande et sur une plage donnée. Utilisation :

Mesure de grandeurs physiques (Température, Pression, Niveau, Tension, Force, Luminosité, Couleur...). Dans ce type de capteurs, le paramètre physique a mesuré agit sur l'impédance de l'antenne ce qui a pour effet de faire varier la puissance rayonnée vers le lecteur. Comme illustré la **Figure II.6**, éléments sensibles à un paramètre peuvent être utilisés pour désadapter d'impédance de l'antenne :

- Le substrat
- La structure de l'antenne
- Un dépôt sur l'antenne
- Ou encore un élément extérieur utilisé comme 'second' substrat.





**Figure II.6 :** Famille des capteurs-RFID analogique.

Cette deuxième famille est la plus complexe de toutes, en raison du principe du travail. Vue du lecteur, l'information capteur est disponible en suivant les variations de la puissance de transmission nécessaire pour activer le tag ou bien dans la puissance réfléchiée par le tag (RSSI en anglais Received Signal Strength Indication). Il faut donc être certain que ces variations proviennent uniquement du paramètre physique à mesurer et non pas de l'environnement de mesure.

Aujourd'hui, il existe plusieurs types de capteurs-RFID qui se différencient selon le type de Fonctionnalité. Nous avons catégorisé ce type de capteur-RFID selon quatre principes basés sur la position du capteur qui affecte le conditionnement d'impédance :

- Le premier principe se base simplement sur l'effet de l'environnement proche sur l'antenne du tag. Dans ce cas un simple tag RFID non modifié suffit. Par exemple, le masquage physique d'un tag RFID permet de détecter un passage [16]. Le taux d'hygrométrie du sol se mesure à l'aide d'un simple tag enterré .
- Le deuxième principe requiert de rendre le substrat sur lequel est posée l'antenne sensible à un paramètre physique. Par exemple un substrat papier voit son constant diélectrique évoluer en fonction de l'humidité absorbée [17].
- Ensuite, l'élément sensible peut être l'antenne elle-même. La modification structurelle du dépôt conducteur réalisant l'antenne peut permettre la détection de l'humidité [18].



- Enfin transformer un tag en capteur RFID peut se faire via le dépôt d'un élément sensible sur l'antenne [19]. Quel que soit le type de fonctionnalisation, le choix de la puce RFID est très important. Ce choix se fait principalement sur le critère de la puissance d'activation, l'encombrement acceptable (SOT, MagicStrap...) et le prix.

### II.6.3.1 Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un simple tag-RFID :

Dans la littérature, des applications de détections à l'aide d'un simple tag sont principalement axées sur la localisation, utilisant des algorithmes plus ou moins complexes. Ceci a permis de réaliser des robots d'intérieurs se déplaçant de manière autonome, et manipulant des objets. Ensuite, viennent des applications de détection de mouvement ou de présence [16] pour lesquelles la détection se fait par modification du signal retro-modulé par le tag (niveau du RSSI) lors du mouvement du tag ou lors du passage d'une personne à proximité du tag. Beaucoup ont exploité cette technique pour réaliser d'autres types de capteurs comme la détection de l'humidité du sol [17] ou le niveau d'un liquide. Le principe est toujours le même, la modification du signal retro-modulé du tag par interaction avec son environnement proche pouvant être assimilé à un matériau dont la constante diélectrique effective varie.

Dans l'objectif de l'internet des objets, il existe dans la littérature des systèmes de détection, que l'on peut rattacher à la domotique, permettant d'automatiser la maison en fonction des objets manipulés. Dans cette étude [21], un simple tag RFID est utilisé pour détecter trois situations différentes :

- La détection d'un simple touché de l'antenne du tag (désadaptation brève),
- Le masquage de l'objet (désadaptation longue),
- La détection du mouvement d'un objet (désadaptation fluctuante).

Ce système de domotique permet par exemple d'allumer la lumière, sans avoir à se lever, par simple manipulation d'un livre.

D'autres études, ont été menées sur la possibilité de positionner le dispositif de monitoring directement au poignet de la personne (par exemple, pour un suivi médical des personnes âgées), afin d'analyser le rapprochement avec un objet, pour en faire un suivi journalier. Le suivi de la qualité du sommeil avec un dispositif similaire est une autre

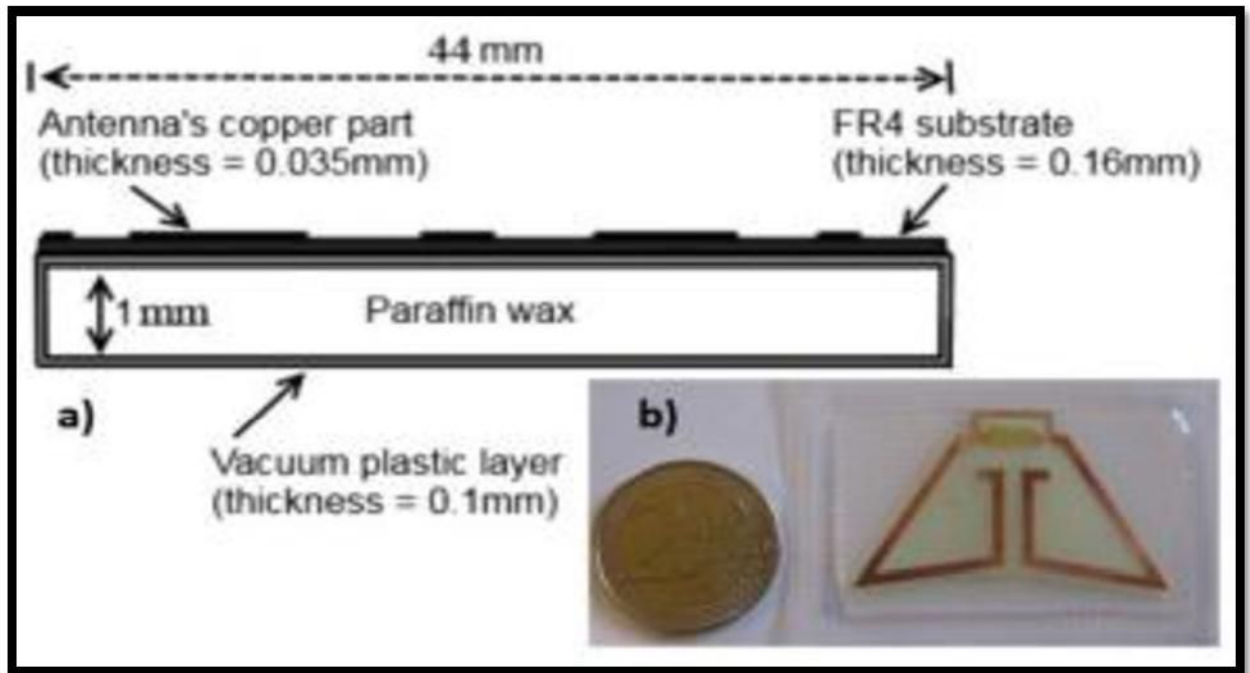
application étudiée dans [22] montrant tout le potentiel de ce type d'approche simpliste de capteur-RFID.

Référence	Type de capteur embarqué	Puce utilisée
<b>Enable IPC RFID Fuse Tags</b>	Arrachement (3.6m)	Higgs 3
<b>Tag Co E-seal</b>	Arrachement (6m, pour container)	Higgs 4
<b>RF micron chameleon</b>	Mouvement (positionnement du tag)	Magnus S2
<b>RTEC ATOM Magnu</b>	Niveau d'humidité (6m, utilisable sur du métal)	Magnus S2
<b>SMARTRAC PATCH</b>	Niveau d'humidité (9m)	Magnus S2
<b>SMARTRAC TADPOLE</b>	Niveau d'humidité (8m)	Magnus S2

**Tableau II.3** : Capteur-RFID avec auto-tune vendu dans le commerce.

### II.6.3.2 Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un substrat sensible :

Il existe plusieurs capteurs-RFID utilisant le substrat comme élément sensible. Par exemple, la conception d'un biocapteur [23] utilisant de la cire de paraffine en tant que matériau sensible à la température, comme substrat du tag (**Figure II.6**). L'idée principale de ce type de capteur de température est basée sur l'affectation des performances globales du tag RFID. L'exposition de ce substrat à des températures élevées modifie les propriétés physiques et chimiques de la cire de paraffine et induit un décalage fréquentiel. Ce décalage de fréquence réduit les performances de l'étiquette du capteur RFID à une fréquence donnée, Ce type de capteur peut être utilisé, par exemple, pour manipuler des produits thermosensibles.



**Figure II.7 :** Bio-capteur-RFID à détection de seuil : a) vue en coupe du capteur-RFID,

b) vue par dessus.

## II.7 Conclusion :

Nous avons introduit dans ce chapitre le fonctionnement général de la technologie RFID. Ensuite, nous avons fait un état d'avancement technologique des capteur-RFID existant, d'un point de vue commercial et académique. Cette étude nous a permis de tracer un cadre à suivre pour mener à terme l'objectif de ce mémoire. Le point central est de réaliser une antenne capteur RFID fonctionnalisée et optimisée pour des critères de performances bien définies.

# **Chapitre III**

---

## **Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif**

---

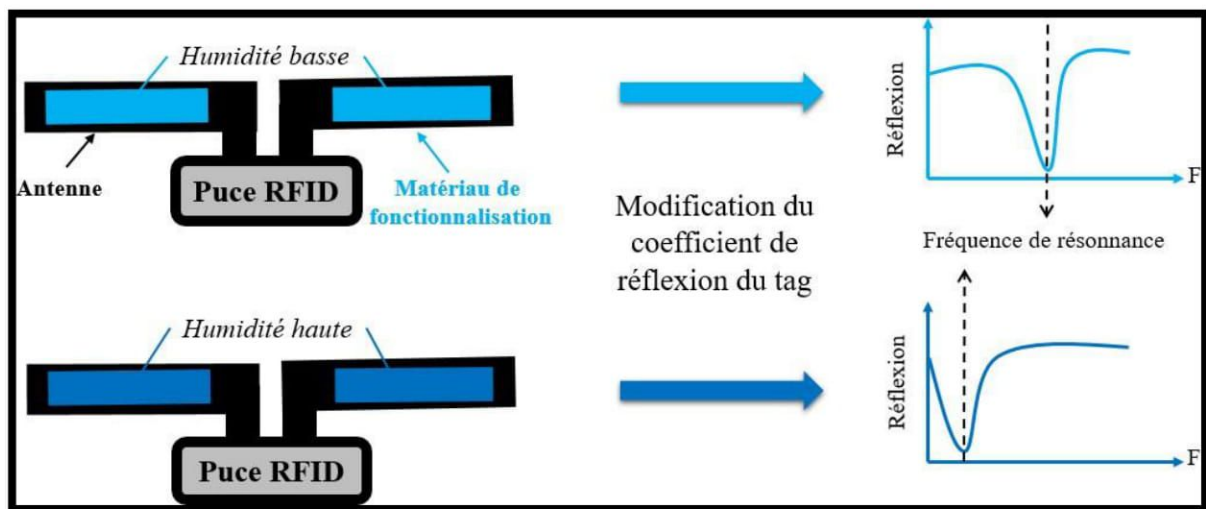


# Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

## III.1 Introduction:

Dans le chapitre précédent, nous avons défini ce qu'est un capteur-RFID et nous avons présenté les différentes façons de le faire et de l'utiliser. Pour comprendre, la **figure III.1** donne la schématisation d'un capteur RFID UHF passif tel. Ce dernier est constitué d'une puce RFID et d'une antenne RF dont les parties colorisées en bleues symbolisent la fonctionnalisation à partir d'un dépôt de matériau sensible représentant la partie capteur.

Dans le cas présent, la grandeur physique à mesurer est la variation d'humidité. Lorsque celle-ci évolue, cela entraîne une variation des propriétés diélectriques du matériau utilisé comme capteur, ce qui engendre une répercussion directe sur la réponse électromagnétique du capteur-RFID. Plus précisément, c'est la fréquence de résonance de l'antenne du capteur qui sera directement impactée. A cette fréquence, le maximum d'énergie est transféré de l'antenne à la puce. Comme on peut le voir sur les courbes à droite de la figure, la fréquence de résonance diminue lorsque l'humidité augmente.



-----

**Figure III.1:** Stratégie de détection par fonctionnalisation d'antenne du capteur-RFID UHF passif

Nous allons donc dans une première partie présenter des notions fondamentales permettant de comprendre notre démarche. Tout d'abord, en exposant la théorie liée à l'adaptation/désadaptation de notre antenne RFID. Puis, nous traiterons l'utilisation de matériaux diélectriques en tant qu'élément fonctionnalisant de notre capteur-RFID. Par la suite, la deuxième partie, traitera des résultats de simulations.

# Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

## III.2 Notions Fondamentales :

Les étiquettes RFID passives, comme décrites dans le chapitre 1, sont simplement composées d'une antenne et d'une puce RFID. L'antenne permet la réception des ondes électromagnétiques (EM) issues du lecteur RFID, fournissant ainsi l'énergie nécessaire à la puce considérée alors comme une charge. Par ailleurs, la même antenne transmet au lecteur RFID les informations contenues dans la puce (code EPC...) en utilisant le principe de rétrodiffusion. Pour rappel, ce principe de communication est basé sur une modulation de charge connectée à l'antenne. Ceci montre l'importance du couple antenne/puce, pour assurer une communication entre le tag RFID et le lecteur.

Donc, le principal enjeu du couplage RFID-capteur, se trouve dans le niveau d'adaptation de l'antenne avec le matériau sensible utilisé comme élément fonctionnalisant de cette même antenne. Nous allons présenter dans cette partie des notions fondamentales pour comprendre le fonctionnement d'un capteur-RFID. Nous commencerons par expliquer la théorie liée aux antennes RFID.

### III.2.1 Éléments de Théorie des antennes RFID :

#### III.2.1.1 Notion d'Adaptation/ Désadaptation d'impédance :

L'étape d'adaptation d'impédance est essentielle pour garantir une puissance maximale de l'antenne vers la puce RFID et optimiser ainsi les performances du tag. Pour cela, l'impédance de l'antenne du tag RFID doit être directement adaptée à celle de la puce, qui est généralement une impédance complexe.

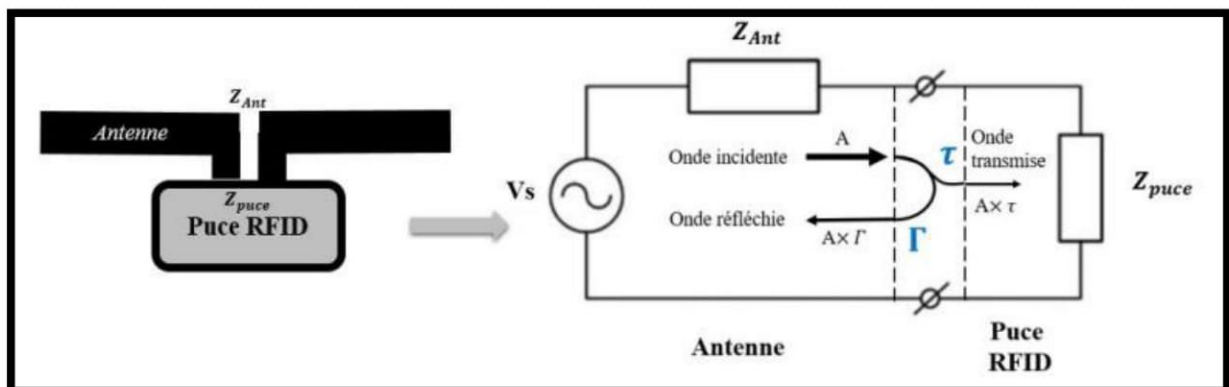


Figure III.2 : Circuit électrique équivalent d'un tag RFID UHF passif [24].

## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

---

Le circuit équivalent de la charge de l'antenne, est donné Figure III.2. Avec,  $V_s$  qui représente la tension alternative aux bornes de l'antenne, induite par l'onde électromagnétique (EM) provenant du lecteur.  $Z_{ant}$  représente l'impédance complexe de l'antenne. [24].  $Z_{puce}$  représente l'impédance complexe de la puce RFID.

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} \quad (III.1)$$

$$\text{Avec : } R_{ant} = R_{rayonnement} + R_{pertes}$$

$$Z_{puce} = R_{puce} + jX_{puce} \quad (III.2)$$

L'impédance de la puce RFID est spécifique à la conception du circuit intégré, elle dépend de la fréquence : Et est fournie par les constructeurs [25]. Afin de garantir un transfert de puissance maximal de l'antenne à la charge (puce), l'impédance d'entrée de l'antenne doit être égale à l'impédance complexe conjuguée du circuit intégré dans la fréquence de fonctionnement du tag [24].

$$R_{ant} = R_{puce} \quad \text{et} \quad X_{ant} = -X_{puce} \quad (III.3)$$

L'adaptation d'impédance peut être réalisée à l'aide de composants localisés ou distribués sous forme de circuit d'adaptation dédiée. La plupart des antennes utilisées pour les tags RFID UHF passifs sont basés sur des géométries de type dipôles gravés ou imprimés sur des substrats diélectriques de faible épaisseur. Les géométries variées que l'on peut observer répondent à des contraintes d'encombrement, de coût de fabrication et de garantie de fonctionnement pour un environnement particulier.

Les techniques d'adaptation d'impédance des antennes dipôles, se sont également multipliées avec entre autres, l'utilisation de « T-match », de « T-slot », ou encore de « loop », de « meander » et de « Tip-loading » [26].

### III.2.1.2 Le coefficient de Réflexion et de Transmission :

Le coefficient de Réflexion  $\Gamma$ , illustré en Figure III.2, est le rapport d'amplitude entre l'onde EM réfléchi en entrée de l'antenne et l'onde EM incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne  $Z_{ant}$  et de l'impédance caractéristique de la puce RFID  $Z_{puce}$ .



## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

---

$$\Gamma = \frac{Z_{puce} - Z_{ant}}{Z_{puce} + Z_{ant}} \quad (III.4)$$

Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance est renvoyée vers la source (re-rayonnée par l'antenne), appelée en anglais « mismatchloss » (pertes de désadaptation) [27].

Dans le cas particulier d'un capteur-RFID avec antenne fonctionnalisée, la désadaptation d'impédance subit par l'antenne lorsque la zone capteur de celle-ci est altérée par la variation du paramètre environnemental à détecter, impacte significativement le coefficient de réflexion. C'est donc un paramètre indispensable [27].

Le coefficient de Transmission  $\tau$  (voir Figure III.2), également très utilisé en RFID, représente la fraction de puissance transmise de l'antenne du tag vers la puce, ou inversement de la puce vers l'antenne pour le re-rayonnement de l'onde, lors de la réponse du tag. Ce coefficient dépend également des impédances de l'antenne et la puce, et s'exprime suivant l'équation [27] :

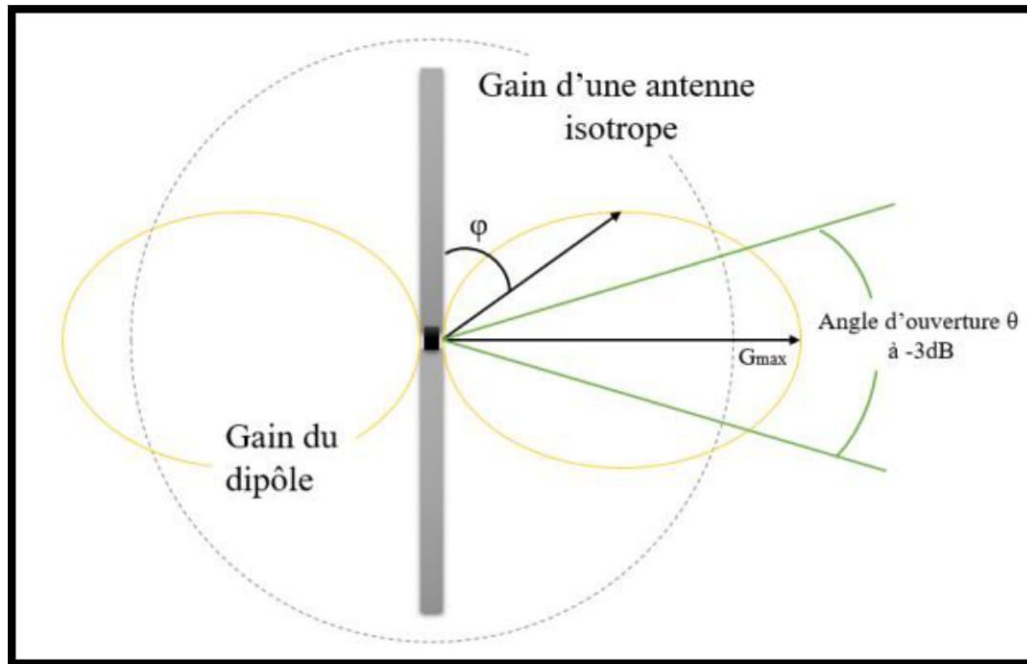
$$\tau = 1 - |\Gamma^*|^2 = \frac{4R_{puce} R_{ant}}{|Z_{puce} + Z_{ant}|^2} \quad (III.5)$$

### III.2.1.3 Notions de Gain et de directivité d'une antenne dipôle :

De manière générale, la directivité d'une antenne est définie comme étant le rapport de la densité de puissance rayonnée maximale dans une direction donnée divisée par la densité de puissance rayonnée d'une antenne isotrope [28], voir l'illustration en Figure III.3. Le gain réalisé d'une antenne qui prend en compte tous les éléments de pertes est défini par l'équation (3.6). Ce gain est basé sur la directivité  $D(\theta, \varphi)$ , le coefficient de transmission  $\tau$  et l'efficacité de rayonnement  $e$  de l'antenne. Il dépend également de l'angle d'ouverture de l'antenne  $\theta$  et de l'angle de polarisation  $\varphi$  entre l'antenne d'émission et de réception. Dans le cas sans pertes, le rapport de l'efficacité de l'antenne multipliée par le coefficient de transmission est égal à 1, et donc le gain est égal à la directivité.

$$G(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \cdot e \cdot \tau \quad (III.6)$$



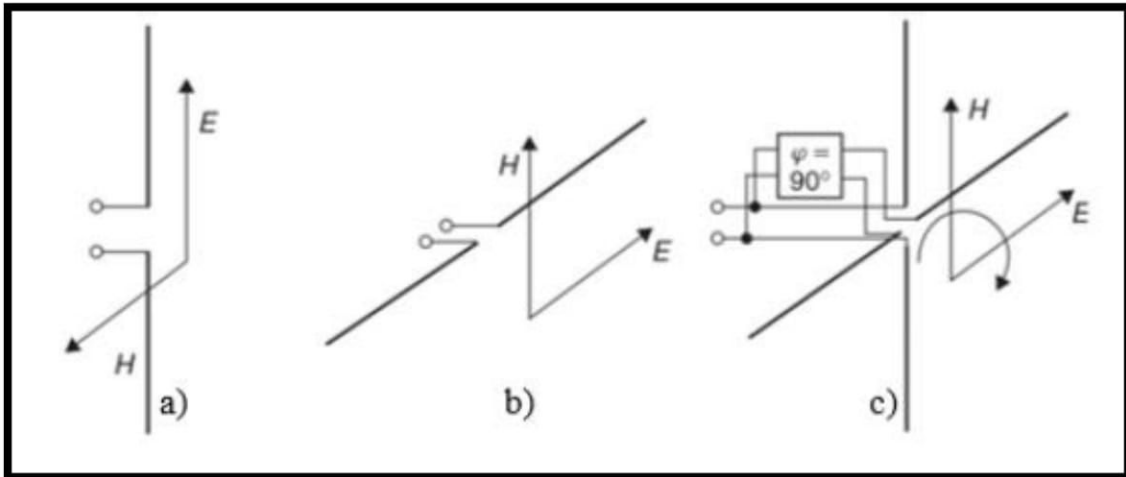


**Figure III.3:** Diagramme de rayonnement d'un dipôle comparé à celui d'un dipôle isotrope [28].

### III.2.1.4 Notion de Polarisation :

La polarisation d'une onde électromagnétique est déterminée par l'orientation du champ électrique de l'onde. Il existe plusieurs types de polarisations dont la polarisation linéaire et la polarisation circulaire. En polarisation linéaire, si les lignes de champ électrique sont parallèles à la surface de la Terre alors la polarisation est dite horizontale, et si les lignes de champ électrique sont perpendiculaires à la surface de la Terre, la polarisation est dite verticale. Ainsi, comme illustrée dans la Figure III.4 a) et b), l'antenne dipôle est une antenne polarisée linéairement dans laquelle les lignes de champ électrique sont parallèles à l'axe dipolaire. La transmission d'énergie entre deux antennes polarisées linéaires est optimale si les deux antennes ont la même direction de polarisation. D'autre part, la transmission d'énergie est à son point le plus bas lorsque les directions de polarisation des antennes d'émission et de réception sont disposées exactement à  $90^\circ$  ou  $270^\circ$  l'une par rapport à l'autre (par exemple une antenne horizontale et une antenne verticale).

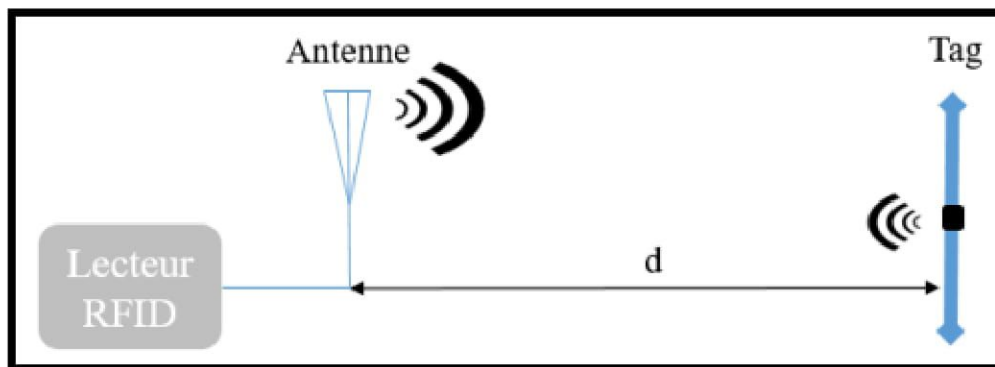
## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif



**Figure III.4:** Polarisation d'une onde électromagnétique, a) polarisation Verticale, b) polarisation horizontale et c) polarisation circulaire [29]

Dans les systèmes RFID, utilisant principalement des antennes dipôles à polarisation linéaire, il n'y a généralement pas de relation fixe entre la position de l'antenne du tag et celle du lecteur. Plus particulièrement, pour des applications de logistique, cela peut conduire à des fluctuations dans la plage de lecture qui sont à la fois élevées et imprévisibles [29].

### III.2.1.5 Qu'est-ce que la distance théorique de lecture :



**Figure III.5:** Illustration de la distance de lecture entre un lecteur RFID et un tag

La distance de lecture (Figure III.5) est un paramètre très utilisé en RFID UHF passive, car elle regroupe en une seule formule plusieurs paramètres essentiels des performances du tag et du lecteur. Elle est tirée de l'équation de Friis (3.7) et est souvent mise sous la forme de l'équation (III.8).

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_t(\theta, \varphi)G_r(\theta, \varphi) \quad (\text{III.7})$$

## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

---

Avec :

**P<sub>t</sub> (W)** : la puissance délivrée à l'antenne d'émission (antenne lecteur)

**P<sub>r</sub> (W)** : la puissance collectée sur l'antenne de réception (liée à la sensibilité de la puce RFID utilisée)

**G<sub>t</sub>** : est le gain de l'antenne d'émission (antenne lecteur) **G<sub>r</sub>** est le gain de l'antenne de réception (antenne du tag) **d (m)** la distance théorique de lecture

**λ(m)** : longueur d'onde

**τ** : coefficient de transmission

**ρ** : pertes de polarisation

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{G_t(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi) (1 - |\Gamma^*|^2)}{P_r}} \quad (\text{III.8})$$

Ces équations sont données en fonction de plusieurs paramètres dont certains seront fixés et connus comme la longueur d'onde  $\lambda$ , le gain de l'antenne du lecteur  $G_t$ , la sensibilité de la puce RFID  $P_r$ . Par contre, les pertes de polarisation  $\rho$  sont variables et dépendent de l'orientation du tag au moment de la mesure. La puissance maximale  $P_t$  en sortie du lecteur RFID doit être conforme aux limites imposées par les autorités de chaque pays sur la puissance rayonnée en sortie de l'antenne. Suivant les normes nous utiliserons :

Dans le cas d'un capteur-RFID, l'environnement impacte plusieurs paramètres de l'antenne du tag dont le gain et le coefficient de transmission. Ceci est d'autant plus vrai pour les capteurs-RFID avec fonctionnalisation de l'antenne. Cette fonctionnalisation se fait à l'aide d'un dépôt d'un matériau sensible, dont la permittivité relative varie en fonction du paramètre à détecter.

### III.2.2 Notion de permittivité diélectriques :

Les milieux diélectriques sont des matériaux qui ont la propriété de se polariser sous l'effet d'un champ électrique, ils peuvent également être considérés comme des isolants. Lorsque ces derniers sont parfaits, il n'y a pas de charges libres ou mobiles, mais dans la réalité les diélectriques contiennent un certain nombre de charges libres provenant des

## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

impuretés internes. Nous avons illustré certains matériaux en Figure III.6, en fonction de leurs résistivités [27].

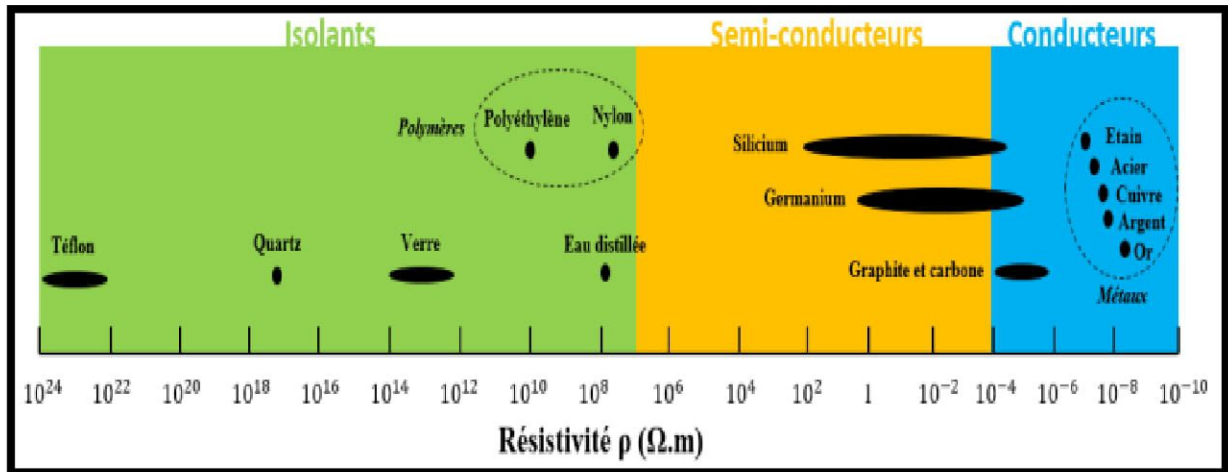


Figure III.6 : Matériaux en fonction de la résistivité [30].

Plusieurs phénomènes se déclenchent dans les matériaux lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique, que cela soit la conductivité ou la polarisation, ils induisent des pertes dans le matériau. Tous ces phénomènes dépendent de la fréquence d'excitation, de la température et de la structure interne du diélectrique.

### III.2.2.1 Choix d'un bio-polymère comme matériau sensible :

Afin de fonctionnaliser notre capteur-RFID, nous avons décidé d'utiliser comme matériau sensible, le gluten de blé, un bio-polymère déjà étudié lors d'un précédent travail de thèse [31]. En effet, ce bio-polymère présente des propriétés intéressantes de transfert de gaz, et il est aussi un matériau polarisable lors d'une excitation par un champ électrique [32]. De plus, le film de gluten de blé est largement étudié comme matériau écologique pour les emballages alimentaires [33]. La capacité du gluten de blé à interagir avec les molécules d'eau a été caractérisée et évaluée en termes de propriétés électriques et diélectriques [34].

### III.3 Design, optimisation et simulation :

Dans cette partie, nous concevons une antenne rayonnante de manière efficace, tout en couplant sur cette même antenne une zone de dépôt permettant de sensibiliser l'antenne au paramètre cible à détecter. Pour y parvenir, nous avons divisé l'antenne de notre capteur-RFID en trois parties comme illustré sur la Figure III.7



## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

- **La zone de dépôt** : L'antenne doit posséder une zone sensible sur la quelle se fera le dépôt de notre gluten de blé. Nous avons donc utilisé une capacité inter digitée afin d'augmenter la sensibilité de l'antenne aux variations du paramètre physique [35].
- **La partie rayonnante** : Dans cet exemple, l'antenne est un dipôle. Une simple modification géométrique de ce dipôle permet de modifier la fréquence de résonance de l'antenne. Puis, par souci d'encombrements, le dipôle peut être replié.
- **Le substrat** : Le substrat doit être à faible perte, afin de ne pas détériorer l'efficacité de l'antenne. Pour se conformer à divers objets, le substrat est préférentiellement souple, notamment afin de le disposer sur des emballages alimentaires pour un suivi en humidité et en gaz. Dans ce travail nous avons utilisé un substrat souple en poly imide, un matériau couramment utilisé dans l'industrie électronique.

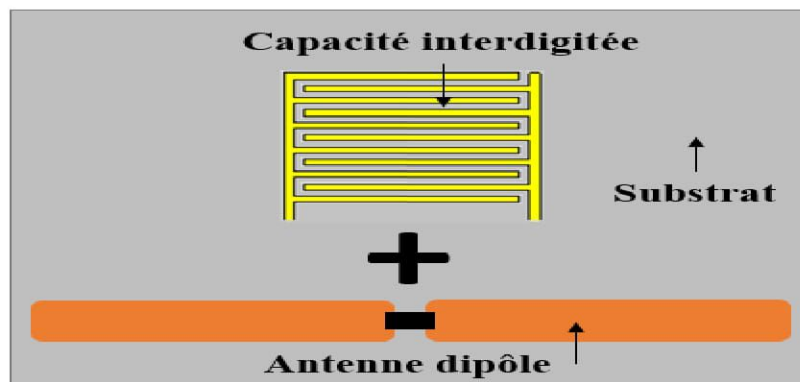


Figure III.7 : Illustration de la composition de l'antenne capteur proposée.

### III.3.1 Outils de simulation: CST Microwaves Studio :

Durant ce projet de fin d'étude, les simulations du capteur-RFID ont donc été réalisées à l'aide du logiciel CST Microwaves Studio. Ce logiciel permet la conception de l'antenne du capteur RFID en s'appuyant sur des études paramétriques pour converger vers un design optimal dans la bande de fréquence RFID UHF. Ce logiciel utilise les équations de Maxwell [24], [36], et utilise différentes méthodes numériques pour le calcul des champs électromagnétiques. Les méthodes les plus couramment utilisées sont la méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain), la méthode FEM (FiniteElement Method) et la méthode des moments(MoM).

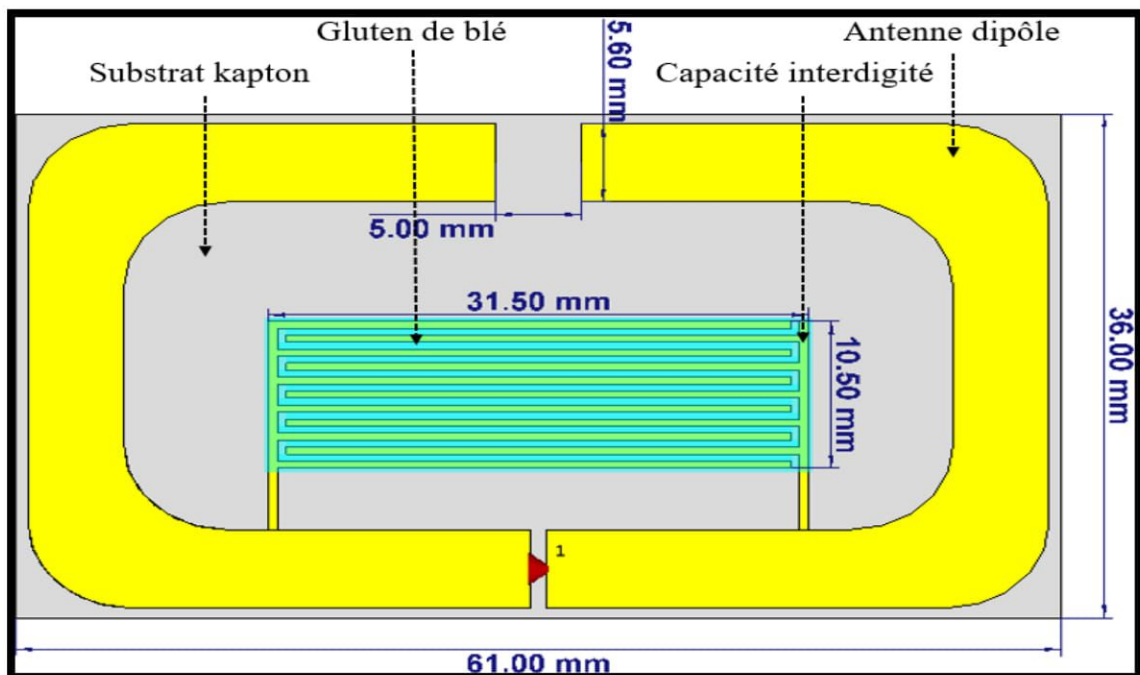
## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

Les étapes habituellement suivies lors de modélisation d'antenne ou de composant RF sont divisées en trois parties: prétraitement (mise en place du modèle), résolution (génération d'une solution approximative des équations de Maxwell en appliquant l'une des méthodes numériques) et post-traitement (évaluation des résultats et calcul des quantités de la solution du solveur).

En ce qui concerne le prétraitement, il s'agit d'abord de créer la géométrie, définir les propriétés des matériaux, puis, l'application des conditions aux limites et des sources, et enfin, le choix et le paramétrage du solveur.

Le processus de maillage (subdivision du domaine de calcul éléments plus petits) peut être considéré comme faisant partie du prétraitement. Il affecte fortement le temps de calcul et la précision de la solution.

### III.3.2 Présentation du design de l'antenne :



**Figure III.8 :** Design de l'antenne du capteur RFID proposée Avec dépôt du gluten de blé et dimensions.

## **Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif**

---

La géométrie de l'antenne du capteur-RFID, présentée Figure III.8, a été déterminée à la suite d'une étude paramétrique réalisée sur deux parties : le dipôle et la partie capacitive. Cette étude a montré que plusieurs paramètres de l'antenne influencent plus ou moins fortement la fréquence de résonance de l'ensemble.

L'objectif se trouve donc dans la recherche du bon compromis entre plusieurs paramètres, afin d'optimiser l'antenne à la fréquence de résonance voulue. Nous avons fixé des conditions initiales de simulation:

- Sur le matériau sensible, qui est considéré dans l'état du plus faible niveau d'humidité détectable.
- Sur la fréquence de résonance, la fréquence choisie est de 868 MHz.
- Ensuite, sur la taille finale de notre antenne, pour rester dans un encombrement minimal (de taille inférieure à celui d'une carte à puce), nous utilisons une géométrie du type antenne dipôle repliée.
- Sur le substrat, ou nous avons utilisé un substrat en polyimide (Kapton), d'une épaisseur de 50 $\mu$ m avec une constante diélectrique  $\epsilon'$  de 3,5, et des pertes diélectriques  $\epsilon''$  de 0,01(à1MHz) [37],[38].

### **III.3.3 Étude paramétrique et optimisation de l'antenne capteur-RFID :**

Cette étude a été réalisée dans le but de connaître l'influence de la variation des dimensions globales de l'antenne sur les paramètres de l'antenne (coefficient de réflexion, fréquence de résonance, gain, directivité ...etc.). Pour cela, nous sommes partis de conditions de base c'est-à-dire une antenne adaptée à l'impédance de la puce RFID, une zone inter digitée recouverte d'un dépôt de gluten de blé avec les propriétés diélectriques.

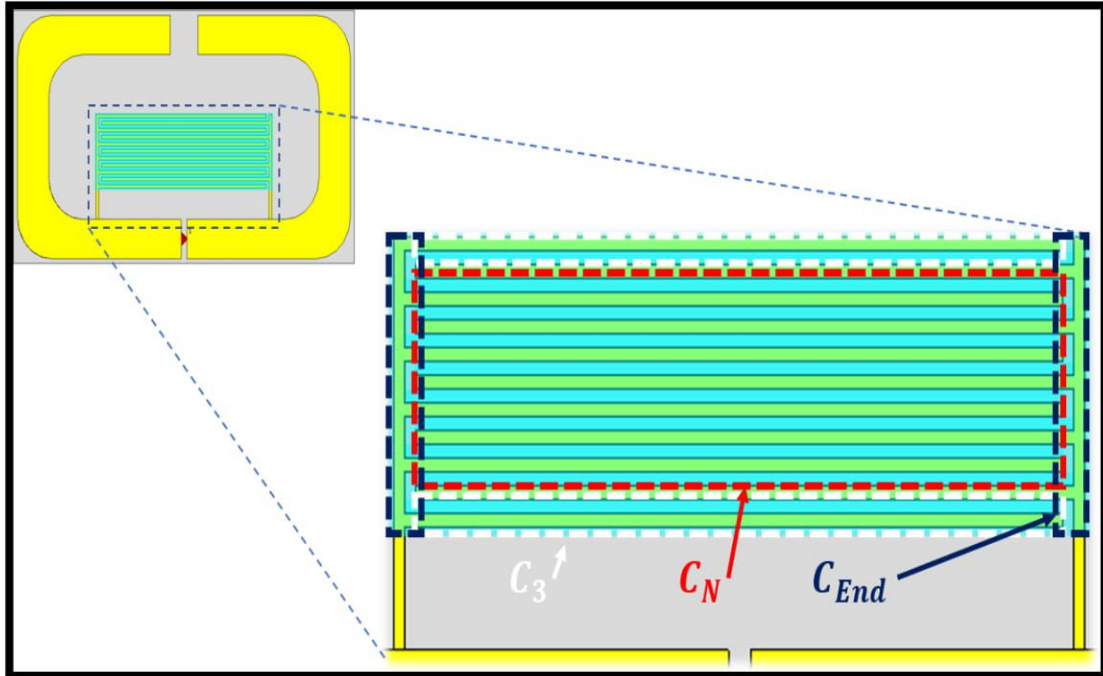
Cette étude nous permettra de comprendre quels sont les paramètres géométriques qui permettent d'ajuster la fréquence de résonance et modifient fortement l'adaptation.

## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

### III.3.3.1 Étude paramétrique de la zone de dépôt :

L'étude concerne la capacité inter digitée, sur laquelle est déposé le gluten de blé mesures. La méthode capacitive est une des méthodes utilisées pour la caractérisation de matériaux diélectriques [39].

De plus, les capacités inter digitées ont pour principal avantage d'être facilement réalisables avec les techniques de fabrication électronique classique, plusieurs travaux ont permis de les modéliser de manière plus ou moins complexe [40]. Par exemple dans cette étude [41], la capacité inter digitée est divisée en 3 sous capacité, leurs formules sont relativement complexes, mais à l'aide d'un outil mathématique il est possible d'en extraire la permittivité diélectrique du matériau déposé, en fonction des différents paramètres géométriques et des permittivités connues. Nous nous aidons de cette représentation Figure III.9 pour mieux comprendre l'étude paramétrique. Et il ressort de ces différents travaux que la capacité totale (équation III.9) est très sensible aux variations de paramètres géométriques, et plus particulièrement la zone entre les doigts inter digités.



**Figure III.9:** fractionnement tiré de l'étude [41] appliqué à notre capteur-RFID



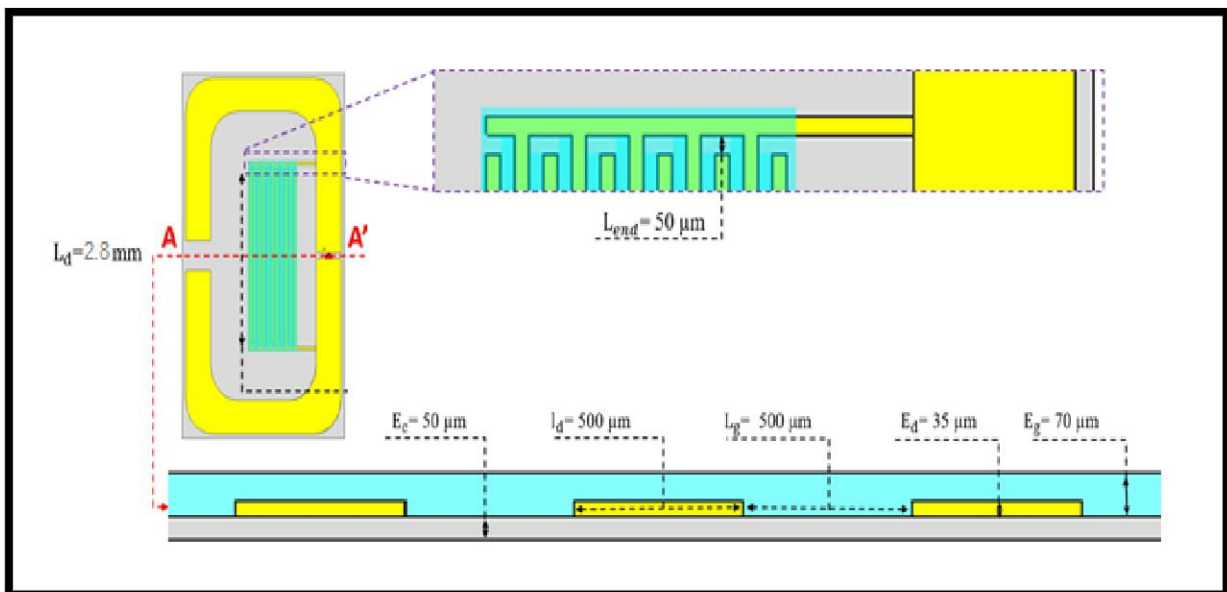
## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

Comme illustré Figure III.9,  $C_3$  représente la capacité formée par les deux doigts aux extrémités et le doigt voisin,  $C_N$ , représente la capacité formée par le reste des doigts au centre de l'inter digité (c'est-à-dire  $n-3$  doigts) et enfin,  $C_{End}$  représente la capacité formée par l'extrémité des doigts.

$$C_{totale} = C_3 + C_N + C_{End} \quad (III,9)$$

Afin de comprendre quels sont les paramètres géométriques les plus sensibles de notre capacité inter digitée totale  $C_{totale}$ , nous avons décidé de faire varier les «sous-capacités» ( $C_3$ ,  $C_N$ ,  $C_{End}$ ) indépendamment et d'en observer la variation induite sur la fréquence de résonance de l'antenne.

Nous avons donc choisi de faire varier la distance inter digitée ( $L_g$ ), la longueur des doigts ( $L_d$ ), leurs largeurs ( $l_d$ ), représentées sur la Figure III.10, les dimensions données en Figure III.10 sont les dimensions pour les quels le capteur-RFID a été optimisé.



**Figure III.10 :** Vue en coupe de la capacité inter digitée : dimensions et épaisseurs optimale

Le tracé du module du coefficient de réflexion, en fonction de la fréquence est représenté dans la Figure III-11. Nous avons atteint une bonne adaptation  $S_{11} \approx -30$  dB à notre fréquence de travail (868 MHz)

## Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

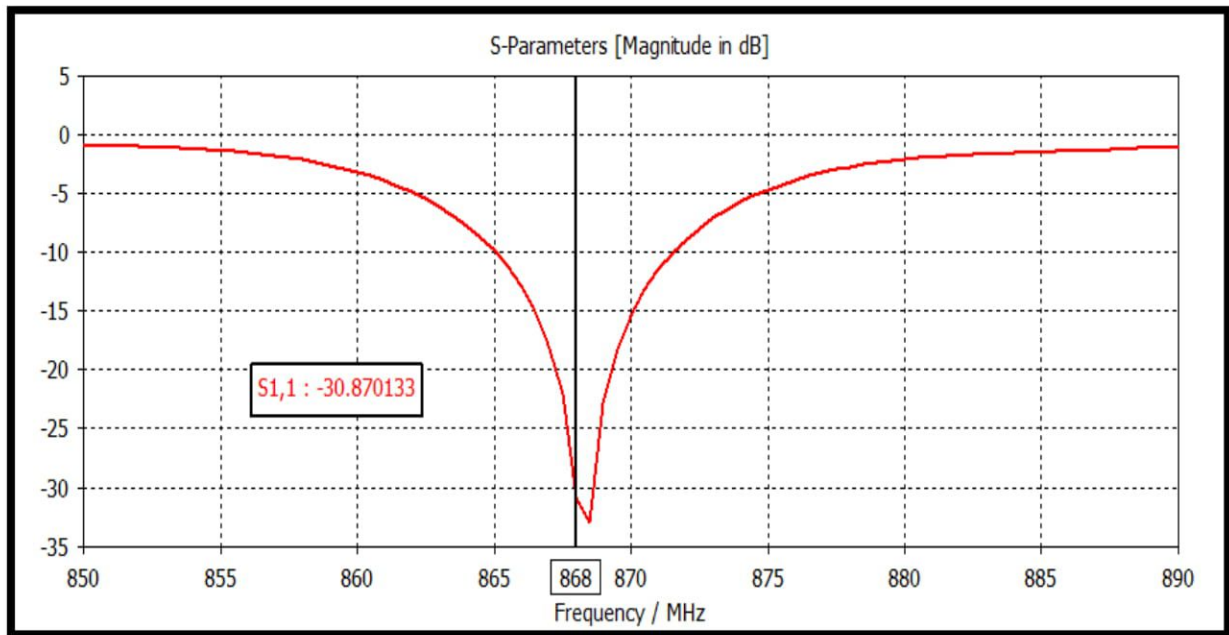


Figure III.11 : Coefficient de réflexion S11 (dB) de l'antenne.

- Étude de l'effet des variations de l'espace à l'extrémité des doigts (Capacité Cend)

Ensuite, nous avons fait varier l'espace se trouvant à l'extrémité des doigts, noté ( $L_g$ ) sur la Figure III.11. et (g) dans la simulation. Les résultats de simulation sont représentés Figure III.12. Pour une variation de  $100\mu\text{m}$ , nous remarquons que le coefficient de réflexion décale vers des fréquences plus basses

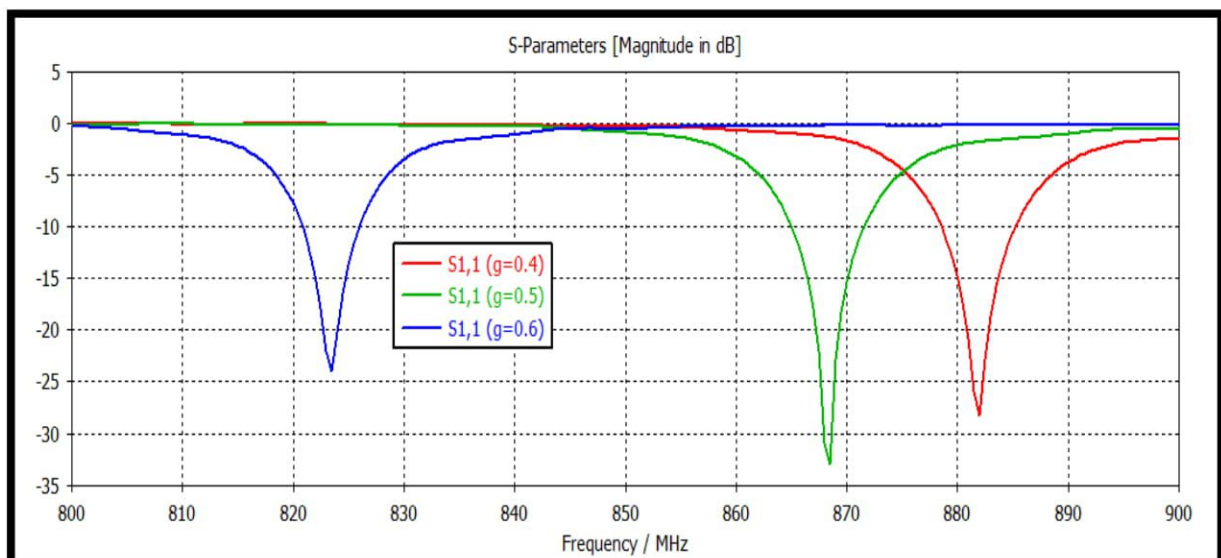
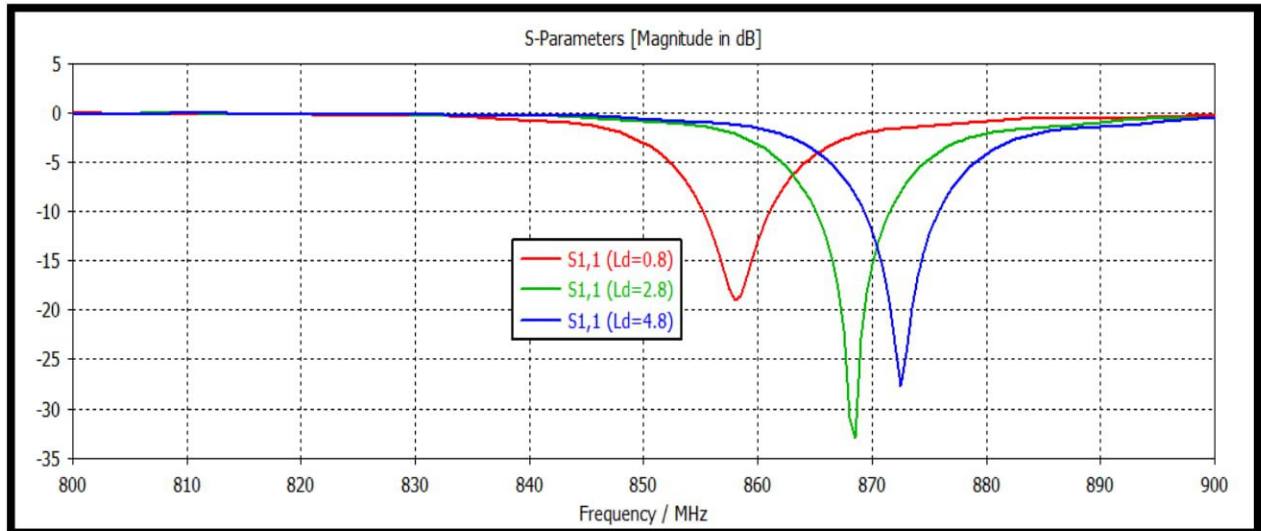


Figure III.12: Étude de l'effet des variations de l'espace à l'extrémité des doigts (Capacité Cend), simulation avec impédance de la puce ( $Z_{\text{puce}}$ ).

# Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

## III.3.3.2 Repliment de l'antenne dipôle :

Comme pour la partie précédente, nous allons maintenant voir l'effet sur le coefficient de réflexion lors de variations des dimensions du dipôle. Plus précisément, nous avons fait varier la longueur du dipôle au niveau du repliement. Les résultats de nos simulations sont présentés en Figure III.13. Ceci a pour effet d'ajouter une capacité au niveau du repliement et permet également d'ajuster la fréquence de résonance.



**Figure III.13:** Étude de l'effet des variations de Repliment de l'antenne dipôle ( $L_d$ ), simulation avec impédance de la puce ( $Z_{puce}$ ).

## III.3.3.3 diagramme de rayonnement et le rapport d'onde stationnaire de l'antenne capteur :

La représentation de diagramme de rayonnement en 3-D pour cette conception, est représentée dans la Figure III-14. Ce diagramme est omnidirectionnel, cette antenne se comporte comme une antenne dipôle. La valeur absolue du gain de cette antenne est de 2.32 dB à la fréquence 868MHz.



# Chapitre III : Design, conception et caractéristiques du capteur RFID UHF passif

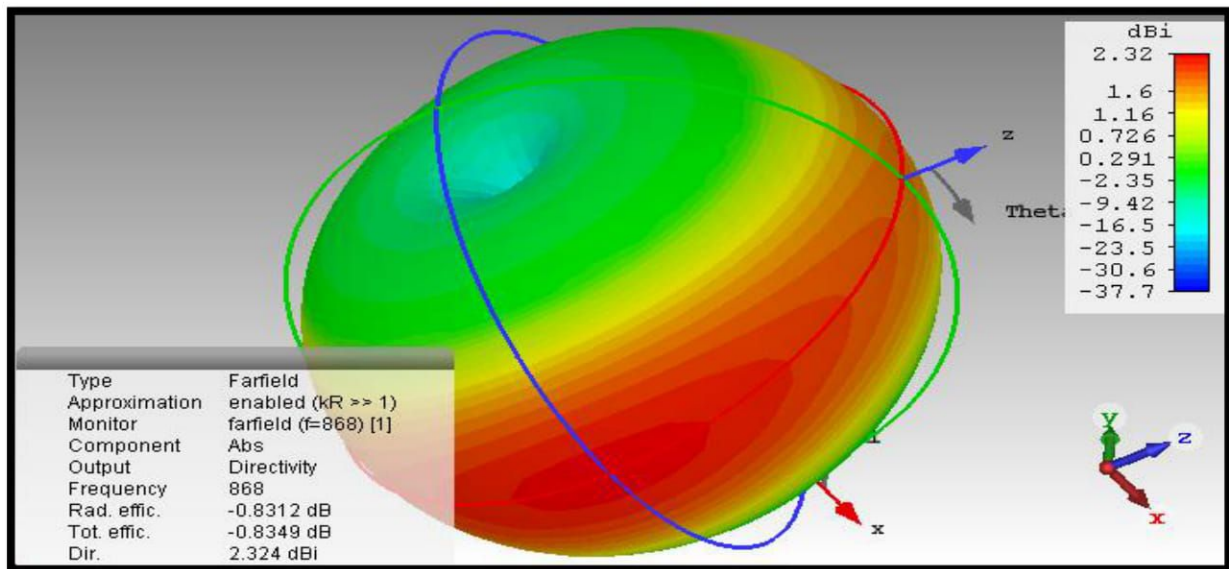


Figure III.14 : Gain réalisé de l'antenne optimisée.

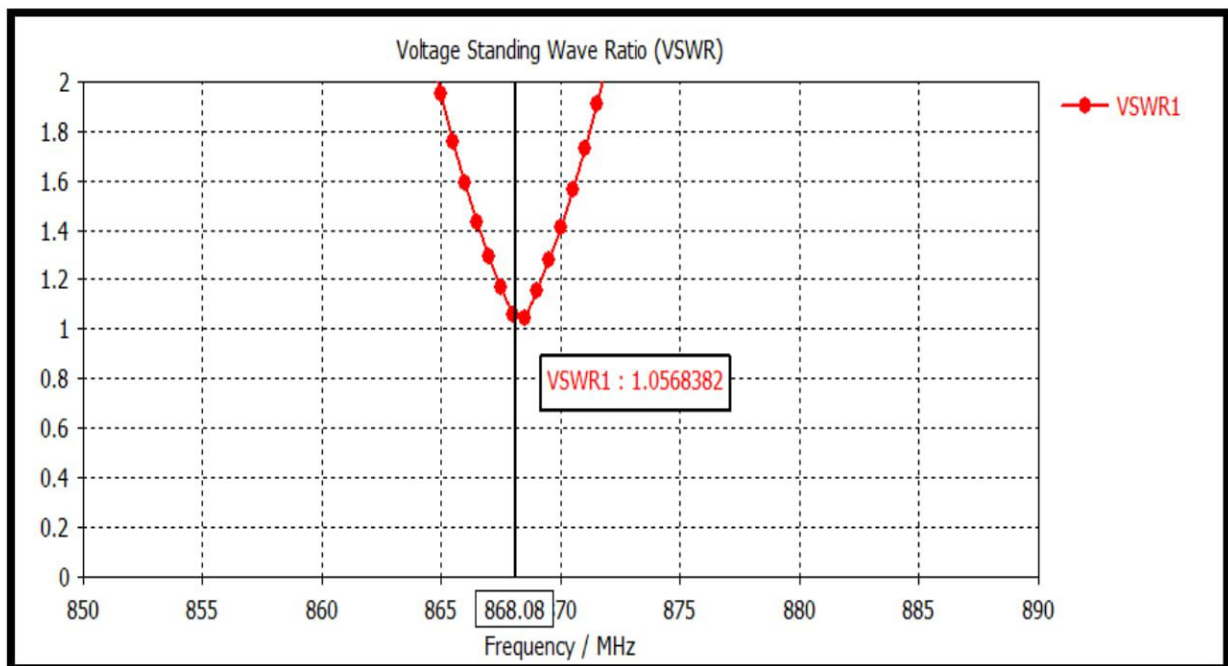


Figure III.15 : le rapport d'onde stationnaire de l'antenne :  $< 2$  à la fréquence 868 MHz.

## III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit de manière détaillée la stratégie de détection basée sur la variation de permittivité du gluten de blé. Nous avons également mené une étude paramétrique pour mieux comprendre le design du capteur RFID, ce qui nous a permis de converger vers une géométrie optimale garantissant une bonne sensibilité.

Le capteur RFID a été conçu pour fonctionner en bande européenne, dont la fréquence est 868 MHz. Le capteur présente un gain réalisé de 2.32dB.

## **Conclusion générale :**

Ce projet de fin d'étude, qui portait sur la conception d'un capteur passif UHF RFID, nous a permis d'aborder plusieurs aspects de la technologie RFID. À la fin de cette étude, nous sommes parvenus à la réalisation d'un capteur RFID fonctionnalisé par dépôt de bio-polymère. Ce type de dispositif a d'abord été validé pour la détection de l'humidité, puis adapté à l'industrie alimentaire. Pour ce faire, nous avons couplé le potentiel du gluten de blé comme élément sensible avec une antenne RFID afin d'extraire les informations du capteur liées à la mesure de l'environnement. De plus, cette preuve de concept a été réalisée en tenant compte de plusieurs critères tels que le coût, la taille et le respect des réglementations en vigueur.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé un bref historique et le contexte ainsi que le concept de base des systèmes RFID. Le chapitre a également abordé les composants de la RFID, notamment les types d'étiquettes, les types de couplage de la communication RFID et finalement nous avons cité quelques applications.

Nous avons vu dans le deuxième chapitre le rôle et différent type de capteur RFID puis l'état d'avancement de cette technologie existant. d'un point de vue commercial et académique. Cette étude nous a permis de tracer un cadre à suivre pour mener à terme l'objectif de ce PFE.

Dans le troisième chapitre, après avoir donné un certain nombre de notions fondamentales pour la compréhension de mon travail, j'ai présenté une étude sur la conception, la méthode de conception et la réalisation de l'antenne d'un capteur-RFID). Cette dernière est divisée en deux parties : la partie rayonnante, de type dipôle replié, et la partie dite "zone sensible" sur laquelle nous avons déposé le bio-polymère (gluten de blé). Les paramètres définis, tels que la taille de la zone, la taille de la zone de dépôt, le choix de la puce et surtout le choix de la fréquence de résonance, nous ont permis d'optimiser l'antenne du capteur avec dépôt de gluten de blé.

## Référence:

- [1]. <http://www.dean-boys.com/extras/iff/iffqa.html>.
- [2]. Stockman, H., "Communication by Means of Reflected Power", Proceedings of the IRE, Volume : 36, Issue : 10, pp 1196-1204, Oct. 1948.
- [3]. M. Cardullo, s.d. [en ligne]. Genèse de l'étiquette RFID polyvalente. Disponible : <http://www.rfidjournal.com/article/articleview/392/1/2/June 11, 2006> [date d'accès].
- [4]. "Transponder Apparatus and System", brevet américain US US3713148 A, Mario Cardullo, Communications Services Corp, 1973.
- [5]. "Système de reconnaissance et d'identification électronique", brevet américain US3816708 A, Charles Walton, Dispositifs de proximité, 1973.
- [6]. Klaus Finkenzeller, "RFID Handbook", John Wiley & Son Ltd, 1999.
- [7]. [www.rfidconsultation.eu/docs/ficheiros/White\\_Paper\\_RFID\\_english\\_12\\_12\\_2005\\_final.pdf](http://www.rfidconsultation.eu/docs/ficheiros/White_Paper_RFID_english_12_12_2005_final.pdf).
- [8]. <http://magazine.digitalidworld.com/Nov03/page 66.pdf>.
- [9]. Mesure et instrumentation. 1- de la physique du capteur au signal électronique page 59. Paris, Hermès Science Publication, 2000.
- [10]. <https://th-industrie.com/tags-rfid/246-capteurs-rfid.html#:~:text=Les%20capteurs%20sont%20donc%20aliment%C3%A9s,onde%20radiofr%C3%A9quence%20du%20lecteur%20RFID>.
- [11]. J. F. Salmerón, A. Rivadeneyra, F. Martínez Martí, L. F. Capitan-Vallvey, A. Palma, et M. Carvajal, " Passive UHF RFID tag with multiple sensing capabilities ", Sensors, vol. 15, p. 26769 26782, oct. 2015.
- [12]. I. Jauregi et al., " UHF RFID Temperature Sensor Assisted With Body-Heat Dissipation Energy Harvesting ", IEEE Sens. J., vol. 17, no 5, p. 1471 1478, mars 2017.
- [13]. M. M. Tentzeris, " Novel paper-based inkjet-printed antennas and wireless sensor modules ", in 2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, 2008, p. 1 8.

- [14]. J. F. Salmerón et autres, "Design and Development of Sensing RFID Tags on Flexible Foil Compatible With EPC Gen 2", *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no 12, p. 4361 4371, déc. 2014.
- [15]. R. V. Aroca, R. S. Inoue, L. M. Pedro, G. A. P. Caurin, et D. V. Magalhaes, " Towards a battery-free wireless smart glove for rehabilitation applications based on RFID ", in *2015 IEEE Brasil RFID*, 2015, p. 1 5.
- [16]. G. A. Vera, A. Abdelnour, M. Sarkis, A. Georgiadis, D. Kaddour, et S. Tedjini, " Passive RFID-enabled proximity sensor ", in *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2016, p.
- [17]. R. V. Aroca, A. C. Hernandez, D. V. Magalhães, M. Becker, C. M. P. Vaz, et A. G. Calbo, " Application of Standard EPC/GEN2 UHF RFID Tags as Soil Moisture Sensors ", *Proceedings*, vol. 1, no 2, p. 10, nov. 2016.
- [18]. S. Sajal, Y. Atanasov, B. D. Braaten, V. Marinov, et O. Swenson, " A low cost flexible passive UHF RFID tag for sensing moisture based on antenna polarization ", in *IEEE International Conference on Electro/Information Technology*, 2014, p. 542 545.
- [19]. M. Akbari, J. Virkki, L. Sydänheimo, et L. Ukkonen, " The possibilities of graphenebased passive RFID tags in high humidity conditions ", in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016, p. 1269 1270.
- [20]. J. S. Lee, J. Oh, J. Jun, et J. Jang, " Wireless Hydrogen Smart Sensor Based on Pt/Graphene-Immobilized Radio-Frequency Identification Tag ", *ACS Nano*, vol. 9, no 8, p. 7783 7790, août 2015.
- [21]. « IDSense : A Human Object Interaction Detection System Based on Passive UHF RFID ", Disney Research. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.disneyresearch.com/publication/idsense-a-human-object-interactiondetection-system-based-on-passive-uhf-rfid/>.
- [22]. C. Occhiuzzi, C. Vallese, S. Amendola, S. Manzari, et G. Marrocco, " NIGHT-Care : A Passive RFID System for Remote Monitoring and Control of Overnight Living Environment", *Procedia Comput. Sci*, vol. 32, p. 190 197, janvier 2014.

- [23]. A. A. Babar, S. Manzari, L. Sydanheimo, A. Z. Elsherbeni, and L. Ukkonen, "Passive UHF RFID Tag for Heat Sensing Applications", *IEEE Trans. Antennas Propaganda*, Vol. 60, No. 9, pp. 4056-4064, Sept. 2012.
- [24]. C. A. Balanis, *Antenna theory : analysis and design*, 3e éd. Hoboken, NJ : John Wiley, 2005.
- [25]. "UCODE®|NXP". En [ligne]. Disponible à l'adresse [https://www.nxp.com/products/identification-and-security/smart-label-and-tag-ics/ucode:MC\\_50483](https://www.nxp.com/products/identification-and-security/smart-label-and-tag-ics/ucode:MC_50483).
- [26]. G. Marrocco, "The art of UHF RFID antenna design : Impedance-matching and size-reduction techniques", *IEEE Antennas Propag.* Vol. 50, No. 1, 2008.
- [27]. D. M. Dobkin, "The RF in RFID : passive UHF RFID in practice", *IEEE Antennas Propagation*, vol. 50, n° 1, 2008. Amsterdam ; Boston : Elsevier / Newnes, 2008.
- [28]. A. Rida, L. Yang, et M. M. Tentzeris, *RFID-enabled sensor design and applications*. Boston : Artech House, 2010.
- [29]. K. Finkenzeller, "RFID Handbook : Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, troisième édition", p. 480.
- [30]. "Matériaux textiles fonctionnels et intelligents - Conduction électrique". En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [https://campus.mines-douai.fr/pluginfile.php/13739/mod\\_resource/content/0/CH1\\_fr\\_mai\\_2013/co/cours\\_ch1\\_1\\_1\\_fr.html](https://campus.mines-douai.fr/pluginfile.php/13739/mod_resource/content/0/CH1_fr_mai_2013/co/cours_ch1_1_1_fr.html).
- [31]. F. Bibi, *Étude des propriétés diélectriques haute fréquence d'un polymère végétal : le gluten de blé, et utilisation comme biocapteur de marqueurs environnementaux de la qualité des aliments dans les systèmes passifs d'identification par radiofréquence*. Montpellier, 2015
- [32]. N. Gontard, R. Thibault, B. Cuq, et S. Guilbert, "Influence of relative humidity and film composition on oxygen and carbon dioxide permeabilities of edible films", *J. Agric. Food Chem*, vol. 44, no4, p. 1064-1069, 1996.
- [33]. "Euroquality | Deux nouveaux projets gagnés par Euroquality ces derniers jours ! [En ligne]. Disponible sur : <http://euroquality.fr/fr/2018/07/10/two-new-energy-projects-won-by-euroquality-this-past-few-days/>.



[34].F. Bibi, C. Guillaume, A. Vena, N. Gontard, et B.Sorli, "Wheat gluten, a bio-polymer layer to monitor relative humidity in food packaging : Caractérisation électrique et diélectrique", *Sens. Actuators Phys.*, vol. 247, p. 355-367, août 2016.

[35].I. Bord, "Etude d'un capteur capacitif différentiel pour la détection de pluie", p. 209.

Chapitre 2-Design, conception et caractérisation du Capteurs-RFID UHF passif92

[36].F. Gustrau et D. Manteuffel, *EM Modeling of Antennas and RF Components for Wireless Communication Systems*. Springer Science & Business Media, 2006.

[37].S. Chisca, I. Sava, V. E. Musteata, et M. Bruma, "Dielectric and conduction properties of polyimide films", in *CAS 2011 Proceedings (2011 International Semiconductor Conference)*, 2011, vol. 2, p. 253-256.

[38].R. D. Rusu, M. D. Damaceanu, M. Bruma, et A. Müller, "Dielectric properties of thin polyimide films", in *CAS 2010 Proceedings (International Semiconductor Conference)*, 2010, vol. 02, p. 363-366.

[39].N. J. Kidner, Z. J. Homrighaus, T. O. Mason, et E. J. Garboczi, "Modeling interdigital electrode structures for the dielectric characterization of electroceramic thin films", *Thin Solid Films*, vol. 496, no2, p. 539-545, févr. 2006.

[40].D. Dimos, M. V. Raymond, R. W. Schwartz, H. N. Al-Shareef, et C. H. Mueller, "Tunability and calculation of the dielectric constant of capacitor structures with interdigital electrodes", *J. Electroceramics*, vol. 1, no2, p. 145-153, 1997.

[41].S. S. Gevorgian, T. Martinsson, P. L. Linner, et E. L. Kollberg, "CAD models for multilayered substrate interdigital capacitors", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, vol. 44, no6, p. 896-904, 1996.

## **Abréviations :**

**RFID** : Radio Frequency Identification

**RF** : Radio Frequency

**USB** : Universal Serial Bus

**PCMCIA** :

**IFF** : Identification Friend or Foe

**CA** : certificate authority

**UWB** : ultra wide band

**FCC** : Federal Communications Commission

**EPC** : Electronic Product Code

**MSSI** : Microsoft Shared Source Initiative

**LF** : low frequency

**HF** : Haut Frequency

**BF** : Bass Frequency

**LOS** : Line of sight

**CI** : Circuit Intégré

**W ROM** :W Read-Only Memory

**EM** : Electromagnetic

**ADC** : Analog to Digital Converter

**FAD** : Flavine-adénine-dinucléotide

**SPI** : Serial Peripheral Interface

**I2C** : Inter Integrated Circuit

**AVC** : *accident vasculaire cérébral*

**RSSI** : responsable de la sécurité des systèmes d'information

**FDTD** : Finite Difference Time Domain Method

**FEM** : Finite Element Method

**MOM** : Method of Moments