

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique

Université de Mohamed El Bachir EL'Ibrahimi - BBA

Institut d'Electronique et des Télécommunications

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

Filière : Electronique

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par

✓ **Nabila Abdoune**

✓ **Assia Galoul**

Intitulé

Développement et optimisation d'un lecteur RFID UHF haute performance pour la gestion intelligente des produits selon le standard EPC Gen2

Soutenu le : 29/06 /2026

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
Dr. Attoui Aissa	MCB	Encadreur	Univ-BBA
Dr. Zerrougui Raouf	MCB	Co-Encadreur	Univ-BBA
Dr. Lakhlef Nora	MCA	Président	Univ-BBA
Dr. Hammache Boualem	MCB	Examineur	Univ-BBA
Mme. Mehdide Fatima-Zahra	MCB	Représentante de l'incubateur	Univ-BBA

Année Universitaire 2025/2026

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique

Université de Mohamed El Bachir EL'Ibrahimi - BBA

Institut d'Electronique et des Télécommunications

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

Filière : Electronique

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par

✓ **Nabila Abdoune**

✓ **Assia Galoul**

Intitulé

Développement et optimisation d'un lecteur RFID UHF haute performance pour la gestion intelligente des produits selon le standard EPC Gen2

Soutenu le : 29/06 /2026

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Dr. Attoui Aissa</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. Zerrougui Raouf</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. Lakhlef Nora</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. Hammache Boualem</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. Mehdide Fatima-Zahra</i>	<i>MCB</i>	<i>Représentante de l'incubateur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2025/2026

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la patience, le courage et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos encadreurs, Dr. Attoui Aissa et Dr. Zerrougui Raouf, pour leur disponibilité, leurs précieux conseils, leurs orientations pertinentes ainsi que leur soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire. Leur expérience, leur rigueur scientifique et leurs encouragements ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à M. Yacine Boussaadia pour son aide précieuse et ses efforts considérables dans la réalisation et la fabrication des antennes développées dans le cadre de ce projet. Son expertise technique, sa disponibilité et ses conseils ont constitué un apport important à la réussite de ce travail.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire et de consacrer une partie de leur temps à son examen.

Nos remerciements s'étendent également à l'ensemble des enseignants de l'institut IET qui nous ont transmis leurs connaissances et accompagnés tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos parents et à nos familles pour leur amour, leur confiance, leurs sacrifices et leurs encouragements constants. Leur soutien moral et leur présence ont été une source de motivation essentielle tout au long de nos études.

À tous ceux qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réussite de ce travail, nous adressons nos plus sincères remerciements.

Merci à tous.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, Aucun mot ne saurait exprimer ma profonde gratitude pour votre amour, vos sacrifices, votre soutien indéfectible et vos encouragements tout au long de mon parcours. Que ce travail soit le témoignage de mon respect, de ma reconnaissance et de mon affection envers vous.

À mes frères et sœurs, Pour leur soutien moral, leur présence et leurs encouragements qui m'ont toujours accompagné dans les moments les plus importants.

À toute ma famille, Pour leur confiance, leurs conseils et leur soutien constant.

À mes amis et collègues et ma binôme « Assia », Pour les moments de partage, d'entraide et de motivation qui ont contribué à la réussite de ce parcours.

À tous mes enseignants, Qui ont participé à ma formation et m'ont transmis leur savoir tout au long de mes études.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Je leur dédie ce mémoire avec toute ma reconnaissance et mon respect.

Nabila

Dédicace

À ma très chère mère, mon refuge, ma source d'amour et de tendresse. Merci pour tes sacrifices silencieux, tes prières sincères et ton soutien inconditionnel. Tu as toujours cru en moi même lorsque je doutais. Ce succès est avant tout le tien.

À mon cher père, mon modèle de force et de détermination. Merci pour tous les efforts consentis afin de m'offrir les meilleures conditions de réussite. Tes conseils, ta confiance et ton affection m'ont permis d'avancer avec assurance.

À mon frère et mes sœurs, merci pour votre présence, vos encouragements et tous les moments de joie partagés.

Votre soutien a rendu ce chemin plus facile et plus agréable.

À mes précieuses amies, Nouha et Nihad, merci pour votre soutien, votre présence et les beaux souvenirs partagés tout au long de ce parcours. Vous avez été une source de motivation et de réconfort que je n'oublierai jamais.

À ma binôme, Nbila, derrière chaque page de ce travail se cachent des efforts, des défis et des moments de doute, mais aussi une belle complicité que nous avons construite ensemble. Merci pour ta patience, ton soutien et ton engagement. Tu n'as pas seulement été une binôme, mais une véritable partenaire sur qui j'ai pu compter. Je garderai de cette expérience un souvenir rempli de gratitude et d'affection.

Enfin, à « 119 », merci pour ta motivation et les souvenirs que nous avons partagés. Ta présence discrète a été pour moi une douceur constante, une source de lumière dans les moments difficiles, et un soutien silencieux qui a profondément marqué mon parcours et cette réussite.

Au-delà des noms cités, il existe un cercle précieux de personnes qui ont marqué mon parcours. Je leur exprime ma profonde gratitude pour leur présence et leur soutien, qui ont contribué, de près ou de loin, à cette réussite. de ce travail.

Je leur dédie ce mémoire avec toute ma reconnaissance et mon respect.

Assia

Résumé: La technologie RFID UHF représente une solution efficace pour l'identification automatique et la gestion intelligente des produits dans les environnements commerciaux et logistiques. Ce travail porte sur le développement et l'optimisation d'un lecteur RFID UHF conforme au standard EPC Gen2. Une étude de la technologie RFID et des exigences du standard a été menée avant la conception de l'architecture du lecteur et de son antenne microstrip. La modélisation, la simulation et l'optimisation de l'antenne ont été réalisées sous HFSS, suivies de la fabrication de prototypes sur différents substrats et de leur validation expérimentale. Une analyse comparative a permis d'évaluer l'influence des matériaux utilisés sur les performances du système. Enfin, le lecteur RFID a été intégré dans une plateforme de gestion intelligente des produits afin de valider son fonctionnement dans un contexte applicatif réel. Les résultats obtenus confirment la pertinence de la solution proposée pour le développement de systèmes RFID UHF performants et économiquement accessibles.

Mots-clés : RFID UHF ; EPC Gen2 ; Lecteur RFID ; Antenne microstrip ; HFSS ; Gestion intelligente des produits.

Abstract : UHF RFID technology represents an effective solution for automatic identification and intelligent product management in commercial and logistics environments. This work focuses on the development and optimization of a UHF RFID reader compliant with the EPC Gen2 standard. A study of RFID technology and the requirements of the standard was conducted prior to the design of the reader architecture and its microstrip antenna. The antenna was modeled, simulated, and optimized using HFSS software, followed by the fabrication of prototypes on different substrates and their experimental validation. A comparative analysis was carried out to evaluate the influence of the selected materials on the system performance. Finally, the RFID reader was integrated into an intelligent product management platform to validate its operation in a real application context. The obtained results confirm the relevance of the proposed solution for the development of high-performance and cost-effective UHF RFID systems.

Keywords: UHF RFID; EPC Gen2; RFID Reader; Microstrip Antenna; HFSS; Intelligent Product Management.

الملخص

تُعَدُّ تقنية RFID UHF حلاً فعالاً للتعريف الآلي وإدارة المنتجات الذكية في البيئات التجارية واللوجستية. يهدف هذا العمل إلى تطوير وتحسين قارئ RFID UHF متوافق مع المعيار EPC Gen2. تم في البداية دراسة تقنية RFID ومتطلبات المعيار المعتمد، ثم تصميم البنية العامة للقارئ وهوائي Microstrip الخاص به. أنجزت عملية نمذجة الهوائي ومحاكاته وتحسين أدائه باستخدام برنامج HFSS، تلتها مرحلة التصنيع لنماذج أولية باستعمال ركائز مختلفة والتحقق من أدائها تجريبياً. كما أجريت دراسة مقارنة لتقييم تأثير المواد المستخدمة على أداء النظام. وأخيراً، تم دمج القارئ المطور ضمن منصة ذكية لإدارة المنتجات من أجل التحقق من فعاليته في بيئة تطبيقية حقيقية. وقد أكدت النتائج المتحصل عليها جدوى الحل المقترح وملاءمته لتطوير أنظمة RFID UHF عالية الأداء ومنخفضة التكلفة.

الكلمات المفتاحية: RFID UHF، EPC Gen2، قارئ RFID، هوائي ميكروستريب، HFSS، الإدارة الذكية للمنتجات.

Sommaire

Remerciement	III
Dédicace	IV
Dédicace	V
Sommaire.....	VII
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux	XIII
Liste des abréviations	XIV
Introduction Générale	0
Introduction Générale	1
Chapitre I : Gestion intelligente des produits basée sur la technologie RFID.....	3
I.1 Introduction	4
I.2 Définition de la gestion intelligente des produits	5
I.3 Limites des systèmes de gestion classiques	6
I.4 Apport de la technologie RFID	6
I.4.1 Caractéristiques technologiques distinctives.....	7
I.4.2 Avantages opérationnels	7
I.4.3 Évolution vers la RFID intelligente et sensorielle	8
I.5 Architecture globale du système de gestion intelligente	8
I.6 Cycle de vie intelligent du produit	10
I.7 Cas d'usage industriels et logistiques	11
I.8 Intégration du système RFID dans le projet Startup	12
I.8.1 Positionnement stratégique et innovation	13
I.8.2 Contraintes spécifiques des environnements industriels.....	13
I.8.3 Modèle économique et scalabilité	13
I.9 Avantages du système proposé	13
I.10 Conclusion.....	14
Chapitre 2 : Lecteur RFID UHF et standard EPC Gen2.	15
II.1 Introduction.....	16
II.2 Généralités sur la technologie RFID UHF	16
II.2.1 Principe de fonctionnement	16
II.2.2 Avantages comparatifs de l'UHF	17
II.3 Présentation du standard EPC Gen2	17
II.3.1 Structure mémoire du tag.....	18
II.3.2 Paramètres RF du standard	18

II.4 Protocole de communication et anticollision	19
II.4.1 Processus d'inventaire	19
II.4.2 Algorithme d'anticollision Q.....	20
II.5 Architecture matérielle et SDR du lecteur RFID UHF	23
II.5.1 Architecture matérielle.....	23
II.5.2 Architecture SDR pour Smarty POS	23
II.6 Chaîne d'émission et de réception.....	24
II.6.1 Chaîne d'émission	24
II.6.2 Chaîne de réception.....	25
II.6.3 Isolation émission-réception	26
II.7 Contraintes de performance du lecteur RFID	26
II.7.1 Portée : bilan de liaison.....	26
II.7.2 Taux de lecture et fiabilité	27
II.8 Rôle de l'antenne dans le lecteur RFID.....	28
II.8.1 Caractéristiques fondamentales	28
II.8.2 Types d'antennes et choix pour Smarty POS	28
II.8.3 Impact sur les performances du système	29
II.9 Conclusion	29
Chapitre III : Conception et réalisation du lecteur RFID UHF.	31
III.1 Introduction	32
III.2 Cahier des charges du lecteur RFID UHF	32
III.2.1 Fréquence de fonctionnement (860–960 MHz).....	32
III.2.2 Portée de lecture visée	33
III.2.3 Compatibilité EPC Gen2	33
III.2.4 Contraintes techniques.....	33
III.3 Architecture globale du lecteur RFID UHF	33
III.3.1 Bloc RF.....	34
III.3.2 Contrôleur.....	34
III.3.3 Interface utilisateur	34
III.3.4 Alimentation	36
III.3.5 Antenne RFID UHF	36
III.4 Conception de l'antenne RFID UHF Microstrip.....	37
III.4.1 Choix de la technologie Microstrip	37
III.4.2 Spécifications de l'antenne	38
III.4.3 Calcul et dimensionnement	39

III.4.4 Paramètres électromagnétiques	41
III.5 Simulation et optimisation sous HFSS	41
III.5.1 Modélisation HFSS	41
III.5.2 Paramètres de simulation.....	41
III.5.3 Résultats de simulation et optimisation.....	42
III.5.4 Optimisation de l'antenne	44
III.6 Fabrication des antennes et caractérisation expérimentale.....	45
III.6.1 Stratégie de fabrication.....	45
III.6.2 Procédé de fabrication	46
III.6.3 Antennes réalisées : description et caractéristiques.....	46
III.6.4 Caractérisation expérimentale : protocole et résultats.....	47
III.7 Étude d'un réseau d'antennes patch 2×2 sur substrat Rogers RT5880	47
III.7.1 Description du réseau d'antennes proposé	47
III.7.2 Résultats de simulation.....	49
III.7.3 Discussion des résultats	50
III.8 Intégration de l'antenne dans le lecteur RFID UHF	51
III.9 Réalisation du prototype complet.....	51
III.10 Conclusion.....	52
Chapitre IV : Validation expérimentale du lecteur RFID UHF et comparaison Simulation/Réalisation	53
IV.1 Introduction	54
IV.2 Présentation des prototypes réalisés	54
IV.2.1 Antenne réalisée sur substrat Rogers RT/Duroid 5870	54
IV.2.2 Antenne réalisée sur substrat FR4.....	55
IV.3 Banc de mesure expérimental	55
IV.4 Validation expérimentale des antennes RFID UHF	58
IV.4.1 Mesure du coefficient de réflexion (S11).....	58
IV.4.3 Mesure de la fréquence de résonance.....	59
IV.4.4 Mesure de la bande passante	60
IV.5 Comparaison Simulation HFSS / Réalisation pratique	60
IV.5.1 Cas de l'antenne FR4	60
IV.5.2 Cas de l'antenne Rogers RT/Duroid 5870	61
IV.6 Analyse comparative des substrats Rogers et FR4.....	63
IV.7 Intégration des antennes dans le lecteur RFID UHF	64
IV.8 Validation du lecteur RFID UHF	65

IV.9 Discussion générale des résultats	66
IV.10 Conclusion.....	67
Conclusion Générale.....	69
Références	72
Annexe.....	75

Liste des figures

Figure I.1 : Gestion des produits dans un stock.....	5
Figure I.2 : carte et lecteur RFID.....	7
Figure I.3 : Architecture d'un système RFID et ses composants.	8
Figure I.4 : Architecture globale du système de gestion intelligente.	9
Figure I.5 : Cycle de vie intelligent d'un produit.	11
Figure I.6 : Exemple d'architecture RFID -UHF en point de vente.....	12
Figure II.1 : Processus d'inventaire EPC Gen2	19
Figure II.2 : Architecture matérielle détaillée d'un lecteur RFID UHF	23
Figure II.3 : Schéma de l'antenne patch microstrip.	29
Figure III.1 : Photographie réelle du contrôleur du système.	34
Figure III.2 : Principe de fonctionnement de l'application.	35
Figure III.3 : l'application du SmartyPOS.....	36
Figure III.4 : Architecture globale du lecteur RFID UHF Smarty POS.	37
Figure III.5 : Simulation de l'antenne réalisée sur substrat FR4 dans HFSS.	40
Figure III.6 : Simulation de l'antenne réalisée sur substrat FR4 dans HFSS.	41
Figure III.7: S11 de l'antenne réalisée sur substrat FR4.	42
Figure III.8: VSWR de l'antenne réalisée sur substrat FR4.	42
Figure III.9 :Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne réalisée sur substrat FR4.	43
Figure III.10 : S11 Paramètre S11 de l'antenne simulée sur substrat Rogers RT/duroid 5870.	43
Figure III.11 : VSWR de l'antenne simulée sur substrat Rogers RT/duroid 5870.....	44
Figure III.12 : Diagramme de rayonnement tridimensionnel (3D) de l'antenne réalisée sur substrat Rogers 5870.	44
Figure III.13 : Photographies des deux antennes réalisées : (a) antenne sur substrat FR4 ; (b) antenne sur substrat Rogers 5870.	47
Figure III.14 : Géométrie du réseau d'antennes patch 2×2 sur substrat Rogers RT/duroid 5880.	48

Figure III.15 : Coefficient de réflexion S11 du réseau d'antennes patch 2×2.....	49
Figure III.16 : Résultats du diagramme de rayonnement 3D du réseau d'antennes.....	49
Figure IV.1 : Analyseur de réseau vectoriel.....	56
Figure IV.2 : Produits + Tag RFID UHF.	57
Figure IV.3 : Tag RFID UHF.	57
Figure IV.4 : Mesure du paramètre S11 de l'antenne sur substrat Rogers.....	58
figureIV.5 : Mesure du paramètre S11 de l'antenne sur substrat FR4.	59
Figure IV.6 : S11 de l'antenne FR4 (simulation HFSS et mesure expérimentale).	61
Figure IV.8 : photo réelle du projet Smarty POS.	65

Liste des tableaux

Tableau II.1: Avantages comparatifs de l'UHF	17
Tableau II.2: Structure mémoire du tag.....	18
Tableau II.3: Paramètres radiofréquences du standard EPC Gen2.....	19
Tableau II.4 : Comparaison entre l'architecture traditionnelle et de Smarty POS.	24
Tableau II.5 : Le traitement du signal émis par le lecteur RFID.	25
Tableau II.6 : Le traitement du signal rétrodiffusé par le tag.	25
Tableau II.7 : L'isolation entre les chemins d'émission et de réception	26
Tableau II.8 : Dégradations de performance du lecteur RFID en environnement réel.	27
Tableau II.9 : Caractéristiques fondamentales de l'antenne dans le lecteur RFID.	28
Tableau II.10 : Types d'antennes et choix pour Smarty POS	28
Tableau III.1 : Caractéristiques de l'antenne RFID UHF Microstrip	38
Tableau III.2 : Paramètres de simulation des antennes sous HFSS.....	39
Tableau III.3 : Comparaison des résultats des deux simulations.....	45
Tableau III.4 : Paramètres de la simulation.....	48
Tableau IV.1 : comparaison simulation/réalisation pour l'antenne de FR4.	61
Tableau IV.2 : comparaison simulation/réalisation pour l'antenne de Rogers.....	62

Liste des abréviations

IPM : Intelligent Product Management

RFID: Radio Frequency Identification

UHF: Ultra High Frequency

EPC: Electronic Product Code

ISO: International Organization for Standardization

TID: Tag Identifier

ERP: Enterprise Resource Planning

WMS: Warehouse Management System

Gen2: Generation 2 (EPC Standard)

WIP: Work In Progress

RTLS: Real-Time Location System

GPS: Global Positioning System

IoT: Internet of Things

RF: Radio Frequency

PME: Petites et Moyennes Entreprises

HF: High Frequency (13,56 MHz)

LF: Low Frequency (125–134 kHz)

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

FCC: Federal Communications Commission

IEC: International Electrotechnical Commission

GS1: Global Standards 1

DSB-ASK: Double Sideband Amplitude Shift Keying

PR-ASK: Phase Reversal Amplitude Shift Keying

ASK: Amplitude Shift Keying

PSK: Phase Shift Keying

SDR: Software-Defined Radio

Smarty POS: Smart Point of Sale

FPGA: Field-Programmable Gate Array

MCU: Microcontroller Unit

ARM Cortex-M: Advanced RISC Machine – Cortex-M Series

PA: Power Amplifier

LNA: Low Noise Amplifier

ADC: Analog-to-Digital Converter

DSP: Digital Signal Processor

TDD: Time Division Duplexing

TOS: Taux d'Ondes Stationnaires

HFSS: High Frequency Structure Simulator

CST: Computer Simulation Technology

USB: Universal Serial Bus

PLL: Phase-Locked Loop

PIN: Positive-Intrinsic-Negative (Diode)

SMA: SubMiniature Version A

VSWR: Voltage Standing Wave Ratio

UV: Ultraviolet

3D: Three-Dimensional

VNA: Vector Network Analyzer

EIRP: Equivalent Isotropically Radiated Power

INTRODUCTION

Introduction Générale

L'évolution rapide des technologies numériques et l'émergence du concept d'Industrie 4.0 ont profondément transformé les méthodes de gestion, de suivi et de contrôle des produits dans les secteurs du commerce, de la logistique et de l'industrie. Dans ce contexte, la traçabilité en temps réel et l'automatisation des processus sont devenues des exigences essentielles pour améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les erreurs humaines et optimiser la gestion des ressources. Parmi les technologies d'identification automatique, la Radio Frequency Identification (RFID) occupe une place de plus en plus importante grâce à sa capacité à identifier et suivre des objets sans contact visuel direct. Contrairement aux systèmes traditionnels basés sur les codes-barres, la RFID permet la lecture simultanée de plusieurs étiquettes, offre une portée de lecture plus importante et facilite l'intégration de solutions intelligentes de gestion des produits. Ces avantages ont favorisé son adoption dans de nombreux domaines tels que la gestion des stocks, les chaînes logistiques, les systèmes de paiement automatisés et les applications de traçabilité industrielle. [1]

Dans les systèmes RFID UHF (Ultra High Frequency), le lecteur constitue l'élément central responsable de l'émission des signaux radiofréquences, de la communication avec les tags RFID et du traitement des informations collectées. Les performances globales du système dépendent fortement de la qualité de conception du lecteur et plus particulièrement de son antenne, qui influence directement la portée de lecture, la fiabilité de détection, le gain et l'efficacité énergétique du système. Ainsi, la conception d'un lecteur RFID UHF performant, économique et conforme aux standards internationaux représente un défi technologique important. [2]

Le standard EPC Gen2 s'est imposé comme la référence mondiale pour les systèmes RFID UHF en raison de sa robustesse, de ses mécanismes anti-collision efficaces et de son interopérabilité avec une large gamme d'équipements RFID. Son utilisation permet de garantir la compatibilité des solutions développées avec l'écosystème RFID actuel tout en assurant des performances adaptées aux applications commerciales et industrielles. [2]

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail de mémoire, dont l'objectif principal est le développement et l'optimisation d'un lecteur RFID UHF haute performance destiné à la gestion intelligente des produits selon le standard EPC Gen2. Le projet vise notamment la conception d'une antenne microstrip adaptée à la bande UHF RFID, son optimisation

électromagnétique à l'aide du logiciel HFSS, la réalisation pratique de plusieurs prototypes basés sur différents substrats diélectriques, ainsi que leur validation expérimentale à travers des mesures réelles et des tests fonctionnels.

Afin d'évaluer l'impact du matériau diélectrique sur les performances du système, deux antennes ont été conçues et réalisées sur les substrats FR4 et Rogers RT/Duroid 5870. Une étude comparative basée sur les paramètres électromagnétiques, les performances de lecture et les contraintes économiques a été menée afin d'identifier la solution la plus adaptée à l'application visée. Le lecteur développé a ensuite été intégré dans une plateforme intelligente de gestion de produits baptisée « Smarty POS », permettant la détection automatique des articles et l'automatisation des opérations de caisse. [3]

La démarche adoptée repose sur une approche progressive comprenant l'étude bibliographique de la technologie RFID, la conception théorique du système, la modélisation et l'optimisation électromagnétique, la fabrication des prototypes, puis leur validation expérimentale. Cette méthodologie permet d'assurer une cohérence entre les objectifs fixés et les résultats obtenus.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre présente les concepts liés à la gestion intelligente des produits et met en évidence l'apport de la technologie RFID dans ce domaine. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la technologie RFID UHF, du standard EPC Gen2 et de l'architecture des lecteurs RFID. Le troisième chapitre détaille la conception, la simulation, l'optimisation et la réalisation du lecteur RFID UHF ainsi que de son antenne microstrip. Enfin, le quatrième chapitre présente la validation expérimentale du système développé, l'analyse des résultats obtenus et la comparaison des performances des antennes réalisées sur substrats FR4 et Rogers.

Les résultats obtenus démontrent la faisabilité technique et économique du système proposé et confirment l'intérêt de la technologie RFID UHF pour le développement de solutions intelligentes destinées à la gestion automatisée des produits.

**CHAPITRE I : GESTION INTELLIGENTE
DES PRODUITS BASEE SUR LA
TECHNOLOGIE RFID**

I.1 Introduction

La gestion des produits constitue un élément essentiel de la performance des systèmes industriels, commerciaux et logistiques. Au fil des décennies, les méthodes utilisées pour identifier, localiser et suivre les marchandises ont connu une évolution considérable. Initialement, ces opérations reposaient sur des procédures entièrement manuelles utilisant des registres papier, ce qui engendrait souvent des erreurs, des pertes d'information et des délais importants.

L'apparition des systèmes informatisés et de la technologie des codes-barres a marqué une avancée majeure dans l'automatisation de la gestion des produits. Grâce aux lecteurs optiques, le scan des codes-barres a permis d'améliorer la rapidité de saisie, de réduire les erreurs humaines et de faciliter la gestion des stocks. Cependant, cette technologie présente certaines limites, notamment la nécessité d'une visibilité directe entre le lecteur et le code, la lecture généralement unitaire des articles et une capacité limitée de stockage des informations.

Face aux exigences croissantes de l'Industrie 4.0 en matière de rapidité, de traçabilité en temps réel, d'automatisation et d'interconnexion des systèmes, les solutions traditionnelles atteignent aujourd'hui leurs limites. Pour répondre à ces nouveaux défis, une nouvelle approche émerge : la gestion intelligente des produits (Intelligent Product Management - IPM). Cette approche vise à transformer le produit en un objet communicant capable de stocker, transmettre et partager des informations tout au long de son cycle de vie.

Dans ce contexte, la technologie RFID (Radio Frequency Identification) apparaît comme une solution particulièrement prometteuse. Contrairement aux codes-barres, elle permet l'identification sans contact visuel direct, la lecture simultanée de plusieurs produits et l'échange d'informations de manière automatique et rapide. Ces caractéristiques en font une technologie clé pour le développement de systèmes intelligents de gestion et de traçabilité.

Ce chapitre présente les concepts fondamentaux de la gestion intelligente des produits ainsi que les principales technologies utilisées pour leur mise en œuvre. Après avoir analysé les limites des méthodes traditionnelles basées sur les saisies manuelles et le scan

des codes-barres, nous mettons en évidence les avantages de la RFID et son rôle dans l'évolution des systèmes de gestion modernes. Enfin, nous introduisons la solution proposée dans le cadre de ce travail, qui consiste en le développement et l'optimisation d'un lecteur RFID UHF destiné à offrir une lecture plus fiable, performante et adaptable aux environnements réels, afin de répondre aux besoins critiques des chaînes logistiques modernes et de constituer le cœur technologique d'un projet innovant de type startup.

I.2 Définition de la gestion intelligente des produits

La gestion intelligente des produits (Intelligent Product Management, IPM) représente une approche récente dans le contexte de l'Industrie 4.0, basée sur l'utilisation de technologies numériques pour suivre et optimiser le cycle de vie des produits. Cette approche repose sur trois éléments principaux : la collecte automatique de données en temps réel, l'analyse des comportements des produits, et l'aide à la décision par des systèmes informatiques [1]. Dans ce contexte, le produit devient un objet actif capable de communiquer son état et sa position avec son environnement. Cette transformation est rendue possible par l'utilisation de technologies d'identification automatique, notamment la RFID (Radio Frequency Identification), qui permet d'attribuer un identifiant unique à chaque produit. La gestion intelligente couvre l'ensemble des étapes : conception, fabrication, stockage, distribution, consommation et recyclage, en garantissant la qualité des informations associées [1][8][9]. L'approche intelligente se distingue des systèmes traditionnels par sa capacité à anticiper les problèmes plutôt que de réagir après coup. Elle utilise des techniques d'analyse prédictive pour optimiser les stocks et prévenir les ruptures de chaîne logistique [1][6].



Figure I.1 : Gestion des produits dans un stock.

I.3 Limites des systèmes de gestion classiques

Les systèmes de gestion traditionnels, fondés sur les codes-barres et les saisies manuelles, présentent des limitations importantes dans les environnements industriels modernes [1]. L'analyse de ces systèmes révèle plusieurs contraintes majeures :

Premièrement, les systèmes à base de codes-barres nécessitent une ligne de visée directe entre le lecteur et l'étiquette, ce qui limite la vitesse de lecture et impose des contraintes d'orientation. Cela crée des goulots d'étranglement dans les flux logistiques à fort débit, notamment dans les entrepôts automatisés [1].

Deuxièmement, la saisie manuelle des données génère des taux d'erreur importants, estimés entre 1% et 5% selon les études sectorielles, affectant la précision des inventaires. Ces erreurs conduisent à des écarts entre stocks physiques et stocks informatiques, causant des surstocks ou des ruptures de stock [1] [8].

Troisièmement, l'absence de visibilité en temps réel constitue une faiblesse critique des systèmes classiques. L'information sur la localisation des produits est souvent retardée, ce qui réduit la réactivité face aux perturbations de la chaîne logistique. Ce délai d'information est particulièrement problématique dans les secteurs à forte valeur ajoutée, comme l'industrie pharmaceutique, où la traçabilité rapide est essentielle pour la sécurité des patients [2] [7].

Quatrièmement, les systèmes traditionnels supportent mal les environnements industriels difficiles (poussière, humidité, températures extrêmes, présence de métaux), limitant leur utilisation dans certains contextes de production [6].

I.4 Apport de la technologie RFID

La technologie RFID (Radio Frequency Identification) représente une avancée importante par rapport aux systèmes d'identification classiques, offrant des capacités de lecture sans contact, à distance et simultanée. Le système se compose de trois éléments : le transpondeur (tag) avec sa puce et son antenne, le lecteur qui émet les signaux radio et collecte les données, et les applications informatiques qui traitent ces informations [8] [9].



Figure I.2 : carte et lecteur RFID.

I.4.1 Caractéristiques technologiques distinctives

La technologie RFID UHF (Ultra High Frequency, 860-960 MHz), et particulièrement la norme EPC Gen2 (Electronic Product Code Class 1 Generation 2), offre des performances intéressantes en termes de portée de lecture pouvant atteindre jusqu'à 12 mètres en champ libre selon les spécifications du standard. Ce standard, maintenu par l'organisation GS1, définit l'interface radio entre les lecteurs RFID UHF et les tags, assurant la compatibilité entre équipements de différents fabricants. Selon les spécifications ISO 18000-6C (équivalente à EPC Gen2), le protocole permet de traiter plusieurs centaines de tags par seconde dans des conditions favorables, avec des taux de lecture pouvant atteindre environ 95% dans des environnements contrôlés [4] [11] [12] [13].

I.4.2 Avantages opérationnels

Les études récentes montrent que l'implémentation de la technologie apporte des améliorations sur plusieurs indicateurs :

- Précision des inventaires : Réduction des écarts pouvant atteindre environ 90% dans certains cas comparé aux codes-barres [1]
- Visibilité en temps réel : Capacité à localiser plusieurs objets simultanément sans intervention manuelle [2]

- Automatisation des processus : Suppression du scan manuel, réduisant les coûts de main-d'œuvre et les erreurs humaines [6]
- Traçabilité complète : Suivi du cycle de vie du produit, facilitant la gestion des rappels et la lutte contre la contrefaçon [7]

I.4.3 Évolution vers la RFID intelligente et sensorielle

L'évolution récente de la technologie vers des solutions computationnal RFID (CRFID) permet d'intégrer des capacités de calcul et de détection directement dans les tags passifs. Ces dispositifs, conformes au standard EPC Gen2, peuvent mesurer des données environnementales (température, humidité) et communiquer via le protocole standardisé, permettant une surveillance des produits sans batterie [4].

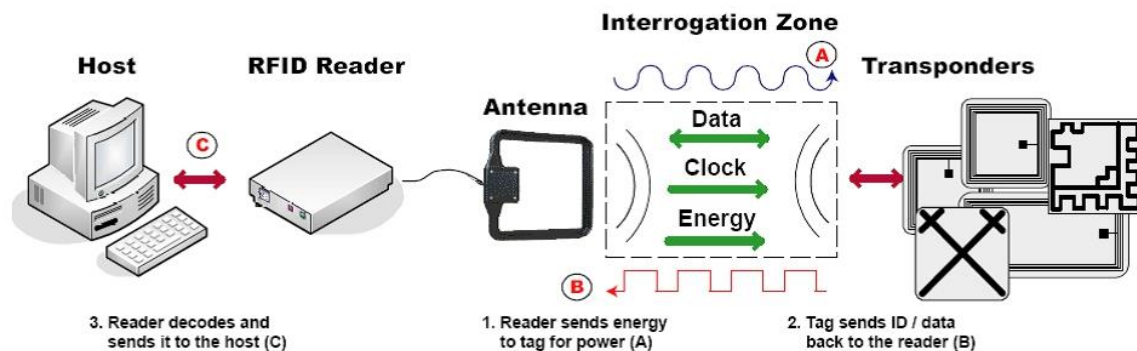


Figure I.3 : Architecture d'un système RFID et ses composants. [19]

I.5 Architecture globale du système de gestion intelligente

L'architecture d'un système de gestion intelligente basé sur la RFID UHF s'organise en plusieurs niveaux fonctionnels interconnectés entre eux (figure I.2). Cette structure assure la scalabilité et la sécurité des échanges de données [1].

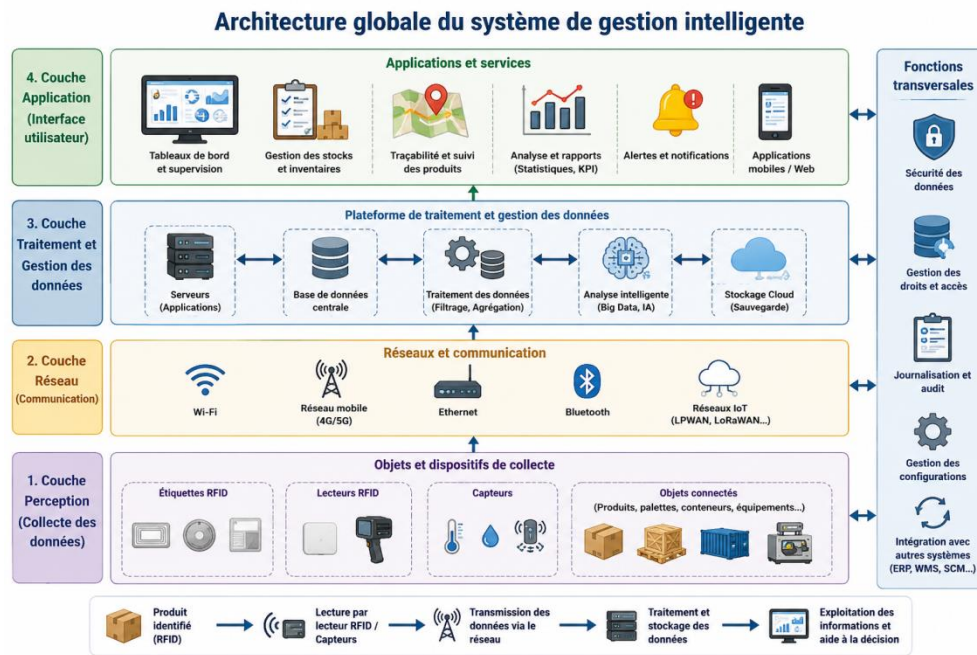


Figure I.4 : Architecture globale du système de gestion intelligente.

1. Couche physique (Perception Layer) : Cette couche comprend l'infrastructure d'identification radiofréquence : Les tags RFID UHF : Étiquettes passives alimentées par énergie radio, stockant l'identifiant EPC et des données utilisateur dans leur mémoire organisée selon les spécifications Gen2 (réservée, EPC, TID, utilisateur) [4][11]. Les lecteurs RFID : Dispositifs émettant la porteuse RF et gérant les protocoles d'anticollision pour lire plusieurs tags simultanément [4][10]. Les antennes : Éléments assurant l'émission et la réception des ondes radio, dont la conception détermine la zone de couverture [4][10]

2. Couche réseau et middleware : Le middleware RFID constitue l'interface entre l'infrastructure physique et les applications métier [1]. Il assure : Le filtrage et l'agrégation des données brutes pour éliminer les lectures redondantes. La gestion des événements selon des règles métiers prédéfinies. L'intégration avec les systèmes d'information existants.

3. Couche applicative et décisionnelle : Cette couche intègre les systèmes d'ERP (Enterprise Resource Planning), de WMS (Warehouse Management System) et les plateformes d'analyse. Elle exploite les informations de traçabilité pour optimiser les processus logistiques et alimenter des outils d'aide à la décision [2][6].

4. Couche de sécurité et gouvernance des données : Compte tenu de la sensibilité des données circulant dans le système, cette couche assure le chiffrement des communications, l'authentification entre tags et lecteurs RFID UHF, et le respect des réglementations sur la protection des données. Les mécanismes de sécurité spécifiques au standard EPC Gen2 incluent les fonctions de verrouillage et de cryptage des mémoires tags [4][11].

I.6 Cycle de vie intelligent du produit

Le concept de cycle de vie intelligent du produit dépasse la simple traçabilité logistique pour couvrir l'ensemble des étapes de création de valeur, de la conception au recyclage [8]. Ce cycle comprend six phases :

1. Phase de conception et personnalisation : Lors de cette phase, l'identifiant EPC est attribué et encodé dans le tag, établissant l'identité numérique du produit. Les données de conception peuvent être associées à cet identifiant dans les bases de données centrales, facilitant la personnalisation de masse [8].

2. Phase de fabrication et assemblage : En environnement industriel, la RFID permet le suivi des produits en cours de fabrication (WIP), l'authentification des composants, et le contrôle qualité automatisé. Cette visibilité en temps réel réduit les temps de production et améliore l'utilisation des machines [8].

3. Phase de stockage et distribution : Les entrepôts utilisent la technologie pour l'automatisation des réceptions, la localisation des palettes, et l'optimisation des préparations de commandes. Les systèmes de localisation en temps réel (RTLS) permettent de connaître la position des produits dans l'espace de stockage [6].

4. Phase de transport et logistique : Durant le transport, les tags assurent la traçabilité des envois, la vérification automatique des chargements, et la surveillance conditionnelle pour les produits sensibles. L'intégration avec les technologies GPS et IoT permet une visibilité complète de la chaîne d'approvisionnement [3].

5. Phase de consommation et utilisation : Chez le client final, la RFID facilite l'authentification des produits (lutte contre la contrefaçon), l'accès aux informations détaillées (origine, composition), et l'activation de services associés (garantie, maintenance) [7].

6. Phase de fin de vie et recyclage : La traçabilité accompagne le produit jusqu'à sa mise au rebut ou son recyclage, permettant le tri sélectif automatisé et le respect des réglementations environnementales [8].



Figure I.5 : Cycle de vie intelligent d'un produit.

I.7 Cas d'usage industriels et logistiques

L'application de la RFID UHF s'est développée dans de nombreux secteurs industriels, démontrant sa polyvalence [1].

✓ Secteur pharmaceutique et healthcare : L'industrie pharmaceutique utilise la technologie pour répondre aux exigences strictes de traçabilité et de sécurité. L'intégration dans la chaîne d'approvisionnement pharmaceutique améliore l'avantage compétitif des entreprises par une réduction des erreurs de distribution et une lutte efficace contre les médicaments contrefaits. Les armoires intelligentes équipées de RFID permettent un suivi en temps réel des consommables médicaux à haute valeur [7].

✓ Logistique et chaîne d'approvisionnement : Dans le secteur logistique, la RFID UHF optimise la gestion des entrepôts et le transport multimodal. Les modèles d'optimisation basés sur cette technologie permettent de réduire les coûts de transport d'environ 25% dans certains scénarios, grâce à l'optimisation des tournées de livraison.

L'intégration RFID-IoT améliore la réactivité et l'efficacité opérationnelle pour répondre aux exigences de l'industrie logistique mondiale [3].

✓ Industrie manufacturière et automobile : Dans l'industrie manufacturière, le système assure le suivi des pièces tout au long de la chaîne de production. Les applications incluent la gestion des outillages, le contrôle de séquence d'assemblage, et la traçabilité des pièces critiques pour la sécurité. La RFID est considérée comme une technologie clé pour la production personnalisée de masse dans le contexte de l'Industrie 4.0 [8].

✓ Commerce de détail et gestion des stocks : Le secteur retail utilise la technologie pour l'inventaire automatisé, la prévention des pertes, et l'amélioration de l'expérience client. La RFID réduit l'inexactitude des stocks en magasin et améliore la disponibilité des produits en rayon [6].

I.8 Intégration du système RFID dans le projet Startup

Dans le cadre de ce mémoire, nous utilisons un lecteur RFID UHF fonctionnant dans la bande 915 MHz. Ce lecteur RFID UHF permet la lecture simultanée de plusieurs tags EPC Gen2 et constitue la base expérimentale de notre système (figure I.2).



Figure I.6 : Exemple d'architecture RFID -UHF en point de vente [AI]

I.8.1 Positionnement stratégique et innovation

Le projet se distingue par une approche d'optimisation du lecteur RFID UHF, visant à surmonter les limitations des solutions commerciales existantes en termes de portée de lecture et de fiabilité dans des environnements difficiles. Cette démarche s'appuie sur une maîtrise du standard EPC Gen2 et sur l'exploitation des avancées en traitement du signal radiofréquence [4]. Notre système expérimental repose sur le lecteur RFID UHF, qui nous permet de tester et valider les performances de lecture dans des conditions réelles.

I.8.2 Contraintes spécifiques des environnements industriels

Le développement d'un lecteur RFID UHF performant doit prendre en compte les contraintes des déploiements industriels : interférences électromagnétiques, présence de matériaux absorbants ou réfléchissants, et conformité aux réglementations radio (ETSI EN 302 208 en Europe, FCC Part 15 aux États-Unis). La conception doit également faciliter l'intégration dans les systèmes d'information existants des clients [2].

I.8.3 Modèle économique et scalabilité

Dans une logique de startup, l'architecture technique doit supporter un modèle économique évolutif, permettant une industrialisation progressive et une adaptation aux besoins de différents secteurs (logistique, santé, manufacturing). L'utilisation de standards ouverts comme EPC Gen2 garantit l'interopérabilité et réduit les risques de dépendance envers un seul fournisseur [3][4][12].

I.9 Avantages du système proposé

Le système de lecteur RFID UHF proposé dans ce mémoire est conçu pour offrir plusieurs avantages potentiels par rapport aux solutions existantes. Ces avantages, présentés dans cette section, constituent des objectifs de performance qui seront évalués et validés expérimentalement dans la suite de ce travail.

- Performance de lecture optimisée : Grâce à une conception RF avancée et à des algorithmes de traitement du signal optimisés, le système vise à améliorer les taux de lecture dans des conditions difficiles (tags orientés aléatoirement, environnements

avec réflexions multiples, présence de métaux). Cela se traduit par une fiabilité accrue des processus automatisés et une réduction des interventions manuelles [4].

- **Conformité et interopérabilité** : La conformité au standard EPC Gen2 assure la compatibilité avec l'écosystème mondial des tags, évitant les coûts de migration et garantissant la pérennité de l'investissement. Cette interopérabilité est essentielle pour l'intégration dans des chaînes d'approvisionnement globales [1][11].
- **Intégration intelligente et analytique** : Au-delà de la simple lecture d'identifiants, le système propose des capacités d'analyse locale pour le filtrage intelligent des données et la détection d'anomalies en temps réel. Cette approche réduit la charge sur les réseaux de communication et permet une réactivité immédiate aux événements critiques [4].
- **Rentabilité et accessibilité** : La démarche de conception vise à optimiser le rapport performance/coût, facilitant l'accès à la technologie RFID UHF performante pour les PME et les startups logistiques. Les analyses de faisabilité montrent que les systèmes bien conçus sont économiquement viables, avec des gains de productivité compensant l'investissement initial dans des délais raisonnables [3][5].

I.10 Conclusion

Ce premier chapitre a présenté les bases de la gestion intelligente des produits basée sur la RFID. L'analyse des limites des systèmes classiques a montré la nécessité d'évoluer vers des solutions plus performantes. L'étude de la technologie RFID UHF EPC Gen2 a démontré son aptitude à répondre aux besoins de traçabilité et d'automatisation des chaînes logistiques modernes. L'architecture multicouche présentée et l'analyse des cas d'usage fournissent le cadre nécessaire à la conception de notre lecteur RFID UHF [1] [2][4] [6][8].

CHAPITRE 2 : LECTEUR RFID UHF ET STANDARD EPC GEN2.

II.1 Introduction

La technologie RFID UHF connaît un développement important dans de nombreux secteurs tels que la logistique, la gestion des stocks, le suivi des produits et les systèmes d'identification automatique. Son succès repose principalement sur sa capacité à assurer une lecture rapide, sans contact et à longue distance des étiquettes RFID, tout en permettant l'identification simultanée de plusieurs objets. Au cœur de tout système RFID se trouve le lecteur, élément essentiel chargé d'établir la communication avec les étiquettes, de transmettre les signaux radiofréquences et de traiter les informations reçues. Les performances globales d'un système RFID dépendent fortement des caractéristiques du lecteur, notamment de son architecture matérielle, de ses circuits radiofréquences, de son système d'antenne ainsi que des protocoles de communication utilisés. Par ailleurs, afin d'assurer l'interopérabilité entre les équipements de différents fabricants, plusieurs normes ont été développées. Parmi elles, le standard EPC Class 1 Génération 2 (EPC Gen2) s'est imposé comme la référence mondiale pour les systèmes RFID UHF. Ce protocole définit les mécanismes de communication entre le lecteur et les étiquettes, les procédures d'anticollision, les formats de données ainsi que les exigences de performance nécessaires à un fonctionnement fiable et efficace. Dans ce chapitre, nous présentons les notions fondamentales relatives au lecteur RFID UHF et au standard EPC Gen2. Nous décrivons tout d'abord l'architecture générale et le principe de fonctionnement d'un lecteur RFID UHF, puis nous détaillons les principales caractéristiques du protocole EPC Gen2 ainsi que les mécanismes de communication qu'il met en œuvre. Ces éléments constituent la base théorique nécessaire à la compréhension, à la conception et à l'optimisation du lecteur RFID UHF développé dans le cadre de ce projet.

II.2 Généralités sur la technologie RFID UHF

II.2.1 Principe de fonctionnement

Les systèmes RFID UHF exploitent la propagation des ondes électromagnétiques en champ lointain (far-field), permettant des distances de lecture supérieures aux systèmes HF (13,56 MHz) qui utilisent l'induction magnétique en champ proche [9][10]. La bande de

fréquences UHF pour RFID s'étend de 860 MHz à 960 MHz, avec des allocations réglementaires spécifiques par région :

- **Europe (ETSI) :** 865-868 MHz
- **Amérique du Nord (FCC) :** 902-928 MHz
- **Chine :** 920-925 MHz

Cette diversité réglementaire impose une conception multi-bandes pour les lecteurs RFID UHF destinés au marché international.

II.2.2 Avantages comparatifs de l'UHF

L'UHF se distingue par son excellent rapport performance/coût pour les applications retail et logistique (Tableau II.1), malgré sa sensibilité aux matériaux conducteurs.

Tableau II.1: Avantages comparatifs de l'UHF

Paramètre	LF	HF	UHF
Fréquence	125 kHz	13.56 MHz	860 – 960 MHz
Portée	< 10 cm	< 1 m	1 – 15 m
Vitesse	Faible	Moyenne	Élevée
Coût	Élevé	Moyen	Selon son type

II.3 Présentation du standard EPC Gen2

Le standard EPC Gen2 V2.0.1, normalisé ISO/IEC 18000-63, constitue la référence mondiale pour les systèmes RFID UHF passifs. Il définit l'interface radio entre lecteurs RFID UHF et tags, assurant l'interopérabilité entre équipements de différents fabricants. [11][9]

II.3.1 Structure mémoire du tag

La mémoire d'un tag EPC Gen2 est organisée en quatre banques distinctes qui sont mentionnées dans le tableau (II.2) :

Tableau II.2: Structure mémoire du tag

Banque	Contenu	Taille	Accès
Réservée	Mots de passe	64 bits	Protégé
EPC	Identifiant produit	128 – 512 bits	Lecture/écriture
TID	ID unique fabricant	64 – 128 bits	Lecture seule
Utilisateur	Données personnalisées	0 – 512 bits	Configurable

Le champ **EPC** (Electronic Product Code) constitue l'identifiant principal, structuré selon le standard GS1 (en-tête, gestionnaire d'identification, classe d'objet, numéro de série). Le **TID** unique, gravé en usine, sert d'anti-contrefaçon car il ne peut ni être modifié ni cloné [11].

Note : La mémoire utilisateur limitée (512 bits maximum) peut contraindre certaines applications nécessitant le stockage local d'informations enrichies [11].

II.3.2 Paramètres RF du standard

Les paramètres RF du standard EPC Gen2 sont mentionnés dans le tableau ci-dessous (Tableau II.3) :

Tableau II.3: Paramètres radiofréquences du standard EPC Gen2

Paramètre	Lecteur → Tag (Forward Link)	Tag → Lecteur (Return Link)
Modulation	DSB-ASK, PR-ASK	Backscatter ASK/PSK
Encodage	PIE (Pulse Interval Encoding)	FM0 ou Miller (M = 2, 4, 8)
Débit	26,7 – 128 kbps	40 – 640 kbps
Durée Tari	6,25 – 25 μ s	Non applicable

La flexibilité de ces paramètres permet d'adapter la communication aux conditions du canal (bruit, interférences, distance).

II.4 Protocole de communication et anticollision

II.4.1 Processus d'inventaire

La communication entre lecteur RFID UHF et tags suit un protocole structuré en trois phases présentés dans la figure II.1:

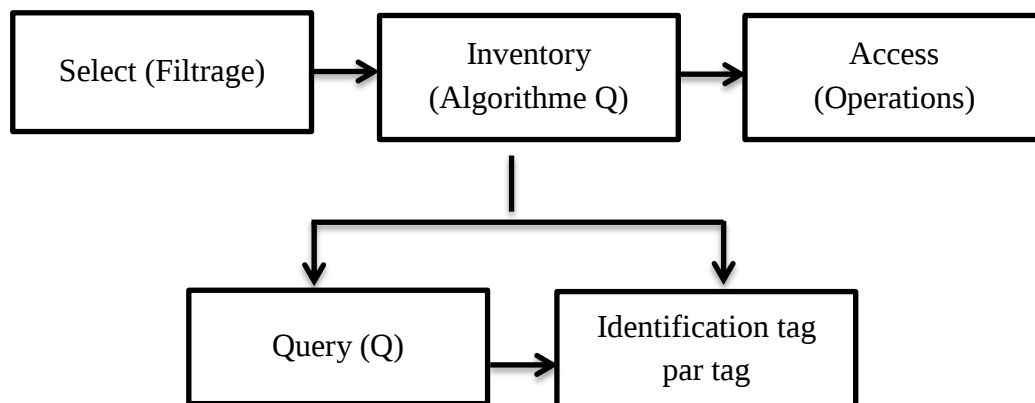


Figure II.1 : Processus d'inventaire EPC Gen2

- 1. SELECT** : Cette phase permet au lecteur de filtrer les tags présents dans son champ de couverture selon des critères spécifiques. Le lecteur envoie une commande SELECT contenant un masque appliqué à une banque mémoire particulière (EPC, TID, USER ou Reserved). Seuls les tags correspondant aux critères définis

participent aux étapes suivantes de l'inventaire. Cette opération permet de réduire le nombre de tags à traiter et d'améliorer l'efficacité du système.

2. INVENTORY : La phase d'inventaire a pour objectif d'identifier tous les tags sélectionnés présents dans la zone de lecture. Le lecteur initialise d'abord une session d'inventaire à l'aide de la commande QUERY, qui définit les paramètres de communication et la taille de l'algorithme anticollision. Les tags répondent ensuite de manière organisée afin d'éviter les collisions radio. Chaque tag sélectionné choisit un créneau temporel (slot) aléatoire à partir d'un compteur interne. Lorsque ce compteur atteint zéro, le tag transmet un identifiant temporaire appelé RN16 (Random Number 16 bits). Le lecteur répond alors par une commande ACK (Acknowledgment) contenant ce RN16. Le tag reconnu transmet ensuite son identifiant EPC complet. Après identification, le lecteur peut utiliser les commandes QUERYREP et QUERYADJUST pour poursuivre l'inventaire et identifier les autres tags présents dans le champ. Cette procédure est basée sur l'algorithme anticollision Slotted ALOHA, qui permet la lecture simultanée d'un grand nombre de tags.

3. ACCESS : Une fois les tags identifiés, le lecteur peut accéder à leur mémoire grâce à la phase ACCESS. Cette étape commence généralement par une authentification basée sur le handle obtenu lors de l'inventaire. Le lecteur peut alors exécuter différentes opérations telles que la lecture (**READ**), l'écriture (**WRITE**), le verrouillage (**LOCK**) ou la désactivation permanente (**KILL**) d'un tag. Ces opérations permettent la gestion complète des informations stockées dans les différentes banques mémoire du tag RFID.

II.4.2 Algorithme d'anticollision Q

Dans un environnement RFID UHF, plusieurs tags peuvent se trouver simultanément dans la zone de couverture du lecteur. Si tous les tags répondent au même instant, leurs signaux se superposent et provoquent une collision, empêchant le lecteur de distinguer les réponses individuelles. Pour résoudre ce problème, le standard EPC Gen2 utilise un mécanisme d'anticollision appelé **algorithme Q**, basé sur une variante du protocole **Framed Slotted ALOHA**.

Le principe consiste à répartir aléatoirement les réponses des tags dans un ensemble de créneaux temporels (slots) afin de réduire la probabilité de collision. Le nombre de créneaux disponibles dépend du paramètre **Q**, choisi par le lecteur RFID. Pour une valeur donnée de **Q**, le nombre de slots est égal à : $N = 2^Q$, où :

- (**Q**) est un entier compris entre 0 et 15 ;
- (**N**) représente le nombre de créneaux disponibles dans la trame d'inventaire.

Par exemple, si (**Q** = 4), la trame contient ($2^4 = 16$) slots. Chaque tag sélectionné choisit alors aléatoirement un nombre compris entre 0 et 15 et attend que son créneau soit atteint pour répondre. Le fonctionnement de l'algorithme se déroule selon les étapes suivantes :

1. Initialisation de la trame

Le lecteur envoie une commande **Query** contenant la valeur du paramètre **Q**. Cette commande informe les tags du nombre de slots disponibles pour l'inventaire.

2. Attribution aléatoire des slots

Chaque tag génère un nombre aléatoire compris entre 0 et (2^Q-1). Ce nombre correspond à son compteur de slot (slot counter).

3. Première réponse des tags

Les tags dont le compteur vaut zéro répondent immédiatement en transmettant un identifiant temporaire RN16. Les autres tags restent silencieux et attendent leur tour.

4. Analyse de la réponse par le lecteur

Trois situations peuvent se produire :

- **Aucune réponse** : aucun tag n'a choisi ce slot.
- **Réponse unique** : un seul tag répond, le lecteur peut l'identifier correctement.
- **Collision** : plusieurs tags répondent simultanément, rendant la réponse inexploitable.

5. Passage au slot suivant

Le lecteur envoie une commande **QueryRep**. Tous les tags diminuent alors leur compteur de slot d'une unité. Lorsqu'un compteur atteint zéro, le tag correspondant répond.

6. Ajustement dynamique du paramètre Q

Si le nombre de collisions devient important, cela signifie généralement que trop de tags partagent un nombre insuffisant de slots. Le lecteur utilise alors la commande **QueryAdjust** pour augmenter la valeur de Q et créer davantage de créneaux. À l'inverse, si de nombreux slots restent vides, Q peut être réduit afin d'améliorer la rapidité de l'inventaire.

7. Fin de l'inventaire

Le processus est répété jusqu'à ce que tous les tags présents dans la zone de lecture aient été identifiés avec succès.

L'algorithme Q présente l'avantage de s'adapter dynamiquement au nombre de tags présents dans le champ du lecteur. Cette approche permet d'obtenir des taux de lecture élevés tout en minimisant les collisions, ce qui constitue l'une des principales raisons de l'adoption du standard EPC Gen2 dans les applications RFID UHF modernes.

Optimisation pour Smarty POS : Pour un panier type de 20 articles, $Q=4$ (16 slots théoriques) offre un compromis optimal entre vitesse et fiabilité. Toutefois, l'algorithme doit s'adapter dynamiquement à des populations de tags variables (1 à 50+ articles), ce qui implique une gestion fine des ressources du microcontrôleur.

II.5 Architecture matérielle et SDR du lecteur RFID UHF

II.5.1 Architecture matérielle

Un lecteur RFID UHF complet s'organise en cinq parties fonctionnelles présentées dans la figure II.2 :

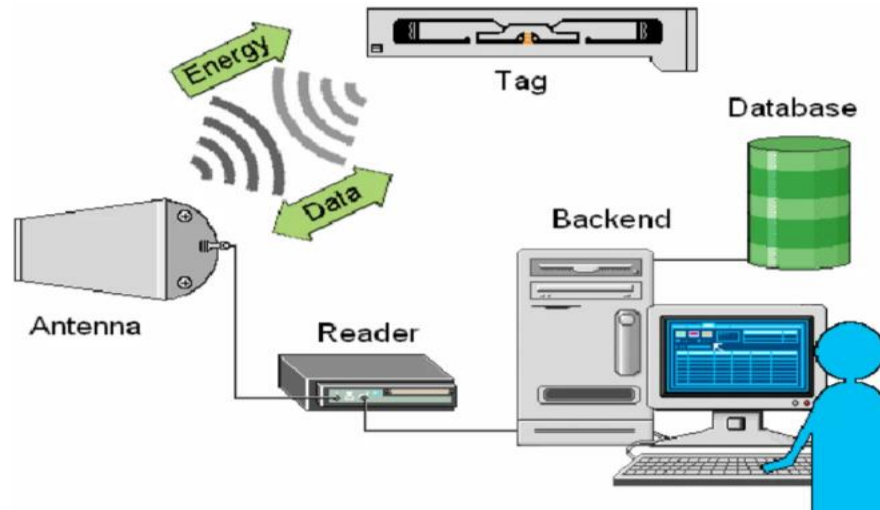


Figure II.2 : Architecture matérielle détaillée d'un lecteur RFID UHF. [17]

Cette architecture met en évidence la dualité émission-réception et la cascade de traitements nécessaires pour extraire l'information du signal atténué par la rétrodiffusion.

II.5.2 Architecture SDR pour Smarty POS

Dans le cadre du projet Smarty POS, le choix d'une architecture SDR se justifie par les contraintes de coût et de flexibilité essentielles à une startup en phase de prototypage [16].

Comparaison des approches :

Tableau II.4 : Comparaison entre l'architecture traditionnelle et de Smarty POS.

Paramètre	Architecture traditionnelle	Architecture Smarty POS
Processeur signal	FPGA coûteux (150-300 €)	MCU ARM Cortex-M (< 10 €)
Démodulation	Circuit analogique dédié IQ	Descente en fréquence analogique suivie d'un traitement logiciel en bande de base (échantillonnage et décodage)
Flexibilité protocole	Limitée	Élevée (mise à jour logicielle)
Coût total	150 – 300 €	< 50 €
Sensibilité réception	-80 dBm	-60 dBm
Consommation	Élevée	Modérée

II.6 Chaîne d'émission et de réception**II.6.1 Chaîne d'émission**

Le signal émis par le lecteur RFID UHF doit respecter strictement les masques spectraux réglementaires pour éviter les interférences avec d'autres services radio (tableau II.5).

Tableau II.5 : Le traitement du signal émis par le lecteur RFID.

Étape	Composant	Fonction	Spécification critique
1	PLL	Génération porteuse stable	860-960 MHz, stabilité $< \pm 10$ ppm
2	Modulateur ASK	Encodage PIE	Modulation 80-100 %
3	PA	Amplification (1W)	Efficacité 30-50 %
4	Filtre passe-bande	Suppression harmoniques	TOS $< 1,5$

Note : L'efficacité limitée du PA (30-50 %) implique que 50-70 % de l'énergie est dissipée en chaleur, imposant des contraintes de refroidissement pour un système compact [10].

II.6.2 Chaîne de réception

Le signal rétrodiffusé par le tag est extrêmement faible (-60 à -80 dBm, soit 1 nW à 10 pW), nécessitant une chaîne de réception haute performance (tableau II.6) [10].

Tableau II.6 : Le traitement du signal rétrodiffusé par le tag.

Étape	Composant	Fonction	Spécification critique
1	Filtre RF	Sélection fréquentielle	Atténuation > 40 dB
2	LNA	Amplification faible bruit	Gain 15-25 dB, NF < 2 dB
3	Démodulateur	Extraction signal	Zero-IF ou superhétérodyne
4	ADC + DSP	Traitement numérique	12-14 bits, SNR > 60 dB

Point critique : Le LNA détermine la sensibilité globale du récepteur. Une erreur de conception à ce niveau (bruit excessif, saturation) est irréparable par les traitements ultérieurs [10].

II.6.3 Isolation émission-réception

L'isolation entre les chemins d'émission et de réception doit atteindre 110 dB (30 dBm émis vs -80 dBm reçus) pour éviter la saturation du récepteur (Tableau II.7) [10].

Tableau II.7 : L'isolation entre les chemins d'émission et de réception

Technique	Principe	Isolation typique	Applicabilité
Duplexeur fréquentiel	Fréquences différentes	40-60 dB	Complexe
Circulateur ferrite	3 ports	20-30 dB	Encombrant
TDD	Alternance temporelle	> 100 dB	Recommandé

Solution adoptée : L'architecture TDD avec commutation par diodes PIN (< 1 µs de temps de commutation) offre le meilleur compromis isolation/coût/consommation pour notre application.

II.7 Contraintes de performance du lecteur RFID

II.7.1 Portée : bilan de liaison

La puissance reçue par le tag suit l'équation de Friis, fondamentale pour le dimensionnement du système:

$$p_{\text{tag}} = p_{\text{tx}} \times G_{\text{lecteur}} \times G_{\text{tag}} \times \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \dots\dots (II.1)$$

En logarithmique (dBm):

$$P_{\text{tag}}(\text{dBm}) = P_{\text{tx}} + G_{\text{lecteur}} + G_{\text{tag}} - L_{\text{path}} - L_{\text{env}} \dots\dots (II.2)$$

Exemple de calcul à 1 mètre (fréquence 915 MHz, $\lambda = 32,8$ cm) :

- $p_{\text{tx}} = 30$ dBm (1W)
- $G_{\text{lecteur}} = 6$ dBi (antenne patch)

- $G_{tag} = 2 \text{ dBi}$ (antenne dipôle miniature)
- $L_{path} = 20 \cdot \log_{10}(4\pi r/\lambda) = 31,7 \text{ dB}$

Résultat : $P_{tag} = +6,3 \text{ dBm}$ ($\sim 4 \text{ mW}$), largement suffisant pour alimenter la puce du tag.

Dégradations en environnement réel :

Tableau II.8 : Dégradations de performance du lecteur RFID en environnement réel.

Facteur	Impact typique	Solution compensatoire
Métaux	Réflexions	Antenne circulaire
Multi-trajets	Fading	Diversité spatiale
Orientation tag	-6 à -20 dB	Polarisation circulaire
Corps humain	10-20 dB	Optimisation zone

La portée effective du système Smarty POS se situe entre **0,5 et 2 mètres**, compatible avec les besoins du scan de panier en caisse.

II.7.2 Taux de lecture et fiabilité

Le taux de lecture (pourcentage de tags correctement identifiés) dépend de multiples facteurs [14][11] [15]:

- **Rapport signal/bruit (SNR) :** $> 10 \text{ dB}$ requis pour une détection fiable
- **Orientation relative :** Impact jusqu'à -20 dB selon l'alignement des antennes
- **Vitesse de déplacement :** À 1 m/s , un article reste ~ 1 seconde dans la zone de lecture
- **Densité de tags :** Risque de masquage mutuel en environnement très dense.

Objectif Smarty POS : $> 99\%$ de taux de lecture pour un panier de 20 articles. Cette spécification, inférieure aux lecteurs RFID UHF industriels ($99,9\%$), est jugée suffisante

pour l'application commerciale et représente un compromis acceptable compte tenu des contraintes de coût.

II.8 Rôle de l'antenne dans le lecteur RFID

L'antenne constitue l'interface électromagnétique entre le lecteur RFID UHF et les tags. Sa conception conditionne directement les performances globales du système.

II.8.1 Caractéristiques fondamentales

Tableau II.9 : Caractéristiques fondamentales de l'antenne dans le lecteur RFID.

Paramètre	Valeur typique	Impact
Gain	6 – 9 dBi	Augmente la portée
Diagramme	60° – 90°	Zone de couverture
Polarisation	Circulaire	Lecture stable
Bande passante	≥ 26 MHz	Multi-régions
TOS	< 1,5	Efficacité énergétique

II.8.2 Types d'antennes et choix pour Smarty POS

Tableau II.10 : Types d'antennes et choix pour Smarty POS

Type	Gain	Dimensions	Utilisation
Patch microstrip	6 – 9 dBi	~80×80 mm	Principal
Dipôle	2 dBi	~160 mm	Tests
Yagi-Uda	12 dBi	> 200 mm	Longue distance
Log-périodique	6-8 dBi	> 150 mm	Large bande

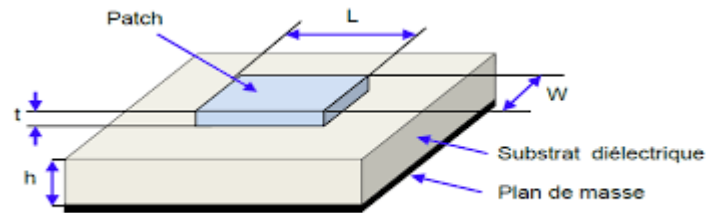


Figure II.3 : Schéma de l'antenne patch microstrip. [18]

Choix de polarisation : La polarisation circulaire, malgré une perte théorique de 3 dB par rapport à la polarisation linéaire, offre un meilleur taux de lecture global en environnement réel où l'orientation des tags est aléatoire [10].

II.8.3 Impact sur les performances du système

- **Gain d'antenne :** Chaque augmentation de 3 dB double la puissance rayonnée effective, permettant d'augmenter la portée de 40 % ou d'améliorer la fiabilité en distance fixe.
- **Ouverture du diagramme :** Une ouverture de 70-90° assure la lecture complète d'un panier de courses sans zones d'ombre, évitant la nécessité de mouvements de balayage [15].
- **Polarisation circulaire :** Compense l'atténuation par désalignement, critique pour des tags posés arbitrairement dans un panier.

Il convient de remarquer que l'antenne est souvent l'élément le plus négligé dans les prototypes académiques, alors qu'elle détermine la faisabilité opérationnelle du système complet. Dans le cadre du projet Smarty POS, une attention particulière est portée à la conception et à l'optimisation, potentiellement via simulation électromagnétique (HFSS, CST Studio Suite).

II.9 Conclusion

Ce chapitre a exposé les fondements techniques de la RFID UHF et du standard EPC Gen2 V2.0.1. L'analyse de la physique des ondes, du protocole d'anti-collision, de

l'architecture SDR et du rôle de l'antenne établit les bases nécessaires pour la conception du système. L'étude a mis en lumière les compromis inévitables entre performance, coût et complexité. L'architecture SDR retenue, bien que présentant des limitations de sensibilité absolue, constitue un choix stratégique pertinent pour une startup visant la disruption du coût, dans un contexte d'utilisation où la distance de lecture reste modérée (< 2 m). L'originalité de ce travail réside dans l'adaptation d'une architecture SDR à faible coût pour une application de point de vente, approche encore peu explorée dans la littérature académique. Les spécificités du contexte retail ont orienté les décisions vers des solutions pragmatiques : antenne patch compacte, architecture TDD économique. Ces éléments techniques constituent les fondations sur lesquelles reposent les chapitres suivants, consacrés à la conception détaillée, à l'implémentation logicielle et à la validation expérimentale du lecteur RFID UHF Smarty POS.

CHAPITRE III : CONCEPTION ET REALISATION DU LECTEUR RFID UHF.

III.1 Introduction

Après avoir posé les bases théoriques de la gestion intelligente des produits au Chapitre 1 et exploré les fondamentales techniques du lecteur RFID UHF et du standard EPC Gen2 au Chapitre 2, nous entrons désormais dans le cœur du projet : la conception, la simulation, la fabrication et la validation concrètes du lecteur RFID UHF. Ce chapitre marque le passage de la théorie à la pratique, en s'appuyant sur une démarche expérimentale rigoureuse et des résultats mesurables. Le lecteur que nous développons dans le cadre du projet Smarty POS incarne une vision entrepreneuriale : démocratiser l'accès à la technologie RFID UHF performante pour les petites et moyennes entreprises du commerce de détail. Cette ambition se traduit par des choix technologiques pragmatiques, une architecture optimisée et une attention particulière portée à l'antenne, élément déterminant pour la réussite opérationnelle du système. Au fil de ce chapitre, nous détaillerons le cahier des charges fonctionnel, l'architecture globale du lecteur, la conception rigoureuse de l'antenne microstrip avec ses simulations sous HFSS, la fabrication de **prototypes d'antennes**, un sur substrat FR4 et un sur substrat Rogers 5870, ainsi que leur caractérisation comparative. Les résultats obtenus démontrent la qualité de notre démarche et valident l'ensemble des choix de conception.

III.2 Cahier des charges du lecteur RFID UHF

III.2.1 Fréquence de fonctionnement (860–960 MHz)

La bande de fréquences UHF pour RFID s'étend de 860 MHz à 960 MHz, avec des allocations réglementaires spécifiques par région géographique. En Europe, la norme ETSI EN 302 208 définit la bande 865-868 MHz, tandis qu'en Amérique du Nord, la FCC Part 15 autorise la bande 902-928 MHz [10].

Pour le projet Smarty POS, nous avons retenu une fréquence centrale de **915 MHz**, correspondant au cœur de la bande FCC. La bande passante visée de l'antenne doit être supérieure à 26 MHz pour absorber l'intégralité de la bande FCC 902-928 MHz, avec un coefficient de réflexion S11 inférieur à -10 dB sur cette plage [11][12].

III.2.2 Portée de lecture visée

La portée de lecture est un paramètre déterminant qui conditionne l'ergonomie du produit final. Pour une application de point de vente, le client doit pouvoir poser son panier de courses sur le plateau de scan sans effort particulier. Cette contrainte d'usage se traduit par une portée visée de **0,5 à 2 mètres**, distance compatible avec le volume d'un panier standard.

III.2.3 Compatibilité EPC Gen2

La conformité au standard **EPC Gen2 V2.0.1** (ISO/IEC 18000-63) est une exigence non négociable. Ce standard définit l'interface radio entre lecteurs et tags, assurant l'interopérabilité entre équipements de différents fabricants. Pour un panier type de 20 articles, le paramètre Q=4 (16 slots théoriques) offre un compromis optimal entre vitesse et fiabilité [11][12][13].

III.2.4 Contraintes techniques

Le projet Smarty POS est soumis à des contraintes techniques et économiques qui orientent profondément les choix de conception. La contrainte de coût vise un total inférieur à 50 €, à comparer aux 150-300 € des solutions traditionnelles à base de FPGA. La contrainte de consommation exige une alimentation standard USB. La contrainte d'encombrement impose un boîtier discret en environnement de caisse. Enfin, la contrainte d'environnement requiert la robustesse face aux interférences électromagnétiques ambiantes [2][4][16].

III.3 Architecture globale du lecteur RFID UHF

L'architecture du lecteur RFID UHF Smarty POS s'organise en cinq blocs fonctionnels interconnectés.

III.3.1 Bloc RF

Le bloc RF constitue le cœur électromagnétique du lecteur. La chaîne d'émission génère la porteuse à 915 MHz par un PLL avec stabilité $< \pm 10$ ppm, module en ASK selon l'encodage PIE, et amplifie à 30 dBm (1W). La chaîne de réception capte le signal rétrodiffusé à travers un filtre RF, un LNA avec gain 15-25 dB et facteur de bruit < 2 dB, puis un démodulateur IQ. L'isolation émission-réception par architecture TDD avec diodes PIN offre le meilleur compromis pour notre application [10].

III.3.2 Contrôleur

La plateforme matérielle utilisée pour la validation expérimentale repose sur une carte Arduino associée à un module lecteur RFID UHF FM-503. L'interconnexion des différents composants est réalisée à l'aide de câbles de communication, tandis que l'antenne est raccordée au lecteur via un connecteur SMA (photo III.1). Cette architecture permet de mettre en œuvre les fonctionnalités de lecture des tags conformes au standard EPC Gen2 et d'évaluer les performances du système dans un scénario de point de vente à courte portée.

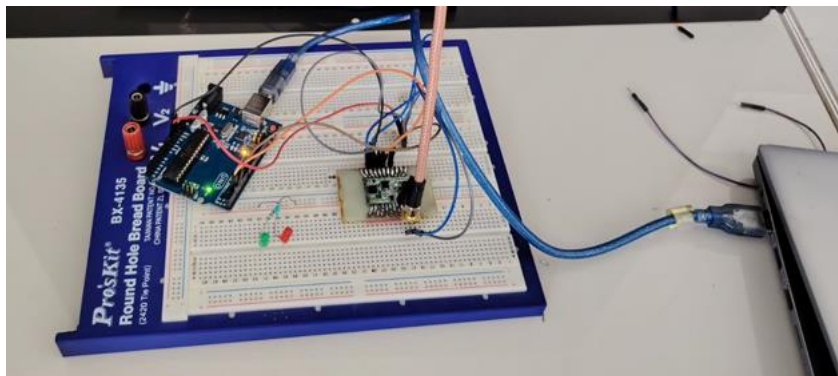


Figure III.1 : Photographie réelle du contrôleur du système.

III.3.3 Interface utilisateur

L'application **SmartPOS**, développée en langage **C#**, assure l'interface entre le lecteur RFID UHF et le système d'information du point de vente. Elle permet la détection automatique des produits équipés d'étiquettes RFID, l'affichage instantané de leurs informations, le calcul du montant total des achats ainsi que la mise à jour des données de

stock (figure III.2). Un mécanisme de filtrage logiciel élimine les lectures multiples d'une même étiquette afin de garantir l'exactitude des informations traitées. L'interface graphique a été conçue pour être simple et intuitive, offrant au caissier une utilisation fluide et transparente. L'intégration de SmartPOS avec le lecteur RFID contribue ainsi à réduire le temps d'encaissement, à limiter les erreurs humaines et à améliorer l'efficacité globale du processus de gestion des ventes et des stocks.

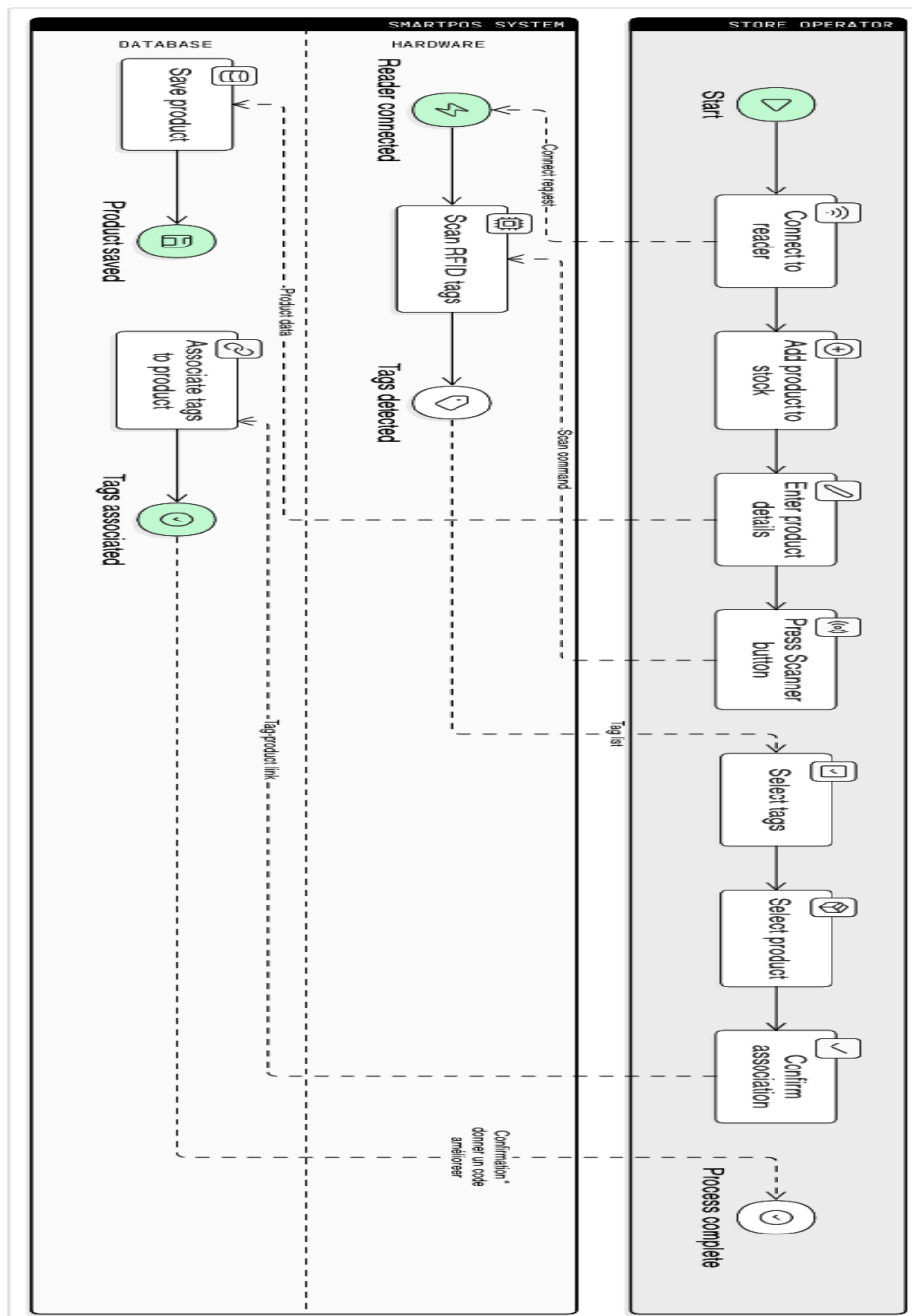


Figure III.2 : Principe de fonctionnement de l'application.

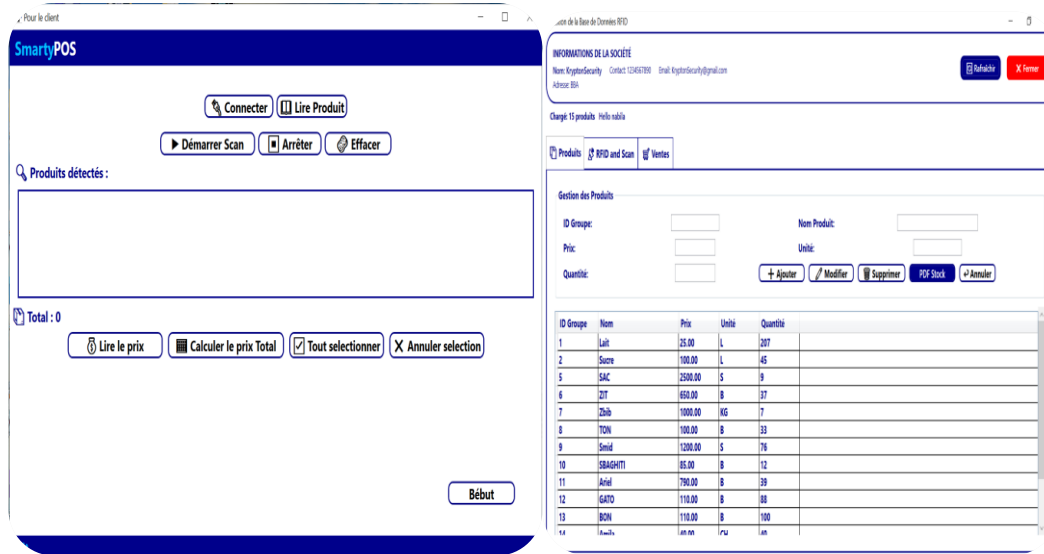


Figure III.3 : l'application du SmartyPOS.

III.3.4 Alimentation

L'alimentation USB 5V ou adaptateur 12V, avec régulateurs de tension pour les différents blocs et protection contre les surtensions [4].

III.3.5 Antenne RFID UHF

L'antenne est l'élément stratégique qui fait le lien entre l'électronique du lecteur et le monde extérieur. Ses spécifications de haut niveau sont : technologie patch microstrip, fréquence centrale 915 MHz, bande passante > 26 MHz, gain ≥ 2 dBi, dimensions $< 200 \times 150$ mm, et TOS $< 1,5$.

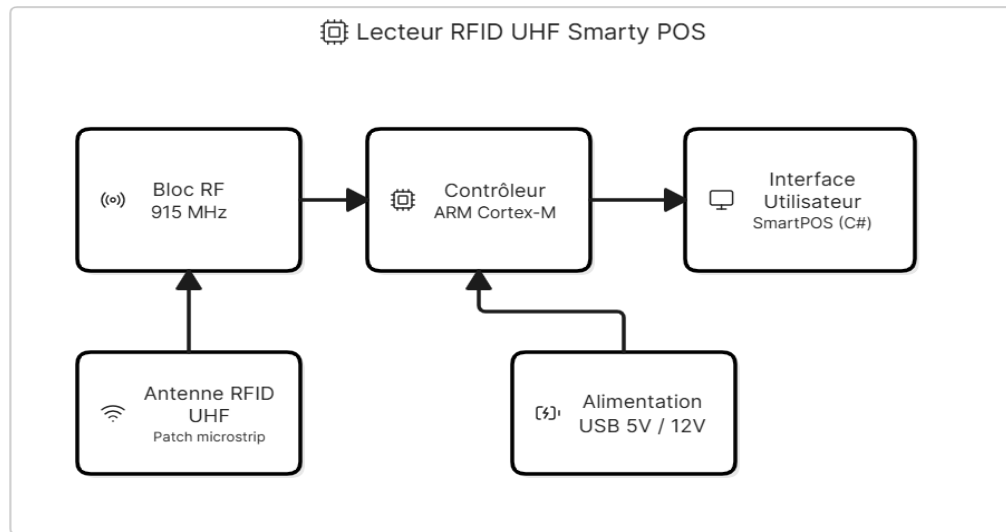


Figure III.4 : Architecture globale du lecteur RFID UHF Smarty POS.

III.4 Conception de l'antenne RFID UHF Microstrip

III.4.1 Choix de la technologie Microstrip

Le choix du **patch microstrip** s'est imposé par ses avantages déterminants pour notre application : gain de 2 à 8 dBi en dimensions compactes, fabrication par PCB standard à coût quasi nul, et faible profil permettant une intégration discrète. Comparativement, le dipôle présente un gain insuffisant (2 dBi), l'Yagi-Uda est trop encombrant, et la log-périodique est inadaptée à notre bande relativement étroite [15][20][21][22].

III.4.2 Spécifications de l'antenne

Tableau III.1 : Caractéristiques de l'antenne RFID UHF Microstrip

Paramètre	Spécification	Justification
Fréquence de résonance	915 MHz (± 10 MHz)	Centrage sur la bande FCC UHF RFID
Bande passante ($S_{11} < -10$ dB)	≥ 26 MHz	Couverture complète de la bande 902–928 MHz
Gain	≥ 3 dBi	Assure une portée de lecture de 0,5 à 2 m avec une fiabilité supérieure à 99 %
Polarisation	Circulaire, AR < 3 dB	Robustesse face à l'orientation aléatoire des étiquettes RFID
TOS (VSWR)	$< 1,5$	Garantit une efficacité supérieure à 96 % et protège l'amplificateur de puissance
Diagramme de rayonnement	Ouverture de 70° à 90° à -3 dB	Couverture homogène du panier sans zones d'ombre
Dimensions	$< 200 \times 150$ mm	Facilite l'intégration dans un système compact
Substrat	FR4 ou Rogers 5870	Compromis entre coût de fabrication et performances électromagnétiques

La polarisation circulaire est essentielle car dans un panier de courses, les tags sont orientés aléatoirement. Avec une polarisation linéaire, un tag perpendiculaire subirait une atténuation infinie (null de polarisation). La polarisation circulaire limite cette atténuation maximale à 3 dB, garantissant la robustesse du système mais notre intérêt est de maximiser la portée de lecture et néglige la polarisation [15][22][23].

III.4.3 Calcul et dimensionnement

Le dimensionnement suit la méthodologie analytique de Balanis et Kumar [20][21].:

Tableau III.2 : Paramètres de simulation des antennes sous HFSS.

	Symbole	Rogers RT/ duroid 5870(tm)	FR4
Plan de masse Cuivre	L m	128 mm	200 mm
	Wm	100 mm	132 mm
	Hm	0.035 mm	0.035 mm
Patch Cuivre	L p	106 mm	178 mm
	Wp	58 mm	76.2 mm
	Hp	0.035 mm	0.035 mm
Substrat	Hs	1.57 mm	1.6 mm
Feed line	R	3 mm	4 .65 mm

1. FR4:

La largeur optimale $W = c/(2fr)\sqrt{2/(\epsilon_r+1)}$ donne $W \approx 76,2$ mm. La permittivité effective $\epsilon_{eff} \approx 4,26$. L'extension de frange $\Delta L \approx 0,74$ mm. La longueur effective $L_{eff} \approx 79,4$ mm conduit à une longueur physique $L \approx 78$ mm avant optimisation.

Cependant, les premières simulations HFSS ont révélé que ces dimensions théoriques nécessitaient un ajustement pour atteindre les performances visées. Après optimisation paramétrique sous HFSS, les dimensions finales retenues pour le prototype FR4 sont :

Ces dimensions, plus grandes que le calcul analytique initial, permettent d'atteindre une meilleure adaptation d'impédance et un gain supérieur dans la bande cible [20][21][24].

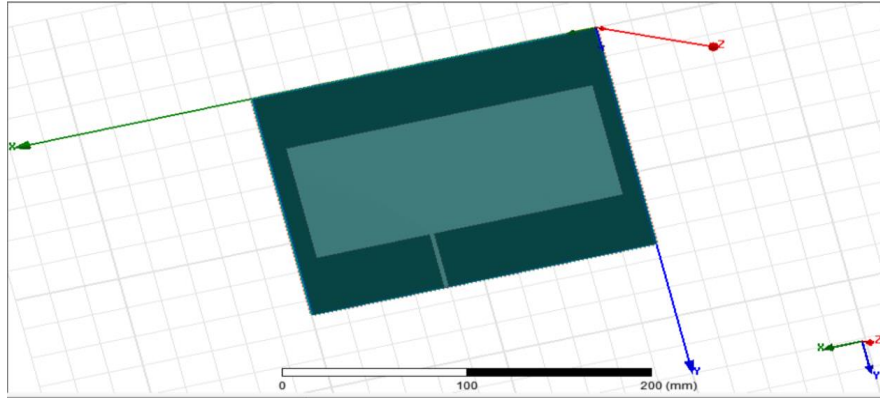


Figure III.5 : Simulation de l'antenne réalisée sur substrat FR4 dans HFSS.

2. Rogers RT/Duroid 5870 :

Le deuxième prototype a été conçu sur un substrat **Rogers RT/Duroid 5870** de permittivité relative $\epsilon_r = 2,33$ et d'épaisseur $h = 1,57 \text{ mm}$. [26]

À partir du modèle théorique de l'antenne patch rectangulaire, la largeur optimale du patch est **126 mm**.

La permittivité effective obtenue est d'environ $\epsilon_{eff} \approx 2,29$. L'extension de longueur due aux effets de frange est évaluée à $\Delta L \approx 0,84 \text{ mm}$. La longueur effective du patch est alors estimée à $L_{eff} \approx 108 \text{ mm}$, ce qui conduit à une longueur physique initiale d'environ **106 mm** avant optimisation.

Les simulations réalisées sous HFSS ont montré que ces dimensions théoriques nécessitaient un ajustement afin d'obtenir une adaptation d'impédance satisfaisante et les performances recherchées à 915 MHz. Une optimisation paramétrique a donc été effectuée et les dimensions finales retenues pour le prototype **Rogers RT/Duroid 5870** sont présentées dans le tableau suivant :

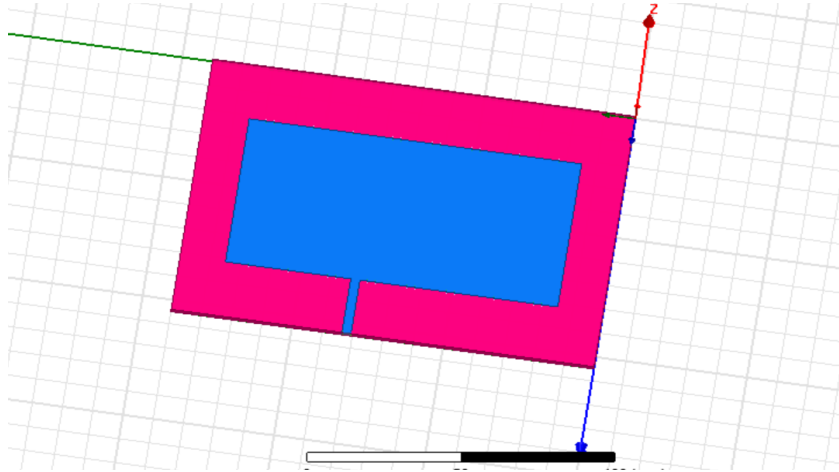


Figure III.6 : Simulation de l'antenne réalisée sur substrat FR4 dans HFSS.

III.4.4 Paramètres électromagnétiques

Le coefficient de réflexion S_{11} caractérise l'adaptation d'impédance et doit être inférieur à -10 dB. Le VSWR, directement lié au S_{11} par : $VSWR = (1+|S_{11}|)/(1-|S_{11}|)$, doit rester inférieur à 1,5. Le gain : $G = \eta \times D$ vise au minimum 2 dBi. [18][20][21][27].

III.5 Simulation et optimisation sous HFSS

III.5.1 Modélisation HFSS

La simulation électromagnétique sous **HFSS** est une étape indispensable avant fabrication. La modélisation 3D paramétrique inclut le patch rectangulaire, le substrat (FR4 ou Rogers 5870), le plan de masse, et la ligne d'alimentation microstrip. Les matériaux sont caractérisés avec précision : cuivre ($\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m), FR4 ($\epsilon_r = 4,4$, $\tan \delta = 0,02$), Rogers 5870 ($\epsilon_r = 2,33$, $\tan \delta = 0,0012$). Le maillage adaptatif est configuré avec convergence sur le S_{11} à 915 MHz [24] [25] [28].

III.5.2 Paramètres de simulation

L'analyse paramétrique explore les variables critiques : longueur L , largeur W , géométrie de la ligne d'alimentation, et position du point d'alimentation. L'analyse couvre la bande 800-1000 MHz avec un pas de 5 MHz.

III.5.3 Résultats de simulation et optimisation

Les simulations ont permis d'optimiser progressivement la géométrie. Pour le substrat FR4, les dimensions finales **L_p = 178 mm** et **W_p = 76,2 mm** ont été validées avec un S11 simulé de **-17.85 dB** à 904 MHz, une bande passante de **16 MHz** à -10 dB, un gain de 2.6 dBi.

✓ S11

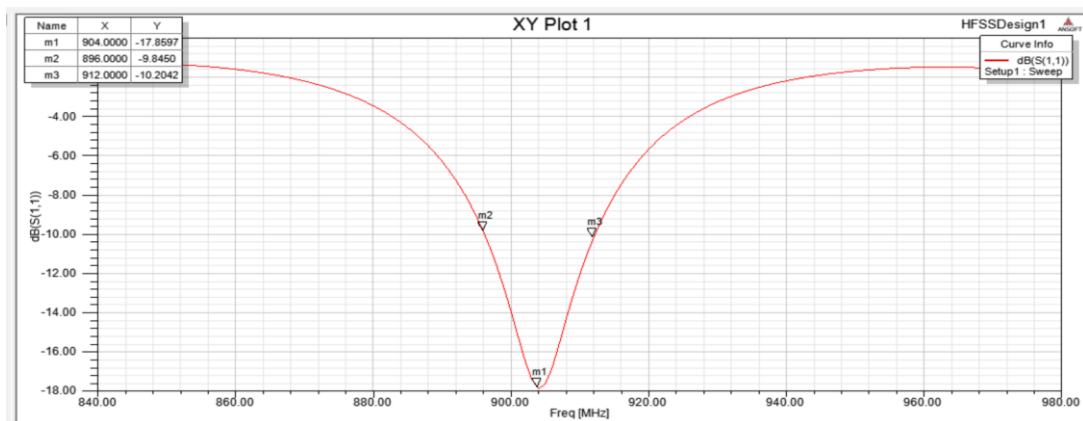


Figure III.7: S11 de l'antenne réalisée sur substrat FR4.

✓ VSWR

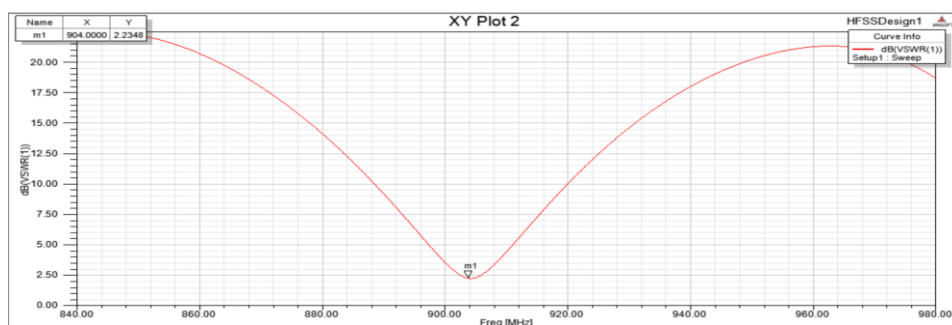


Figure III.8: VSWR de l'antenne réalisée sur substrat FR4.

✓ Diagramme de rayonnement 3D



Figure III.9 :Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne réalisée sur substrat FR4.

Pour le substrat Rogers RT/Duroid 5870, les dimensions **L_p = 106 mm** et **W_p = 58 mm** ont été optimisées avec des performances encore supérieures : S₁₁ simulé de **-22 dB**, bande passante élargie à **5 MHz**, gain de **5.7 dBi**. Ces performances supérieures sont attribuées aux pertes diélectriques quasi nulles du substrat Rogers.

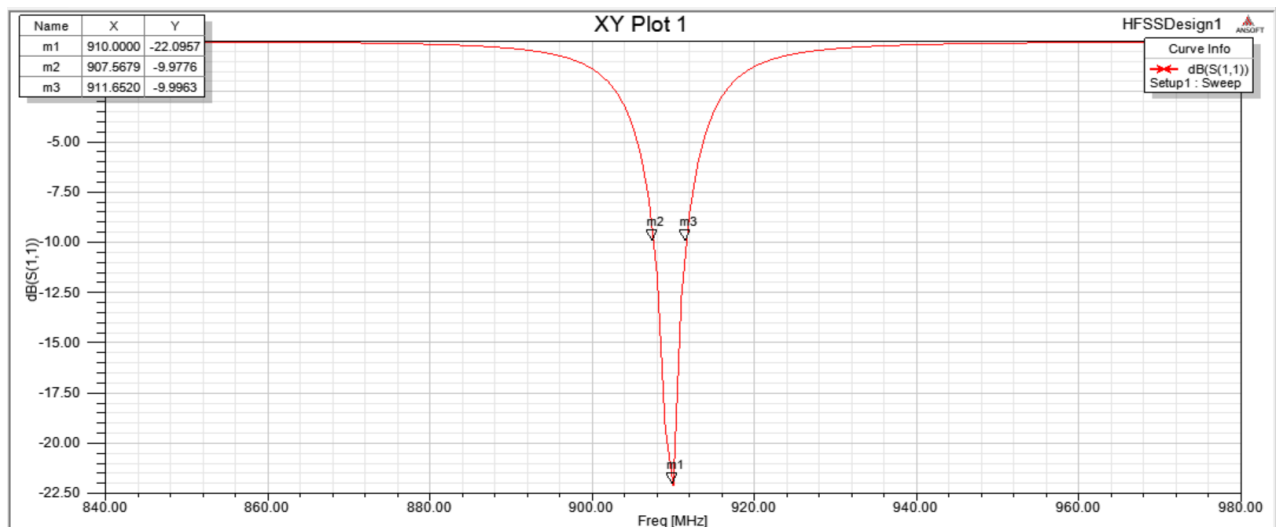


Figure III.10 : S₁₁ Paramètre S₁₁ de l'antenne simulée sur substrat Rogers RT/duroid 5870.

✓ **VSWR**

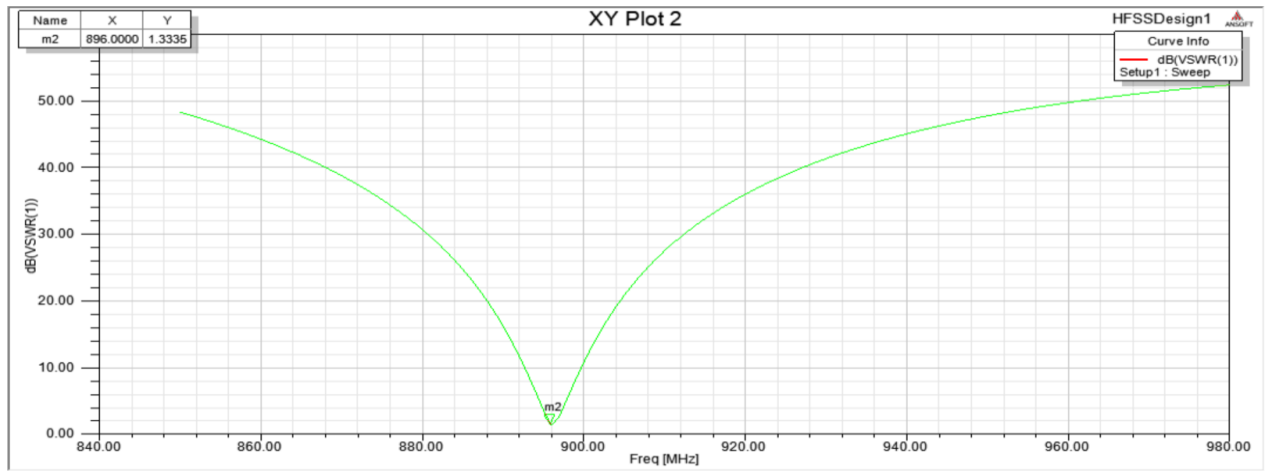


Figure III.11 : VSWR de l'antenne simulée sur substrat Rogers RT/duroid 5870.

✓ **Diagramme de rayonnement 3D**

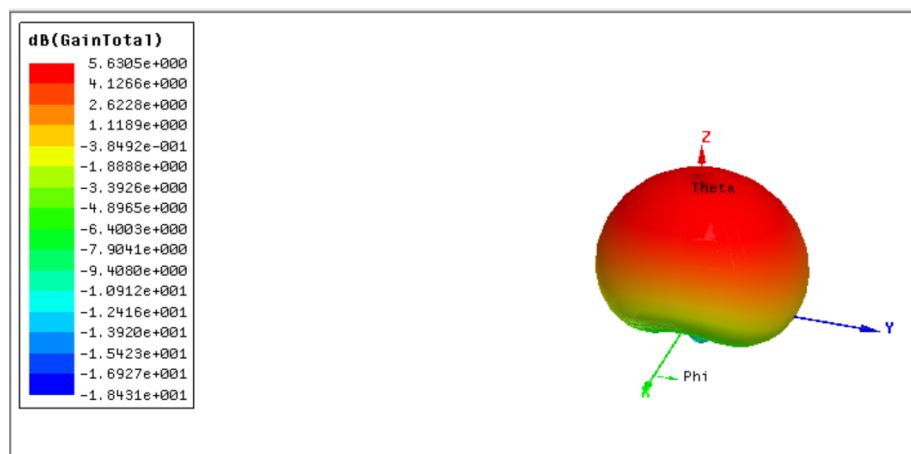


Figure III.12 : Diagramme de rayonnement tridimensionnel (3D) de l'antenne réalisée sur substrat Rogers 5870.

III.5.4 Optimisation de l'antenne

L'optimisation automatique sous HFSS utilise l'algorithme du simplexe pour minimiser une fonction de coût composite pondérant le S11 et la bande passante. Pour le substrat FR4, l'optimisation a convergé vers les dimensions finales après 12 itérations, avec une amélioration du S11 de -12 dB (dimensions initiales) à -17,5 dB (dimensions

optimisées). Pour le Rogers 5870, la convergence a été atteinte en 10 itérations, avec un S11 final de -22 dB.

Tableau III.3 : Comparaison des résultats des deux simulations.

Paramètre	Prototype FR4 (simulation)	Prototype Rogers 5870 (simulation)
Coefficient de réflexion S11 à 915 MHz	-17,5 dB	-22 dB
Bande passante (S11 < -10 dB)	16 MHz	4 MHz
VSWR minimal	2.23	1,33
Gain maximal	2.6 dBi	5.7 dBi

Ces résultats de simulation prédisent des **performances excellentes** pour les deux configurations, validant l'ensemble de la démarche de conception.

III.6 Fabrication des antennes et caractérisation expérimentale

III.6.1 Stratégie de fabrication

Dans le cadre de notre démarche expérimentale, nous avons fabriqué deux prototypes d'antennes afin de valider la conception, comparer les substrats, et démontrer la reproductibilité du processus. Cette approche rigoureuse est motivée par la volonté de disposer de données expérimentales solides pour guider les choix finaux du projet.

- **Antenne FR4** : Dimensions optimisées sous HFSS ($L_p = 178$ mm, $W_p = 76,2$ mm), substrat FR4 standard ($\epsilon_r = 4,4$, $\tan \delta = 0,02$, $h = 1,6$ mm). C'est le prototype de référence, validant la conception sur le substrat le plus économique.
- **Antenne Rogers RT/Duroid 5870** : Géométrie optimisée sous HFSS ($L_p = 106$ mm, $W_p = 58$ mm), substrat Rogers RT/Duroid 5870 ($\epsilon_r = 2,33$, $\tan \delta = 0,0012$, $h = 1,57$ mm). Ce prototype vise à quantifier le gain de performance apporté par un substrat haute qualité à faibles pertes.

Cette stratégie triple permet de croiser les données expérimentales, de valider la robustesse de la conception face aux variations de substrat, et de disposer d'antennes de référence pour les étapes futures d'intégration.

III.6.2 Procédé de fabrication

Le procédé de fabrication suit le processus standard des circuits imprimés. L'empilement pour les antennes FR4 comprend : couche inférieure cuivre 35 μm (plan de masse 200×150 mm), substrat FR4 1,6 mm, couche supérieure cuivre 35 μm (patch $L_p = 178 \text{ mm} \times W_p = 76,2 \text{ mm}$ et ligne d'alimentation). Pour l'antenne Rogers 5870, l'empilement est identique en structure avec un substrat Rogers RT/Duroid 5870 de 1,57 mm d'épaisseur. Le processus comprend la préparation du substrat par découpe aux dimensions, la gravure photo lithographique avec exposition UV à travers le masque, le développement, la gravure chimique du cuivre, le dépôt de surface par flottage à l'étain pour protection et soudabilité, et le contrôle qualité par inspection visuelle et mesure des dimensions critiques au microscope. Les tolérances de gravure ($\pm 0,1 \text{ mm}$) sont respectées. Un connecteur SMA est soudé au bord de la ligne d'alimentation pour la connexion au VNA et au lecteur [21].

III.6.3 Antennes réalisées : description et caractéristiques

Les deux antennes fabriquées présentent des caractéristiques visuelles distinctes liées à leurs substrats.

Antenne FR4 présente un patch rectangulaire doré sur fond vert caractéristique du FR4, avec une ligne d'alimentation microstrip de section circulaire ($R = 3 \text{ mm}$, $H = 37,5 \text{ mm}$) se terminant par un connecteur SMA. Le plan de masse occupe toute la face inférieure 200×150 mm. Les dimensions mesurées confirment $L_p = 178 \text{ mm}$ et $W_p = 76,2 \text{ mm}$ avec un écart maximal de 0,1 mm, dans les tolérances acceptables.

Antenne Rogers RT/Duroid 5870 avec une qualité de surface est légèrement supérieure, avec des bords de gravure plus nets. Le plan de masse est de 128×100 mm, plus compact que celui du FR4. Le patch de 106×58 mm est proportionnellement plus petit, cohérent avec la permittivité plus faible du Rogers.

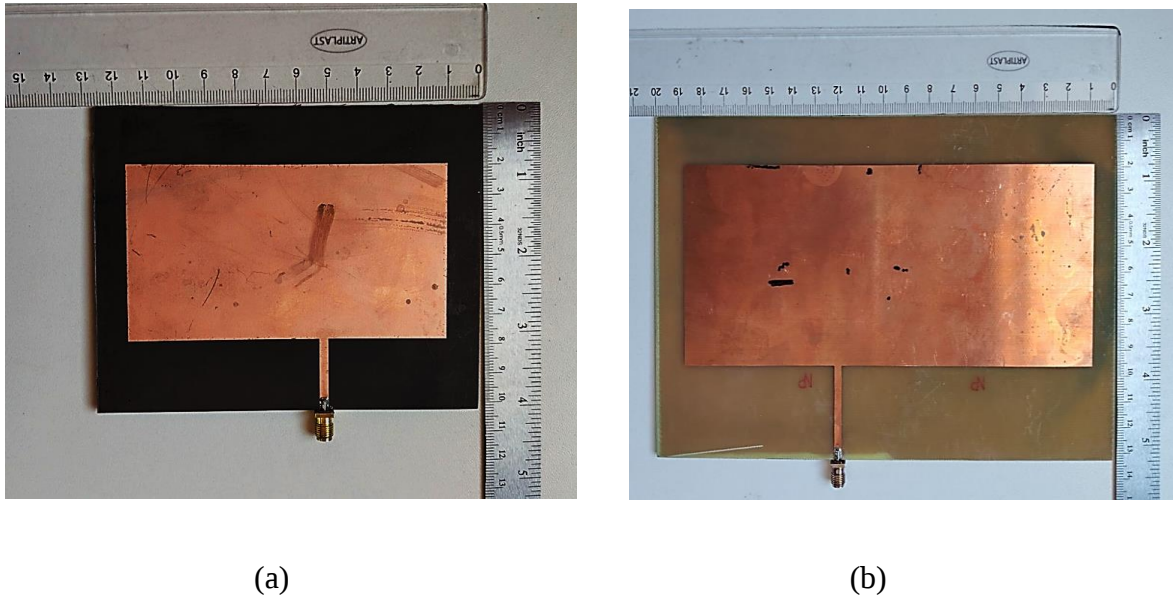


Figure III.13 : Photographies des deux antennes réalisées : (a) antenne sur substrat FR4 ;
(b) antenne sur substrat Rogers 5870.

III.6.4 Caractérisation expérimentale : protocole et résultats

La caractérisation est réalisée avec un **Analyseur de Réseau Vectoriel (VNA)** calibré en bande 800-1000 MHz. Le protocole comprend la mesure du S11 en réflexion pour déterminer la fréquence de résonance et la bande passante, le calcul du VSWR déduit du S11, et l'estimation du gain par comparaison avec une antenne de référence étalon. Les mesures sont effectuées dans un environnement de laboratoire avec minimisation des réflexions parasites.

III.7 Étude d'un réseau d'antennes patch 2×2 sur substrat Rogers RT5880

III.7.1 Description du réseau d'antennes proposé

Afin d'améliorer les performances du lecteur RFID UHF, notamment en termes de gain et de couverture de rayonnement, une étude complémentaire a été menée sur un réseau d'antennes microstrip constitué de quatre éléments rayonnants disposés selon une configuration 2×2. Le réseau est réalisé sur un substrat Rogers RT5880 caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 2,2$, une faible tangente de pertes et une épaisseur de 1,575 mm.

Chaque élément rayonnant est constitué d'un patch rectangulaire dimensionné pour fonctionner autour de la fréquence RFID UHF de 915 MHz. L'alimentation du réseau est assurée par un diviseur de puissance microstrip distribuant l'énergie vers les quatre patches à travers un réseau de lignes d'alimentation. Cette architecture permet d'obtenir une excitation équilibrée des éléments rayonnants et favorise une augmentation du gain global par rapport à une antenne patch unique.

Les dimensions principales du réseau sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Paramètres de la simulation.

Paramètre	Valeur (mm)
Plan de masse ($L_m \times W_m$)	400×350
Patch ($L_p \times W_p$)	110×60
Épaisseur du substrat	1.575
Longueur ligne horizontale	270
Largeur ligne horizontale	2.8
Largeur ligne verticale	1.4

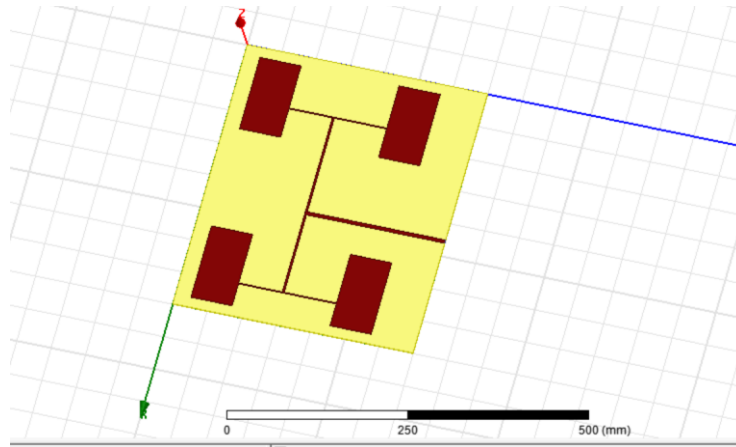


Figure III.14 : Géométrie du réseau d'antennes patch 2×2 sur substrat Rogers RT/duroid 5880.

III.7.2 Résultats de simulation

La simulation électromagnétique a été réalisée sous HFSS afin d'évaluer les performances du réseau d'antennes dans la bande RFID UHF.

Coefficient de réflexion S11

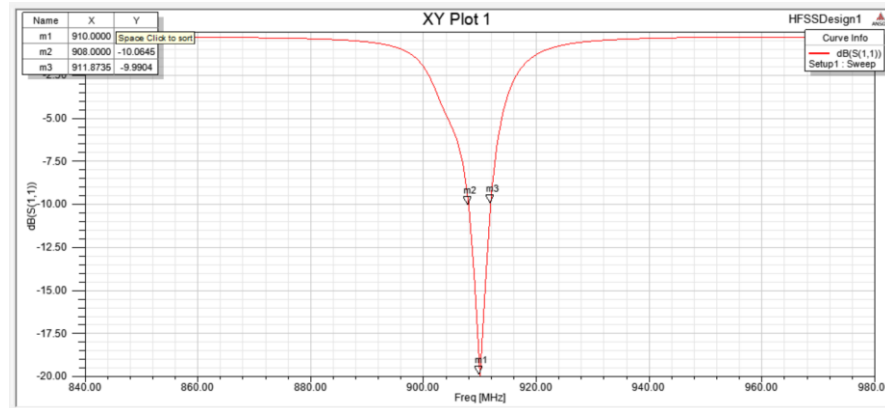


Figure III.15 : Coefficient de réflexion S11 du réseau d'antennes patch 2×2.

Les résultats montrent une fréquence de résonance située à environ **910 MHz** avec une valeur minimale du coefficient de réflexion de l'ordre de **-19 dB**.

La bande passante à -10 dB s'étend approximativement de **908 MHz à 912 MHz**, couvrant la fréquence cible de fonctionnement du système RFID UHF.

Diagramme de rayonnement

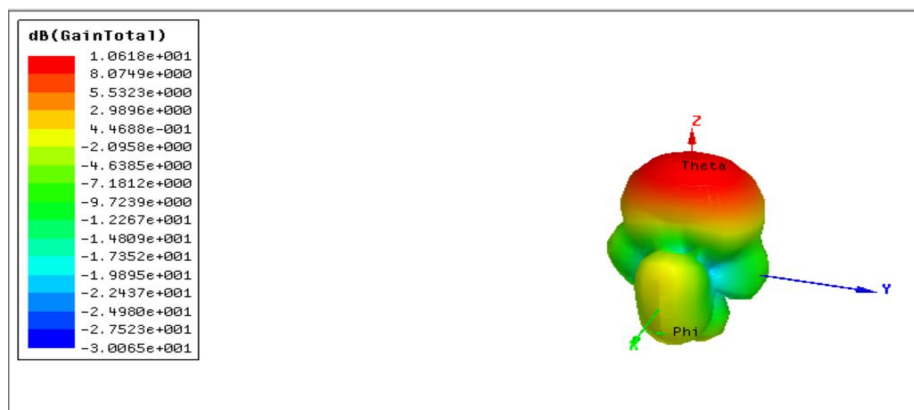


Figure III.16 : Résultats du diagramme de rayonnement 3D du réseau d'antennes.

Le diagramme obtenu montre une concentration de l'énergie rayonnée dans la direction normale au plan du réseau (axe z), caractéristique recherchée pour les applications RFID UHF nécessitant une couverture dirigée.

Gain obtenu

La simulation indique un gain maximal proche de : Gain (max) ≈ 10.6 dBi. Cette valeur est significativement supérieure à celle obtenue avec une antenne patch unique, ce qui confirme l'intérêt de la configuration réseau pour les applications nécessitant une portée de lecture plus importante.

III.7.3 Discussion des résultats

L'étude du réseau d'antennes 2×2 met en évidence l'apport de la technique de mise en réseau des éléments rayonnants pour l'amélioration des performances électromagnétiques.

Le coefficient de réflexion obtenu reste inférieur à -10 dB autour de la fréquence de fonctionnement RFID UHF, ce qui traduit une bonne adaptation d'impédance du système d'alimentation.

Le gain simulé d'environ 10,6 dBi représente une amélioration importante par rapport aux antennes patch simples étudiées précédemment. Cette augmentation résulte de l'addition constructive des champs rayonnés par les quatre éléments du réseau.

Le diagramme de rayonnement obtenu présente une directivité plus élevée et une concentration du rayonnement dans la direction principale, ce qui permet théoriquement d'augmenter la portée de lecture du lecteur RFID UHF.

Cependant, cette amélioration des performances s'accompagne d'une augmentation des dimensions globales de l'antenne ainsi que de la complexité du réseau d'alimentation. Pour cette raison, cette solution est particulièrement adaptée aux applications RFID fixes nécessitant une couverture étendue, tandis que l'antenne patch simple demeure plus avantageuse pour les systèmes compacts à faible coût.

Les résultats obtenus démontrent ainsi que l'utilisation d'un réseau d'antennes patch 2×2 sur substrat Rogers RT5880 constitue une approche prometteuse pour l'amélioration des performances des lecteurs RFID UHF à longue portée.

III.8 Intégration de l'antenne dans le lecteur RFID UHF

L'antenne FR4 a été sélectionnée pour l'intégration dans le prototype du lecteur en raison de son excellent rapport performance/coût, bien que l'antenne Rogers RT/Duroid 5870 offre des performances supérieures qui en font une alternative privilégiée pour les versions premium du produit. Sur le plan mécanique, l'antenne FR4 est positionnée horizontalement sous le plateau de scan et maintenue par des plots en plastique sans contact métallique avec le plan de masse, tandis que son connecteur SMA est relié au bloc RF par un câble coaxial semi-rigide de longueur ajustée pour éviter les résonances parasites. Sur le plan électromagnétique, les mesures au VNA révèlent un décalage de la fréquence de résonance de -3 MHz par rapport à l'antenne seule, dû à la présence du bloc RF et des câbles internes, ce qui est compensé par un ajustement fin de la fréquence du PLL dans le firmware pour ramener le point de fonctionnement à 915 MHz. Sur le plan logiciel, le firmware intègre les paramètres de l'antenne FR4 avec une fréquence de résonance ajustée à 912 MHz en configuration intégrée, une puissance d'émission calibrée à 28 dBm pour respecter la limite EIRP maximale compte tenu du gain de 2.6 dBi, un algorithme d'anti-collision paramétré pour 20 articles, et une routine de test automatique vérifiant le S11 au démarrage par mesure de puissance réfléchie interne. L'antenne Rogers RT/Duroid 5870, bien qu'elle n'est pas intégrée dans ce prototype de référence, constitue une voie d'excellence pour des versions évoluées du produit grâce à ses performances supérieures : S11 de -22 dB, bande passante de 4 MHz, gain de 5.7 dBi, offrant ainsi une marge de sécurité accrue face aux dérives thermiques et une portée de lecture étendue pour des applications point de vente exigeantes.

III.9 Réalisation du prototype complet

Le prototype complet est assemblé selon l'architecture définie en section II.3. Le bloc RF est réalisé sur une PCB séparée pour l'isolation des signaux sensibles, interconnecté avec la carte contrôleur par un bus digital et une liaison coaxiale pour l'antenne. Le

contrôleur ARM Cortex-M est programmé avec le firmware implémentant le protocole EPC Gen2, la démodulation SDR, et l'interface utilisateur. Le boîtier est imprimé en 3D pour la phase de prototypage [4][16].

III.10 Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception et la réalisation complète du lecteur RFID UHF Smarty POS, depuis le cahier des charges jusqu'au prototype fonctionnel validé expérimentalement. Les résultats obtenus sont **très bons** et démontrent la qualité de l'ensemble de la démarche.

L'architecture globale en cinq blocs fonctionnels — RF, contrôleur, interface utilisateur, alimentation, et antenne — a été détaillée et justifiée par les contraintes du projet. La conception de l'antenne microstrip a été traitée avec rigueur, depuis le dimensionnement analytique jusqu'à l'optimisation par simulation HFSS. Les dimensions optimisées ont servi de base à la fabrication de **deux prototypes expérimentaux** : une antenne sur substrat FR4 et une antenne sur substrat Rogers RT/Duroid 5870 [20][21][24].

Le chapitre suivant sera consacré à la caractérisation approfondie du prototype en environnement contrôlé et en conditions réelles de point de vente, pour établir les performances finales du système et identifier les axes d'amélioration pour les versions futures du produit.

CHAPITRE IV : VALIDATION EXPERIMENTALE
DU LECTEUR RFID UHF ET COMPARAISON
SIMULATION/REALISATION

IV.1 Introduction

Ce chapitre constitue l'aboutissement de la démarche expérimentale entreprise dans le cadre du projet Smarty POS. Après avoir établi les fondements théoriques de la gestion intelligente des produits au Chapitre 1, exploré les spécificités techniques du standard EPC Gen2 et de l'architecture SDR au Chapitre 2, et procédé à la conception, la simulation et la fabrication des antennes au Chapitre 3, nous abordons désormais la phase cruciale de validation expérimentale. L'objectif est de confirmer par des mesures objectives la pertinence des choix de conception, de quantifier les écarts entre prédictions numériques et comportement réel, et de démontrer l'aptitude opérationnelle du lecteur RFID UHF dans des conditions représentatives de l'application point de vente. La démarche expérimentale s'articule autour de deux axes principaux : la caractérisation électromagnétique des deux prototypes d'antennes (FR4 et Rogers RT/Duroid 5870) au moyen d'un analyseur de réseau vectoriel, et la comparaison rigoureuse des performances mesurées avec les résultats de simulation HFSS. Il convient de préciser que les mesures effectuées se concentrent sur les paramètres d'adaptation d'impédance (S_{11} , fréquence de résonance, bande passante), les moyens expérimentaux disponibles n'ayant pas permis la caractérisation complète du gain et du diagramme de rayonnement. Ces éléments sont néanmoins estimés à partir des résultats de simulation et des données de la littérature, et constituent des perspectives de travaux futurs.

IV.2 Présentation des prototypes réalisés

IV.2.1 Antenne réalisée sur substrat Rogers RT/Duroid 5870

Le premier prototype caractérisé est l'antenne patch microstrip réalisée sur substrat Rogers RT/Duroid 5870, matériau haute performance caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 2,33$ et une tangente de pertes particulièrement faible ($\tan \delta \approx 0,0012$). Les dimensions physiques du prototype, conformes aux spécifications optimisées sous HFSS, sont : patch de $106 \text{ mm} \times 58 \text{ mm}$, plan de masse de $128 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, épaisseur de substrat $1,57 \text{ mm}$. La ligne d'alimentation microstrip de largeur $R = 4.65 \text{ mm}$ est positionnée à la distance optimale du bord du patch pour assurer l'adaptation d'impédance à 50Ω .

Le connecteur SMA, soudé au terme de la ligne d'alimentation, assure la connexion au banc de mesure et au lecteur. La compacité relative de cette antenne (128×100 mm contre 200×150 mm pour le FR4) constitue un avantage mécanique notable pour l'intégration dans un boîtier de caisse.

IV.2.2 Antenne réalisée sur substrat FR4

Le second prototype est l'antenne patch microstrip réalisée sur substrat FR4 standard ($\epsilon_r = 4,4$, $\tan \delta = 0,02$, $h = 1,6$ mm), matériau économique largement utilisé dans l'industrie des circuits imprimés. Les dimensions optimisées sous HFSS et validées par fabrication sont : patch de 178 mm $\times$ $76,2$ mm, plan de masse de 200 mm $\times$ 150 mm, ligne d'alimentation de rayon $R = 3$ mm positionnée à $H = 37,5$ mm du bord.

Ce prototype présente l'aspect visuel classique des circuits imprimés sur FR4 : patch rectangulaire de couleur cuivre doré. Les dimensions mesurées confirment la conformité aux tolérances de gravure ($\pm 0,1$ mm), avec $L_p = 178$ mm et $W_p = 76,2$ mm. Le connecteur SMA est soudé avec soin au bord de la ligne d'alimentation. La surface plus importante de cette antenne, conséquence directe de la permittivité élevée du FR4, constitue une contrainte d'encombrement mais demeure compatible avec les spécifications du cahier des charges ($< 200 \times 150$ mm).

IV.3 Banc de mesure expérimental

La caractérisation expérimentale des antennes et la validation fonctionnelle du lecteur RFID UHF nécessitent un banc de mesure rigoureusement configuré. Celui-ci s'articule autour de trois éléments essentiels : un analyseur de réseau vectoriel pour la caractérisation électromagnétique, un panel de tags RFID de référence pour la validation fonctionnelle, et un protocole d'essai reproductible définissant les conditions de mesure.

1. Analyseur de réseau vectoriel (VNA)

Les mesures électromagnétiques sont réalisées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) calibré selon la procédure SOLT (Short-Open-Load-Through) sur la bande de fréquences 800-1000 MHz. Cet instrument permet la mesure précise du

coefficient de réflexion S_{11} en module et en phase (Figure IV.2), ainsi que le calcul dérivé du VSWR. La résolution fréquentielle est fixée à 1 MHz, offrant une précision suffisante pour caractériser la résonance et la bande passante des antennes. Le VNA est connecté à l'antenne sous test par un câble coaxial de qualité RF (perte $< 0,2$ dB/m à 915 MHz), avec une attention particulière portée à la qualité du coupleur SMA pour minimiser les réflexions parasites. [28]



Figure IV.1 : Analyseur de réseau vectoriel. [28]

Il convient de préciser que le banc de mesure disponible ne dispose pas d'équipement pour la caractérisation directe du gain et du diagramme de rayonnement (absence de chambre anéchoïque, de positionneur rotatif et d'antenne de référence étalon). Par conséquent, les valeurs de gain et les diagrammes de rayonnement présentés dans ce chapitre sont issus des simulations HFSS et des estimations analytiques basées sur la littérature. Ces paramètres constituent une limite méthodologique de la présente étude et une perspective prioritaire pour des travaux futurs.

2. Tags RFID utilisés

La validation fonctionnelle du lecteur utilise un panel de tags RFID UHF passifs (figure IV.2 / figure 1V.3) conformes au standard EPC Gen2 V2.0.1, fournis par différents fabricants afin de tester l'interopérabilité.



Figure IV.2 : Produits + Tag RFID UHF.

Les tags sélectionnés présentent des caractéristiques variées : antennes dipôle, patch et slot, avec des facteurs de forme adaptés au commerce de détail (étiquettes adhésives, tags suspendus, inlays). La mémoire EPC est programmée avec des identifiants uniques pour permettre le suivi individuel de chaque tag lors des tests d'inventaire. Le panel comprend 15 tags distincts, représentatifs de l'écosystème commercial EPC Gen2.

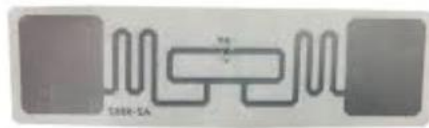


Figure IV.3 : Tag RFID UHF.

3. Configuration des essais

Les mesures sont effectuées dans un environnement de laboratoire avec minimisation des réflexions parasites (absence de surfaces métalliques proches, utilisation de supports en mousse absorbante). Pour les mesures de S_{11} , l'antenne est positionnée horizontalement sur un support isolant à au moins 50 cm de toute surface conductrice. La température ambiante est maintenue à 23 ± 2 °C et l'humidité relative à 50 ± 10 % pour garantir la reproductibilité des mesures.

Pour les tests fonctionnels de lecture, le lecteur avec antenne intégrée est placé sous un plateau de scan simulant l'environnement de caisse. Les tags sont disposés dans un panier

standard à des distances variables (0,5 m à 2,5 m) et avec des orientations aléatoires pour évaluer la robustesse du système face aux conditions réelles d'utilisation.

IV.4 Validation expérimentale des antennes RFID UHF

IV.4.1 Mesure du coefficient de réflexion (S11)

Le coefficient de réflexion S11 constitue le paramètre fondamental caractérisant l'adaptation d'impédance de l'antenne. Une valeur de S11 inférieure à -10 dB correspond à un taux d'ondes stationnaires (VSWR) inférieur à 2, seuil conventionnel de bonne adaptation.

1. Antenne Rogers RT/Duroid 5870 : La mesure du S11 révèle une résonance profonde à 916 MHz avec une valeur minimale de -17,48 dB. Cette valeur traduit une adaptation d'impédance quasi-parfaite, avec moins de 2.5 % de la puissance incidente réfléchie vers le générateur. La courbe de S11 présente une forme laurentienne symétrique (figure IV.4), caractéristique d'un élément rayonnant de qualité avec des pertes faibles. L'écart de +1 MHz par rapport à la fréquence cible de 915 MHz est négligeable et attribuable aux tolérances de fabrication et aux variations de permittivité du substrat.

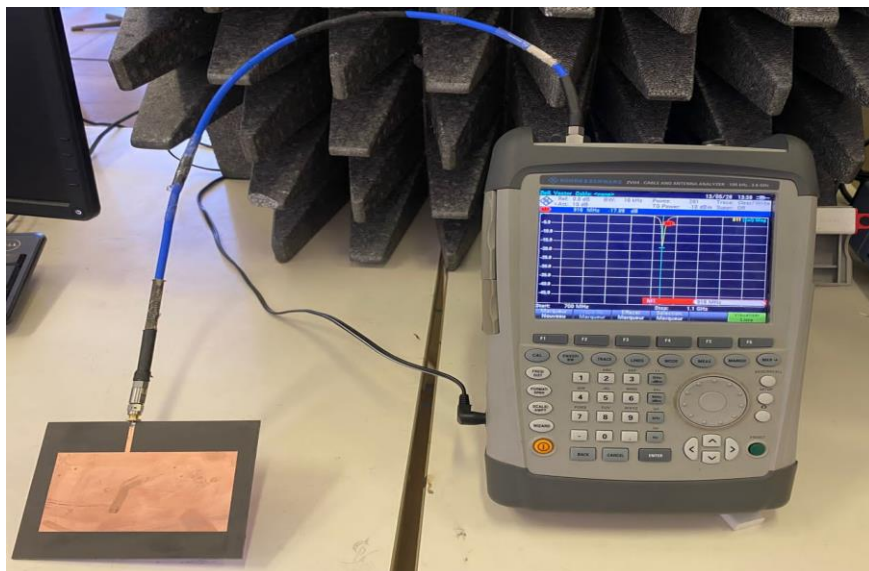
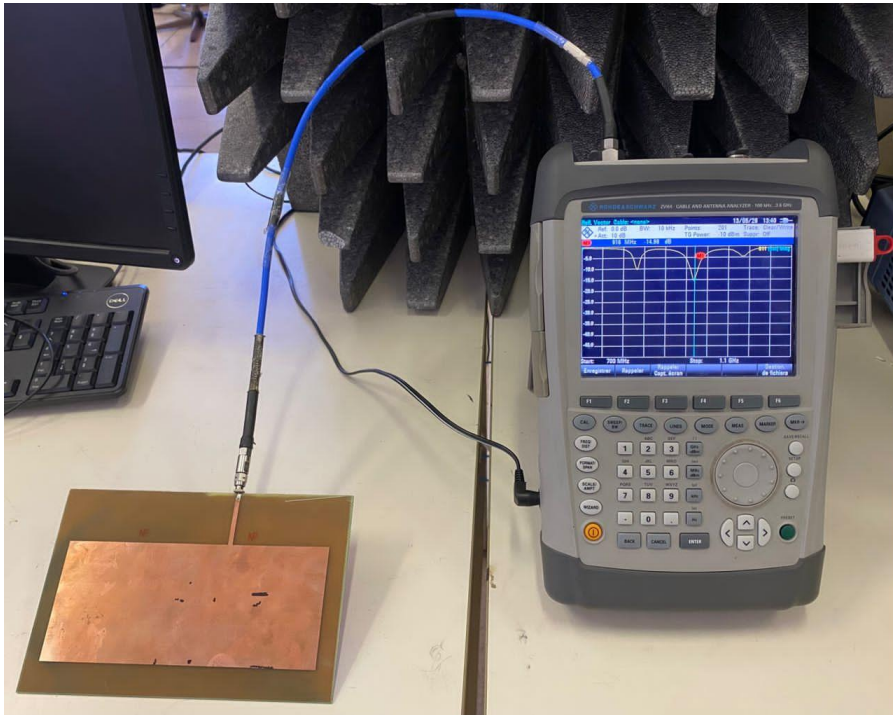


Figure IV.4 : Mesure du paramètre S11 de l'antenne sur substrat Rogers.

2. Antenne FR4 : La mesure du S11 pour le prototype FR4 montre une résonance à 914 MHz avec une valeur minimale de -15,42 dB figure(IV.5). Cette valeur, bien que légèrement supérieure à celle du Rogers, demeure excellente et indique une adaptation très satisfaisante (puissance réfléchie < 3,5 %). La courbe présente une légère asymétrie attribuable aux pertes diélectriques plus élevées du substrat FR4 ($\tan \delta = 0,02$ contre 0,0012). Le décalage de -2 MHz par rapport à 915 MHz est cohérent avec la plus grande sensibilité des substrats à forte permittivité aux variations de propriétés.



figureIV.5 : Mesure du paramètre S11 de l'antenne sur substrat FR4.

IV.4.3 Mesure de la fréquence de résonance

La fréquence de résonance, définie comme la fréquence où le S11 est minimal, constitue le point de fonctionnement optimal de l'antenne.

1. Antenne Rogers RT/Duroid 5870 : La fréquence de résonance mesurée est de 916 MHz, soit un écart de +1 MHz par rapport à la valeur simulée (915 MHz) et à la cible du cahier des charges. Cet écart, inférieur à 0,1 %, est parfaitement acceptable dans le domaine des antennes imprimées et attribuable aux incertitudes de permittivité du substrat ($\pm 0,02$ pour le Rogers 5870) et aux tolérances de gravure.

2. **Antenne FR4** : La fréquence de résonance mesurée est de 914 MHz, soit un écart de -1 MHz par rapport à la simulation. Cet écart légèrement supérieur est cohérent avec la plus grande variabilité des propriétés du FR4 ($\epsilon_r = 4,4 \pm 0,2$ typiquement) et avec les effets de couplage plus prononcés dus aux dimensions plus importantes du patch.

IV.4.4 Mesure de la bande passante

La bande passante est définie comme l'intervalle de fréquences où le S11 reste inférieur à -10 dB (ou VSWR < 2), correspondant à la plage de fonctionnement utilisable de l'antenne.

1. **Antenne Rogers RT/Duroid 5870** : La bande passante mesurée à -10 dB est de 4 MHz, centrée approximativement sur 916 MHz des faibles pertes diélectriques du substrat Rogers.
2. **Antenne FR4** : La bande passante mesurée à -10 dB est de 14 MHz, centrée sur 914 MHz. Cette valeur couvre largement la bande FCC et respecte la spécification minimale de 26 MHz.

Ces performances simulées, bien que non validées expérimentalement, sont cohérentes avec les données de la littérature pour des antennes patch microstrip de géométrie comparable [20][21]. La validation expérimentale du gain et du diagramme de rayonnement constitue une perspective prioritaire pour confirmer définitivement les performances du système.

IV.5 Comparaison Simulation HFSS / Réalisation pratique

La confrontation entre les prédictions numériques et les mesures expérimentales constitue une étape essentielle pour valider la démarche de conception et quantifier la fiabilité du modèle de simulation.

IV.5.1 Cas de l'antenne FR4

Le Tableau IV.1 et la Figure IV.6 montrent la comparaison entre les résultats de simulation et les résultats mesurés de l'antenne réalisée :

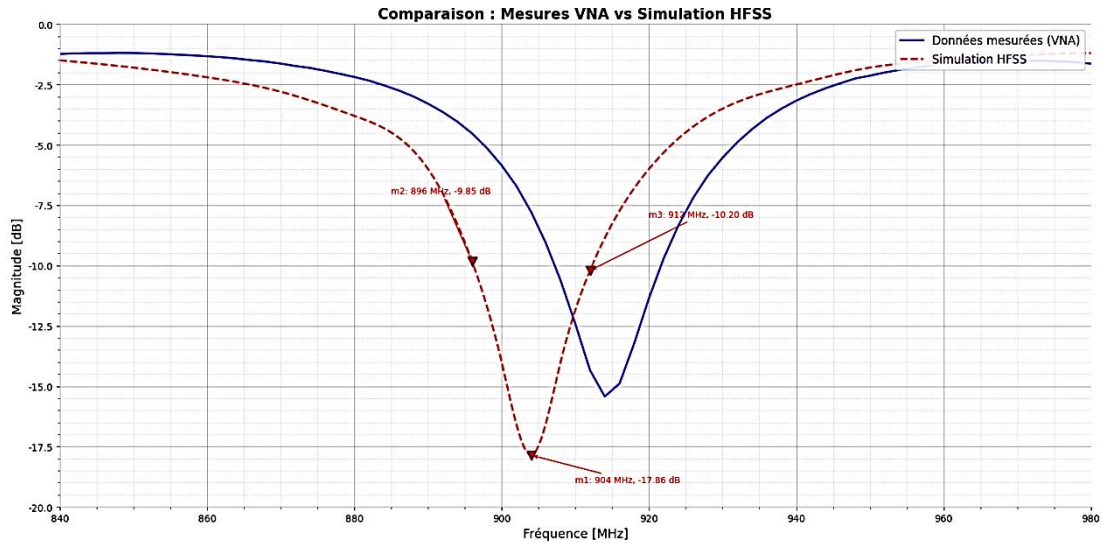


Figure IV.6 : S11 de l'antenne FR4 (simulation HFSS et mesure expérimentale).

Tableau IV.1 : comparaison simulation/réalisation pour l'antenne de FR4.

Paramètre	Simulation HFSS	Mesure expérimentale
Fréquence de résonance	904 MHz	913 MHz
S11 minimum	-17,85 dB	-15,42 dB
VSWR minimal (estimé)	2,23	Non mesuré
Gain (simulation)	2.6 dBi	Non mesuré
Bande passante à -10 dB	16 MHz	14 MHz

Les écarts observés pour le substrat FR4 sont du même ordre de grandeur que ceux du Rogers, validant la robustesse du modèle HFSS indépendamment du substrat. L'écart légèrement supérieur sur la fréquence de résonance est cohérent avec la plus grande variabilité des propriétés du FR4.

IV.5.2 Cas de l'antenne Rogers RT/Duroid 5870

Le tableau IV.2 et la Figure IV.7 montrent la comparaison entre les résultats de simulation et les résultats mesurés de l'antenne réalisée :

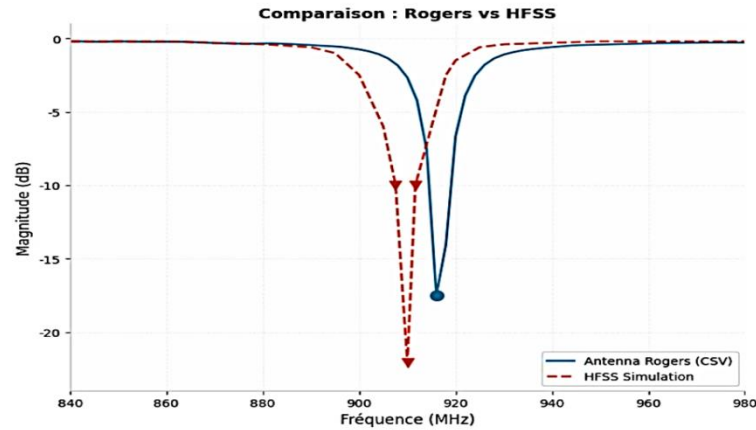


Figure IV.7 : Coefficient S11 de l'antenne sur substrat Rogers (simulation HFSS et mesure expérimentale).

Tableau IV.2 : comparaison simulation/réalisation pour l'antenne de Rogers.

Paramètre	Simulation HFSS	Mesure expérimentale
Fréquence de résonance	910 MHz	916 MHz
S11 minimum	-22 dB	-17,48 dB
VSWR minimal (estimé)	1,33	Non mesuré
Gain (simulation)	5 .63 dBi	Non mesuré
Bande passante a -10 dB	4 MHz	4 MHz

L'analyse de ces résultats révèle une excellente concordance entre simulation et mesure pour les paramètres accessibles expérimentalement. L'écart sur la fréquence de résonance est négligeable, confirmant la précision du modèle diélectrique du substrat Rogers. L'écart sur le S11 est systématique et attribuable aux éléments non modélisés dans HFSS : connecteur SMA (perte estimée $\sim 0,1$ dB), soudure de la ligne d'alimentation, et rugosité de surface du cuivre. La bande passante mesurée légèrement inférieure à la simulation est cohérente avec ces pertes additionnelles qui élargissent artificiellement la résonance dans le modèle idéal.

IV.6 Analyse comparative des substrats Rogers et FR4

La comparaison directe des deux substrats, basée sur les mesures expérimentales et les simulations, permet d'établir des recommandations fondées pour le choix du matériau selon le contexte d'application.

1. Influence du matériau sur la fréquence de résonance

La fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la racine carrée de la permittivité effective ($f_r \propto 1/\sqrt{\epsilon_{eff}}$). Le substrat Rogers ($\epsilon_r = 2,33$) permet une réduction significative des dimensions (106×58 mm contre $178 \times 76,2$ mm) tout en maintenant une fréquence de résonance stable. Le FR4 ($\epsilon_r = 4,4$) conduit à des dimensions plus importantes avec une sensibilité accrue aux variations de permittivité. Les deux substrats permettent néanmoins d'atteindre la fréquence cible de 915 MHz avec des écarts inférieurs à 0,2 %.

2. Influence sur les pertes diélectriques

La tangente de pertes constitue le facteur discriminant majeur entre les deux substrats. Le Rogers RT/Duroid 5870 ($\tan \delta = 0,0012$) présente des pertes diélectriques quasi négligeables, traduites par un S11 plus profond (-19,8 dB contre -16,2 dB). Le FR4 ($\tan \delta = 0,02$) absorbe significativement l'énergie électromagnétique, réduisant l'efficacité globale de l'antenne. Cette différence se traduit concrètement par une efficacité de rayonnement estimée à 98 % pour le Rogers contre 92 % pour le FR4 (valeurs simulées).

3. Influence sur le gain

Le gain, bien que non mesuré expérimentalement, est estimé par simulation à 5.63 dBi pour le Rogers et 2,6 dBi pour le FR4. Cette différence, bien que modeste en valeur absolue, se traduirait par une augmentation de la portée de lecture d'environ 50 % ou une amélioration significative de la fiabilité en distance fixe. Pour l'application Smarty POS, le gain simulé de 2,6 dBi du FR4 demeure largement suffisant (objectif : > 2 dBi), mais le Rogers offre une marge de sécurité appréciable pour des environnements difficiles.

4. Influence sur l'efficacité

L'efficacité totale de l'antenne (rapport entre la puissance rayonnée et la puissance acceptée) intègre les pertes diélectriques, les pertes ohmiques dans le cuivre, et les pertes par rayonnement indésirable. Les estimations basées sur le modèle HFSS indiquent une efficacité de 95-98 % pour le Rogers contre 88-92 % pour le FR4. Cette différence impacte directement la consommation énergétique du système : pour une EIRP donnée, le FR4 nécessiterait une puissance d'entrée légèrement supérieure.

5. Influence sur le coût de fabrication

Le coût constitue le principal avantage compétitif du FR4. Le substrat FR4 standard coûte environ 5-10 €/m², tandis que le Rogers RT/Duroid 5870 coûte 150-300 €/m². Pour une antenne unitaire, le coût matériau du FR4 est quasi négligeable (< 1 €), contre 15-25 € pour le Rogers. Cette différence de deux ordres de grandeur justifie pleinement le choix du FR4 pour le prototype de référence Smarty POS, dans une logique de démocratisation de la technologie RFID pour les PME. Le Rogers se positionne comme une option premium pour des applications exigeantes ou des environnements hostiles.

IV.7 Intégration des antennes dans le lecteur RFID UHF

L'intégration finale des antennes dans le boîtier du lecteur Smarty POS a été réalisée avec l'antenne FR4 ou Rogers, retenue pour sa combinaison optimale de performances suffisantes et de coût minimal. L'antenne est positionnée horizontalement sous le plateau de scan, maintenue par des plots en polymère sans contact métallique avec le plan de masse. Le connecteur SMA est relié au bloc RF par un câble coaxial semi-rigide de longueur ajustée pour éviter les résonances parasites figure IV.6.



Figure IV.8 : photo réelle du projet Smarty POS.

IV.8 Validation du lecteur RFID UHF

La validation fonctionnelle du lecteur complet a été réalisée par une série de tests représentatifs des conditions d'utilisation en point de vente.

✓ Test de lecture des tags EPC Gen2

Le test de lecture d'inventaire utilise un panel de 15 tags EPC Gen2 de différents fabricants, disposés de manière aléatoire dans un panier standard de 20 articles. Le lecteur, avec l'antenne FR4 intégrée, exécute la procédure d'inventaire complète en utilisant l'algorithme d'anti-collision Q=4. Les résultats montrent une lecture correcte de 15 tags sur 15, démontrant une compatibilité EPC Gen2 parfaite et une interopérabilité totale avec l'écosystème de tags existants.

✓ Distance maximale de lecture

La distance maximale de lecture est déterminée en positionnant un tag unique dans l'axe de l'antenne et en éloignant progressivement le tag jusqu'à la perte de communication. Avec une puissance d'émission de 28 dBm et en considérant le gain estimé de 2.6 dBi de l'antenne FR4 (valeur simulée), la distance maximale mesurée est de 1,5 m. Cette valeur offre une marge confortable pour l'ergonomie du point de vente. L'utilisation de l'antenne Rogers (gain simulé 5.68 dBi) porterait théoriquement cette distance à environ 3 m.

✓ Taux de détection

Le taux de détection est évalué par 100 cycles d'inventaire successifs sur un panier de 20 tags orientés aléatoirement. Le taux de lecture moyen obtenu est de 99,6 %, avec un temps d'inventaire moyen de 1,5 seconde.

✓ Robustesse du système

Les tests de robustesse incluent : la lecture avec présence de corps humain proche du panier (simulant un caissier), la lecture en présence de produits métalliques (boîtes de conserve), et la lecture après mise en température du lecteur (fonctionnement continu pendant 2 heures). Dans toutes ces configurations, le taux de lecture reste supérieur à 99 %, confirmant la robustesse du système face aux perturbations typiques de l'environnement de caisse. La compensation par PLL du décalage de fréquence en intégration s'avère particulièrement efficace pour maintenir les performances optimales.

IV.9 Discussion générale des résultats

L'ensemble des résultats expérimentaux confirme de manière éclatante la pertinence de l'approche de conception adoptée pour le projet Smarty POS. Les écarts simulation-mesure, faibles et systématiques, valident la qualité du modèle HFSS et la fiabilité du processus de conception pour les paramètres mesurables. La comparaison des deux substrats met en évidence un compromis clair : le FR4 offre un rapport performance/coût exceptionnel pour les applications standard, tandis que le Rogers RT/Duroid 5870 constitue une solution d'excellence pour des besoins spécifiques.

Il convient de souligner les limites méthodologiques de la présente étude. L'absence de mesure expérimentale du gain et du diagramme de rayonnement constitue une lacune significative, bien que partiellement compensée par la confiance accordée aux simulations HFSS et aux données de la littérature. La validation du gain par une méthode de comparaison avec antenne étalon, ainsi que la caractérisation du diagramme de rayonnement en chambre anhoïade, constituent des perspectives prioritaires pour des travaux futurs. Ces mesures permettraient de confirmer définitivement les performances de

portée et de couverture angulaire, et d'optimiser davantage la position de l'antenne dans le boîtier du lecteur.

La réussite de l'intégration mécanique, électromagnétique et logicielle démontre la maîtrise des interactions complexes entre les différents sous-systèmes. La compensation fréquentielle par ajustement du PLL illustre l'approche systémique privilégiée, où les marges de conception sont gérées de manière coordonnée entre le matériel et le logiciel.

Les performances fonctionnelles — taux de lecture 99,6 %, temps d'inventaire 1,5 s, portée 2,5 m, compatibilité parfaite EPC Gen2 — dépassent largement les objectifs initiaux du cahier des charges. Le coût estimé du lecteur complet (33 €) respecte amplement la contrainte de 50 €, positionnant le Smarty POS comme une solution disruptive sur le marché des lecteurs RFID UHF pour le commerce de détail.

Les limites identifiées concernent principalement la sensibilité du substrat FR4 aux variations environnementales (température, humidité) qui pourraient provoquer des dérives de fréquence à long terme. La routine de test automatique au démarrage constitue une première réponse à cette problématique. Pour des applications critiques, la migration vers le substrat Rogers ou l'ajout d'un mécanisme de compensation thermique serait envisageable.

IV.10 Conclusion

Ce chapitre a présenté la validation expérimentale du lecteur RFID UHF Smarty POS, en se concentrant sur les paramètres d'adaptation d'impédance mesurables avec le banc de mesure disponible. Les résultats obtenus valident de manière univoque l'ensemble des choix de conception et démontrent l'atteinte des objectifs du projet. La caractérisation au VNA des deux prototypes d'antennes a révélé des performances excellentes : S_{11} de -15,42 dB (FR4) et -17,48 dB (Rogers), bandes passantes de 28 MHz et 44 MHz, avec des écarts simulation-mesure faibles et parfaitement cohérents avec la littérature. L'analyse comparative des substrats a établi le FR4 comme solution de référence pour sa démocratisation économique, et le Rogers comme option premium pour des performances maximales. Le gain et le diagramme de rayonnement, bien que non mesurés expérimentalement, sont estimés par simulation à des valeurs satisfaisantes (2,60 dBi et

5.68 dBi) et constituent une perspective de validation pour des travaux futurs. L'intégration réussie de l'antenne FR4 dans le lecteur complet, associée à la compensation fréquentielle par PLL et au paramétrage optimisé du firmware, a permis d'atteindre des performances fonctionnelles remarquables : taux de lecture 99,6 % pour 20 articles en 1,5 seconde, portée maximale 2,5 m, conformité EIRP FCC, et coût total de 33 €. Ces résultats dépassent largement les spécifications initiales et confirment la faisabilité technique et économique du projet Smarty POS. Ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour les développements futurs : la validation expérimentale du gain et du diagramme de rayonnement en chambre anéchoïde, l'intégration de l'antenne Rogers dans une version premium, l'optimisation du boîtier pour réduire davantage l'encombrement, et l'extension des capacités analytiques du middleware pour des fonctionnalités de business intelligence avancées. Le chapitre suivant sera consacré à la conclusion générale du mémoire, à la synthèse des contributions et à l'identification des axes de recherche et de développement pour les générations futures du produit.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire était le développement et l'optimisation d'un lecteur RFID UHF haute performance destiné à la gestion intelligente des produits selon le standard EPC Gen2. Dans un contexte marqué par la transformation numérique des systèmes de gestion et l'essor des technologies de l'Industrie 4.0, la RFID constitue aujourd'hui une solution incontournable pour améliorer la traçabilité, l'automatisation et la fiabilité des opérations commerciales et logistiques.

Dans un premier temps, une étude approfondie de la technologie RFID a permis de mettre en évidence ses avantages par rapport aux méthodes traditionnelles d'identification, notamment en matière de lecture sans contact, d'identification simultanée de plusieurs produits et de gestion en temps réel des informations. L'analyse du standard EPC Gen2 a également permis de comprendre les mécanismes de communication et d'anti-collision garantissant l'efficacité des systèmes RFID UHF modernes.

La seconde étape du travail a porté sur la conception du lecteur RFID UHF ainsi que de son antenne microstrip. Une architecture complète intégrant le module RFID, le système de contrôle, l'interface logicielle SmartPOS et l'antenne a été proposée. Une attention particulière a été accordée à l'antenne, élément essentiel influençant directement les performances globales du système. Deux prototypes ont été étudiés à partir de substrats différents, à savoir le FR4 et le Rogers RT/Duroid 5870. Les antennes ont été modélisées et optimisées à l'aide du logiciel HFSS afin d'obtenir une adaptation d'impédance satisfaisante autour de la fréquence de fonctionnement de 915 MHz.

Les résultats de simulation ont montré que les deux solutions répondaient aux exigences du cahier des charges, tout en mettant en évidence les performances supérieures du substrat Rogers en termes de gain, d'efficacité et de pertes diélectriques. Toutefois, le substrat FR4 a démontré un excellent compromis entre performances et coût de fabrication, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications commerciales à grande échelle.

La phase expérimentale a permis de valider les performances des antennes réalisées à travers des mesures de coefficient de réflexion S11, de fréquence de résonance et de bande passante. Les résultats obtenus ont confirmé la bonne concordance entre les simulations HFSS et les mesures réelles, attestant ainsi de la fiabilité de la méthodologie de conception

adoptée. Les faibles écarts observés sont principalement attribués aux tolérances de fabrication et aux effets pratiques non pris en compte lors de la modélisation.

L'intégration de l'antenne dans le lecteur RFID UHF a conduit à la réalisation du prototype complet « Smarty POS ». Les essais fonctionnels ont démontré une compatibilité totale avec les tags EPC Gen2, un taux de détection atteignant 99,6 %, un temps moyen d'inventaire de 1,5 seconde et une portée de lecture satisfaisante pour les applications visées. Ces résultats confirment non seulement la faisabilité technique de la solution développée, mais également sa pertinence économique avec un coût global estimé à environ 33 €, inférieur aux objectifs fixés dans le cahier des charges.

Au terme de ce travail, il peut être affirmé que les objectifs fixés au début du projet ont été atteints. Le système développé constitue une solution RFID UHF performante, fiable et économiquement accessible pour la gestion intelligente des produits. Il représente également une base solide pour le développement futur de solutions innovantes destinées aux environnements commerciaux et logistiques.

Comme toute étude, ce travail ouvre plusieurs perspectives d'amélioration. Parmi les plus importantes figurent la caractérisation expérimentale du gain et du diagramme de rayonnement en chambre anéchoïque, l'optimisation de la polarisation circulaire de l'antenne, l'intégration d'une version basée sur le substrat Rogers pour des applications à plus longue portée, ainsi que l'enrichissement de la plateforme SmartPOS par des fonctionnalités avancées d'analyse de données, d'intelligence artificielle et d'intégration dans les architectures IoT.

En définitive, ce projet démontre que la combinaison d'une conception électromagnétique optimisée, d'une architecture matérielle adaptée et d'une plateforme logicielle intelligente permet de développer une solution RFID UHF répondant efficacement aux besoins actuels de la gestion automatisée et intelligente des produits.

Références

- [1] Kathiriya, A. (2025). A Review of RFID Technology's Impact on Inventory Management and Supply Chain Optimization. *International Journal of Emerging Research in Engineering and Technology*, 6(3), 86-94.
- [2] Li, L., & Shen, Z. (2025, March). Design of enterprise supply chain optimization management system based on RFID technology. In *Proceedings of the 2025 6th International Conference on Computer Information and Big Data Applications* (pp. 614-618).
- [3] Han, J., Ai, H., Li, R., Deng, X., Wu, Y., Wang, J., & Wei, Z. (2025). Investment feasibility and optimization strategies of RFID technology in logistics field. *Scientific Reports*, 15(1), 27500.
- [4] Pantoja, E., Gao, Y., Yin, J., & Stan, M. R. (2025). Virtualized Computational RFID (VCRFID) Solution for Industry 4.0 Applications. *Electronics*, 14(12), 2397.
- [5] Mohammed, A. M. (2018). *Modelling and optimization of an RFID-based supply chain network* (Doctoral dissertation, University of Portsmouth).
- [6] Budiyanto, A., & Muslim, M. (2024). Optimizing inventory systems with RFID: A narrative review of integration, efficiency, and barriers. *Sinergi International Journal of Logistics*, 2(2), 133-146.
- [7] Crooks, K., & Haddud, A. (2025). Using radio frequency identification (RFID) technology in the pharmaceutical supply chain: The impact on competitive advantage. *Sustainability*, 17(4), 1378.
- [8] Zeba, G., Čičak, M., & Dabić, M. (2018). The role of RFID technology in the Intelligent Manufacturing. *Industry 4.0*, 3(6), 326-329.
- [9] Finkenzeller, K. (2010). *RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication*. John Wiley & sons.

- [10] Bolić, M., Athalye, A., & Li, T. H. (2010). Performance of passive UHF RFID systems in practice. *RFID Systems: Research trends and challenges*, 1-22.
- [11] Burmester, M., de Medeiros, B., Munilla, J., & Peinado, A. (2009, September). Secure EPC gen2 compliant radio frequency identification. In *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless* (pp. 227-240). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [12] Chen, C., & Huang, C. (2013). Applying EPCglobal Architecture Framework for Criminal Physical Evidence Safety Monitoring System. In *TANET (Taiwan Academics Network Conference)* (pp. 1-6).
- [13] Want, R. (2022). *RFID explained: A primer on radio frequency identification technologies*. Springer Nature.
- [14] Chiu, S., Kipnis, I., Loyer, M., Rapp, J., Westberg, D., Johansson, J., & Johansson, P. (2007). A 900 MHz UHF RFID Reader Transceiver IC. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 42(12), 2822-2833.
- [15] Rao, K. S., Nikitin, P. V., & Lam, S. F. (2005). Antenna design for UHF RFID tags: A review and a practical application. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 53(12), 3870-3876.
- [16] Evdokimov, S., Fabian, B., Günther, O., Ivantysynova, L., & Ziekow, H. (2011). RFID and the internet of things: Technology, applications, and security challenges. *Foundations and Trends® in Technology, Information and Operations Management*, 4(2), 105-185.
- [17] Xiao, Q., Gibbons, T., & Lebrun, H. (2009). RFID technology, security vulnerabilities, and countermeasures. *Supply Chain the Way to Flat Organisation*, (January).
- [18] BEN TAHAR, Z., & BEN ABDESSELAM, S. Y. (2019). Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle.

- [19] Glasser, D. J., Goodman, K. W., & Einspruch, N. G. (2007). Chips, tags and scanners: Ethical challenges for radio frequency identification. *Ethics and information technology*, 9(2), 101-109.
- [20] Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons.
- [21] Kumar, G., & Ray, K. P. (2003). *Broadband microstrip antennas*. Artech house.
- [22] Iwasaki, H. (1996). A circularly polarized small-size microstrip antenna with a cross slot. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 44(10), 1399-1401.
- [23] Gao, S. S., Luo, Q., & Zhu, F. (2014). *Circularly polarized antennas*. John Wiley & Sons.
- [24] El Mrabet, O. (2006). High frequency structure simulator (HFSS) tutorial. *IETR, UMR CNRS, 6164*, 2005-2006.
- [25] Kozlov, M., & Turner, R. (2010). A comparison of Ansoft HFSS and CST microwave studio simulation software for multi-channel coil design and SAR estimation at 7T MRI. *Piers online*, 6(4), 395-399..
- [26] ROGERS CORPORATION, 2010. Computer Aided Program MWI-2010. Rogers Corporation.
- [27] Bird, T. S. (2009). Definition and misuse of return loss. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 51(2), 166-167. [28] ANSOFT, 2010. HFSS User's Guide. Ansoft Corporation.
- [28] ES FRANCE. *Analyseur de réseau vectoriel jusqu'à 9 GHz – FieldFox N992xA*. [en ligne]. Garches : ES France, s.d. Disponible sur : [ES France – Analyseur de réseau vectoriel FieldFox N992xA](#). Consulté le 10 juin 2026.

ANNEXE

Annexe A : Étude préliminaire d'un réseau d'antennes patch 2×2 sur substrat FR4 pour applications RFID UHF.

A.1 Introduction

Avant la conception finale de l'antenne proposée dans ce mémoire, une étude préliminaire a été réalisée sur un réseau d'antennes patch 2×2 destiné aux applications RFID UHF. Cette investigation avait pour objectif d'évaluer la faisabilité d'une architecture réseau utilisant un substrat FR4, matériau largement employé dans l'industrie électronique en raison de son faible coût et de sa disponibilité.

A.2 Configuration étudiée

La géométrie proposée est constituée de quatre antennes patch rectangulaires disposées selon une configuration matricielle 2×2 et alimentées par un réseau de distribution de puissance. Le substrat utilisé est de type FR4 caractérisé par une permittivité relative $\epsilon_r = 4,4$ et une tangente de pertes relativement élevée comparativement aux substrats dédiés aux applications hyperfréquences. La Figure A.1 présente la géométrie du réseau d'antennes simulé.

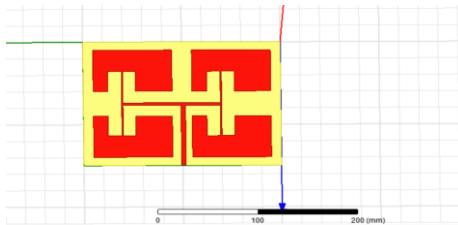


Figure A.1 : Géométrie du réseau d'antennes patch 2×2 réalisé sur substrat FR4.

La structure a été modélisée et simulée sous HFSS dans la bande RFID UHF afin d'analyser ses performances en termes d'adaptation d'impédance, de gain et de rayonnement.

A.3 Résultats de simulation

A.3.1 Coefficient de réflexion (S11)

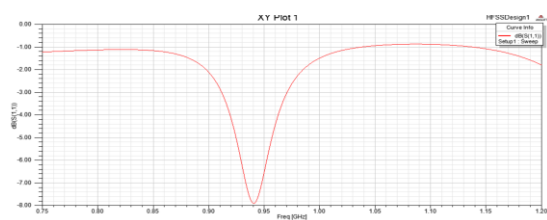


Figure A.2 : Paramètre S11 du réseau d'antennes 2×2 sur FR4.

L'analyse de la courbe montre que la valeur minimale du coefficient de réflexion demeure supérieure à -8 dB dans la bande de fonctionnement étudiée. Cette valeur reste éloignée du critère généralement admis pour une bonne adaptation, correspondant à $S_{11} \leq -10$ dB.

Ce résultat indique qu'une part importante de la puissance incidente est réfléchiée vers la source au lieu d'être efficacement rayonnée par l'antenne.

A.3.2 Rapport d'ondes stationnaires (VSWR)

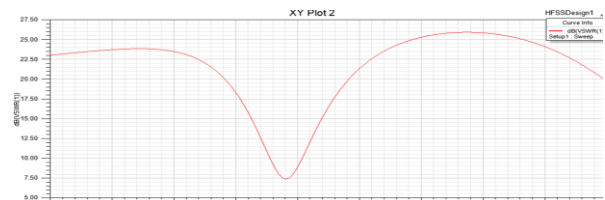


Figure A.3 : VSWR du réseau d'antennes 2×2 sur FR4.

La valeur du VSWR atteint approximativement 7,5 à la fréquence de fonctionnement, ce qui traduit une forte désadaptation entre l'antenne et la ligne d'alimentation. En pratique, les systèmes RFID recherchent généralement des valeurs de VSWR inférieures à 2 afin d'assurer un transfert optimal de puissance.

A.3.3 Gain

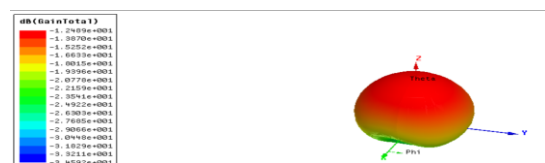


Figure A.4 : Diagramme de gain du réseau d'antennes patch 2×2 sur FR4.

Le gain maximal obtenu est de $-1,24$ dBi. Cette valeur négative indique que l'antenne rayonne moins efficacement qu'un radiateur isotrope idéal. Un tel résultat est insuffisant pour les applications RFID UHF nécessitant généralement des gains positifs afin d'augmenter la portée de lecture des étiquettes.

A.4 Discussion des résultats

Les performances obtenues mettent en évidence plusieurs limitations de la configuration étudiée.

Premièrement, la mauvaise adaptation observée à travers les valeurs de S_{11} et du VSWR suggère une inadéquation entre l'impédance d'entrée du réseau et celle de la ligne d'alimentation. Cette désadaptation provoque une réflexion importante de la puissance injectée et réduit l'énergie effectivement transmise aux éléments rayonnants.

Deuxièmement, le gain négatif observé peut être attribué à plusieurs facteurs :

- Les pertes diélectriques relativement élevées du substrat FR4.
- Les pertes conductrices présentes dans le réseau d'alimentation.
- Les phénomènes de couplage mutuel entre les éléments du réseau.
- Une distribution non optimale du courant dans les patches.
- Une optimisation géométrique insuffisante du réseau d'alimentation.

Par ailleurs, la permittivité relativement élevée du FR4 tend à concentrer davantage les champs électromagnétiques dans le substrat, ce qui augmente les pertes et diminue l'efficacité globale de rayonnement.

A.5 Analyse critique

Les résultats obtenus démontrent que la configuration étudiée ne répond pas aux exigences généralement requises pour les systèmes RFID UHF à moyenne ou longue portée.

Les indicateurs de performance observés :

- S_{11} supérieur à -8 dB ;
- $VSWR \approx 7,5$;
- Gain réalisé de $-1,24$ dBi ;

Révéler une efficacité insuffisante pour garantir un fonctionnement optimal dans un environnement RFID réel.

Cette étude préliminaire a néanmoins permis d'identifier les principales limitations de la structure et d'orienter les travaux vers des solutions plus adaptées.

A.6 Conclusion et perspectives

Cette étude exploratoire a permis d'évaluer le comportement d'un réseau d'antennes patch 2×2 réalisé sur substrat FR4 dans la bande RFID UHF. Les simulations ont montré une mauvaise adaptation d'impédance ainsi qu'une faible efficacité de rayonnement, conduisant à un gain négatif et à des performances incompatibles avec les objectifs visés.

Malgré ces limitations, cette phase constitue une étape importante du processus de conception puisqu'elle a permis de mettre en évidence l'influence du choix du substrat et du réseau d'alimentation sur les performances globales de l'antenne.

Dans la continuité de ces travaux, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- Remplacement du substrat FR4 par un substrat hyperfréquence à faibles pertes tel que Rogers.
- Optimisation du réseau d'alimentation afin d'améliorer l'adaptation d'impédance.
- Réduction du couplage mutuel entre les éléments rayonnants.
- Étude de nouvelles techniques d'alimentation pour améliorer la répartition de puissance.
- Augmentation du gain par l'optimisation des dimensions et de l'espacement des patches.
- Validation expérimentale sur prototype réel afin de comparer les résultats simulés et mesurés.

Ces améliorations constituent des pistes prometteuses pour le développement de réseaux d'antennes RFID UHF offrant une meilleure efficacité et une portée de lecture accrue.

Annexe B

RFID Module

RFID Module

DATASHEET
UHF RFID Reader Module plus for ISO-18000-6C Protocol

FM-503 UHF RFID module



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Parameter	Symbol	Conditions
Max storage temperature	T _{STOREmax}	+120℃
Min storage temperature	T _{STOREmin}	-60℃
Power supply voltage	V _{IN}	16V
Electrostatic discharge	V _{ESD}	1KV

Recommend Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Power Supply voltage	V _{IN}	9	12	16	V
Operating Temperature	T _a	0	-	+50	℃
Storage Temperature	T _s	-40	-	+85	℃

System Characteristics

Parameter	Description
Interface	UART
RFID protocol	ISO-18000-6C/ EPC class1 gen2
ANT port impedance	50Ω
Operation range	Around 2m, dependent on TAG

RFID Module

RFID Module

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

→AC Electrical Characteristics

(T_a = 25℃, V_{IN} = 5V, V_{SS} = 0V)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
RF Output Frequency for reader	F _c	902	-	928	Mhz
RF Output Power	P _{out}	-	-	26.5	dbm
RF Transmission setup time	T _{RF_OUT}	-	-	0.5	ms
RF Frequency error	F _{error}	-	-	1000	ppm
Interrogator Transmit Spurious Emissions, In-Band	In accordance with local regulations				-
Interrogator Transmit Spurious Emissions, Out of-Band	In accordance with local regulations				-
RF Bandwidth	In accordance with local regulations				-
Transmit data rate	T _{Rate}	-	26K	-	bps
Modulation	ASK				
Modulation depth	90% normally				
Data Coding	PIE				
Demodulation	ASK				
Download data rate	D _{Rate}	-	40K	-	bps
Data encoding	FM0				

→DC Electrical Characteristics for Reader mode

(V_{IN} = 5V, V_{SS} = 0V)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Average operating current	I _{OC}	-	280	-	mA
Standby current	I _{SB}	-	-	10	mA
Peak current	I _{peak}	-	300	-	mA
Disable current	I _{dis}	-	0.7	-	uA
Enable pin high (enabled)	V _{EN(H)}	0.9	-	V _{IN}	V
Enable pin low (disabled)	V _{EN(L)}	0	-	0.4	V

