HAL
open science

Conception d'une solution RFID UHF pour l'optimisation de la logistique de bouteilles métalliques

Ahcine Safraou

To cite this version:

Ahcine Safraou. Conception d'une solution RFID UHF pour l'optimisation de la logistique de bouteilles métalliques. Electronique. Sorbonne Université, 2018. Français. NNT : 2018SORUS043 . tel-02134115

HAL Id: tel-02134115

https://theses.hal.science/tel-02134115v1

Submitted on 20 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE
SORBONNE UNIVERSITÉ

Spécialité

Informatique, Télécommunications et Électronique

École doctorale EDITE de Paris

Présentée par

Ahcine SAFRAOU

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de SORBONNE UNIVERSITÉ

Sujet de la thèse :

Conception d'une solution RFID UHF pour l'optimisation de la logistique de bouteilles métalliques

soutenue le 4 avril 2018

devant le jury composé de :

Mme. Valérie VIGNERAS	Rapporteure
M. Yvan DUROC	Rapporteur
Mme. Marjorie GRZESKOWIAK	Examinatrice
M. Jean GAUBERT	Examinateur
M. Bertrand GRANADO	Directeur de thèse
Mme. Emmanuelle BOURDEL	Co-Directrice de thèse
M. Stephane DUDRET	Encadrant

Table des matières

Acronymes et notations **xiii**

Introduction générale **1**

1 Présentation de la RFID UHF et de l'effet de l'environnement sur son fonctionnement **7**

1.1 Introduction 9

1.2 Transformation numérique de la logistique et de la gestion des stocks de bouteilles de gaz 10

1.2.1 Le POC de Denain 2013 10

1.2.2 Les deux méthodes d'identification à partir d'une solution de traçabilité RFID UHF 11

1.2.2.1 Méthode de lecture unitaire : lecteur RFID UHF portable 11

1.2.2.2 Méthode de lecture volumétrique : le portique RFID UHF appliqué au suivi des bouteilles de gaz 12

1.3 Présentation de la technologie RFID UHF 14

1.3.1 Généralités et définitions de base de la RFID 15

1.3.1.1 RFID dans le domaine UHF 18

1.3.2 La communication lecteur ↔ tag 20

1.3.3 Le tag RFID UHF 22

1.3.3.1 Fonctionnement du tag 22

1.3.4 Le lecteur RFID UHF 23

1.4 Effet de l'environnement sur une communication RF 27

1.4.1 Définitions des principaux phénomènes physiques au niveau d'obstacles et d'interfaces 28
1.4.2 Définitions des principaux phénomènes physiques influant sur la qualité de la communication en espace libre 30
1.5 Mise en évidence des perturbations dues à la présence du métal sur le fonctionnement de l'antenne 32
1.6 État de l'art des solutions RFID UHF pour objets conducteurs 35
1.6.1 Influence du substrat sur le fonctionnement de l'antenne dipôle 36
1.6.2 Emploi de matériaux EBG au niveau du substrat 36
1.6.3 Utilisation d'un plan de masse 38
1.6.4 Autres points d'amélioration possibles 39
1.7 Conclusion 40

2 Etude du protocole de communication de la RFID UHF : EPC class 1 Generation 2 43
2.1 Introduction 44
2.2 Mécanismes généraux d'EPC Gen2 44
2.2.1 Les couches physique et liaison de données 44
2.2.2 Commandes, espaces mémoires et états du tag 48
2.2.3 Paramétrage et performances 51
2.2.4 Vérification de l'intégrité du message 52
2.2.5 Les différents types de collisions 53
2.3 Algorithmes anti-collision 54
2.3.1 Algorithme d'identification à l'aide de la méthode de parcours arborescent 56
2.3.2 Protocole ALOHA 57
2.3.2.1 Pure Aloha 57
2.3.2.2 Slotted Aloha 57
2.3.2.3 Framed slotted Aloha (FSA) 58
2.4 L'anti-collision d'EPC Gen.2 : Q-algorithm 61
2.5 Validation du recours au portique RFID UHF pour le traçage des bouteilles métalliques 64
2.5.1 Tests sur panier homogène 65
2.5.2 Tests sur panier hétérogène 67
2.6 Conclusion 70

3 Conception et caractérisation de tags RFID UHF pour objets métalliques 73

3.1 Introduction 75

3.2 Choix de conception pour la réalisation des premiers prototypes . . . 76

3.2.1 Sélection du substrat en fonction des spécificités de notre cas d'application 76

3.2.2 Choix de la puce RFID UHF et détermination de son impédance d'entrée 78

3.2.3 Choix du type d'antenne 80

3.3 Étapes de conception d'un premier prototype de tag RFID UHF utilisant une antenne dipôle 81

3.3.1 Design de l'antenne dipôle 81

3.3.2 Réalisation du tag 82

3.4 Résultats de simulation de l'antenne dipôle du premier prototype . . 83

3.5 Résultats de mesure du premier prototype de tag 84

3.5.1 Présentation du premier banc de mesure pour la caractérisation de fonctionnement de tags RFID UHF : le Tagformance Hand Carry Kit 85

3.5.2 Distance d'activation du tag RFID UHF 86

3.6 Technique de mesure de la permittivité du substrat dans le domaine UHF 88

3.6.1 Étape expérimentale 88

3.6.2 Étape de simulation 89

3.7 Réalisation et résultats de simulation du second prototype d'antenne 91

3.8 Mesures de performances du second prototype de tag 94

3.8.1 Distance d'activation du tag 94

3.8.2 Diagramme de rayonnement 95

3.8.3 Autres paramètres de fonctionnement du tag mesurés à partir du Tagformance Hand Carry Kit 96

3.8.4 Discussions des résultats 100

3.9 Intégration de la solution RFID UHF dans les nouvelles générations de bouteilles 100

3.9.1 Conception du tag intégré et de son antenne fente 100

3.9.2 Simulation de l'antenne fente incurvée 102

3.10 Conclusion 104

4 Réalisation d'un circuit de récupération d'énergie RFID UHF pour capteur connecté 105
4.1 Introduction 107
4.2 Système de récupération d'énergie en RFID UHF 108
4.2.1 Principe de fonctionnement général de la récupération d'énergie RF 108
4.2.2 État de l'art des circuits de récupération d'énergie RFID UHF 110
4.3 Architecture globale du tag RFID UHF augmenté conçu 112
4.3.1 Le circuit de mesure et de communication 113
4.3.1.1 La puce RFID UHF 115
4.3.1.2 Le microcontrôleur basse consommation 116
4.3.2 Le circuit de récupération d'énergie 116
4.3.2.1 Cellules de stockage de l'énergie collectée 117
4.3.3 Superviseurs 118
4.4 Étude et optimisation du circuit de récupération d'énergie 120
4.4.1 Présentation et caractérisation du DC-DC Boost converter . . 120
4.4.2 L'étage multiplieur et son circuit d'adaptation d'impédance . . 122
4.4.2.1 Choix de configuration et sélection des valeurs de composants par simulation 123
4.4.2.2 Adaptation d'impédance 126
4.4.2.3 Synthèse de la configuration sélectionnée 127
4.5 Performances du circuit prototype de récupération d'énergie 127
4.5.1 Caractérisation par mesure expérimentale du multiplieur et du réseau d'adaptation d'impédance 128
4.5.2 Étude de performances de l'ensemble du circuit 131
4.5.2.1 Résultats de mesure du circuit prototype 131
4.5.2.2 Comparaison des performances de notre circuit à l'état de l'art 132
4.6 Conclusion 132

Conclusion générale et perspectives 135

Annexes 139

Publications 159

Table des figures

1.1 Tag du commerce fixé sur une bouteille de gaz 11
1.2 Opération de lecture de l'identifiant code-barres d'une bouteille effectuée par un opérateur 12
1.3 Opération de remplissage d'un panier de bouteille réalisée par un opérateur 12
1.4 Passage d'un camion chargé sous un portique RFID UHF 13
1.5 Représentation des différents volumes de bouteilles de gaz 14
1.6 Mise en évidence de la problématique de l'hétérogénéité des paniers de bouteilles chargés sur un camion en (a) et transportés par un chariot élévateur en (b) 14
1.7 Communication entre un lecteur et un tag RFID UHF 15
1.8 Présentation des différents domaines de la RFID 16
1.9 Représentation des 3 zones de propagation électromagnétique en fonction de la distance par rapport à l'émetteur 20
1.10 Schéma de principe 21
1.11 Tag RFID UHF et son schéma bloc 22
1.12 Schéma de principe de la rétro-modulation par modulation de charge 24
1.13 Lecteur RFID UHF et son schéma bloc 25
1.14 Synoptique des configuration bi-statique en (a) et mono-statique en (b) 25
1.15 Exemple d'une chaine d'émission d'un lecteur RFID UHF 26
1.16 Exemple d'une chaine de réception d'un lecteur RFID UHF 27
1.17 Masque fréquentiel respectant les régulations imposées en puissance et en fréquence 27
1.18 Représentation du phénomène de diffraction d'une OEM 28
1.19 Représentation du phénomène de réfraction d'une OEM 29

1.20 Représentation du phénomène d'absorption d'une OEM 29
1.21 Représentation du phénomène de réflexion d'une OEM 30
1.22 Interférence constructive 31
1.23 Interférence destructive 32
1.24 Environnements industriels métalliques 33
1.25 Densité de courant surfacique (en $A.m^{-1}$) au niveau de l'antenne et du plan métallique à 1,5 mm en dessous pour (a) une antenne dipôle à adaptation de type T-match et (b) une antenne dipôle quart d'onde 34
1.26 Mise en évidence de l'effet parasite d'un plan conducteur présent dans l'environnement proche d'une antenne sur ses performances 35
1.27 Variation de l'impédance de l'antenne en fonction de la permittivité du substrat [KA09] 37
1.28 Variation de l'impédance de l'antenne en fonction de l'épaisseur du substrat [KA09] 38
1.29 Effet de la permittivité du substrat sur la fréquence de travail de l'antenne [KA09] 39
1.30 Effet de l'épaisseur du substrat sur la fréquence de travail de l'antenne [KA09] 40
1.31 Représentation d'un méta-matériau de type EBG à deux niveaux. (a) vue de coupe, (b) vue du dessus 40
1.32 Schéma simplifié d'une bouteille de gaz avec emplacement du tag RFID UHF au niveau du col 41

2.1 Enveloppe RF de la modulation ASK en (a) et PR-ASK en (b) utilisées dans une communication L $\rightarrow$ T 45
2.2 (a) Modulation DSB-ASK ou SSB-ASK et (b) PR-ASK dans le temps 45
2.3 Principe de fonctionnement du codage *PIE* 46
2.4 Principe de fonctionnement du codage FM0 : en (a) la fonction et en (b) le diagramme d'état 46
2.5 Principe de fonctionnement du codage Miller : en (a) la fonction et en (b) le diagramme d'état 47
2.6 (a) trame préambule et (b) trame de synchronisation 48
2.7 Organisation de la mémoire du tag RFID UHF 49
2.8 Représentation des différentes commandes du lecteur et des états possibles du tag 50

2.9 Perturbation du lecteur 1 par le lecteur 2 en raison de la présence du premier dans la zone d'interférence du second 53
2.10 Perturbations mutuelles de deux lecteurs opérant sur une même population de tags 54
2.11 Interférence au niveau du lecteur de deux réponses provenant de deux tags différents 55
2.12 Exemple d'inventaire utilisant le principe de parcours arborescent des identifiant : le Query Tree Protocol 56
2.13 Exemple d'une session d'inventaire utilisant l'algorithme anti-collision FSA 58
2.14 Diagramme d'état de l'ajustement de la valeur Q du compteur de fenêtres 62
2.15 Présentation du portique RFID UHF à deux antennes avec les principales dimensions 65
2.16 Représentation de la disposition des bouteilles B50 équipées chacune d'un tag orienté aléatoirement dans le panier homogène 66
2.17 Représentation de la disposition des bouteilles B50 équipées chacune de 2 tags dans le panier homogène 67
2.18 Représentation de la disposition des bouteilles et des tags dans le panier hétérogène 68
2.19 Panier chargé de 8 bouteilles B50 avec chacune 2 tags, 6 bouteilles B20 équipées d'un seul tag chacunes et deux grillages métalliques, un au dessus et un second devant les B20 69

3.1 Echelle de la dureté de Shore A pour différents types de polymères dis mous 78
3.2 Les différentes couches constitutives de notre tag RFID UHF 78
3.3 Circuit équivalent de la puce Ucode 7m dans un boitier SOT886 . . . 80
3.4 Résultat de simulation de l'impédance du circuit équivalent de la puce Ucode 7m dans un boitier SOT 886 avec $Z_0 = 50\ \Omega$ 81
3.5 Boucle d'induction pour l'adaptation en impédance de l'antenne du premier prototype 82
3.6 Premier prototype de tag RFID UHF souple 83
3.7 Coefficient de réflexion en amplitude (a) et adaptation d'impédance de l'antenne à la puce Ucode 7m en (b) du premier prototype de tag . 84

3.8 Caractéristisation du rayonnement du second prototype avec : (a) diagramme de rayonnement et (b) intensité de rayonnement sur le plan E, (c) diagramme de rayonnement et (d) intensité de rayonnement sur le plan H 85
3.9 Puissance rayonnée de l'antenne du premier prototype 86
3.10 Banc expérimental Hand Carry Kit servant à la caractérisation des performances du tag 86
3.11 Distance d'activation de notre premier prototype de tag RFID UHF . 87
3.12 Résonateur série à vide en (a) et chargé par la résine de polyuréthane UR5044 en (b) 89
3.13 Résonateur parallèle à vide en (a) et chargé par la résine de polyuréthane UR5044 en (b) 89
3.14 Mise en évidence de la fréquence de résonance du premier prototype de tag avec la nouvelle valeur de permittivité mesurée 91
3.15 Antenne dipôle pour le second prototype de tag 92
3.16 Coefficient de réflexion en amplitude (a) et adaptation d'impédance de l'antenne à la puce Ucode 7m en (b) de l'antenne du second prototype de tag 92
3.17 Caractéristisation du rayonnement de l'antenne du second prototype avec : (a) Diagramme de rayonnement et (b) intensité de rayonnement sur le plan E, (c) diagramme de rayonnement et (d) intensité de rayonnement sur le plan H 93
3.18 Puissance rayonnée par l'antenne du second prototype en fonction de la fréquence 93
3.19 Second prototype de tag RFID UHF 94
3.20 Distance de lecture du tag mesurée avec et sans métal 94
3.21 Banc expérimental de mesure du diagramme de rayonnement pour tag RFID UHF 95
3.22 Diagramme de rayonnement dans le plan E du tag donnée en distance maximale d'activation (en m) 96
3.23 Schéma de principe de la détermination de la distance maximale de lecture retour T→L 97
3.24 Distance de lecture retour maximale du tag en fonction de la fréquence 98
3.25 Surface équivalente radar différentielle du tag en fonction de la fréquence 98
3.26 Diagramme de constellation de la réponse du tag reçu par le lecteur . 99
3.27 Puissance moyenne provenant du transpondeur au niveau du lecteur . 99

3.28 Vue global de la pièce supérieure de la bouteille et de l'emplacement réservé au tag RFID UHF avec en (a) une vue du dessus et en (b) une vue en perspective . . . 101
3.29 Antenne fente pour tag RFID UHF . . . 101
3.30 Coefficient de réflexion de l'antenne fente en fonction de la fréquence 102
3.31 Caractéristisation de l'antenne fente incurvée : (a) Diagramme de rayonnement et (b) intensité de rayonnement sur le plan E, (c) diagramme de rayonnement et (d) intensité de rayonnement sur le plan H . . . 103
3.32 Puissance rayonnée par l'antenne fente en fonction de la fréquence . . 103

4.1 Schéma bloc des étapes de la récupération d'énergie RF . . . 109
4.2 Synoptique des trois principales configurations de systèmes communicants à récupération d'énergie avec en (a) la configuration avec switch, en (b) celle à deux antennes et en (c) la configuration séquentielle . . 111
4.3 Schéma bloc du capteur autonome et de son circuit de récupération d'énergie . . . 113
4.4 Schéma de principe du circuit de mesure et de communication . . . 114
4.5 Schéma de principe du circuit de récupération d'énergie RFID UHF . 117
4.6 Schéma bloc du superviseur et du composant en aval dont il gère l'activation . . . 119
4.7 Hystérésis de l'état du composant controlé par le superviseur en fonction de la tension au bornes de la capacité de charge . . . 119
4.8 Diagramme d'état du fonctionnement du superviseur . . . 120
4.9 Rendement du booster en fonction de son courant de sortie . . . 121
4.10 Tension de sortie du booster V_{out-B} en fonction de son courant en entrée I_{in-B} . . . 122
4.11 Architectures de redresseur (a) redresseur simple série, (b) pont de diodes et (c) multiplieur 2 étages en configuration Greinacher-modifiée 123
4.12 Multiplieur en configuration de Greinacher modifiée et son réseau d'adaptation d'impédance LC . . . 123
4.13 Multiplieur à 2 étages en configuration de Villard . . . 124
4.14 Comparaison de la puissance en sortie du multiplieur dans le cas de capacités idéales et avec prise en compte de leurs paramètres réels . . 125
4.15 Modèle équivalent de capacité utilisé pour les simulations . . . 126
4.16 Circuit Schematic du multiplieur 4 étages . . . 126

4.17 Configuration du réseau LC en L abaisseur d'impédance retenue . . . 127
4.18 Comparaison de la tension de sortie du multiplieur avec et sans réseau LC 127
4.19 Carte prototype du circuit de récupération d'énergie 128
4.20 Schéma électrique du circuit de récupération d'énergie 129
4.21 Tension $V_{out-Mult}$ mesurée en sortie du multiplieur à vide en fonction de la fréquence du signal d'entrée, avec P_{in} = -10 dBm 129
4.22 Rendement du multiplieur mesuré en fonction de sa charge R_l en sortie, à 867 MHz et P_{in} = -10 dBm 130
4.23 Tension $V_{out-Mult}$ et puissance $P_{out-Mult}$ en sortie du multiplieur en fonction du courant $I_{out-Mult}$ pour une puissance d'entrée P_{in} = -10 dBm 130
4.24 Efficacité de conversion en puissance ECP mesurée du circuit de récupération d'énergie avec et sans superviseurs en fonction de la puissance d'entrée à 867 MHz 131
25 Repère sphérique dont l'origine est au centre de l'antenne 140
26 Circuit équivalent de l'antenne en émission 142
27 Circuit équivalent de l'antenne en réception 146

Liste des tableaux

1.1 Les différents domaines de la RFID, leurs avantages et exemples d'application . . . 17
1.2 Régulation des puissances et fréquences d'émission selon les régions . 19
1.3 Évolution de la régulation au Japon, au Royaume-Uni et en Suisse . . 19
1.4 Exemple des temps nécessaire pour différents types de transactions . 31
1.5 Largeur de la bande passante en fonction de la distance de l'antenne au plan métallique . . . 34
1.6 Comparatif des performances de tag sur objets métalliques présent dans l'état de l'art . . . 42

2.1 Longueurs de trame optimales en fonction de la population de tags obtenues à partir de la méthode d'estimation de Vogt . . . 60
2.2 Nombre de tags lus par le lecteur en fonction de la puissance d'émission des antennes . . . 66
2.3 Nombre de tags lus en fonction de la distance à l'axe du portique . . 67
2.4 Temps de lecture de l'ensemble du chargement en fonction de l'estimation initiale de la population de tags . . . 69

3.1 Comparatif des performances de tags RFID UHF flexibles pour objets métalliques . . . 77
3.2 Comparatif de matériaux flexibles pour une utilisation en tant que substrat . . . 77
3.3 Comparaison des sensibilités et espaces mémoires (EPC et utilisateur) des puces Ucode7m, Monza5 et Monza R6-P . . . 79

4.1 Comparaison des sensibilités et espaces mémoires (EPC et utilisateur) des puces Ucode I2C de NXP, Monza X2K d'Impinj et SL900A d'AMS115
4.2 Comparaison des avantages et inconvénients des super-capacités et des mini-batteries 118
4.3 Récapitulatif des choix de configuration pour le multiplieur et le réseau LC 128
4.4 Comparaison des performances de circuits de récupération d'énergie en RFID UHF 132
5 Pertes de polarisation en dB en fonction de la polarisation de l'émetteur et du récepteur 143

Acronymes et notations

ACK	*Acknowledge*
ADS	*Advanced Design System*
ASK	*Amplitude-Shift Keying*
BFSA	*Basic Framed Slotted Aloha*
BLF	*Backscatter Link Frequency*
CAN	*Convertisseur Analogique-Numérique*
CRC	*Cyclic Redundancy Check*
CNA	*Convertisseur Numérique-Analogique*
dB	*Décibel*
dBc	*Décibel relative to carrier*
dBi	*Décibel isotropic*
dBm	*Décibel-milliwatts*
DC	*Direct Current*
DFSA	*Dynamic Framed Slotted Aloha*
DSB-ASK	*Double Side Band Amplitude Shift Keying*
EBG	*Electromagnetic Band-Gap*
ECP	*Efficacité de Conversion en Puissance*
EIRP	*Effective Isotropic Radiated Power*
EM	*Électromagnétique*
EMPro	*Electromagnetic Professional Software*
EPC	*Electronic Product Code*
ERC	*European Research Council*
ERP	*Effective Radiated Power*

ETSI	*European Telecommunications Standards Institute*
FDMA	*Frequency Division Multiple Access*
FHSS	*Frequency-Hopping Spread Spectrum*
FR4	*Flame Resistant 4*
FSA	*Framed Slotted Aloha*
HF	*High Frequency*
I2C	*Inter-Integrated Circuit*
ID	*Identifier*
IOE	*Internet Of Everything*
IOT	*Internet Of Things*
ISO	*International Organization for Standardization*
IT	*Information Technology*
LBT	*Listen Before Talk*
LED	*Light-Emitting Diode*
LF	*Low Frequency*
LRC	*Longitudinal Redundancy Check*
MAC	*Medium Access Control*
OEM	*Onde Électromagnétique*
OSI	*Open Systems Interconnection*
PIE	*Pulse Interval Encoding*
PIFA	*Planar Inverted-F Antennas*
PLL	*Phase-Locked Loop*
POC	*Proof Of Concept*
PR-ASK	*Phase Reversal Amplitude Shift Keying*
PSK	*Phase Shift Keying*
PW	*Pulse Wide*
RF	*Radio Fréquence*
RFID	*Radio Frequency Identification*
RN16	*16 bits Random Number*
RTcal	*Interrogator to Tag Calibration symbol*
SGA	*Système de Gestion des Actifs*
SHF	*Super High Frequency*
SNR	*Signal to Noise Ratio*

SPI	*Serial Peripheral Interface*
SSB-ASK	*Single Side Band Amplitude Shift Keying*
TARI	*Type A Reference Interval*
TDMA	*Time Division Multiple Access*
TML	*Transmission Line Calibration*
TRcal	*Tag to Interrogator Calibration symbol*
UCN	*Unité de contrôle numérique*
UHF	*Ultra High Frequency*
VRC	*Vertical Redundancy Check*
VSWR	*Voltage Standing Wave Ratio*
WORM	*Write Once Read Many*
β	*Constante de phase*
Γ	*Coefficient de réflexion*
γ	*Constante de propagation*
δ	*Épaisseur de peau*
η	*Impédance caractéristique de l'air*
ϵ_r	*Constante diélectrique relative*
ϵ_{eff}	*Constante diélectrique effective*
λ	*Longeur d'onde*
μ	*Perméabilité*
σ	*Conductivité*

Introduction générale

Contexte général

Les grands groupes industriels, parmi lesquels Air Liquide, mettent au cœur de leurs objectifs de développement la transformation numérique. Il s'agit de répondre à une politique conjoncturelle à fort gain ajouté de dématérialisation des processus industriels. Cette évolution est considérée comme étant une révolution industrielle, la quatrième selon les analystes [Sch17] . Elle n'aura pas seulement un impact fonctionnel, celui-ci sera également structurel. De fait, sa mise en place aura un retentissement notable dans l'organisation de ce que sera l'entreprise de demain. Un des axes majeurs de la transformation numérique est l'Internet des Objets (IOT pour Internet of Things), aussi appelé IOE (Internet of Everything) afin d'illustrer cet aspect du tout connecté vers lequel nous tendons. Celui-ci permettra de connecter les actifs industriels et ainsi moderniser la gestion des stocks, la maintenance et la logistique. Dans ce domaine, la technologie RFID, acronyme anglais de Radio Frequency IDentification (Identification Radio Fréquence), semble s'être imposée comme l'une des solutions les plus adaptées. Chez Air Liquide, à la fin des années 90, début des années 2000, une première tentative de déploiement à l'échelle industrielle s'est soldée par un échec. La technologie RFID manquait de maturité, ses performances restaient assez limitées et sa valeur ajoutée trop faible. Son retour en force, ces dernières années, est principalement dû à :

— l'évolution et la miniaturisation des systèmes sur puces, présentant des performances aujourd'hui intéressantes.

— l'essor des domaines comme ceux de la science des données, de l'intelligence artificielle et du développement des interfaces homme/machine, nécessitant un écosystème que nous pourrions qualifier d'ultra connecté. Ils rendent pos-

sible une exploitation proactive à forte valeur ajoutée des informations collectées, articulées autour de trois axes : l'identité de l'actif industriel, son état et l'action à mener.

La RFID est une technologie de communication entre un lecteur et un tag (appelé également transpondeur ou étiquette RFID). Ce dernier est composé d'une puce reliée à une antenne, l'ensemble se trouvant dans une disposition spécifique au cas d'usage allant de la simple feuille de papier (insertion par jet d'encre conductrice) au badge blindé et étanche pour véhicule de chantier. Il existe plusieurs régions du spectre fréquentiel dans lequel se trouve la technologie RFID. En UHF (Ultra High Frequency), la bande de fréquence est comprise entre 860 MHz et 930 MHz, selon les régions. En Europe, elle est se situe actuellement entre 865 MHz et 868 MHz. Les avantages de la RFID UHF par rapport au code-barres sont nombreux. Parmi ceux-ci la possibilité d'effectuer une lecture volumétrique de l'ensemble des objets présents dans le champ du lecteur et la présence d'une mémoire réinscriptible permettant une évolution de l'information en fonction de l'état de l'objet tracé. Sa mémoire non figée enrichit l'interaction de l'objet avec son environnement. En plus de l'identifiant propre à chaque puce RFID, d'autres informations concernant l'objet suivi peuvent être ajoutées et modifiées en temps réel au sein de la mémoire utilisateur. C'est également une solution plus robuste que le code-barres du fait que la lecture RF, aveugle, peut se faire à travers le packaging adapté à l'environnement.

Contexte spécifique au projet doctoral

Pour Air Liquide, la transformation numérique des procédés de gestion des bouteilles de gaz a pour objectif de développer un système de contrôle de ses actifs industriels, en réduisant le délai entre la prise d'information et l'action à mener. L'agilité industrielle, la capacité à s'adapter rapidement et avec aisance au marché, est devenu une nécessité pour toute entreprise se trouvant dans un secteur extrêmement concurrentiel afin de fournir le meilleur service qui soit. La numérisation de la solution de traçabilité permettra de connecter les actifs industriels au système de gestion et de production et ainsi de créer l'écosystème IOT agile spécifique à l'entreprise.

Air Liquide Services, filiale à 100% du Groupe, a pour mission de proposer aux autres filiales du groupe des services IT dans des domaines tels que la supervision des installations de production, le suivi à distance des stocks clients, la traçabilité des conteneurs de gaz ou l'optimisation des tournées de livraison. Dans ce contexte,

Air Liquide Services a déployé la solution de traçabilité nomée « Servitrax » pour la logistique des bouteilles de gaz. Air Liquide gère actuellement plusieurs dizaines de millions de bouteilles de gaz industriels et médicaux dans le monde. Ces bouteilles sont actuellement tracées par un système de codes-barres leur donnant un identifiant unique. Ces codes-barres sont scannés à chaque étape de leur cycle d'utilisation : remplissage, chargement, livraison, retour sur site, etc.

La lecture de codes-barres est robuste mais présente plusieurs défauts que la technologie RFID pourrait résoudre comme par exemple :

— une lecture en vision directe ;
— une faible distance de lecture dépassant difficilement les 50 cm ;
— un risque de détérioration élevé (déchirure, rayure, tache) ;
— une information figée dès la création de l'étiquette, impossibilité de modifier l'information ;
— une lecture qui ne peut être qu'unitaire, nécessitant une opération humaine (entre 20 secondes et 1 minute par bouteille) à faible valeur ajoutée ;
— une simple fonction d'identification ;
— une manipulation manuelle de la bouteille est parfois nécessaire pour lire le code, augmentant le temps de l'opération et le risque d'accident pour l'opérateur.
— certains formats de bouteilles (typiquement cylindre < 5 litres), ne peuvent pas être équipés de codes-barres de par leur géométrie, et sont donc exclus du système de traçabilité. Le nombre de bouteilles de ce type est actuellement en hausse, car il facilite la distribution dans les zones urbaines denses.

La RFID UHF possède des caractéristiques de fonctionnement lui permettant de dépasser ces limites grâce notamment à la possibilité de réaliser des lectures volumétriques ou à l'aveugle, une distance de lecture plus importante, une durée de vie du tag augmentée et la possibilité d'avoir une mémoire dynamique s'ajoutant à l'identifiant propre à chaque puce.

Pour aller plus loin, l'information d'identification numérique pourrait être enrichie grâce une information sur l'état de la bouteille tracé à l'aide de capteurs, greffés à l'étiquette RFID. Ce gain de connaissance de l'objet va dans le sens de l'amélioration des procédés de gestion des bouteilles de gaz.

Problématique de la thèse

La technologie RFID UHF pour la logistique est une solution éprouvée. Cependant quelques verrous technologiques subsistent sur le chemin menant à un déploiement massif sur tout type de produit. Notamment pour les objets métalliques comme par exemple les bouteilles et conteneurs de gaz. Pour qu'une solution RFID UHF puisse être déployée sur de tels objets, il est avant tout indispensable de s'affranchir des effets parasites du métal proche sur la communication RF (Radio Fréquence). Actuellement, deux solutions sont possibles. La première consiste à concevoir un tag constitué de métamatériaux et la seconde de réaliser un tag dont les dimensions sont suffisamment importantes pour l'isoler de l'environnement perturbateur. Pour la première solution, le problème se trouve dans le fait que ce type de matériaux est souvent hors de prix. Pour la seconde, le principal inconvénient est de l'ordre ergonomique.

L'amélioration de la gestion des actifs industriels passe également par un niveau supplémentaire d'information qui concerne leur état. Nous pourrions pour cela équiper l'objet d'un capteur qui viendrait se greffer au tag RFID afin de communiquer des mesures en temps réel. Actuellement, un tel système intègre forcément une batterie ou une pile afin de fournir l'énergie nécessaire au capteur pour fonctionner. Dès lors qu'une source physique est présente sur l'objet (batterie ou pile), un entretien régulier devient indispensable. Afin de se défaire de cette contrainte, le développement d'un système de récupération d'énergie électromagnétique, fonctionnant dans la bande RFID UHF est une solution envisageable. Ce circuit passif permettra de fournir l'énergie nécessaire au capteur connecté, de la prise de mesure à la communication du résultat. L'amélioration des performances de ce qui se fait au niveau de l'état de l'art est nécessaire pour assurer un fonctionnement correct du capteur.

Organisation et contributions de la thèse

Placés dans ce contexte général de transformation numérique et plus spécifiquement d'optimisation de la logistique de conteneurs métalliques, les travaux de cette thèse ont un double objectif. Le premier est de lever un verrou technologique qui est l'utilisation de la RFID UHF sur objet conducteur avec des tags déployables à l'échelle industrielle et au prix abordable. Le deuxième objectif est l'enrichissement

de l'information concernant l'état de l'objet connecté à l'aide d'un tag RFID UHF augmenté auquel viendra se greffer un capteur. Afin de garantir l'autonomie énergétique de ce tag augmenté, un circuit de récupération d'énergie électromagnétique devra également être intégré.

Le manuscrit s'organise selon cet objectif d'optimisation de la logistique de bouteilles de gaz métalliques. Pour cela et dans un premier temps, nous présenterons les paramètres fondamentaux de la communication en RFID UHF. Cette étude se fera en deux parties : la première, matérielle, présente les éléments constitutifs d'une solution RFID (le lecteur et le tag) et des paramètres physiques d'une communication RFID UHF ; elle traite également de l'effet de l'environnement sur la communication RF et plus particulièrement l'effet du métal proche sur le fonctionnement du transpondeur. La seconde partie est logicielle. Elle traite du protocole de communication standard EPC global Class 1 Generation 2 (EPC Gen2) et ses spécifications. Le but des deux premiers chapitres est de mettre en exergue les paramètres à optimiser afin de proposer une solution de traçabilité en environnement hostile la plus robuste. Nous aborderons ensuite la conception d'un tag RFID UHF pour objets conducteurs. Nous développerons dans ce chapitre la réalisation et les mesures de performances de prototypes de tag répondant aux spécifications industrielles imposées et adaptés aux objets conducteurs. Dans le dernier chapitre, nous exposerons les travaux concernant la réalisation d'un tag augmenté autonome, en se penchant plus particulièrement sur l'étude et l'optimisation du système de récupération d'énergie électromagnétique fonctionnant dans la bande RFID UHF.

Chapitre 1

Présentation de la RFID UHF et de l'effet de l'environnement sur son fonctionnement

Sommaire

1.1 Introduction **9**

1.2 Transformation numérique de la logistique et de la gestion des stocks de bouteilles de gaz **10**

1.2.1 Le POC de Denain 2013 10

1.2.2 Les deux méthodes d'identification à partir d'une solution de traçabilité RFID UHF 11

1.3 Présentation de la technologie RFID UHF **14**

1.3.1 Généralités et définitions de base de la RFID 15

1.3.2 La communication lecteur ↔ tag 20

1.3.3 Le tag RFID UHF 22

1.3.4 Le lecteur RFID UHF 23

1.4 Effet de l'environnement sur une communication RF . . **27**

1.4.1 Définitions des principaux phénomènes physiques au niveau d'obstacles et d'interfaces 28

1.4.2 Définitions des principaux phénomènes physiques influant sur la qualité de la communication en espace libre 30

1.5 Mise en évidence des perturbations dues à la présence du métal sur le fonctionnement de l'antenne **32**

1.6 État de l'art des solutions RFID UHF pour objets conducteurs **35**

1.6.1 Influence du substrat sur le fonctionnement de l'antenne dipôle 36
1.6.2 Emploi de matériaux EBG au niveau du substrat 36
1.6.3 Utilisation d'un plan de masse 38
1.6.4 Autres points d'amélioration possibles 39
1.7 Conclusion 40

1.1 Introduction

La technologie RFID UHF se présente aujourd'hui comme la solution la plus appropriée pour la logistique et la gestion des stocks dans l'industrie. La transformation numérique la rend même incontournable. Pour l'industrie 4.0, son prédécesseur, le code-barres présente des limites qu'il est indispensable de dépasser.

L'ensemble des limitations techniques qu'impose le système code-barres peut être solutionné par le recours à la RFID UHF. Elle permet en effet :

- d'augmenter la distance de lecture à plusieurs mètres voir décamètres et cela même à l'aveugle car la communication se fait par ondes RF ;
- d'ajouter ou de modifier l'information déjà présente. En effet, la puce RFID peut embarquer une mémoire dynamique ;
- d'avoir une étiquette plus robuste, pouvant résister à différents phénomènes comme l'humidité, les chocs, la chaleur et bien d'autres ;
- une lecture rapide et à distance des bouteilles ;
- de réaliser une lecture volumétrique, et donc de procéder à des inventaires rapides ;
- de nouveaux usages spécifiques à Air Liquide comme par exemple :
  - la lecture automatique du contenu de la bouteille et date de reconditionnement par un automate équipé d'un lecteur ;
  - le suivi des tous les formats de bouteilles jusqu'ici exclus du système de traçabilité par code-barres.

Cependant les performances de cette technologie restent sujettes à l'environnement dans lequel elle évolue. L'utilisation de tags RFID pour la logistique d'objets métalliques massifs tels que les bouteilles de gaz représente un défi technique qu'il faut comprendre et maitriser avant de déployer cette technologie. Afin de tirer profit au maximum de cette technologie, il est indispensable de concevoir un tag RFID en fonction de l'environnement dans lequel il sera amené à fonctionner. Pour cela, une bonne compréhension des phénomènes perturbants est nécessaire au même titre que la maitrise des caractéristiques des lecteurs, des tags RFID et de la communication entre eux.

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps le contexte spécifique à Air Liquide pour la logistique et la gestion des stocks des bouteilles de gaz, pour mieux appréhender les challenges techniques à relever. Nous introduirons par la

suite la technologie RFID UHF, après quoi nous nous intéresserons à l'influence de l'environnement sur une communication par ondes électromagnétiques (OEM) et plus particulièrement celle d'un milieu métallique. Pour cette partie, l'étude théorique sera appuyée par des résultats de simulation. Par la suite un état de l'art de conception de tags RFID UHF pour objets conducteurs sera exposé.

1.2 Transformation numérique de la logistique et de la gestion des stocks de bouteilles de gaz

À la fin des années 90, une première tentative d'introduire la RFID LF (Low Frequency) pour la logistique des bouteilles de gaz Air Liquide s'est soldée par un échec. Par rapport au code-barres, la RFID LF était plus encombrante, moins robuste et n'apportait pas de réels avantages.

En 2013, une nouvelle preuve de concept, nommé POC (Proof Of Concept) en interne, est réalisée cette fois avec de la RFID UHF.

1.2.1 Le POC de Denain 2013

L'objectif de ce POC était d'étudier la faisabilité d'une identification des bouteilles de gaz à l'aide d'un portique RFID UHF sous lequel circulerait un camion afin de procéder à une lecture volumétrique du chargement. Les bouteilles étaient équipées de tags RFID UHF de la marque *HID* [HID].

Cette expérimentation a abouti aux constatations suivantes :

— la lecture volumétrique est possible. Cependant, au vu du dispositif expérimental employé il n'est pas possible d'affirmer de manière certaine que les régulations en puissance d'émission, définies par l'ETSI [noa16], aient été respectées ;

— il est indispensable de maitriser tant l'aspect physique que protocolaire de la communication pour l'optimiser et être en mesure de proposer des modifications de configuration selon les différents besoins spécifiques (portique intérieur, extérieur, de dimension réduite, etc) ;

— la nécessité de réaliser un tag RFID UHF adapté aux bouteilles de gaz. Ceux du marché ne sont pas adaptés aux spécificités des bouteilles de gaz, tant au niveau de leur géométrie que de leur mode de fixation. Grâce à la Figure 1.1, nous pouvons constater que le tag, utilisé lors de ce POC, n'est pas adapté

à la géométrie de la bouteille, ce qui complique sa fixation et le rend plus vulnérable aux chocs.

Figure 1.1 – Tag du commerce fixé sur une bouteille de gaz

Les verrous technologique mis en évidence par ce POC ont incité Air Liquide, à travers sa filiale IT et son centre de recherche de Paris Saclay, à monter une collaboration avec des laboratoires universitaires pour deux raisons :

— la première : comprendre le fonctionnement d'un système de communication RF dans un environnement métallique. Cela tant au niveau physique (effet du milieu sur la transmission de signaux radio) que logiciel (maitrise du protocole de communication RFID UHF et de son algorithme anti-collision).

— la seconde : développer une solution RFID UHF viable pour la logistique et la gestion des stocks des bouteilles de gaz, dans cet environnement métallique.

1.2.2 Les deux méthodes d'identification à partir d'une solution de traçabilité RFID UHF

Pour la gestion des ses stocks, Air Liquide a besoin de pouvoir réaliser la traçabilité des bouteilles de gaz selon deux modalités : une lecture unitaire ou une lecture volumétrique.

1.2.2.1 Méthode de lecture unitaire : lecteur RFID UHF portable

L'intêret de cette méthode de lecture est de pouvoir identifier et mettre à jour l'information sur l'objet durant les phases de conditionnement, comme le montre la Figure 1.2 avec un opérateur effectuant une lecture d'un lecteur code-barres. Cette même manipulation restera encore possible avec la lecture RFID UHF, avec comme avantage une portée accrue et moins contraignante que la lecture infrarouge, ce qui

entrainera une diminution des manipulations de bouteilles (voir Figure 1.3) et par la même occasion de risques d'accidents.

Figure 1.2 – Opération de lecture de l'identifiant code-barres d'une bouteille effectuée par un opérateur

Figure 1.3 – Opération de remplissage d'un panier de bouteille réalisée par un opérateur

1.2.2.2 Méthode de lecture volumétrique : le portique RFID UHF appliqué au suivi des bouteilles de gaz

Comme mentionné en introduction, la lecture volumétrique d'un chargement entier et de manière instantanée représente un gain tant au niveau de la rentabilité qu'au niveau de la sécurité des opérateurs. Actuellement, l'identification des bouteilles de gaz représente une opération à risque, chronophage et sans valeur ajoutée. Le portique RFID UHF, présenté en Figure 1.4, est la solution pour répondre aux

exigences de rendement et de sécurité. Au passage du camion sous le portique, la lecture est instantanée et ne nécessite plus aucune manipulation.

Figure 1.4 – Passage d'un camion chargé sous un portique RFID UHF

Les paniers chargés sur un camion peuvent contenir jusqu'à 16 bouteilles chacun. La disposition des bouteilles à l'intérieur de ces paniers se fait de manière aléatoire, si bien que des cylindres de petites dimensions peuvent se retrouver au milieu des paniers et entourés par des cylindres de plus grandes dimensions. Ce problème est explicité dans les Figure 1.5 et 1.6 avec des tailles et volumes de bouteilles très variables. La disposition des antennes sur le portique ainsi que l'orientation des tags sur les bouteilles seront deux points importants dans l'optimisation de la communication.

Nous introduisons dans la prochaine section la technologie RFID et plus particulièrement la RFID UHF.

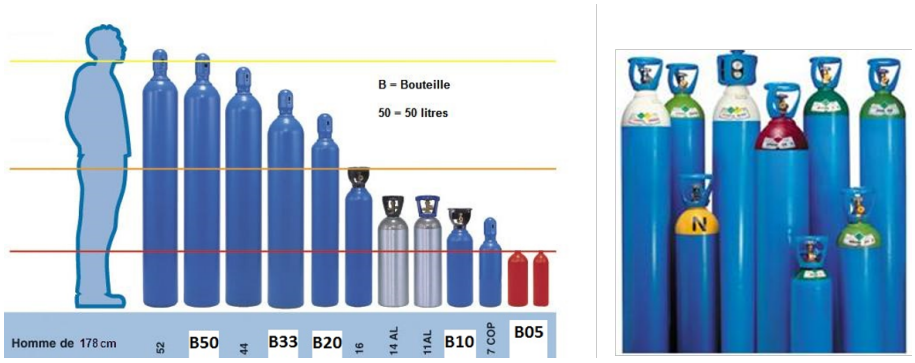


Figure 1.5 – Représentation des différents volumes de bouteilles de gaz

Figure 1.6 – Mise en évidence de la problématique de l'hétérogénéité des paniers de bouteilles chargés sur un camion en (a) et transportés par un chariot élévateur en (b)

1.3 Présentation de la technologie RFID UHF

Dans cette section, nous présentons un ensemble d'informations tirées d'une étude bibliographique s'appuyant notamment sur des ouvrages de références dans le domaine [Par08, Leh08, FM10, CUS10, MSW11, Per14] Ceux-ci développent de manière plus approfondie l'ensemble des points que nous aborderons dans cette section.

1.3.1 Généralités et définitions de base de la RFID

La RFID est une technologie d'identification à l'aide de tags, associés à des objets, composés d'une antenne couplée à une puce. Comme l'illustre la Figure 1.7, le tag interagit avec un lecteur RFID permettant la lecture de l'identifiant unique qui lui est associé ou l'écriture dans la mémoire de la puce d'informations supplémentaires sur l'objet. Quand le tag est dit passif, c'est le lecteur qui fournit l'énergie nécessaire au tag pour fonctionner, lorsque ce dernier se situe dans son champ de rayonnement. Ils communiqueront entre eux à l'initiative du lecteur à condition que le tag se trouve dans le champ de lecture du lecteur.

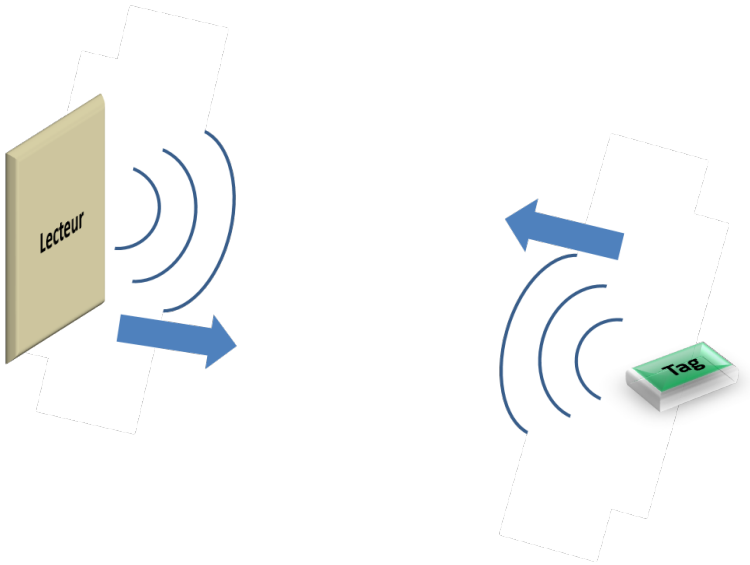


Figure 1.7 – Communication entre un lecteur et un tag RFID UHF

La RFID se divise en plusieurs branches. Celles-ci peuvent être classées en fonction de leur fréquence de travail. La Figure 1.8 présente une vue d'ensemble de la technologie RFID et ses différentes branches.

En fonction de l'application un domaine de la RFID peut être plus adapté que les autres. Le Tableau 1.1 liste les caractéristiques de chacun, leur principaux avantages ainsi que des exemples d'applications.

Classification des tags en fonction du type d'alimentation :

En fonction de leur mode d'alimentation, les tags peuvent être classés dans trois catégories distinctes :

a. les tags **passifs**, dans lesquels aucune source d'énergie embarquée n'est présente. L'ensemble de l'énergie nécessaire à leur fonctionnement est récupérée

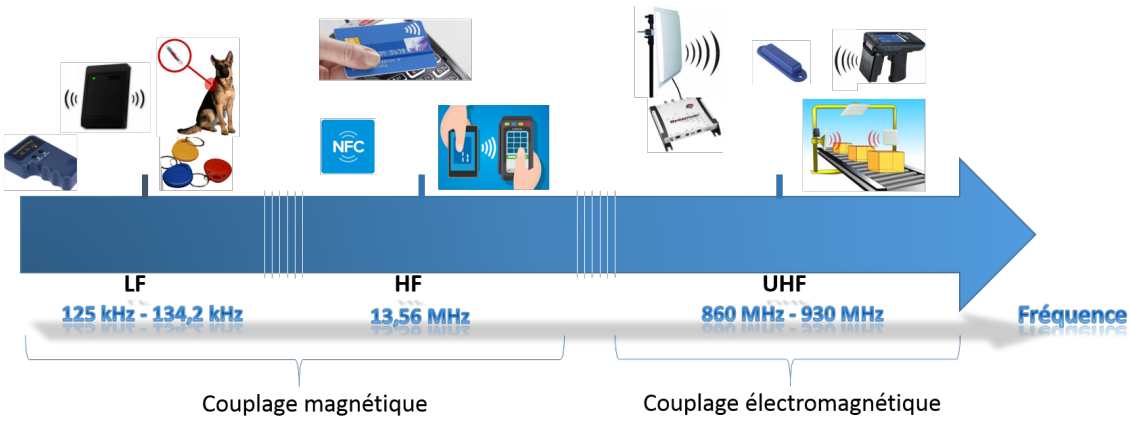


Figure 1.8 – Présentation des différents domaines de la RFID

au niveau de l'antenne et provient du rayonnement électromagnétique. La récupération de l'information, son traitement et le renvoi du signal contenant la réponse se font uniquement à l'aide de l'énergie envoyée par le lecteur. De ce fait, les tags passifs ont une architecture assez simple. L'absence de source d'alimentation embarquée fait que le tag ne génère pas d'onde mais réfléchit l'onde incidente en y intégrant la réponse à la requête du lecteur via une modulation de charge ou de phase. C'est le principe de rétro-modulation dont le fonctionnement est présentée dans le paragraphe 1.3.3.1 ;

b. les tags **semi-passifs** quant à eux possèdent une source d'énergie embarquée. L'intérêt de ces tags est double. Premièrement ils permettent de garder une architecture assez simple car la réponse du transpondeur se fait toujours via le principe de rétro-modulation. Le deuxième avantage est qu'ils permettent de manière indirecte une augmentation significative de la sensibilité radio de la puce. En effet, les performances des puces sont dépendantes du compromis entre la récupération d'énergie et la récupération de l'information provenant du lecteur. Avec cette batterie, le concepteur peut se focaliser sur l'optimisation de la récupération d'information. La batterie elle fournira l'énergie nécessaire au fonctionnement du tag. Elle fournit l'énergie uniquement pour le fonctionnement de la puce et le traitement des données mais en aucun cas pour la communication ;

c. les tags **actifs** sont également équipés d'une source d'alimentation qui fournit de l'énergie à la puce pour le fonctionnement de la puce et le traitement de l'information mais également dans la communication avec le lecteur. La communication du tag vers le lecteur ne se fait plus par rétro-modulation. Le

Table 1.1 – Les différents domaines de la RFID, leurs avantages et exemples d'application

Domaine	Fréquence	Avantages	Exemples d'utilisation
LF	125 - 134,5 kHz	Facilement utilisable sur tout type de matériaux. Prix attractif	Contrôle d'accès
HF	13,56 MHz	Antenne imprimable sur carte. Limitation de la distance de lecture à quelques centimètres. Prix attractifs	Passeport, paiement sans contact
UHF	860 - 930 MHz	Distance de lecture de plusieurs mètres et faible encombrement	Logistique, gestion des stocks
SHF	2,45 GHz	Faible encombrement et très haut débit de communication	Logistique, gestion des stocks

tag génère son propre signal. L'architecture interne de la puce est bien plus élaborée qu'une puce passive ou semi-passive. Si la distance de communication peut atteindre plusieurs centaines de mètres, la durée de vie de ce type de tag est limitée. De plus, l'augmentation de la puissance du signal émis par le tag peut engendrer dans un espace dense d'importants problèmes d'interférences. Les solutions à ce type de problème existent mais rendent alors la puce encore plus énergivore.

Le simple fait d'intégrer une batterie ou une pile limite la durée de vie des tags. Cependant cela permet d'augmenter la taille mémoire et d'intégrer des capteurs ou actionneurs.

Classification des tags selon leur(s) fonction(s) :

Nous distinguons différentes classes de tag selon les fonctions qu'ils proposent. Cette classification se divise en 6 catégories allant de 0 à 5. Les classes de 0 à 4 permettent de distinguer les tags selon leur fonction. La classe 5 elle, correspond au lecteur.

— **classe 0** : les tags de cette classe sont passifs, ils ne sont accessibles qu'en lecture et n'ont pas de fonction d'identification mais uniquement de signalisation de présence quand ils sont dans le champ du lecteur. Comme exemple d'utilisation, nous pouvons citer les antivols RFID que nous pouvons trouver

chez les commerçants ;

— **classe 1** : les tags sont également accessibles en lecture seule avec une mémoire de type WORM (Write Once Read Many). La différence avec la classe 0 est qu'ils ont une fonction d'identification. Ce type de tag peut être utilisé sur des actifs industriels n'étant pas amenés à évoluer au cours du temps ;
— **classe 2** : les puces disposent d'une mémoire non figée, sur laquelle l'information peut être modifiée afin de suivre l'évolution de l'objet ;
— **classe 3** : ces tags sont semi-passifs. Grâce à la source d'énergie, ils pourront intégrer des capteurs pour un fonctionnement autonome. Cependant l'énergie nécessaire à la communication demeure fournie par le lecteur ;
— **classe 4** : les tags sont actifs, leur fonctionnement et même la communication avec le lecteur sont effectués de manière autonome ;
— **classe 5** : cette classe est réservée aux lecteurs qui permettent d'alimenter et initier la communication avec les tags de la classe 0 à la classe 3. Ils communiquent avec les tags de la classe 4 et les autres appareils de la même classe.

1.3.1.1 RFID dans le domaine UHF

Un élément important à considérer au sujet de la RFID UHF concerne les restrictions imposées comme pour tout type de communication en espace libre. Selon la région, les normes seront différentes. Les principales restrictions sont au niveau de la puissance maximale d'émission et de la bande de fréquence allouée, qui peuvent varier d'une région à l'autre comme nous pouvons le voir dans le Tableau 1.2. Cette absence d'harmonisation complique l'interopérabilité mais n'empêche pas qu'un système large (ou multi) bande puisse répondre aux plus fortes restrictions concernant chaque paramètre et ainsi fonctionner dans l'ensemble des régions du globe. Un compromis sera à faire entre la possibilité d'utiliser la solution développée sur les 6 continents et les performances poussées au maximum possible pour une seule région. En Europe, c'est l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) qui est en charge de ces questions de régulations.

Les acronymes ERP (Effective Radiated Power) et EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) représentent la référence à partir de laquelle est mesurée la puissance rayonnée par une antenne. Dans le cas de l'ERP, l'antenne référence est une antenne dipôle, tandis que pour l'EIRP c'est une antenne isotrope. Cette dernière est un modèle théorique pour laquelle le diagramme de rayonnement est sphérique et de gain

Table 1.2 – Régulation des puissances et fréquences d'émission selon les régions

Région	Institut de régulation	Fréquence	Puissance maximale autorisée
Amérique du Nord	FCC	902 - 928 MHz	4 W EIRP
Europe	ETSI	865,6 - 868,6 MHz	2 W ERP
Japon	MIC	952 - 957,6 MHz	4 W EIRP

FCC : Federal Communications Commission
ETSI : European Telecommunications Standards Institute
MIC : Ministry of Internal and Communication

unité. Le passage d'un référentiel à un autre se fait à l'aide des relations suivantes :

$$P_{EIRP}(dBm) = P_{ERP}(dBm) + 2,15 \tag{1.1}$$

$$P_{EIRP}(Watt) = 1,6\ P_{ERP}(Watt) \tag{1.2}$$

Ces normes et régulations ne cessent de changer. Il est donc important de se tenir informé des évolutions en fonction des marchés visés par nos applications. Nous présentons dans le Tableau 1.3 un exemple de changement récent des régulations dans la bande UHF de 3 pays, le Japon, la Suisse et le Royaume-Uni.

Table 1.3 – Évolution de la régulation au Japon, au Royaume-Uni et en Suisse

	Anciennes Régulations			Nouvelles Régulation		
Région	Communication Lecteur->Tag	Fréquence	Puissance	Règles de partage du spectre	Fréquence	Puissance
Japon*	LBT	952 – 957,6	4 W EIRP	LBT	916,7 – 920,9 MHz	4 W EIRP
Royaume-Uni	ETSI	865,6 – 867,6 MHz	2 W ERP	ETSI	865,6 – 867,6 MHz	2 W ERP
				ETSI	915 - 921	4 W ERP
Suisse	ETSI	865,6 – 867,6 MHz	2 W ERP	ETSI	865,6 – 867,6 MHz	2 W ERP
				ETSI	915 - 918 MHz	4 W ERP

* Phase de transition, l'ancienne bande restera valable jusqu'au 31 mars 2018

1.3.2 La communication lecteur ↔ tag

Les échanges entre le lecteur et le tag se font par communication radio fréquence. Le lecteur active le tag passif par transfert d'énergie électromagnétique. Le tag répond aux requêtes à l'aide du principe de rétro-modulation présenté plus bas.

Présentation des différentes zone du champ électromagnétique Selon sa distance à l'antenne émettrice, l'onde électromagnétique ne possède pas les mêmes propriétés. Afin de bien modéliser le comportement de propagation de l'onde dans l'espace, il est nécessaire de découper celui-ci en trois zones. La frontière entre deux zones est fonction de la longueur d'onde λ (en d'autres termes de la fréquence) et de la plus grande dimension de l'antenne D, comme cela est présenté dans la Figure 1.9.

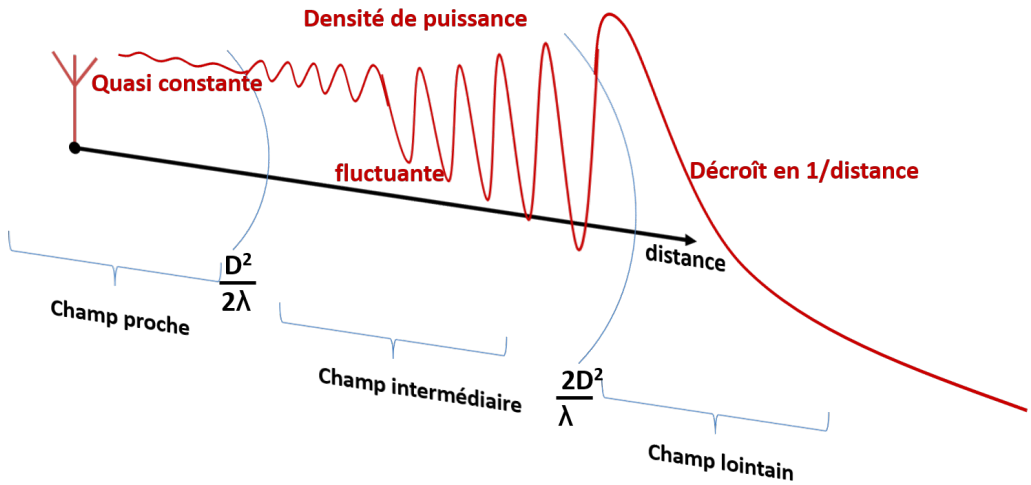


Figure 1.9 – Représentation des 3 zones de propagation électromagnétique en fonction de la distance par rapport à l'émetteur

— la zone de champ proche, également dite de Rayleigh. C'est une zone de champ réactif qui entoure directement l'antenne. Dans celle-ci, le champ électrique et le champ magnétique ne sont pas orthogonaux, les ondes sont évanescentes. Le type de couplage dans cette zone est purement réactif, soit capacitif soit inductif. Ce dernier type de couplage est le plus répandu en RFID à plus basse fréquence.

— la zone intermédiaire, également dite de Fresnel. C'est en réalité une zone de champ proche. Cependant dans celle-ci, le comportement radiatif de l'onde

électromagnétique n'est plus négligeable. Il commence même à être prépondérant, bien que la propagation ne soit pas encore parfaitement radiale. Dans cette zone, le gain peut varier selon la distance.

— la zone de champ lointain, également dite de Fraunhofer. Dans cette zone, nous avons une propagation qui se fait par OEM planes. Le type de couplage est électrique.

Dans le cas des tags RFID UHF qui sont électriquement petits, la zone de Fresnel est considérée comme inexistante, de même que la zone de Rayleigh est extrêmement petite [CUS10].

Transfert de puissance du lecteur vers le tag :

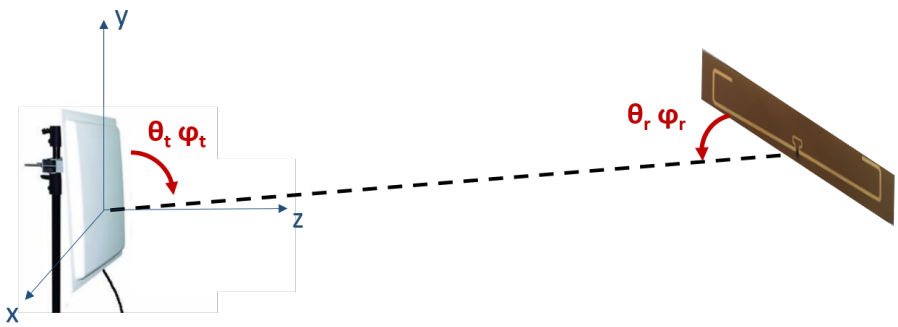


Figure 1.10 – Schéma de principe

En champ lointain, la puissance émise par le lecteur et reçue à l'entrée de la puce P_r, dans un repère sphérique centré sur le lecteur comme sur la Figure 1.10, est :

$$P_r = P_t rdt_t rdt_r (1 - |\Gamma_t|)^2 (1 - |\Gamma_r^*|)^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r) L_p \tag{1.3}$$

avec P_t la puissance du lecteur, rdt_t et rdt_r respectivement le rendement de l'antenne émettrice et réceptrice, Γ_t le coefficient de réflexion de l'antenne émettrice et Γ_r^* celui de l'antenne réceptrice. λ la longueur d'onde du signal, r la distance entre entre le lecteur et le tag, $D_t(\theta_t, \phi_t)$ et $D_r(\theta_r, \phi_r)$ la directivité respective de l'émetteur et du récepteur en coordonnées polaires et L_p les pertes de polarisation.

Pour plus de précisions sur les paramètres des antennes voir l'annexe A, dans laquelle sont notamment détaillés les éléments employés pour le calcul du transfert de puissance entre le lecteur et le tag.

1.3.3 Le tag RFID UHF

Le tag RFID est associé physiquement au bien à identifier. Il est constitué, comme le montre la Figure 1.11, de deux blocs principaux que sont :

- la puce qui peut elle même être divisée en trois blocs distincts :
  - une partie RF ;
  - une partie numérique ;
  - un bloc mémoire dont nous présenterons le partitionnement dans le chapitre 2 (2.2.2) pour le protocole EPC Gen2.
- l'antenne servant d'interface électromagnétique/électrique entre la partie RF de la puce et l'espace libre.

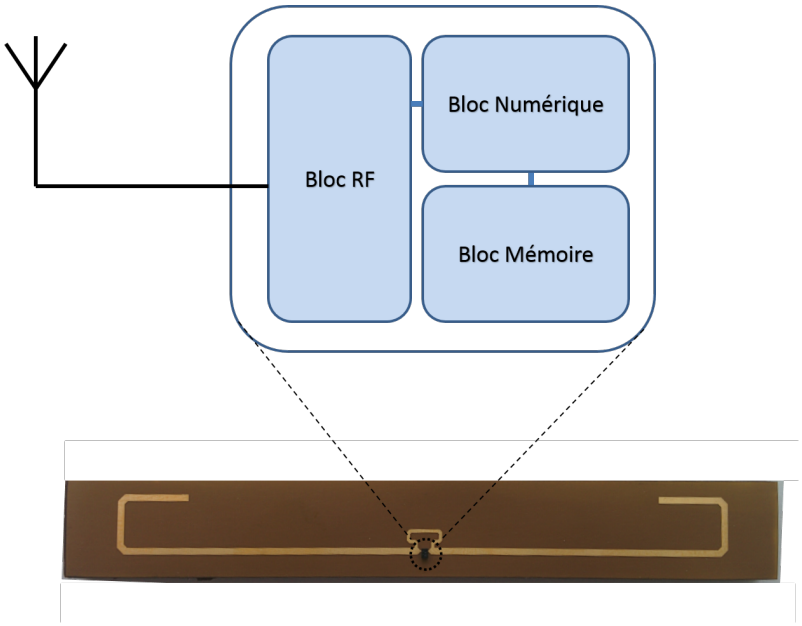


Figure 1.11 – Tag RFID UHF et son schéma bloc

1.3.3.1 Fonctionnement du tag

Nous présentons ici, de manière synthétique, le fonctionnement du tag, caractérisé par quatre étapes principales :

1. collecter l'énergie envoyée par le lecteur, nécessaire à son fonctionnement. La récupération de l'énergie se fait de manière très classique à l'aide d'un circuit redresseur composé d'une diode et d'une capacité ;
2. l'acquisition de la requête provenant du lecteur, se fait généralement à l'aide d'une simple démodulation du signal par détection d'enveloppe ;

3. après la récupération du signal, sa conversion à l'aide d'un convertisseur analogique numérique (CAN) puis sont traitement au niveau du bloc numérique pour une lecture ou écriture dans la mémoire après vérification des données reçues. Une fois l'information traitée, la réponse est convertie à nouveau en signal analogique ;
4. le renvoi de la réponse à la requête du lecteur à l'aide du principe de rétro-modulation que nous présentons dans le paragraphe qui suit.

Principe de la rétro-modulation :

Dans une communication entre un lecteur et un tag passif (ou semi-passif), ce sont les OEM émises par le lecteur qui servent de support à la réponse du tag. L'onde incidente est réfléchie et modulée par la cible (le tag) via la variation de sa surface équivalente radar (présentée en Annexe A) qui peut prendre deux valeurs.

Lors de la rétro-modulation, la communication repose sur une communication binaire (0-logique et 1-logique). Comme le montre la Figure 1.12, la modulation de charge permet d'obtenir ces deux états. La commutation entre les deux charges confère au tag une réflectivité différente, ce qui permet de moduler l'intensité du signal réfléchi entre une valeur logique haute (1-logique) et une valeur logique basse (0-logique).

Le cas où la modulation serait "idéale", c'est à dire avec une profondeur de modulation maximale, serait pour une variation de la charge entre un circuit ouvert et un court circuit. Cependant, il est nécessaire de considérer la télé-alimentation de la puce : dans aucune de ces deux valeurs extrêmes de la charge, la puce ne peut recevoir d'énergie. L'optimisation de la puissance transmise se fait quand l'impédance de l'antenne est égale au conjugué de l'impédance d'entrée de la puce, comme décrit dans les formules présentées dans l'Annexe A. Tout est encore une fois une question de compromis entre la puissance absorbée et la qualité du signal rétro-modulé.

1.3.4 Le lecteur RFID UHF

Sont listés ci-dessous les trois principaux blocs constituant un lecteur, dont la Figure 1.13 donne un aperçu :

— l'unité de contrôle numérique (UCN) qui sert à la gestion des signaux et des commandes à plus haut niveau. Elle envoie les requêtes et traite les signaux reçus afin de réaliser entre autre, les fonctions d'authentification, de gestion des collisions, de codage et de décodage ;

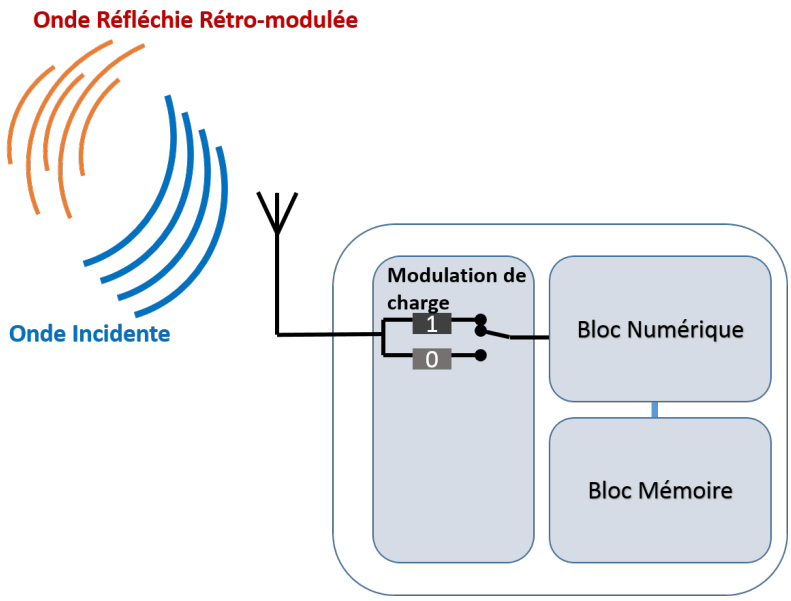


Figure 1.12 – Schéma de principe de la rétro-modulation par modulation de charge

— le circuit RF pour le conditionnement du signal en émission et le traitement du signal en réception ;
— l'antenne servant d'interface électromagnétique/électrique.

Le lecteur sert d'intermédiaire entre le système de gestion des actifs (SGA, qui peut être ou non intégré dans le lecteur) et la population de tag (transfert de commandes dans le sens SGA → tags et d'informations dans les deux sens). Son rôle est également de fournir l'énergie électromagnétique aux tags passifs ou semi-passifs. La gestion des collisions se fait également au niveau du lecteur. Ce dernier peut être équipé de plusieurs antennes dont l'UCN gérera la synchronisation.

Dans la communication avec le tag, le lecteur doit être en mesure d'émettre et de recevoir simultanément. Pour cela, comme le montre la Figure 1.14 deux types de configuration sont possibles : bi-statique et mono-statique. Dans la première les canaux de transmission et réception sont séparés physiquement. Le lecteur dispose de deux circuits distincts disposant chacun d'une antenne, une réservée à l'émission et la seconde à la réception. Dans la seconde configuration, le lecteur n'est équipé que d'une antenne pour l'émission et la réception. Il est donc nécessaire d'intégrer un élément permettant d'isoler le signal émis du signal reçu. Pour cela, le recours à un circulateur permet d'avoir le meilleur rendement possible à la fois en émission et en réception, dans la configuration mono-statique qui est, pour des raisons pratiques et

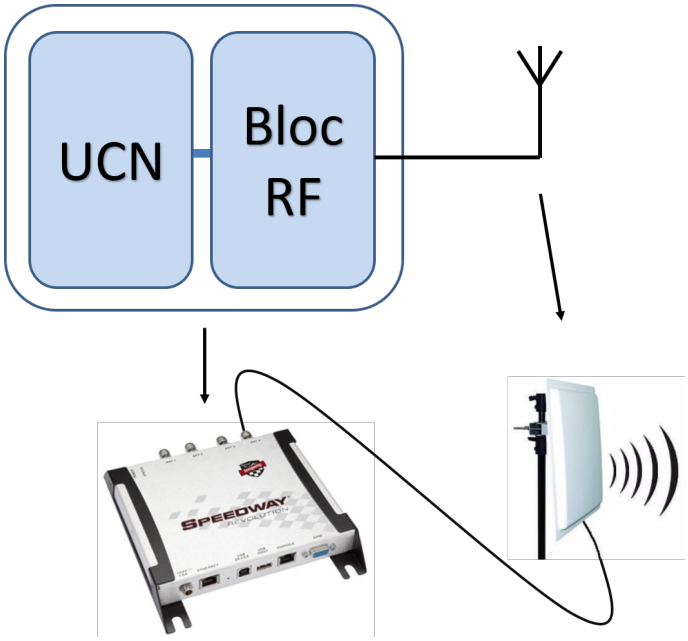


Figure 1.13 – Lecteur RFID UHF et son schéma bloc

économique, la plus courante aujourd'hui. Cependant, dans des dispositions adaptées afin d'éviter l'aveuglement RF de l'antenne réceptrice par l'antenne émettrice, un lecteur fixe peut être en configuration bi-statique afin d'améliorer ses performances de lecture.

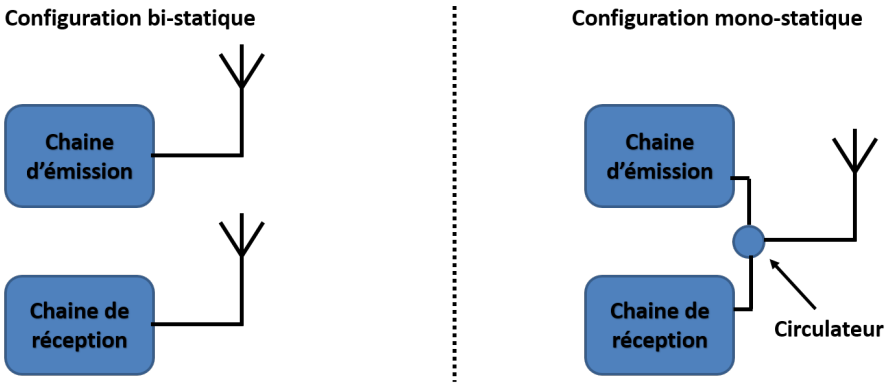


Figure 1.14 – Synoptique des configuration bi-statique en (a) et mono-statique en (b)

Dans la Figure 1.15, nous présentons le schéma bloc simplifié du fonctionnement d'un lecteur en émission. Les données provenant de l'UCN sont conditionnées (modulées, amplifiées et filtrées) avant d'être transmise vers l'antenne pour être rayonnées. Selon la norme ISO 18000-6c [noa14], la modulation peut être de type ASK (Amplitude Shift Keying). Elle a pour avantage de permettre au niveau du tag une architecture plus simple avec un circuit de démodulation qui est alors un simple

détecteur d'enveloppe.

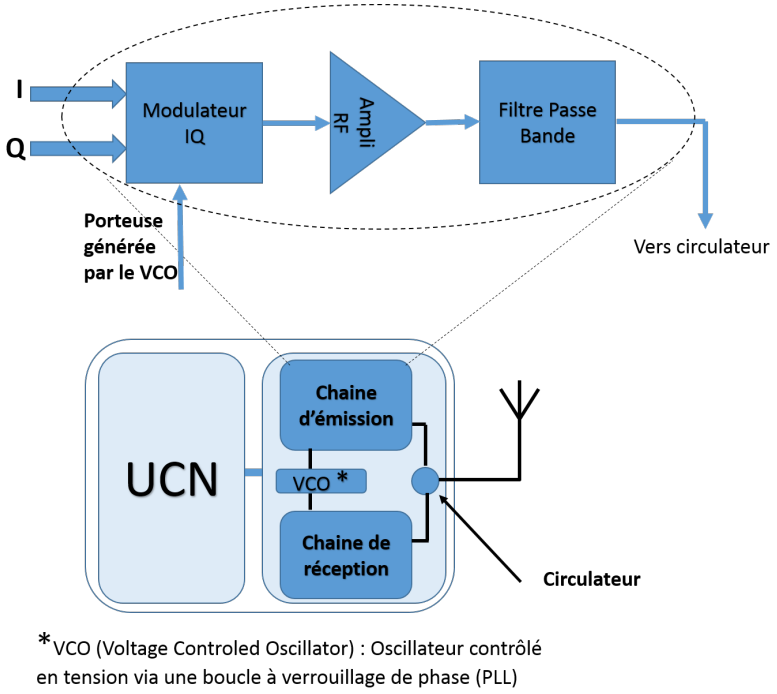


Figure 1.15 – Exemple d'une chaine d'émission d'un lecteur RFID UHF

La chaine de réception du signal est, comme le montre la Figure 1.16, composée d'un amplificateur, d'un démodulateur I/Q, d'un filtre et d'un convertisseur analogique numérique. Le rôle du démodulateur est de reconstituer le signal provenant du tag malgré la position variable du tag par rapport au lecteur entrainant une variation non maitrisée de la phase du signal reçu par rapport au signal émis. L'une des voies est en phase avec le synthétiseur générant la modulation en émission et la seconde est déphasée de $\frac{\Pi}{2}$. La somme des signaux sur les deux voies permettra de recouvrer l'ensemble du signal retro-modulé par le tag.

Respect des normes :

Pour qu'un lecteur puisse être homologué, il est essentiel que celui-ci respecte deux points fondamentaux que sont la puissance et la bande de fréquence d'émission. La Figure 1.17 montre le masque fréquentiel (entre 865 MHz et 868 MHz) imposé en Europe par l'ETSI.

Les autres normes à respecter, notamment l'étalement spectral du signal ou le temps d'émission peuvent être consultées dans la documentation officielle de l'European Research Council (ERC) [noa17].

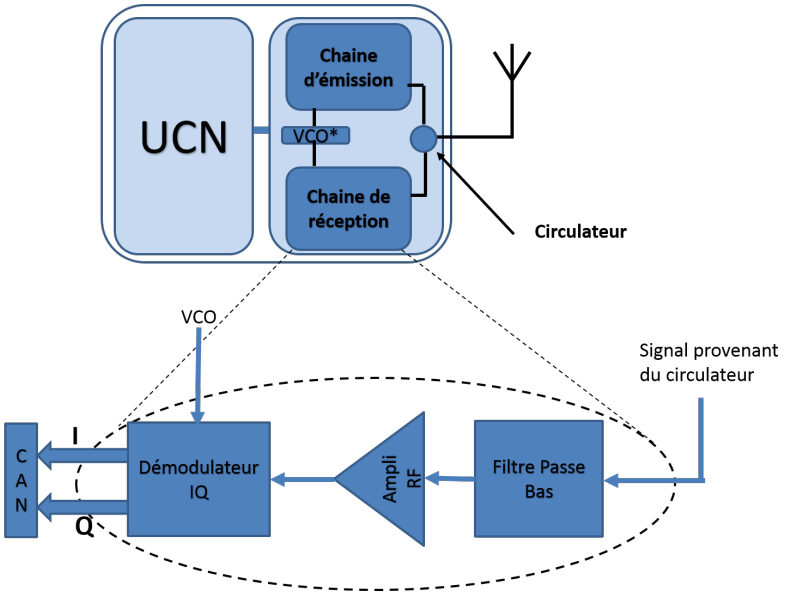


Figure 1.16 – Exemple d'une chaine de réception d'un lecteur RFID UHF

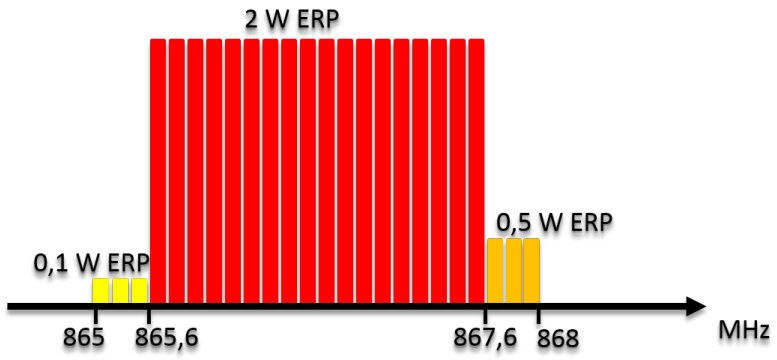


Figure 1.17 – Masque fréquentiel respectant les régulations imposées en puissance et en fréquence

Après avoir exposé les fondamentaux de la RFID UHF, nous allons présenter, dans la section suivante, les principaux effets de l'environnement sur une communication radio.

1.4 Effet de l'environnement sur une communication RF

La conception d'un tag doit tenir compte de l'environnement dans lequel il sera employé. L'une des principales étapes de ce projet est d'étudier la possibilité de réa-

liser une solution RFID UHF pour la logistique d'objets conducteurs. Cette solution doit être, tant au niveau des dimensions que du prix, raisonnable. Nous entendons par raisonnable un prix inférieur à 30 centimes d'euros l'unité et un volume inférieur à 12 cm^3. Nous présentons dans cette section les principaux phénomènes physiques pouvant avoir un effet sur la qualité de la communication par OEM.

1.4.1 Définitions des principaux phénomènes physiques au niveau d'obstacles et d'interfaces

La diffraction a lieu quand l'onde rencontre un obstacle ou une ouverture. Elle se manifeste à travers l'étalement des directions de propagation de l'onde EM. En UHF et pour les distances de communication de quelques mètres, son effet est négligeable. Pour que le contraire soit vrai, il faudrait un obstacle ou une fente de taille caractéristique bien inférieure à la longueur d'onde du signal. La Figure 1.18 illustre ce phénomène.

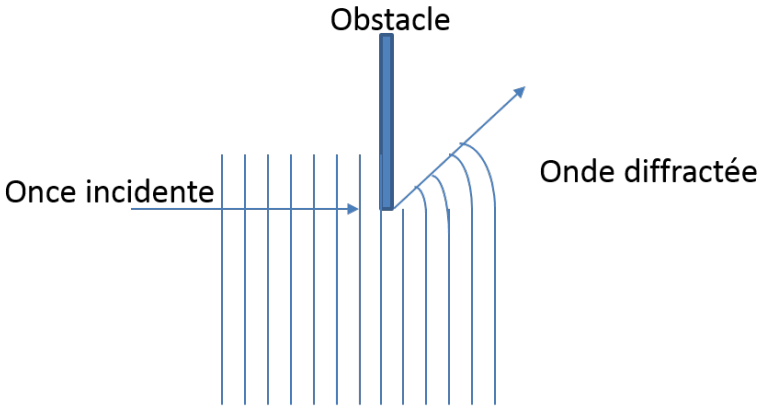


Figure 1.18 – Représentation du phénomène de diffraction d'une OEM

La réfraction a lieu à l'interface entre deux milieux au caractéristiques physiques différentes. Elle se traduit par la déviation de l'onde EM comme le montre la Figure 1.19. Tout comme la diffraction elle est négligeable dans le cadre d'une communication UHF de quelques mètres.

L'absorption d'une onde EM est définie par le fait que son énergie de rayonnement EM est convertie en une énergie alternative, généralement en chaleur à travers l'effet Joule. Un schéma de principe du phénomène est présenté dans la Figure 1.20.

La réflexion a lieu quand l'onde EM arrive à une interface. Une partie traverse et l'autre est réfléchie comme le montre la Figure 1.21.

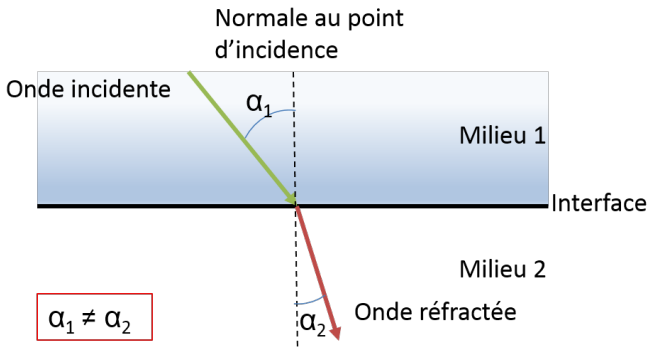


Figure 1.19 – Représentation du phénomène de réfraction d'une OEM

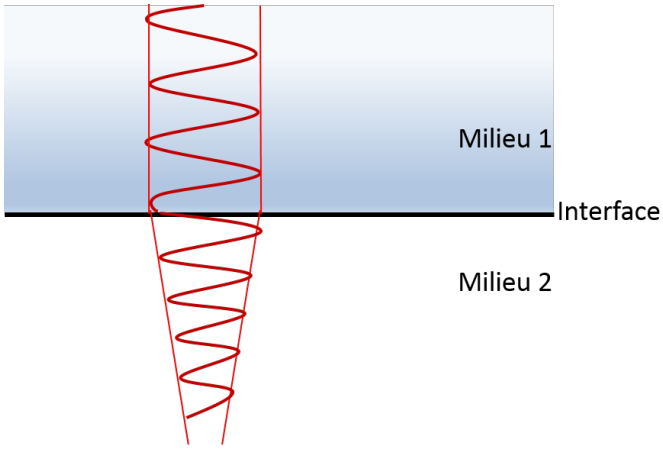


Figure 1.20 – Représentation du phénomène d'absorption d'une OEM

Pour un obstacle métallique, en première approximation, l'onde EM est directement réfléchie. Cela n'est pas tout à fait vrai car en réalité, l'onde pénètre légèrement dans le métal. Ceci est caractérisé par l'épaisseur de peau δ, définissant l'épaisseur de la zone en surface du conducteur où se concentre le courant. Comme le montre l'équation 1.4, δ dépend des propriétés de l'onde et du métal.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma \mu \pi f}} \tag{1.4}$$

Avec σ la conductivité du matériau (S.m^{-1}), μ sa perméabilité (H.m^{-1}) et f la fréquence de l'OEM.

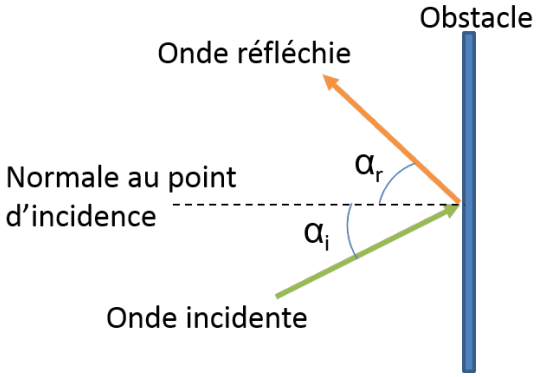


Figure 1.21 – Représentation du phénomène de réflexion d'une OEM

1.4.2 Définitions des principaux phénomènes physiques influant sur la qualité de la communication en espace libre

Tag en mouvement dans le référentiel lecteur :

Dans le référentiel lecteur, le cas du tag en mouvement est fréquent. Par exemple dans le cas d'un portique RFID, d'un suivi de production sur tapis roulant ou d'une lecture à la volée à l'aide d'un lecteur portable (hand held). La lecture en mouvement peut poser le problème de l'alimentation du tag durant tout le processus de communication, que ce soit pour une lecture, une écriture voir même une simple identification. Le transpondeur doit être alimenté sans interruption durant toute la période que prend l'échange. Si tel n'est pas le cas, la communication devra reprendre depuis depuis l'étape initiale. La Table 1.4 est issu de l'ouvrage de Dominique Paret [Par08]. Elle permet d'avoir un ordre d'idée sur le temps approximatif pour effectuer une commande.

Cette information sur le temps que prend une commande donne un aperçu sur temps d'alimentation nécessaire pour un seul tag. L'histoire est tout autre quand plusieurs tags sont présents dans le champ du lecteur. Il faudra alors tenir compte du temps de gestion des collisions qui augmenteront de manière non négligeable la période d'échange entre le lecteur et chacun des tags.

L'effet Doppler-Fizeau est un phénomène qui survient quand le récepteur est en mouvement par rapport au référentiel de l'émetteur. Quand le tag se rapproche du lecteur, la fréquence qu'il percevra sera plus élevée. Au contraire quand le récepteur

Table 1.4 – Exemple des temps nécessaire pour différents types de transactions

Fonctions	Temps nécessaire (ms)
Reset	5
Réponse à une requête et séquence de gestion de collisions	3
Sélection	2
Authentification	2
Lecture de 16 octets	2,5
Écriture de 16 octets + relecture de contrôle	9
Total	25

s'éloigne du lecteur, la fréquence sera moins élevée que celle émise réellement par le lecteur. Ce problème est moins critique au niveau du lecteur qui possède une bande passante et une sensibilité largement supérieure à celle du tag.

Des chercheurs ont utilisé ce phénomène pour déterminer la position de tags dans un environnement clos [TBH15]. L'effet Doppler-Fizeau pourrait servir à déterminer les bouteilles qui se trouvent effectivement dans le camion et ne pas comptabiliser d'autres se trouvant dans le champ des antennes du lecteur.

Interférences constructives ou destructives :

Le phénomène d'interférence résulte de la superposition d'une onde réfléchie et de l'onde directe (et/ou d'autres ondes réfléchies). En RFID UHF, c'est la principale cause de destruction du signal au niveau de l'antenne réceptrice. La combinaison de répliques du signal émis aux trajets multiples sont à l'origine de ce que l'on appelle l'évanouissement par trajets multiples (multi-path fading en anglais) [Dio13]. La combinaison créée par la superposition de plusieurs signaux aux trajets multiples peut être de deux sortes :

— constructive, ses conséquences sont bénéfiques pour la communication. Comme le montre la Figure 1.22, elle améliore la qualité du signal et sa portée en augmentant son amplitude.

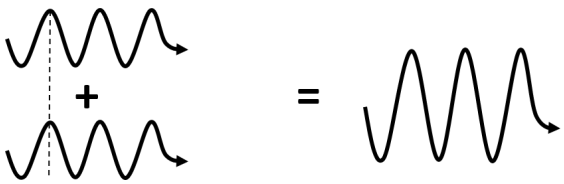


Figure 1.22 – Interférence constructive

— destructive, le signal sera alors perturbé. Le cas extrême, que nous pouvons voir sur la Figure 1.23, est l'annulation du signal à point spatial donné. Cela a pour conséquence l'apparition de "trous noirs EM", au niveau desquels le tag ne sera pas vu par le lecteur dont il ne recevra alors plus les requêtes et l'énergie nécessaire à son fonctionnement.

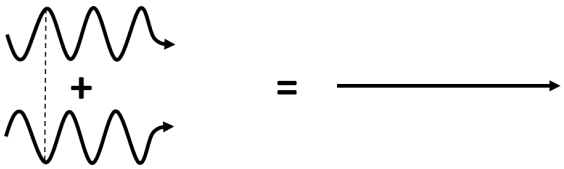


Figure 1.23 – Interférence destructive

Plus il y aura d'obstacles réflecteurs, par exemples les bouteilles et paniers métalliques, plus il y aura des risques d'interférences.

1.5 Mise en évidence des perturbations dues à la présence du métal sur le fonctionnement de l'antenne

Un milieu métallique, comme celui que nous pouvons voir dans la Figure 1.24, est considéré comme fortement perturbateur pour une communication RF. Son influence est importante tant au niveau de la communication, principalement à travers le phénomène de réflexion, qu'au niveau des caractéristiques du tag UHF et plus précisément sur le comportement de l'antenne.

Concernant l'effet de l'objet métallique sur lequel est disposé le transpondeur, nous pouvons l'expliquer à l'aide de la théorie des images. L'image de l'antenne du tag est par définition un objet virtuel symétrique par rapport au métal, comme cela est expliqué dans l'article de Bjorninen [BSURS14] dont est extrait la Figure 1.25.

L'auteur présente les résultats de la modélisation de ce phénomène qui montrent bien une forme identique à celle de l'antenne, en terme de densité de courant, au niveau de l'objet métallique sur lequel est montée l'antenne. Nous pouvons observer que la densité de courant est quasi similaire (au niveau de l'antenne et de son image virtuelle sur la surface conductrice). En revanche les directions des courants induits sur chacune des surfaces sont opposées. L'onde réfléchie au niveau du métal sera, en atteignant le niveau de l'antenne, pratiquement en opposition de phase par rapport à l'onde incidente. Cela entrainera une interférence destructive au niveau de l'antenne

Figure 1.24 – Environnements industriels métalliques

du tag. La sensibilité et le rendement de l'antenne seront alors moins importants. Son efficacité de rayonnement (ou de re-rayonnement) sera fortement réduite.

Mise en évidence de l'effet du métal sur le fonctionnement de l'antenne :

Nous avons réalisé une première série de simulations afin de mieux appréhender l'effet néfaste que peut avoir un environnement métallique sur une antenne. La Figure 1.26 met en avant les perturbations dues à la présence du métal sur le fonctionnement d'une simple antenne dipôle. Le coefficient de réflexion (S_{11}) nous montre clairement l'effet perturbateur du plan conducteur proche de l'antenne. La distance entre le plan conducteur et l'antenne influe sur la valeur d'impédance que présente l'antenne au générateur (ou à la charge en réception). Cette variation d'impédance entrainera une dégradation du rendement de l'antenne, comme cela est présenté en Annexe A à travers le calcul du coefficient de transmission.

Une autre série de simulations a été effectuée dans le but de mettre en évidence l'influence de la variation de la distance entre l'antenne et le plan conducteur sur la

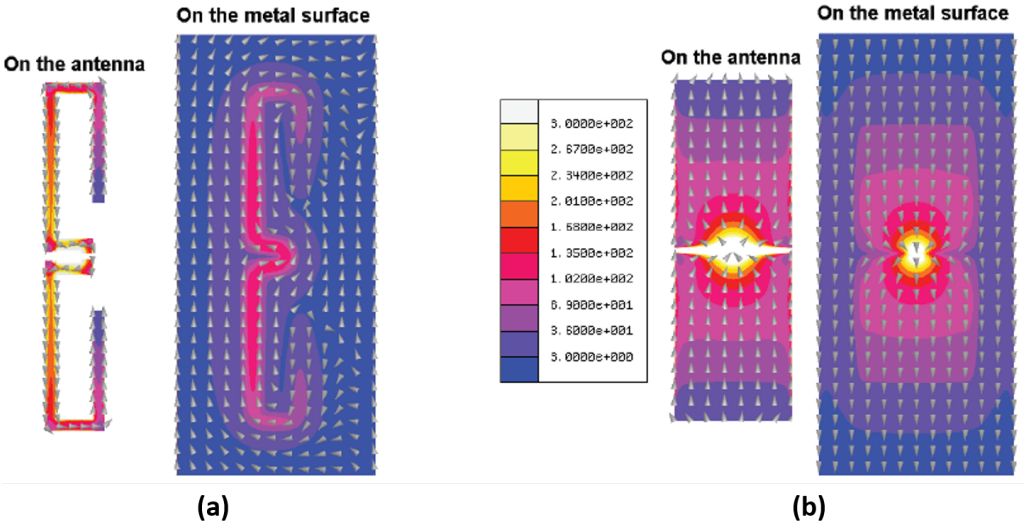


Figure 1.25 – Densité de courant surfacique (en $A.m^{-1}$) au niveau de l'antenne et du plan métallique à 1,5 mm en dessous pour (a) une antenne dipôle à adaptation de type T-match et (b) une antenne dipôle quart d'onde

largeur de la bande passante à -10 dB du paramètre S_{11}. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.5. Ces simulations ont été réalisées sur une antenne dipôle adaptée à la puce Monza5 de Impinj et un substrat de permittivité relative égale à 2,5. Pour les différentes distances, l'antenne à été réadaptée à l'impédance de la puce.

Table 1.5 – Largeur de la bande passante en fonction de la distance de l'antenne au plan métallique

Epaisseur du Substrat	1 cm	2 cm	2,5 cm	3 cm	3,5 cm	4 cm	5 cm
Bande Passante (MHz)	5	19	25	39	54	74	140

De ces deux premières séries de simulations, nous pouvons constater l'effet que peut avoir l'environnement métallique sur le fonctionnement d'une antenne et donc l'importance d'en tenir compte dans la conception de notre solution.

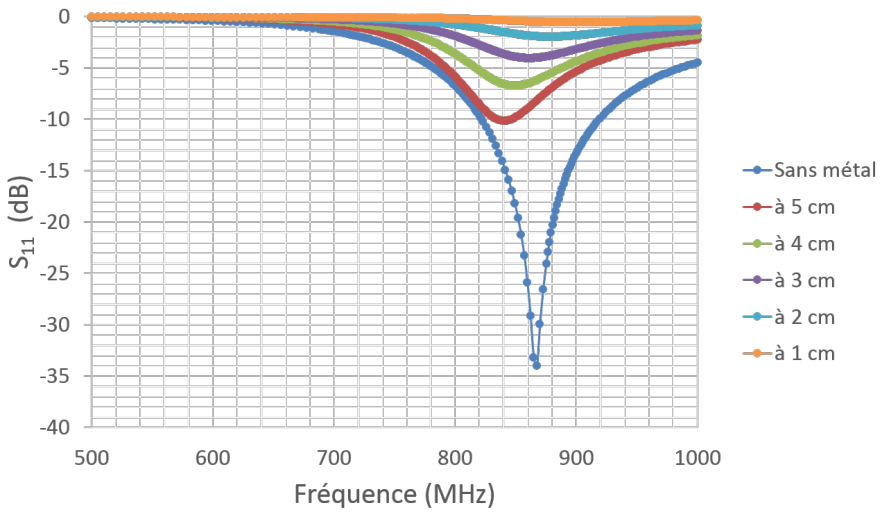


Figure 1.26 – Mise en évidence de l'effet parasite d'un plan conducteur présent dans l'environnement proche d'une antenne sur ses performances

1.6 État de l'art des solutions RFID UHF pour objets conducteurs

Nous allons dans cette section voir les différentes solutions RFID UHF adaptées pour le suivi d'objets conducteurs présentes dans la littérature.

L'implémentation d'une solution RFID UHF sur du métal a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, notamment dans le but de trouver une solution afin d'améliorer les performances du système. Plusieurs types d'antenne sont employés comme l'antenne dipôle, l'antenne patch, l'antenne fente ou encore l'antenne PIFA (Plannar Inverted F-Antenna) [BSURS14].

Dans certains articles [KA09, RLN08, FRI+16, MSD09], c'est l'antenne dipôle qui est choisie pour équiper le tag. Les techniques de miniaturisation et d'adaptation d'impédance sont bien maitrisées. Elle possède aussi comme autre avantage d'être quasi-omnidirectionnelle. L'antenne analogue à la dipôle est l'antenne fente. Elle présente les mêmes caractéristiques en terme de diagramme de rayonnement, mais avec une inversion des directions des champs E et H. Elle sera cependant moins sensible aux effets du plan conducteur. Comme sa surface est majoritairement conductrice, elle sera en elle même un obstacle aux ondes EM incidentes, qui ne pourront atteindre le plan métallique inférieur. Le courant induit à la surface de celui-ci sera bien inférieur comparé à celui induit avec une antenne dipôle. Autre élément, l'antenne fente est naturellement d'impédance inductive [Mar08], ce qui facilite l'adaptation

à l'impédance aux puces RFID UHF qui sont fortement capacitives.

Soit une antenne fente duale d'une antenne dipôle. Leurs impédance respectives Z_{fente} et $Z_{dipôle}$ sont reliées par l'égalité suivante :

$$Z_{fente} = \frac{\eta^2}{4Z_{dipôle}} \tag{1.5}$$

Avec η l'impédance caractéristique de l'air.

1.6.1 Influence du substrat sur le fonctionnement de l'antenne dipôle

L'article de R. Kanan [KA09] met en évidence l'effet de l'épaisseur h et de la permittivité ϵ_r du substrat sur l'impédance de l'antenne ainsi que sur la puissance reçue. Concernant l'évolution de l'impédance Z_a de l'antenne en fonction de la permittivité relative ϵ_r et de l'épaisseur h du substrat, l'auteur présente les résultats suivants :

— lorsque ϵ_r augmente, Re(Z_a) diminue et Im(Z_a) augmente.

— lorsque h augmente, Re(Z_a) diminue et Im(Z_a) augmente.

Les Figures 1.27 et 1.28 présentent cette influence de la permittivité et de l'épaisseur du substrat sur l'impédance de l'antenne. Les paramètres ϵ_r et h ont également un effet sur la fréquence de résonance comme le montrent les Figure 1.29 et 1.30.

Les résulats présents dans l'article de K. H. Lin [LCM13], nous indiquent qu'un substrat de forte permittivité permet de réduire les interférences entre l'antenne et l'objet conducteur. En UHF, un substrat de constante diélectrique élevée a pour effet de réduire les radiations parasites telles que les ondes de surface. Ceci aura également tendance à concentrer les lignes de champ à l'intérieur du substrat. De ce fait, ces paramètres auront également une forte influence sur le gain ainsi que la directivité de l'antenne [GDHK06b].

1.6.2 Emploi de matériaux EBG au niveau du substrat

L'objectif de l'emploi de ce type de méta-matériau en tant que substrat est de créer un bande interdite pour ne pas susciter de réflexion au niveau du métal. Des travaux sur l'emploi de matériaux RF absorbants mettent en avant une amélioration des performances du tag. Les matériaux de type EBG, pour Electromagnetic Band Gap, atténuent les ondes qui la traversent pour une bande de fréquence précise. La Figure 1.31 représente un matériau EBG à deux niveaux. Il est composé de deux

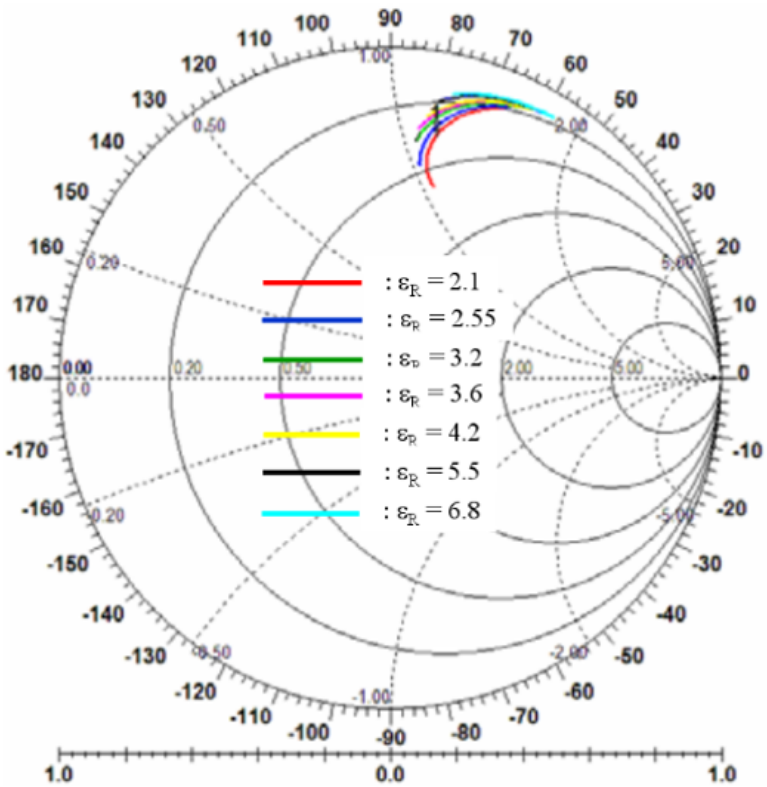


Figure 1.27 – Variation de l'impédance de l'antenne en fonction de la permittivité du substrat [KA09]

réseaux de pavés avec les caractéristiques géométriques étudiées afin de présenter une impédance infinie pour une certaine gamme de fréquence.

Leur principe de fonctionnement est le suivant : pour une onde électromagnétique incidente à la surface du plan EBG, l'impédance Z du matériau en fonction de la fréquence est donnée par la formule 1.6 [GY11].

$$Z = \frac{j2\pi f L}{1 - (2\pi f)^2 LC} \tag{1.6}$$

L et C représentent respectivement l'inductance et la capacité du méta-matériau. Ils dépendent des paramètres géométriques. Par exemple, en augmentant la surface des pavés, on augmente la valeur de capacité. Si la fréquence f de l'onde incidente est égale à $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, alors l'impédance est infinie. La bande de fréquence interdite est de ce fait ajustée en jouant sur les valeurs de C et L.
Le principal inconvénient de ces absorbants est probablement leur coût, il n'est actuellement pas envisageable d'y avoir recours pour équiper nos tags. De plus, leur efficacité n'est pas garantie pour une utilisation sur une surface courbée.

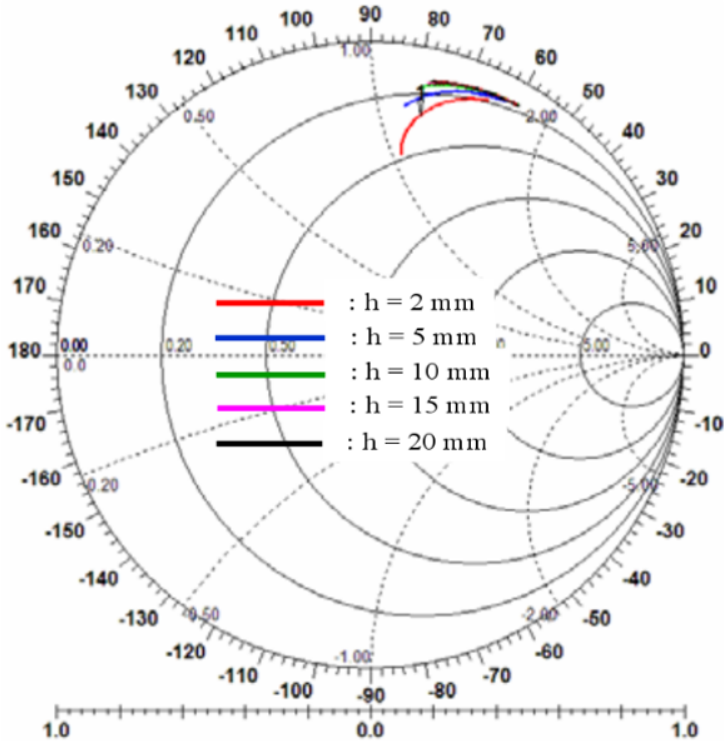


Figure 1.28 – Variation de l'impédance de l'antenne en fonction de l'épaisseur du substrat [KA09]

1.6.3 Utilisation d'un plan de masse

Le recours à un plan de masse pourrait être une solution afin de s'affranchir des problèmes que pose l'objet métallique sur lequel est disposé le tag. Par exemple, l'antenne patch est une antenne disposant de son propre plan de masse qui l'isole de l'objet conducteur sur lequel elle se trouve. L'influence de celui-ci sur son fonctionnement est de ce fait fortement réduit. L'antenne PIFA dispose également d'un plan de masse [CT10]. Cette antenne présente de bonnes performances même sur objets conducteurs. Mais du fait de la présence de vias dans son design, son coût de production est moins intéressant que les autres types d'antenne [BSURS14].

Le plan de masse au niveau du tag permet également de mieux maitriser le niveau d'efficacité de l'antenne du transpondeur. Dans notre cas, pour des raisons de respect de règles de sécurité strictes, il n'est pas envisageable de fixer le tag sur la bouteille métallique. La solution la plus simple est d'utiliser un élément de fixation de type serflex autour du col de la bouteille comme le montre la Figure 1.32. Cette solution présente comme inconvénient de ne pas garantir la fixation ferme du tag contre la bouteille et de ce fait la distance entre l'antenne et la bouteille métallique.

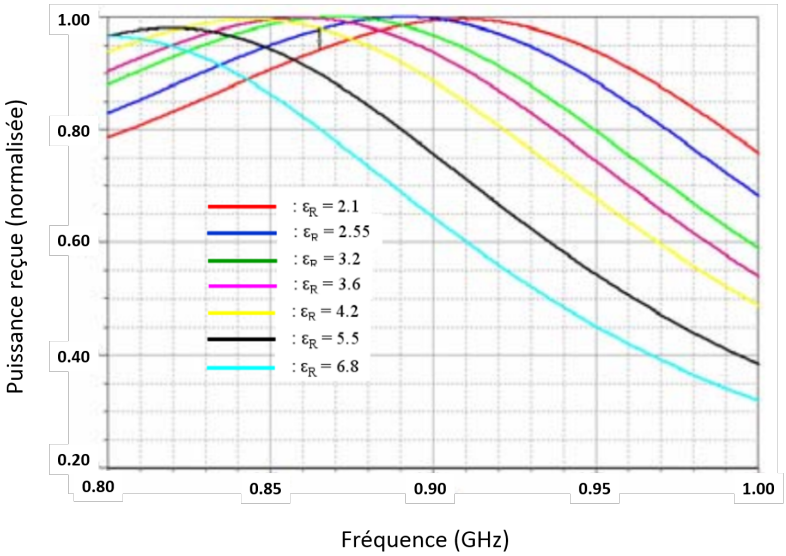


Figure 1.29 – Effet de la permittivité du substrat sur la fréquence de travail de l'antenne [KA09]

Il est nécessaire d'intégrer directement dans le tag un plan de masse. Cela permettra de s'affranchir du problème de variation de l'impédance que présente l'antenne à la puce et qui est dépendante de la distance au métal [RSU+03], comme nous l'avons présenté plus haut dans ce chapitre (1.5).

Dans le Tableau 1.6, nous présentons quelques solutions d'antenne RFID UHF pour objets métalliques ainsi que leurs performances.

1.6.4 Autres points d'amélioration possibles

Il est évident que pour améliorer les performances de communication, c'est principalement le tag qu'il faut chercher à optimiser. Cependant d'autres éléments du dispositif peuvent également être optimisés. Afin d'éviter les conséquences des interférences destructives ou de trous noirs EM, il peut être intéressant d'utiliser plusieurs antennes lecteurs. Dans le cas du portique RFID, cela éliminera les zones de trous noirs électromagnétiques causés par les interférences destructives. De plus, dans le cas où les tags sont disposés de manière aléatoire, nous augmenterons les chances de lecture en éliminant la problématique d'écart de polarisation. Idéalement les antennes seront connectées à un même lecteur, qui gérera leur synchronisation.

Tout en respectant les dimensions et la géométrie autorisées selon l'application, l'augmentation de la taille de l'antenne du tag peut être une solution. Cela améliorera ses performances de récupération d'énergie et de re-rayonnement.

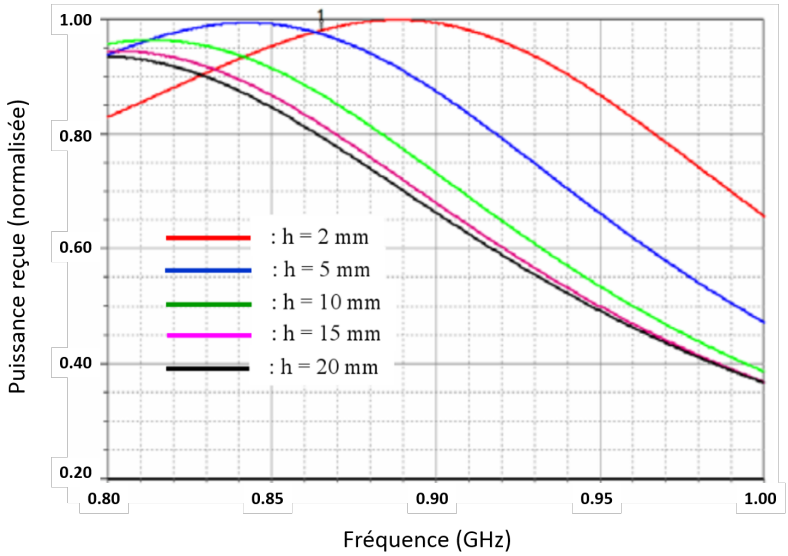


Figure 1.30 – Effet de l'épaisseur du substrat sur la fréquence de travail de l'antenne [KA09]

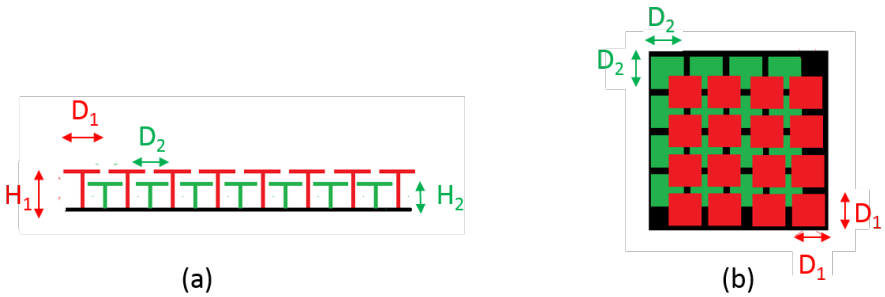


Figure 1.31 – Représentation d'un méta-matériau de type EBG à deux niveaux. (a) vue de coupe, (b) vue du dessus

L'autre solution est l'étalement spectral par saut de fréquence (FHSS pour Frequency Hopping Spreading Spectrum). Grâce à l'utilisation successive pseudo aléatoire de plusieurs canaux de la bande de fréquence, cette méthode permet de réduire de manière importante le taux d'interférence destructive. Mais celle-ci est assez compliquée à mettre en place en Europe en raison des régulations [Par08].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps défini les principes de base de la communication en RFID UHF et présenté les éléments qui la composent (lecteur et tag) et leurs caractéristiques fondamentales. Nous avons ensuite mis en avant

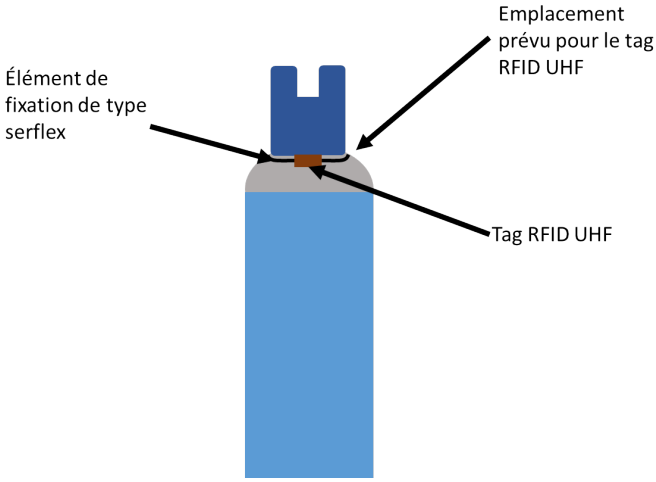


Figure 1.32 – Schéma simplifié d'une bouteille de gaz avec emplacement du tag RFID UHF au niveau du col

les effets de l'environnement sur la propagation d'ondes EM ainsi que l'influence des objets conducteurs sur le comportement des tags qui les équipent. L'état de l'art des solutions RFID UHF sur du métal a permis d'avoir une idée sur ce qui serait le plus efficace dans ce genre de configuration. Au vu des résultats sur l'effet du plan métallique sur le fonctionnement de l'antenne, il est nécessaire d'intégrer au tag un plan de masse afin d'éviter toute désadaptation provoquée par la variation de la distance entre le tag et l'objet conducteur sur lequel il se trouve.

Cependant, avant de conclure ce chapitre, il est intéressant de préciser que l'objet conducteur peut devenir un atout si son effet sur le fonctionnement du tag est maitrisé. La réflexion peut être un avantage car elle augmente le gain et la directivité de l'antenne, à partir du moment où elle est prise en compte dès la conception de l'antenne. En réalité la clé pour développer une solution efficiente, c'est la maitrise et la prise en compte du mieux que possible de l'environnement dès les premières étapes de conception.

Nous allons dans le chapitre suivant introduire la partie logicielle de la RFID UHF avec une présentation du protocole de communication standard EPC Class 1 Generation 2 (EPC Gen2) et plus particulièrement son algorithme anti-collision. L'optimisation de la solution RFID UHF passe également par la maitrise du protocole de communication et de son algorithme anti-collision.

Table 1.6 – Comparatif des performances de tag sur objets métalliques présent dans l'état de l'art

	Type d'antenne	Dimensions	Distance de lecture	Puissance du lecteur (EIRP)	Substrat
Kannen [KA09]	Dipôle	155x35 mm	8,68 m	3,28 W	h=8,55 mm ϵ_r=1,03
Gao [GY11]	Dipôle	82x22 mm	7 m	4 W	h=4,8 mm ϵ_r=4,4
Rao [RLN08]	Patch	62x62 mm	7 m	4 W	h=6 mm ϵ_r=2,5
Bjorninen [BDU+11]	Patch	131x68 mm	25 m (en théorie)	4 W	h=3,75 mm ϵ_r=2,2
Lai [LLT10]	Patch	85x73 mm	6,4 m	4 W	h=1,6 mm ϵ_r=4,4
He [HZ13]	Patch	125,54x24 mm	2,8 m	0,5 W	h=2 mm ϵ_r=4,6

Chapitre 2

Etude du protocole de communication de la RFID UHF : EPC class 1 Generation 2

Sommaire

2.1 Introduction **44**

2.2 Mécanismes généraux d'EPC Gen2 . . . . . **44**

2.2.1 Les couches physique et liaison de données 44

2.2.2 Commandes, espaces mémoires et états du tag 48

2.2.3 Paramétrage et performances 51

2.2.4 Vérification de l'intégrité du message 52

2.2.5 Les différents types de collisions 53

2.3 Algorithmes anti-collision **54**

2.3.1 Algorithme d'identification à l'aide de la méthode de parcours arborescent 56

2.3.2 Protocole ALOHA 57

2.4 L'anti-collision d'EPC Gen.2 : Q-algorithm **61**

2.5 Validation du recours au portique RFID UHF pour le traçage des bouteilles métalliques **64**

2.5.1 Tests sur panier homogène 65

2.5.2 Tests sur panier hétérogène 67

2.6 Conclusion **70**

2.1 Introduction

EPC global Class 1 Generation 2 (EPC Gen2)[noa14] est un protocole de communication RFID UHF pour tag passif standardisé à l'échelle internationale. Il définit et harmonise l'ensemble des paramètres clés aussi bien physiques (modulation, puissance d'émission, etc) que logiques (débit binaire, chiffrement, etc). Il définit également les différentes commandes du lecteur au tag, comme la commande d'inventaire qui est définie comme le processus d'estimation du nombre de tags présents dans le champ du lecteur.

Pour l'optimisation de la solution de logistique RFID UHF, il est primordial de mettre en place des paramètres de communication permettant de s'affranchir au mieux des perturbations dues à l'environnement métallique. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les cas d'interférences et d'évanouissement par trajets multiples étaient plus importants dans ce genre de milieu. De ce fait, l'étude du protocole de communication est un point essentiel afin de déterminer ses paramètres optimaux dans le cadre de l'uilisation d'une solution RFID UHF en environnement métallique. La maîtrise de son fonctionnement nous permettra par la suite de l'optimiser en fonction de notre cas d'usage. La première section de ce chapitre présente les notions essentielles à la compréhension du fonctionnement du protocole standard de la RFID UHF, EPC Gen2. Dans la seconde section, nous exposerons les principales techniques de gestion des collisions. Nous nous attarderons plus particulièrement sur la technique temporelle Aloha, en partant de l'algorithme de base pour arriver à celui utilisé dans l'EPC Gen2, le Q-algorithm. Pour finir, nous présenterons les résultats expérimentaux d'opérations d'inventaire réalisées à l'aide d'un portique RFID UHF monté dans le cadre de ce projet doctoral.

2.2 Mécanismes généraux d'EPC Gen2

2.2.1 Les couches physique et liaison de données

Au niveau des couches physique et liaison de données du modèle OSI (acronyme anglais de *Open System Interconnection*), la communication entre le lecteur et le tag (L $\leftrightarrow$ T) se fait à l'aide des règles de modulation et de codage de l'information présentées ci-dessous.

Concernant la communication du lecteur vers le tag (L → T), trois types de modulation sont possibles [noa14]

— DSB-ASK pour Double Side Band Amplitude Shift Keying ;

— SSB-ASK pour Single Side Band Amplitude Shift Keying ;

— PR-ASK pour Phase Reversal Amplitude Shift Keying.

Celles-ci sont présentées dans les Figures 2.1 et 2.2.

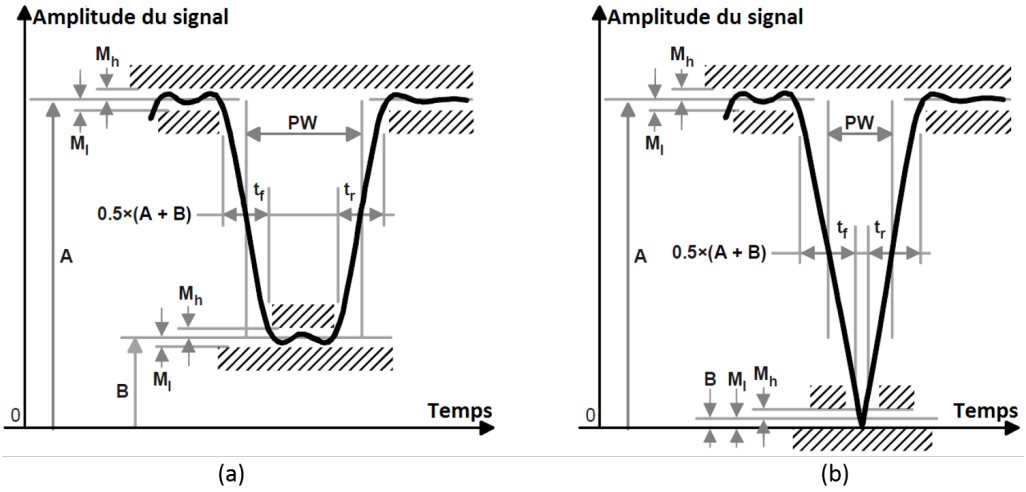


Figure 2.1 – Enveloppe RF de la modulation ASK en (a) et PR-ASK en (b) utilisées dans une communication L → T

Avec $\frac{A-B}{A}$ l'amplitude de modulation, M_h+M_i l'amplitude de modulation maximale tolérée afin de respecter l'enveloppe. t_r et t_f représentent respectivement le temps de montée de 10% à 90% et de descente de 90% à 10% du signal et PW la largeur d'impulsion

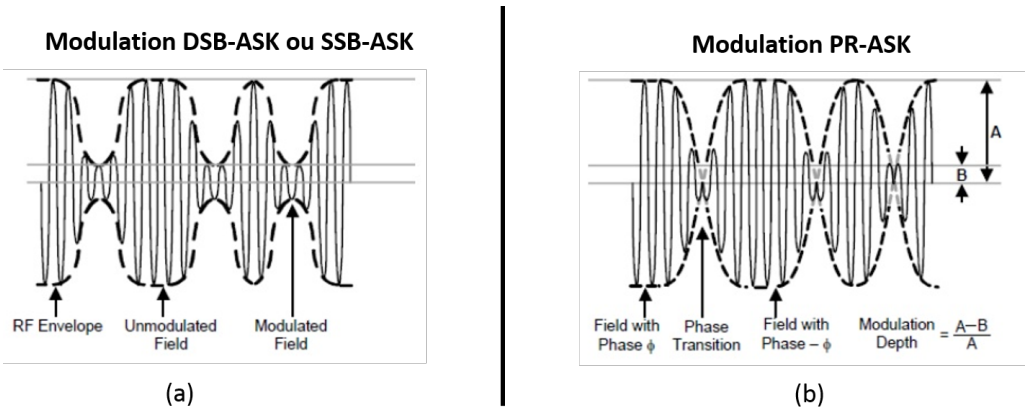


Figure 2.2 – (a) Modulation DSB-ASK ou SSB-ASK et (b) PR-ASK dans le temps

La communication des données du lecteur vers le tag utilise le codage *PIE* (*Pulse Interval Encoding*), présenté dans la figure 2.3 [Par08], qui est construit autour d'un temps élémentaire de référence *TARI* (*Type A Reference Interval*) compris entre 6,25 µs et 25 µs. Comme le montre la Figure 2.3, sa valeur définit le 0-logique dans le code binaire.

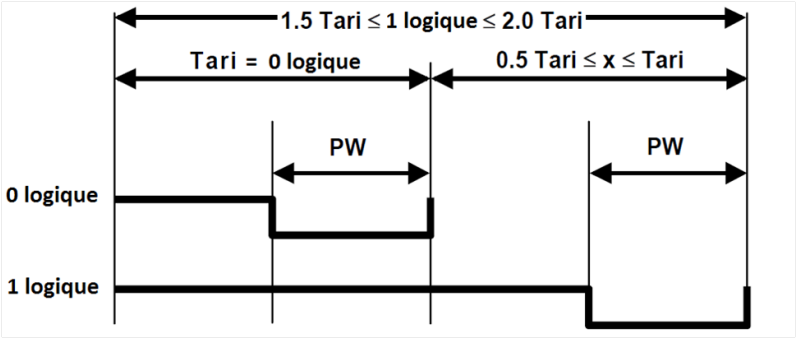


Figure 2.3 – Principe de fonctionnement du codage *PIE*

En ce qui concerne la communication tag vers lecteur (T → L), celle-ci se fait par rétro-modulation. De fait, la puce n'intègre pas d'oscillateur commandé en tension lui permettant de générer une porteuse. Il y a deux types de modulation possibles :

— ASK Amplitude Shift Keying ;

— PSK Phase Shift Keying.

Le type de codage de la porteuse FM0 ou Miller de la sous porteuse est imposé par le lecteur dans un préambule. La Figure 2.4 expose le principe de fonctionnement du codage FM0. De même, la Figure 2.5 celui du codage Miller.

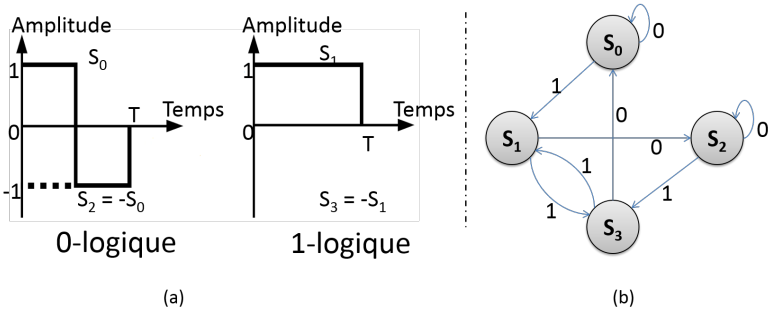


Figure 2.4 – Principe de fonctionnement du codage FM0 : en (a) la fonction et en (b) le diagramme d'état

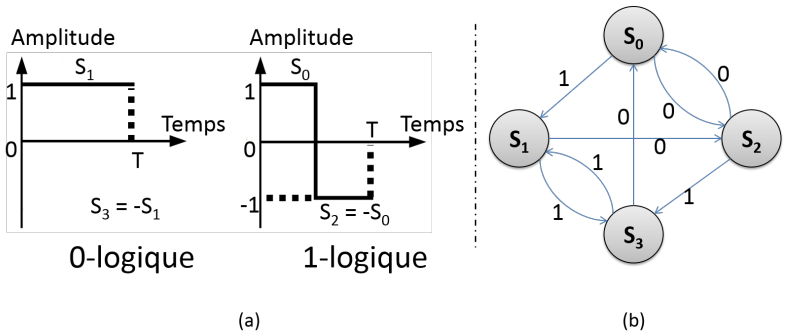


Figure 2.5 – Principe de fonctionnement du codage Miller : en (a) la fonction et en (b) le diagramme d'état

La communication entre le lecteur et le tag est une communication half-duplex et ne doit être en aucun cas full-duplex. C'est à dire que la communication ne peut se faire dans les deux sens de manière simultanée. Lorsque le lecteur émet, le tag attend la fin de la requête pour répondre. Il en va de même pour le lecteur lorsque le tag émet (note : le lecteur continue à diffuser la porteuse qui est rétro-modulée par le tag).

Pour que la communication se passe dans les meilleures conditions, il est nécessaire de synchroniser l'émetteur et le récepteur. Pour cela, en se basant sur le temps de référence, le lecteur indique les paramètres de synchronisation pour que le tag puisse décoder ses messages. Il impose également les paramètres de communication que le transpondeur doit respecter afin qu'il soit en mesure d'interpréter les réponses. Pour ce faire, deux types de messages contenant ces informations, présentés dans la figure 2.6, sont envoyés par le lecteur : le préambule ou la trame de synchronisation.

La commande d'inventaire[1] doit forcement être initiée par un préambule. Pour les autres commandes, le lecteur commence toujours par une trame de synchronisation.

Le préambule est composé :

- d'un *delimiter* d'une longueur fixée ;
- d'un symbole *data-0* ;
- d'un symbole *RTcal* (Interrogator-to-Tag calibration symbol), définit comme $RTcal = L_0 + L_1$ où L_0 et L_1 sont respectivement les longueurs des symboles binaires 0-logique et 1-logique ;

1. Pour la description des commandes émises par le lecteur à destination du tag, voir 2.2.2.

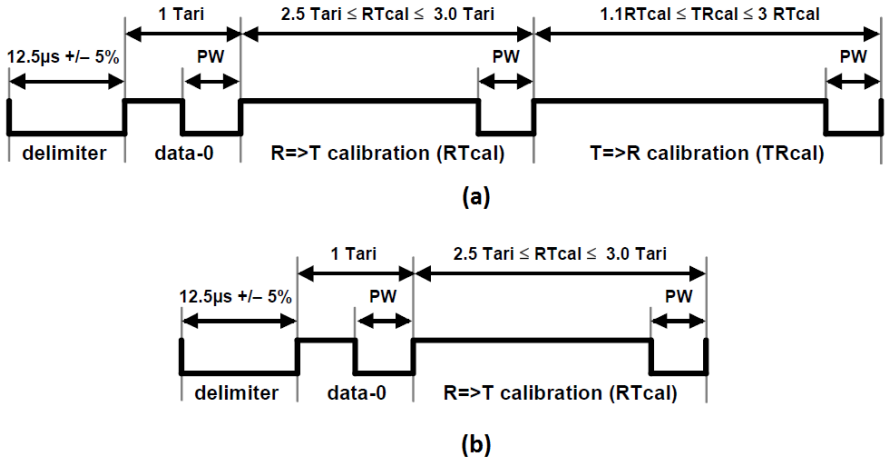


Figure 2.6 – (a) trame préambule et (b) trame de synchronisation

— d'un symbole *TRcal* (Tag-to-Interrogator calibration symbol), tel que $1{,}1.RTcal \leq TRcal \leq 3.RTcal$

De la longueur du *RTcal*, le tag va calculer un pivot :

$$pivot = \frac{RTcal}{2} \tag{2.1}$$

Les symboles plus courts que le pivot seront interprétés comme des 0-logiques et les autres comme des 1-logiques. Le lecteur va également spécifier au tag sa fréquence de travail pour la rétro-modulation *BLF* (acronyme anglais de Backscatter Link Frequency).

$$BLF = \frac{DR}{TRcal} \tag{2.2}$$

Avec *DR* (Divide Ratio) imposé par le lecteur lors de l'initialisation de la phase d'inventaire par la commande *Query* et pouvant prendre deux valeurs (8 ou $\frac{64}{3}$). Le tag va mesurer la longueur de *TRcal* pour ajuster sa fréquence de travail afin que celle-ci corresponde à la valeur de *BLF* calculée.

Une trame de synchronisation est identique à un préambule à ceci près qu'il n'y a pas de symbole *TRcal*.

2.2.2 Commandes, espaces mémoires et états du tag

Les types de commandes :

Il existe trois différents groupes de commandes du lecteur vers les tags qui sont :

— ***Inventory***, pour l'inventaire. Il est composé de la commande *Query* qui ini-

tie un inventaire, de *QueryAdjust* et de *QueryRep* qui permettent une gestion dynamique des collisions lors du processus d'identification des tags présents dans le champ du lecteur. Ces commandes font partie de l'algorithme de gestion des collisions du protocole. Des détails sur son principe de fonctionnement seront donnés lors de la présentation de l'algorithme anti-collision d'EPC Gen2, le Q-algorithm.

— ***Select***, permet de sélectionner une sous catégorie de tag selon des critères définis afin de les inventorier ou d'y accéder.

— ***Access***, ce groupe de commande est celui qui permet d'accéder au tag, notamment à ses différentes mémoires accessibles. Les commandes de type *Access* permettent d'écrire en mémoire, de lire son contenu mais également de désactiver ou de verrouiller le tag afin de gérer son accès.

Les espaces mémoires de la puce :
Selon le protocole EPC Gen 2, la puce doit être dotée de 96 bits minimum de mémoire pour contenir le code produit électronique unique (EPC) normalisé.

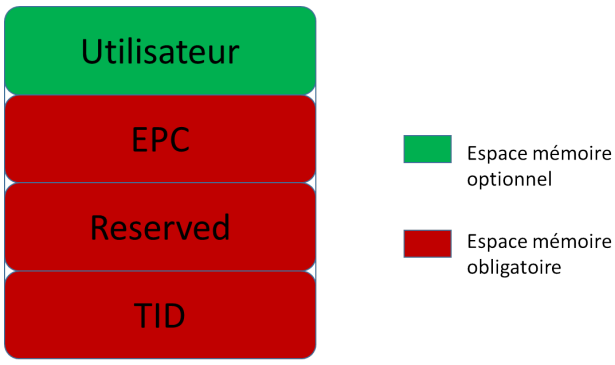


Figure 2.7 – Organisation de la mémoire du tag RFID UHF

Les trois mémoires requises sont :

— ***TID***, pour Tag IDentifier. C'est une mémoire qui est généralement figée, il est donc impossible de modifier l'information contenue. Elle stocke l'identifiant de la puce inscrit par le fondeur au moment de sa production.

— ***EPC*** pour Electronic product code, stocke l'identifiant unique du produit. Afin de respecter le standard EPC Gen2, celle-ci doit avoir une capacité d'au moins 96 bits afin de contenir le code EPC normalisé.

— ***Reserved***, elle est destinée à contrôler l'état et l'accès du tag. Elle permet uniquement de stocker les codes destinés à gérer l'accès en lecture/écriture

dans la mémoire de la puce ou de la désactiver définitivement avec la commande *Kill*.

Une quatrième mémoire optionnelle peut être ajoutée. Il s'agit de la mémoire utilisateur (ou *User memory*). Cette mémoire libre d'accès pour l'utilisateur et réinscriptible donne la possibilité, en plus de l'identification, d'avoir une information supplémentaire sur l'état de l'objet suivi. L'ensemble de l'espace mémoire est visible sur la Figure 2.7.

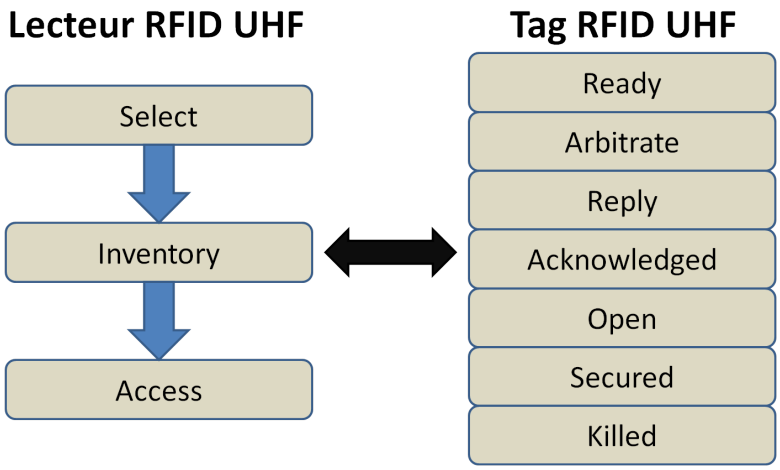


Figure 2.8 – Représentation des différentes commandes du lecteur et des états possibles du tag

Etats du tag :

Les différents états du tag RFID UHF, présentés dans la figure 2.8, sont les suivants :

— ***Ready*** : état dans lequel se met le tag au moment où il reçoit de l'énergie.

— ***Arbitrate*** : état dans lequel se trouve le tag quand il participe à un inventaire. Cet état précède celui de la première réponse.

— ***Reply*** : lorsque vient le tour du tag de répondre, il passe alors dans cet état et entame la première partie de la procédure d'identification en envoyant un nombre aléatoire appelé *RN16* (nombre pseudo aléatoire sur 16 bits). Si le lecteur renvoie le même mot de 16 bits, alors le tag passe à l'état qui suit.

— ***Acknowledged*** : le tag se trouve dans cet état quand la première partie de la phase d'identification a été menée avec succès. La deuxième partie, qui est l'envoi du code unique stocké dans la mémoire *EPC*, se fait quand le tag est dans cet état. Si le lecteur retourne au tag ce même code sans erreur, ce qui a valeur d'*Acknowledge* (*ACK*), alors le tag pourra passer soit à l'état *Open*, soit

à l'état *Secured* directement. Ceci dépendra de la valeur de l'*access password* présent dans l'espace mémoire *Reserved*. Si celui-ci est différent de 0 alors il passera à l'état *Open*, sinon à l'état *Secured*. De l'état *Acknowledged*, le tag peut passer à tout autre état excepté l'état *Killed*. Si l'*ACK* est incorrect, le tag retourne à l'état *Arbitrate*.

— ***Open*** : dans cet état, le tag renvoie un nouveau *RN16* également appelé *handle*, qui sera utilisé pour toute commande de type *Access* par le lecteur. Il devra également être utilisé par le tag pour les réponses au lecteur. De cet état, le tag peut passer à n'importe quel état excepté l'état *Acknowledged*.

— ***Secured*** : état identique à l'*Open* à la différence que celui-ci requiert un code pour y accéder. Dans cet état, le tag renvoie aussi un nouveau *RN16* également appelé *handle*, qui sera utilisé pour toute commande de type *Access* par le lecteur. Il devra également être utilisé par le tag pour les réponses au lecteur. De cet état, le tag peut passer à n'importe quel état excepté l'état *Acknowledged*.

— ***Killed*** : un tag dans l'état *Open* ou *Secured*, doit passer à cet état s'il reçoit du lecteur une commande appelée *password-based kill-command* correcte. Le fait de mettre un tag à l'état *Killed* est irréversible. Il ne pourra plus en ressortir.

Dans l'Annexe B, est présenté le diagramme d'état détaillé d'une puce RFID UHF fonctionnant avec le protocole EPC Gen2.

2.2.3 Paramétrage et performances

Le protocole doit être en mesure d'effectuer un inventaire dans un délai le plus court possible. Le taux de lecture ainsi que la vitesse d'identification sont deux caractéristiques clés d'un dispositif RFID [BCLL09]. Par exemple dans notre cas où un véhicule transportant des bouteilles étiquetées avec des tags RFID UHF passe sous un portique de lecture, le temps de présence des tags dans le champs du lecteur est faible. Dans une configuration classique comme celle que nous présenterons dans la dernière section de ce chapitre et une vitesse de véhicule de 7 $km.h^{-1}$, le temps maximum de lecture du chargement ne doit pas dépasser 2,5 secondes. C'est le rôle de l'algorithme de gestion des collisions d'effectuer les opérations de la manière la plus efficace possible.

Dans [NR09], P.V. Nikitin met en avant l'influence de certains paramètres du protocole de communication. On constate que l'amplitude de modulation n'a aucun effet

sur la qualité de l'échange entre le tag et le lecteur. Il en est de même pour d'autres paramètres comme *RTcal*, *TRcal*, *DR* ou le paramètre M qui spécifie le type de codage (FM0 ou Miller). En revanche, comme le montre l'auteur dans ses travaux, la communication est fortement impactée par des variations du temps référence de l'encodage *TARI* et de la durée d'impulsion.
Dans [JC09], des résultats de simulations mettent en évidence l'impact de l'évanouissement par trajets multiples sur le temps d'inventaire d'une population de tags. Il y est mentionné que le bruit et l'évanouissement par trajet multiples sont deux phénomènes influents sur les temps de lecture. Pour une valeur de rapport signal à bruit (SNR) de 8 dB, le temps d'identification d'une population de 100 tags à une distance de 5 m passe de 9900 ms en trajet direct à 16967 ms dans le cas de trajets multiples, soit une augmentation de 71,4%. Selon Buettner[BW11], nous pouvons considérer que le SNR minimal pour qu'une lecture se fasse sans erreur est de 4 dB.

Au niveau physique, pour améliorer la qualité de la transmission la solution d'étalement de spectre (FHSS), évoquée dans le chapitre précédent, peut être envisagée. Celle-ci est fortement limitée par les régulations propres à chaque région [Par08]. En Amérique du Nord, où les restrictions sont moins contraignantes, cette méthode est largement employée. Du fait qu'en RFID UHF, le tag utilise le principe de rétromodulation pour répondre, le lecteur connait déjà les caractéristiques spectrales des réponses de chaque tag. L'étalement de spectre par saut de fréquence couplé à une répartition temporelle rend le risque de collision quasi nul. Elle permet également de rendre la communication plus robuste face aux bruits présents dans le canal.

2.2.4 Vérification de l'intégrité du message

A plus haut niveau, en RFID UHF, le contrôle de l'intégrité des données se fait à l'aide d'un calcul de *CRC* (*Cyclic Redundancy Check*). Celui-ci est calculé à partir du message à transmettre. La séquence binaire à transmettre est représentée sous forme d'une séquence polynomiale. Pour une trame de n bits, le degré maximal sera n-1. Le bit de poids faible est le degré 0 du polynôme. Sur cette séquence, une division à l'aide d'un générateur polynomial présent dans le lecteur et la mémoire du tag est réalisée. Le résultat appelé *CheckSum* est ajouté au message. Le récepteur procédera à la même opération et comparera son résultat à celui de l'émetteur. Si le résultat est le même, alors le message transmis est correct. Le *CRC* présente

malgré sa simplicité d'implémentation, une grande fiabilité même quand la taille des données est conséquente. Ce qui en fait la procédure d'intégrité des données la plus intéressante comparée aux autres principales méthodes que sont *Vertical Redundancy Check* (*VRC*) et *Longitudinal Redundancy Check* (*LRC*) [CUS10].

2.2.5 Les différents types de collisions

Il existe trois types de collisions possibles [LGV09] :

— le premier concerne l'interférence de deux lecteurs qui se brouillent mutuellement. La solution réside dans la mise en place d'un dispositif multi-antennes, piloté par un lecteur afin de synchroniser leurs temps de fonctionnement. Un dispositif impliquant plusieurs lecteurs pilotés par un unique système de gestion peut également être envisagé. L'essentiel étant la synchronisation des actions afin d'éviter les interférences. Un exemple de ce type d'interférence est donné en Figure 2.9, où l'on peut voir que le Lecteur 1 se trouve dans une zone où il peut être perturbé par le Lecteur 2.

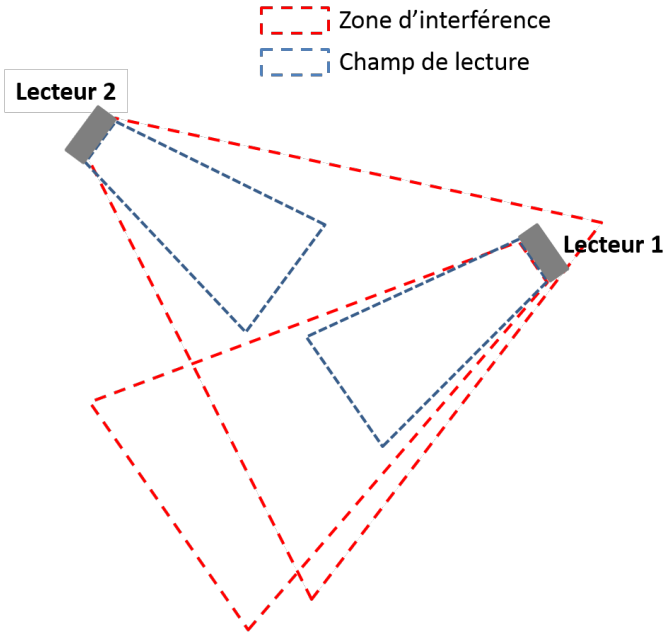


Figure 2.9 – Perturbation du lecteur 1 par le lecteur 2 en raison de la présence du premier dans la zone d'interférence du second

— le deuxième a lieu au niveau du tag, lorsque celui-ci se trouve dans le périmètre d'interrogation de plusieurs lecteurs à la fois, comme le montre la Figure 2.10. Cette interférence entre plusieurs lecteurs opérant sur une même population de tags est résolue pour des tags fonctionnant sous le standard ISO 18000-6

C [AMH08], auquel EPC Gen2 est jugé conforme selon l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO). Ils peuvent être programmés afin d'opérer simultanément sur 4 sessions différentes. Cela permet à plusieurs lecteurs de procéder à un inventaire sur la même population de tags sans interférer sur le cycle d'inventaire des autres. Par exemple, un portique RFID UHF fixe et un lecteur portable pourront être programmés afin que chacun réalise son inventaire sur une session différente. Dans chaque session il existe un drapeau pouvant prendre deux valeurs A ou B. Les deux lecteurs utiliseront chacun une session différente. Le lecteur imposera ensuite au drapeau de la session sur laquelle il travaille une des deux valeurs. Une fois l'identification du tag réalisée avec succès, la valeur du drapeau changera et passera par exemple de A à B s'il était initialisé à A.

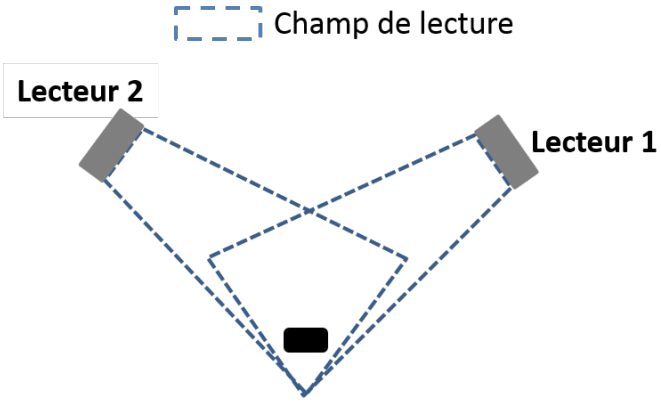


Figure 2.10 – Perturbations mutuelles de deux lecteurs opérant sur une même population de tags

— le dernier type de collision, présenté au niveau de la Figure 2.11, est celui qui se produit le plus en RFID UHF, il s'agit des interférences de tags au niveau du lecteur. Sa méthode de résolution, qui est le sujet de la prochaine partie de ce chapitre, en fait le principal challenge dans l'optimisation du protocole de communication.

2.3 Algorithmes anti-collision

En RFID, l'anti-collision est l'élément essentiel dans le protocole de communication entre le lecteur et le tag. En effet, les lecteurs RFID UHF ne sont pas capables de gérer les cas d'accès multiple et lorsque deux tags (ou plus) cherchent à communiquer en même temps avec le lecteur, il y a collision et donc perte de l'information

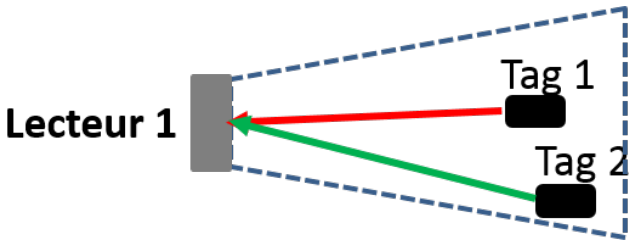


Figure 2.11 – Interférence au niveau du lecteur de deux réponses provenant de deux tags différents

transmise par ces tags [MLS06]. L'une des améliorations apportées par la dernière génération du protocole EPC Gen2 est de gérer les collisions ainsi que les erreurs de transmission, sans avoir recours à une méthode de correction d'erreurs.
Les quatre possibilités de résolution de ce problème sont :

- **spatiale** qui repose sur le simple principe de réduction de la portée des lecteurs en réduisant la puissance ou en intégrant une antenne directive ;
- **fréquentielle** qui consiste à répartir la réponse de chaque tag sur différents canaux fréquentiels ;
- **systématique**. Elle consiste à parcourir l'arbre binaire de tout les identifiants possible ;
- **temporelle** avec une répartition des réponses des tags dans le temps.

Les deux premières solutions ont pour principaux inconvénients d'être compliquées à mettre en place et d'avoir un coût élevé. La solution de traitement systématique a comme désavantage d'être longue dans le cas d'un inventaire sur un nombre important de tags. C'est la quatrième solution qui est employée dans EPC Gen2.
Ces deux protocoles, systématique et temporel, sont employés sous différentes variantes. Dans cette section, nous faisons une présentation du tree-based protocol (parcours d'un arbre de tous les identifiants possibles) qui adopte une approche déterministe. Par la suite sera présentée l'évolution de la méthode de gestion des collisions Aloha, de la version de base, jusqu'à celle employée aujourd'hui dans EPC Gen2. Couplée au CRC, qui permet de s'assurer que le message n'est pas corrompu, elle permet d'assurer l'intégrité de la communication du tag vers le lecteur à travers une approche probabiliste.

2.3.1 Algorithme d'identification à l'aide de la méthode de parcours arborescent

Ce type de protocole anti-collision cherche à résoudre le problème d'accès multiple en désactivant les tags de manière temporaire. Il existe un grand nombre de variantes. Nous présentons donc un exemple de protocole à parcours arborescent, appelé le Query Tree. Le principe de ce protocole anti-collision est assez simple. Il est présenté à travers un exemple d'inventaire dans la figure 2.12.

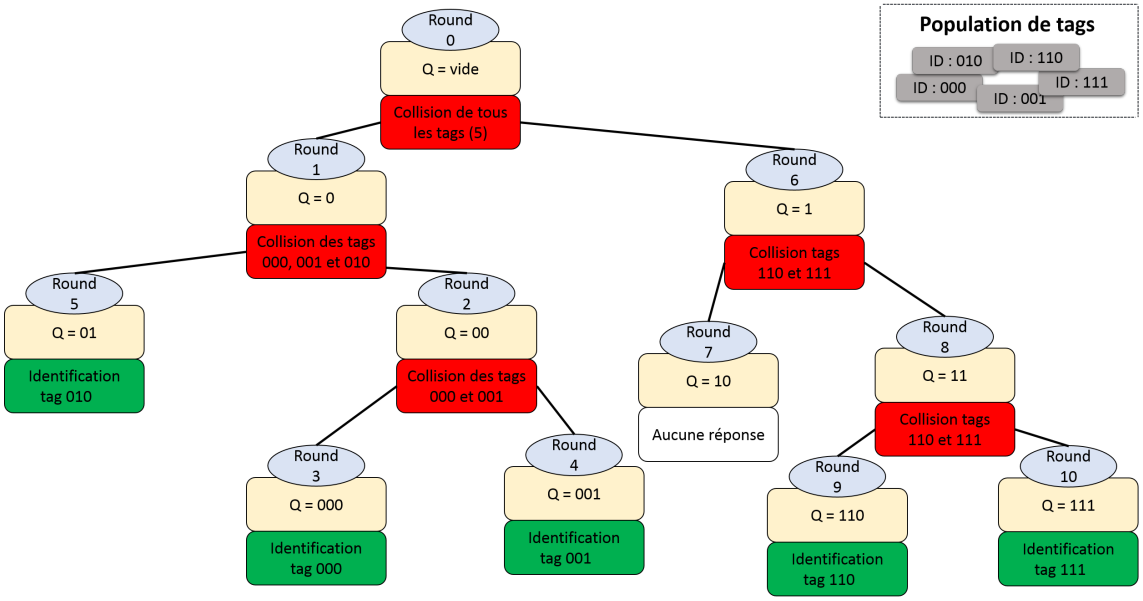


Figure 2.12 – Exemple d'inventaire utilisant le principe de parcours arborescent des identifiant : le Query Tree Protocol

Il s'agit de parcourir par arborescence l'ensemble des identifiants possibles à l'aide d'un compteur Q constitué d'une trame que nous appellerons préfixe car le parcours se fera en commençant par le bit de poids fort. 3 types de réponses sont possibles :

1. Une seule réponse est reçue par le lecteur. Dans ce cas, le tag est identifié. Cette branche ne contient donc plus d'autres tags.
2. aucune réponse. Cela signifie qu'il n'y a plus de tag à identifier sur cette branche, le lecteur change alors la dernière valeur du préfixe.
3. il y a collision, dans ce cas le compteur ajoute une valeur à la fin du préfixe. Une collision signifie qu'il y a au moins deux tags sur cette branche, qui ont dans leurs identifiants ce même préfixe.

Un de ses principaux inconvénients est le temps d'inventaire qui peut devenir trop important dans le cas ou les identifiants seraient longs [DPD14].

2.3.2 Protocole ALOHA

C'est en 1970 que le protocole ALOHA a été développée et mis au point à l'université de Hawaï aux États-Unis [Abr70]. Le principal objectif technique était de réaliser un réseau de communication centralisé sur une même fréquence. Nous présentons dans ce qui suit son principe de fonctionnement.

2.3.2.1 Pure Aloha

Chaque tag alimenté envoie son identifiant (*ID*), si la réponse (*ACK*) du lecteur est correcte, le tag se met en mode *Acknowledged*. Sinon il retourne à l'état *Arbitrary*. Le principal inconvénient de ce protocole est le fait que la probabilité de collision est extrêmement importante de part l'absence de synchronisation entre les différents émetteurs.

Afin d'améliorer les performances en réduisant les risques de collision, voici quelques exemples de modes pouvant être intégrés au Pure Aloha :

— *fast-mode* : quand le lecteur reçoit le début d'une réponse, il envoie une commande aux autres tags afin que ceux-ci n'émettent pas de réponse à ce moment là.

— *muting* : lorsqu'un tag est identifié, le lecteur lui impose de ne plus répondre ;

— *slow down* : Une fois le tag identifié, le lecteur lui envoie la commande *Slow down* afin de diminuer son taux de réponse et de ce fait réduire le nombre de collisions.

Il existe une multitude de variantes à ces modes. Il est également possible de combiner plusieurs modes afin d'améliorer le taux de lecture [KCR10].

2.3.2.2 Slotted Aloha

Les tags envoient leur *ID* dans des fenêtres temporelles définies. Si une collision a lieu dans une fenêtre, alors les tags attendent une période aléatoire et renvoient de nouveau leur *ID* au lecteur. Le nombre de fenêtres reste fixe durant la phase d'inventaire. Les tags répondent dans des fenêtres temporelles synchronisées et de même taille. Selon [Rob72] comparée au pure ALOHA, cette méthode permet de diviser par 2 le risque de collision entre 2 messages. En plus des autres modes du

Pure Aloha, le mode *early-end* peut également être intégré. Dans ce mode, si au début d'une fenêtre temporelle aucune communication n'est détectée, alors le lecteur la fermera avant sa fin pour un gain de temps.

2.3.2.3 Framed slotted Aloha (FSA)

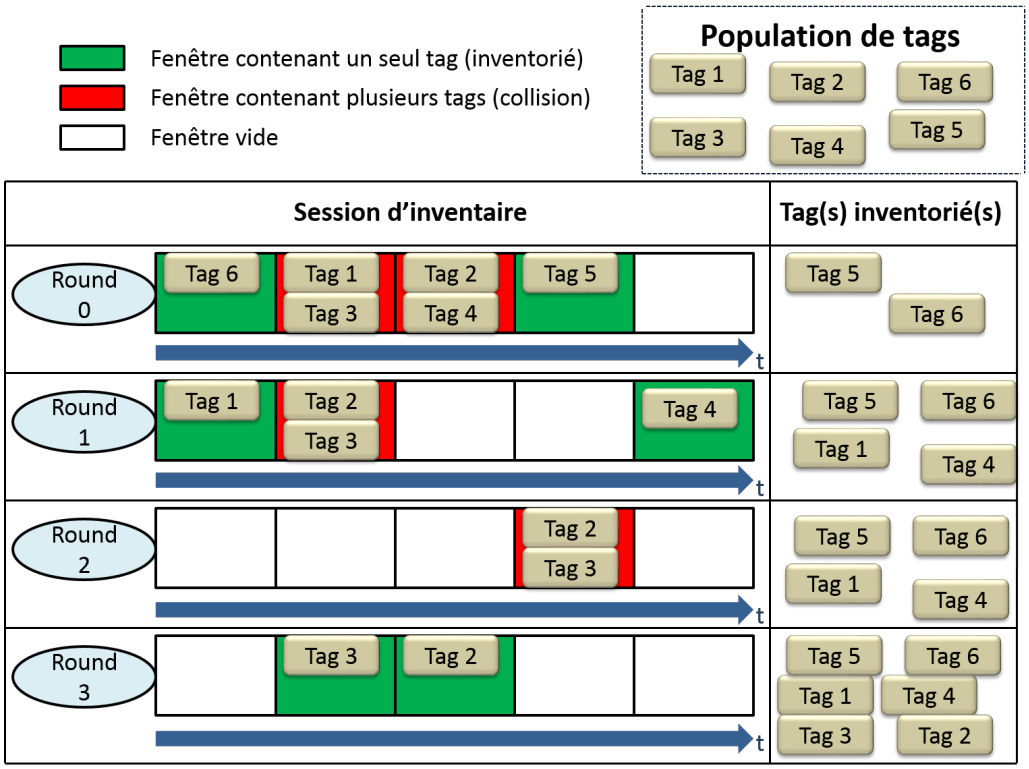


Figure 2.13 – Exemple d'une session d'inventaire utilisant l'algorithme anti-collision FSA

Dans le protocole FSA, une session d'inventaire est composée de plusieurs rounds. Chaque round est une tentative d'énumération des tags présents dans le champs du lecteur. Il est constitué d'un ensemble de fenêtres temporelles appelées trames. Le principe de fonctionnement de FSA est présenté dans la Figure 2.13, à l'aide d'un exemple d'inventaire

L'algorithme FSA se divise en deux catégories : basic et dynamic.

Basic (BFSA) :
il fonctionne sur le principe d'allocations aléatoires de fenêtres temporelles dans une trame. Le nombre de fenêtres temporelles reste constant, pour les différents rounds d'inventaire. Il devra donc être ajusté en fonction du nombre de tags RFID à lire.

BFSA n'est de ce fait pas adapté pour les cas d'applications dans lesquels le nombre de tags est très variable.

Dynamic (DFSA) :
le principe de cet algorithme est de faire varier le nombre de fenêtres dans une même trame en fonction du nombre de collisions et de trames vides. Si le nombre de collisions est trop important par rapport à la taille de la trame, alors le lecteur ajustera la longueur de cette dernière en l'augmentant. A l'inverse, dans le cas où le nombre de fenêtres vides serait élevé, le lecteur diminuera la longueur de la trame. Le nombre de tags restant à inventorier est estimé afin de déterminer la longueur de trame adéquate pour chaque round. Pour cela, le lecteur effectue entre deux rounds un calcul se basant sur le nombre de fenêtres vides, de celles contenant une seule réponse et de celles contenant une collision.

Méthodes d'estimation du nombre de tags liées à FSA :
Il existe deux méthodes d'estimation du nombre de tags :

- la première est dite **statique**. C'est la plus couramment utilisée en raison de sa facilité d'implémentation. Son algorithme de calcul repose sur de simples additions ou multiplications ;
- La seconde méthode, **dynamique**, est beaucoup plus complexe d'un point de vue algorithmique. Elle repose sur des calculs statistiques et probabilistes dont les résultats sont confrontés aux informations provenant des tags (nombres de fenêtres vides et avec collisions). Selon Klair [KCR10], elle est plus efficace dans deux cas :
  - pour un grand nombre de tags à inventorier ;
  - dans le cas où le nombre de tag à inventorier n'est pas connu et dont la quantité peut être très variable.

En revanche, si la population de tags varie peu et est inférieure à la centaine d'unité, la méthode statique s'avérera tout aussi efficace que la méthode dynamique.

C'est dans l'optimisation de la détermination de la longueur de trame que résident les améliorations de ce protocole anti-collision. Nous présentons ici quelques propositions d'amélioration provenant de l'état de l'art.

1. **Méthode de Vogt** [Vog02] :

Table 2.1 – Longueurs de trame optimales en fonction de la population de tags obtenues à partir de la méthode d'estimation de Vogt

Population de tags	1-9	10-27	17-56	51-129	112 et +
Longueur de trame optimale	16	32	64	128	256

L'estimation de la longueur de trame adaptée est basée sur l'inégalité de Tchebychev qui démontre qu'une variable aléatoire à une forte probabilité de prendre une valeur proche de son espérance mathématique. Selon l'auteur, avec cette méthode, dans le cas de l'inventaire d'une petite population des tags (de 1 à 9), le nombre adéquat de fenêtres par trame est de 16. Le Tableau 2.1 propose un nombre de fenêtres par trame optimal en fonction de la population de tags.

2. **Méthode de Zhen** [ZKS05] :

L'estimation du nombre de tags repose sur le calcul suivant :

$$NF_{NbTag} = F_1 + (2,39F_C) \tag{2.3}$$

Avec F_1 le nombre de fenêtres contenant une seule réponse de tag et F_C le nombre de fenêtres contenant une collision. De même que pour le coefficient de décalage de 2,39 de l'équation 2.3, l'auteur ajoute de manière empirique un autre coefficient de décalage de 1,4 pour une meilleure efficacité. Le nombre de tags estimé devient alors :

$$NF_{NbTag} = 1,4(F_1 + 2,39F_C) \tag{2.4}$$

3. **Méthode de Khandelwal** [KYLS06] :

L'estimation du nombre de tags repose sur la formule suivante :

$$n = \frac{\log(\frac{F_0}{L_T})}{\log(1 - (\frac{1}{L_T}))} \tag{2.5}$$

Avec F_0 le nombre de fenêtres vides et L_T la longueur de trame précédente (en nombre de fenêtre).

Si F_0 =0, alors

$$n = F_1 + 2F_C \tag{2.6}$$

F_1 représente le nombre de fenêtres contenant une réponse et F_C le nombre de fenêtre contenant une collision. Pour finir, l'auteur ajoute à cette valeur n un coefficient de décalage déterminé de manière empirique de 1,943. tel que :

$$NF_{NbTag} = 1,943n \tag{2.7}$$

4. **Méthode de Floerkemeier** [Flo06] :

Elle repose sur une approche bayesienne, qui consiste à tenir compte non plus uniquement du résultat du round précédent mais aussi des autres et de déterminer la longueur de trame en fonction de l'évolution des réponses sur plusieurs rounds.

5. **Q-protocol** [noa14] :

La longueur de la trame est calculée à l'aide d'un compteur Q (*slot counter*). Celui-ci est un entier pouvant prendre une valeur de 0 à 15. La longueur de la trame qui est fonction de Q est égale à 2^Q. Chaque tag choisit de manière aléatoire une valeur de fenêtre comprise entre 0 et 2^Q-1. Entre chaque round, le lecteur incrémente ou décrémente la valeur de Q, en fonction du nombre de fenêtres vides et de celles contenant une collision. Ceci se fait à l'aide d'une variable d'ajustement de la valeur Q, notée Δ et comprise entre 0,1 et 0,5. Une fenêtre avec une seule réponse n'aura aucune conséquence sur la valeur de Q du prochain round. Le diagramme d'état de l'ajustement de la variable Q est exposé dans la Figure 2.14.

2.4 L'anti-collision d'EPC Gen.2 : Q-algorithm

Au niveau de la couche MAC (Medium Acces Control) c'est le Q-algorithm qui est utilisé en tant qu'algorithme anti-collision dans le protocole de communication EPC Gen.2. Il est de type DFSA, pouvant intégrer le mode *early-end*.

Son principe de fonctionnement est le suivant : le lecteur gère la longueur de trame à l'aide d'un entier Q. Celui-ci est envoyé aux tags à inventorier dans la commande initiant l'inventaire : *Query*. La valeur de Q est ensuite incrémentée ou décrémentée à l'aide de la variable d'ajustement Δ dont la valeur est comprise entre 0,1 et 0,5. Le lecteur gère la valeur du *Query Slot counter* à l'aide de la commande

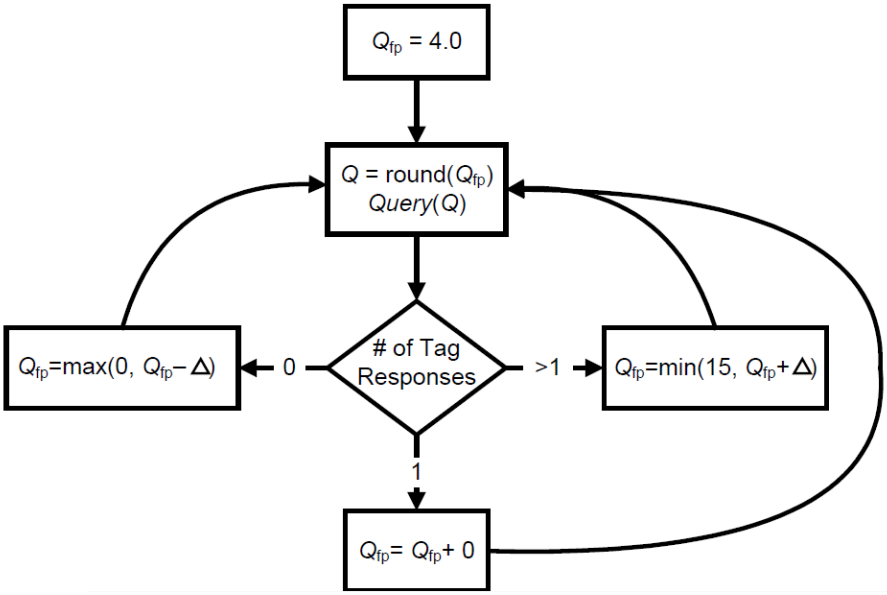


Figure 2.14 – Diagramme d'état de l'ajustement de la valeur Q du compteur de fenêtres

QueryAdjust. Cette commande répète la commande *Query* en modifiant éventuellement la valeur de Q (l'incrémente ou la décrémente). *QueryRep* répète la même commande que précédemment sans changer le moindre paramètre.

Un cycle d'inventaire est composé de plusieurs rounds. Un nouveau round est réalisé quand l'ensemble de la trame a été lue. Dans le prochain round, la valeur de Q sera ajustée, comme le montre de diagramme d'état de la Figure 2.14, en fonction du nombre de collisions et de fenêtres temporelles vides du round précédent. La valeur Q envoyée aux tags est en réalité la valeur arrondie de Q_{fp}, sur laquelle agit la variable d'ajustement Δ.

Voici les différentes étapes d'un scénario d'inventaire réalisé avec le protocole anti-collision Q-algorithm [DDTLT12] :

1. Le lecteur initie un cycle d'inventaire en envoyant une commande Query, avec une valeur Q initiale. Le compteur (*Slot counter*) de chaque tag prendra une valeur aléatoire comprise entre 0 et $2^Q - 1$. Le lecteur décrémente la valeur du *Slot counter* de tous les tags simultanément à l'aide de la commande *QueryRep*.
2. Deux possibilités de réponse pour le tag, en fonction de la valeur de son *Slot*

counter :

(a) *Slot* > 0, alors le tag ne répond pas et reste dans l'état *Arbitrary*.

(b) *Slot* $= 0$, dans ce cas là, le tag passe à l'état *Reply* et envoie un nombre aléatoire sur 16 bits appelé *RN16*.

3. Le lecteur retourne le même *RN16*, c'est la commande *Acknowledge* (ACK).
4. Le tag peut réagir à cette commande de deux manières :
   (a) Le *RN16* renvoyé est incorrect, pas de réponse. Le tag retourne à l'état *Arbitrary* et modifie la valeur du *Slot* de 0 à $2^Q - 1$ (avec Q = 15 soit la valeur maximale). La valeur du drapeau de la session d'inventaire ne change pas.
   (b) Le *RN16* renvoyé est correct, le tag passe à l'état *Acknowledge* et envoie un message contenant le code EPC [NDDR12].
5. Le lecteur répond par un *ReqRN* en renvoyant le code EPC.
6. Le tag répond selon la valeur de *ReqRN* envoyée par le lecteur :
   (a) Il est différent de son identifiant EPC, le tag ne répond pas.
   (b) Il correspond à son identifiant EPC, la valeur du drapeau de la session change et le tag renvoie un nouveau *RN16* (*Handle*). Ce *Handle* sera intégré dans chaque commande du lecteur au tag.

Dans les articles [SBS+17] et [oMRB17], sont présentés les résultats expérimentaux de l'étude de performance de l'algorithme avec notamment la valeur Q initiale optimale en fonction du nombre d'étiquettes RFID. C'est en effet le seul paramètre que nous pouvons ajuster dans l'algorithme anti-collision.

Dans l'article de Namboodiri [NDDR12], les résultats obtenus montrent que le Q-algorithm ajoute un délai supplémentaire pouvant atteindre 50% par rapport à FSA. Cependant, l'algorithme anti-collision d'EPC Gen2 a pour avantage de présenter les mêmes performances en terme de temps nécessaire pour un inventaire complet, que le nombre de tag à inventorier soit connu ou non. Ce qui est l'un de ses principaux avantages par rapport à FSA.

Sur un lecteur du marché, l'unique choix de configuration peut se faire au niveau de la valeur Q initiale dans l'algorithme anti-collision. Nous avons vu que le choix de sa valeur doit se faire en fonction du cas d'usage et du nombre estimé de tags RFID. L'environnement ainsi que les caractéristiques du tag et du lecteur jouent

un rôle beaucoup plus important que les paramètres intrinsèques du protocole de communication ou les paramètres de son algorithme anti-collision sur la qualité de communication entre le tag et le lecteur [LGV09] [NR08]. Ceci est confirmé dans l'article [oRR14], où il est démontré que l'estimation du nombre de tags n'est pas un élément prépondérant, comparé au milieu dans lequel évolue le système, dans l'optimisation de l'échange entre le tag et le lecteur.

Pour étudier l'utilisation du protocole Gen2 dans le cadre de la gestion du stock de bouteilles métalliques, nous avons participé à la mise en place d'une plate-forme d'expérimentation basée sur un portique RFID UHF.

2.5 Validation du recours au portique RFID UHF pour le traçage des bouteilles métalliques

Le portique RFID UHF a été installé en intérieur au GPC (Gas Packaging Center) d'Air Liquide afin de valider son recours pour l'optimisation de la logistique des bouteilles de gaz. Pour équiper le portique nous avons à disposition le matériel suivant :

- un lecteur RFID UHF *Speedway Revolution* de la marque *Impinj* ;
- deux antennes RFID UHF avec un angle d'ouverture à -3 dB de 69° et un rapport axial de 1 dB soit une polarisation quasi-circulaire ;
- deux cables de type TNC de 3 mètres ;
- un logiciel de contrôle du lecteur.

La disposition des deux antennes ainsi que les dimensions du portique sont présentées dans la Figure 2.15.

Au cours de cette phase expérimentale, nous avons testé différentes configurations pour tenter de voir les limites d'un tel équipement. Pour ce faire, le matériel à disposition est constitué :

- d'un panier de transport de bouteilles de gaz ;
- d'un transpalette manuel ;
- d'un lot de 8 bouteilles B50 (cf Figure 1.5) ;
- d'un lot de 6 bouteilles B20 (cf Figure 1.5) ;
- de grilles métalliques, pour simuler des conditions de recouvrement du chargement fortement handicapantes ;

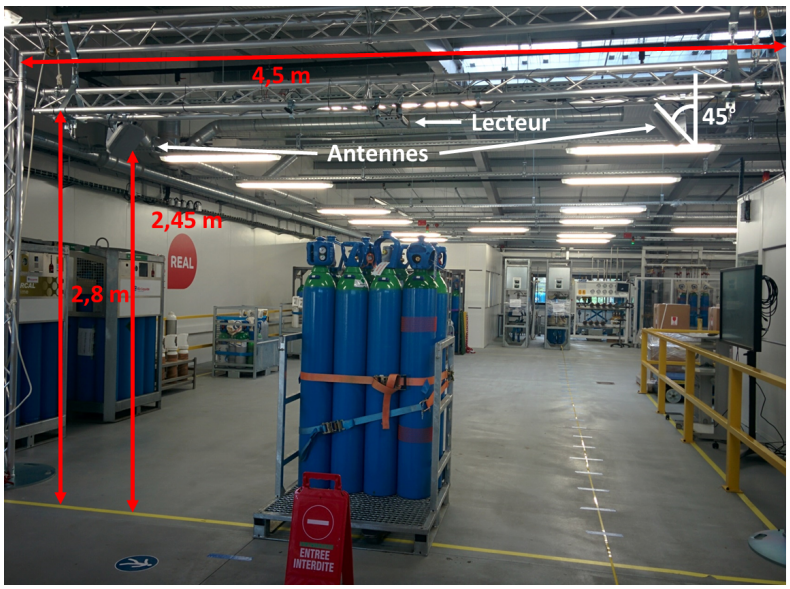


Figure 2.15 – Présentation du portique RFID UHF à deux antennes avec les principales dimensions

— de tags RFID UHF du commerce pour objets métalliques de la marque *HID* ;
— d'un marquage au sol pour l'estimation du champ de lecture des antennes et de la vitesse de déplacement.

2.5.1 Tests sur panier homogène

Première configuration :
Pour cette première série de mesures, nous avons utilisé un panier homogène composé de 8 bouteilles de type B50 équipées chacune d'un tag dont la disposition aléatoire est présentée dans la Figure 2.16.

Nous avons fait passer en dessous du portique à l'aide du transpalette le panier à une vitesse de 7 $km.h^{-1}$ et nous avons utilisé puissance d'émission de 30 dBm ERP.

L'ensemble des tags sont lus sans aucune difficulté à chaque essai. Un essai est défini comme un passage du chargement sous le portique après réinitialisation du processus d'inventaire au niveau du lecteur. En moyenne, le premier tag est lu à 8,5 m et le dernier 3,5 m avant d'atteindre l'axe du portique (axe de référence).

Configuration 2 et 3 :
La seconde série de mesure a été cette fois-ci statique et chaque bouteille (toujours des B50) a été équipée de 2 tags, dont la disposition est visible sur la Figure 2.17.

Nous avons fait varier la puissance des antennes entre 15 et 30 dBm. Dans la

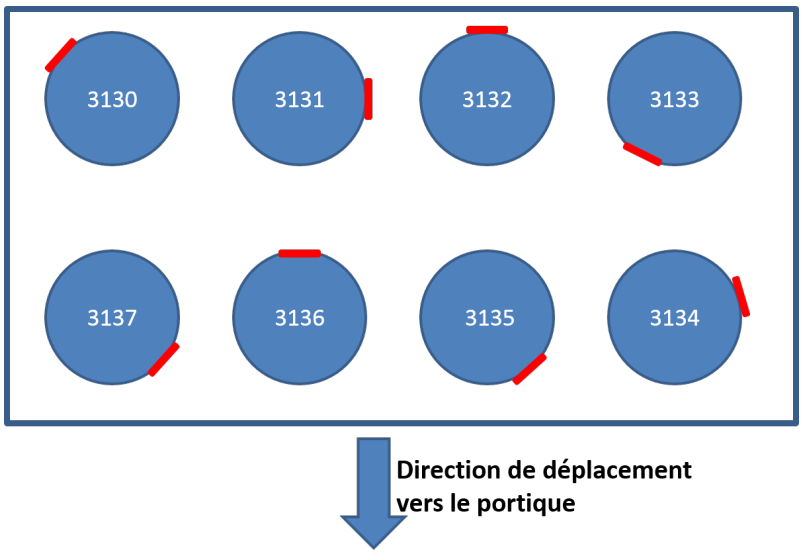


Figure 2.16 – Représentation de la disposition des bouteilles B50 équipées chacune d'un tag orienté aléatoirement dans le panier homogène

configuration 2, le panier est au niveau de l'axe du portique tandis que dans la troisième configuration, le panier est décalé de 1,5 m. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.2

Table 2.2 – Nombre de tags lus par le lecteur en fonction de la puissance d'émission des antennes

$P_{antenne}$ (dBm)	15	20	25	30
Axe du portique	0	8	12	16
Décalé de 1,5 m	0	2	8	16

Pour des puissances d'émission inférieures à 30 dBm, le lecteur n'est pas capable de lire l'ensemble de chargement. En effet, pour la configuration 2, à partir de 30 dBm, la puissance reçue par les antennes du lecteur RSSI (Received Signal Strength Indication) des tags 3131 et 3132 est comprise entre -70 et -74 dBm, ce qui est pratiquement la sensibilité maximale des antennes du lecteur. Même constat dans la configuration 3 mais cette fois pour les tags 3131, 3132, 3135 et 4037.

Configuration 4 :

Pour cette configuration, les mesures ont été réalisées à nouveau en dynamique mais

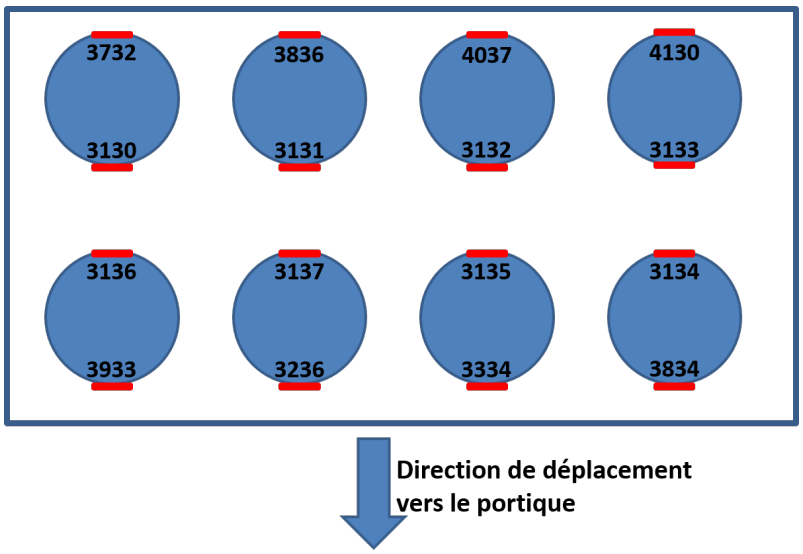


Figure 2.17 – Représentation de la disposition des bouteilles B50 équipées chacune de 2 tags dans le panier homogène

cette fois avec deux grillages, un au dessus et l'autre à l'avant des bouteilles pour simuler certains paniers couverts et amplifier la problématique de l'environnement métallique. Les résultats sont présentées dans le Tableau 2.3 avec le nombre de tags lus en fonction de la distance au portique afin de se comparer au cas de la configuration 1 (sans grillages).

Table 2.3 – Nombre de tags lus en fonction de la distance à l'axe du portique

Distance au portique (m)	5,5	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5
Nb tags non lus	3	5	7	8	9	9	12	15	tous

Nous constatons que la distance pour que l'ensemble des tags soit lu baisse fortement et passe de 3,5m sans grillages à 1,5 m avec grillages. Les résulats restent malgré tout satisfaisants car l'ensemble du chargement est lu avant même d'atteindre l'axe du portique.

2.5.2 Tests sur panier hétérogène

Pour composer un panier hétérogène, nous disposons les bouteilles de type B20 et B50 de la manière présentée dans la Figure 2.18, sur laquelle nous pouvons également voir la disposition des tags.

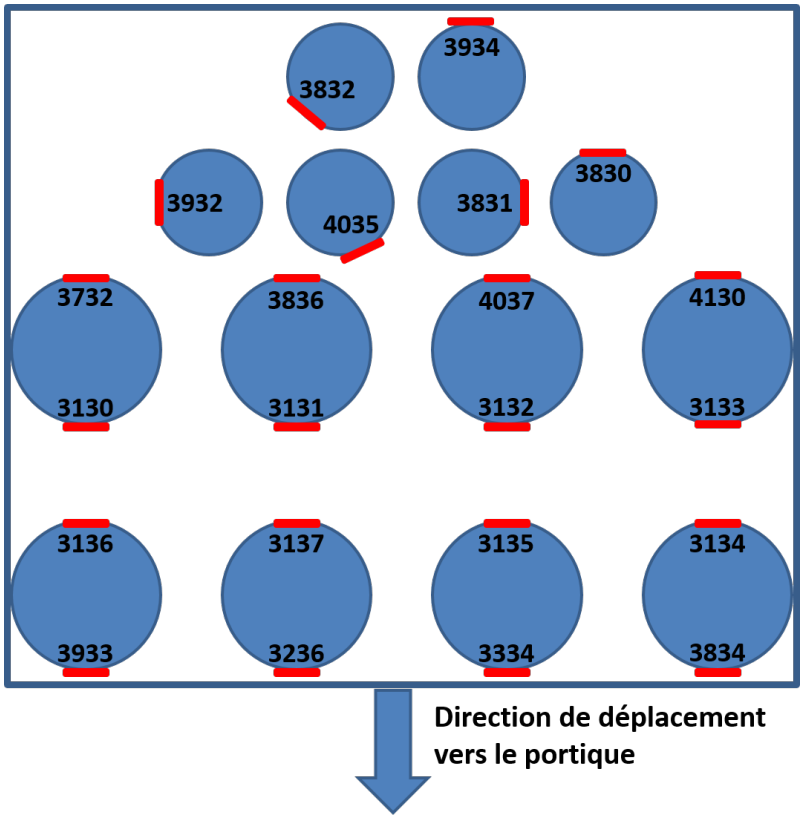


Figure 2.18 – Représentation de la disposition des bouteilles et des tags dans le panier hétérogène

Configuration 5 :

Toujours dans l'idée de se mettre dans des conditions dégradant la liaison tag lecteur, nous avons de nouveau ajouté un grillage au dessus et devant les bouteilles B20, comme le montre la Figure 2.19.

Pour une vitesse de déplacement de 5 $km.h^{-1}$ et une puissance d'émission de 30 dBm, le premier tag est lu à 8,35 m en moyenne de l'axe tandis que l'ensemble du chargement ne sera lu qu'une fois l'axe du portique passé de 1 m.

Configuration 6 :

Pour cette dernière série de mesure, nous avons mis le lecteur en mode *single read*, afin de réduire les risques de collisions. Nous n'avons activé le lecteur qu'une fois le chargement à 5 mètres de l'axe du portique. Nous faisons varier le paramètres d'estimation de la population de tags influant sur la valeur du Q initial. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.4.

Nous déduisons des résultats qu'il est préférable de surestimer la population de tags, du moins dans le cas où cette population est petite (22 tags pour cette série

Figure 2.19 – Panier chargé de 8 bouteilles B50 avec chacune 2 tags, 6 bouteilles B20 équipées d'un seul tag chacunes et deux grillages métalliques, un au dessus et un second devant les B20

Table 2.4 – Temps de lecture de l'ensemble du chargement en fonction de l'estimation initiale de la population de tags

Estimation du nombre de tag	1	10	200
Temps de lecture (s)	7	7	4

de mesure). En effet, le mode *single read* ainsi que le temps d'identification d'un tag qui est de l'ordre de quelque dizaines de millisecondes permettent de procéder à un inventaire complet du chargement durant le temps où il se trouve dans le champ des antennes du lecteur. La sous estimation de la population induit plus de collisions et donc un temps pour la lecture de tout le chargement plus important.

Ces expériences réalisées sur le portique n'ont pas vocation à mettre en avant une solution d'optimisation mais uniquement de valider l'usage d'un portique RFID UHF pour la logistique des bouteilles de gaz. Malgré la puissance deux fois inférieure à la puissance maximale autorisée qui est de 33 dBm ERP, l'emploi de seulement deux antennes et des configurations plus contraignantes que ce qui sera réellement le

cas, les résultats permettent d'affirmer que le recours à un portique est une solution techniquement envisageable pour améliorer le suivi logistique des bouteilles de gaz. Cela en dépit du faible nombre de degrés de liberté sur le protocole EPC gen2.

Avec des équipements plus adaptés, il sera possible d'étudier plus finement les paramètres suivants :

— l'effet de l'estimation de la population de tags sur le temps de lecture de l'ensemble du chargement, aussi bien sur une petite population que sur une plus importante ;
— la vitesse de déplacement sur la possibilité d'inventorier tout le chargement ;
— la disposition et l'orientation optimales des antennes du lecteur dans le cas de 3 ou 4 antennes ;

2.6 Conclusion

EPC Gen 2 permet, grâce à l'harmonisation de la communication RFID UHF, l'interopérabilité de l'ensemble des systèmes, élément clé de ce que doit être réellement l'internet des objets. Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux paramètres du protocole de communication pour une compréhension de son mécanisme. Ensuite, l'étude de l'algorithme anti-collision utilisé dans le cadre d'EPC Gen2 a montré qu'il était suffisamment efficace dans le cadre d'un procédé d'inventaire utilisant un portique RFID UHF. Le protocole EPC Gen2 dans son ensemble et son algorithme anti-collision ne présentent que très peu de degrés de liberté.

Les tests expérimentaux sur portique en intérieur ont confirmé la possibilité d'employer une solution RFID UHF pour la logistique des bouteilles de gaz. Avec une configuration de portique à deux antennes seulement et une puissance d'émission de 30 dBm, soit deux fois moins que ce qu'autorise la norme, tous les tags étaient lus aussi bien à l'arrêt qu'en mouvement avec une vitesse de 7 $km.h^{-1}$ et qui plus est dans des configurations plus contraignantes que ce qui sera réellement.

De ce fait, nous en arrivons à la conclusion que pour optimiser la communication entre le lecteur et les tags dans un milieu hostile (métallique) comme cela est le cas pour notre cas d'usage, les améliorations devront se faire au niveau matériel et principalement au niveau du tag. Le design de l'antenne, le choix du packaging et de

la puce, l'adaptation d'impédance entre la puce et l'antenne seront donc les points clés dans l'optimisation de la communication et de l'augmentation de la distance de lecture.

En s'appuyant sur l'étude théorique de ce chapitre et du chapitre précédent ainsi que le cahier des charges du projet, nous allons pouvoir mettre en place notre solution RFID UHF pour la logistique de bouteilles métalliques, que nous présentons dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Conception et caractérisation d'un tag RFID UHF pour objets métalliques

Sommaire

3.1 Introduction **75**

3.2 Choix de conception pour la réalisation des premiers prototypes **76**

3.2.1 Sélection du substrat en fonction des spécificités de notre cas d'application 76

3.2.2 Choix de la puce RFID UHF et détermination de son impédance d'entrée 78

3.2.3 Choix du type d'antenne 80

3.3 Étapes de conception d'un premier prototype de tag RFID UHF utilisant une antenne dipôle **81**

3.3.1 Design de l'antenne dipôle 81

3.3.2 Réalisation du tag 82

3.4 Résultats de simulation de l'antenne dipôle du premier prototype **83**

3.5 Résultats de mesure du premier prototype de tag **84**

3.5.1 Présentation du premier banc de mesure pour la caractérisation de fonctionnement de tags RFID UHF : le Tagformance Hand Carry Kit 85

3.5.2 Distance d'activation du tag RFID UHF 86

3.6 Technique de mesure de la permittivité du substrat dans le domaine UHF **88**

3.6.1 Étape expérimentale 88
3.6.2 Étape de simulation 89
3.7 Réalisation et résultats de simulation du second prototype d'antenne 91
3.8 Mesures de performances du second prototype de tag . 94
3.8.1 Distance d'activation du tag 94
3.8.2 Diagramme de rayonnement 95
3.8.3 Autres paramètres de fonctionnement du tag mesurés à partir du Tagformance Hand Carry Kit 96
3.8.4 Discussions des résultats 100
3.9 Intégration de la solution RFID UHF dans les nouvelles générations de bouteilles 100
3.9.1 Conception du tag intégré et de son antenne fente 100
3.9.2 Simulation de l'antenne fente incurvée 102
3.10 Conclusion 104

3.1 Introduction

Comme nous avons pu le voir dans le Chapitre 1, le suivi d'objets conducteurs que sont les bouteilles de gaz, à l'aide d'un système RFID UHF, représente un défi majeur. Les objets métalliques, sur lesquels sont directement posés les tags, ont un effet parasite non négligeable sur la communication entre le tag et le lecteur [GDHK06a, QC07].

S'ajoute à cet effet parasite un cahier des charges industriel imposant les exigences suivantes :

— un tag souple s'adaptant aux différentes géométries des conteneurs ;
— des choix de matériaux disponibles sur le marché ;
— un prix du tag permettant un déploiement à l'échelle industrielle ;
— une distance de lecture de 5 mètres, en sachant que sous portique, la distance entre les tags et les antennes du lecteur est d'environ 3 mètres.

Deux cas d'utilisation sont considérés dans notre étude :

— lecture unitaire avec lecteur RFID UHF portable. Ce cas d'usage est l'inventaire d'un ensemble de bouteilles par un opérateur, à l'aide d'un lecteur RFID portable. La distance de lecture ira de quelques centimètres à 2 mètres ;
— lecture volumétrique avec portique RFID UHF. Ce cas d'usage correspond au passage d'un camion chargé en bouteilles sous un portique équipé de lecteurs RFID. Cette fois, la distance de lecture est plus importante, elle se situe entre 2 et 4 mètres. Par ailleurs, la lecture devra se faire tandis que le chargement est en mouvement.

Nous allons dans ce chapitre exposer les différentes étapes de la conception de notre tag RFID UHF. Les choix de conception pour respecter le cahier des charges seront détaillés avant de présenter les étapes de conception de l'antenne adaptée à la puce RFID UHF sélectionnée. Par la suite, nous exposerons les résultats de simulation et expérimentaux des prototypes de tag réalisés. Enfin, nous présenterons une étude sur l'intégration de la solution directement dans l'architecture des bouteilles de gaz de nouvelle génération.

3.2 Choix de conception pour la réalisation des premiers prototypes

3.2.1 Sélection du substrat en fonction des spécificités de notre cas d'application

Afin d'isoler au mieux l'antenne de la bouteille métallique, nous cherchons un matériau avec une constante diélectrique la plus élevée possible tout en veillant à ce que sa tangente de perte à 867 MHz soit la plus faible possible, pour éviter une dégradation de la qualité de la communication radio. L'objectif de l'étude est de permettre à terme d'équiper de tags RFID des millions de bouteilles. Nous cherchons à réaliser un tag composé de matériaux à faible coût et disponibles sur le marché pour une production à grande échelle. Pour cela, nous excluons les matériaux « exotiques » tels que les EBG (electromagnetic band gap) [JB13] ou les matériaux hybrides ayant des valeurs de constante diélectrique élevées. La recherche du rapport qualité prix est un élément essentiel dans le choix des matériaux.

Les bouteilles de gaz sur lesquelles sont disposés les tags sont de volumes et de formes variables. Une solution pour prendre en compte cette diversité de volumes est de réaliser des tags RFID souples capables d'épouser la forme de la bouteille quelle que soit sa forme et sa dimension. Il est nécessaire notamment que ces tags s'adaptent à des bouteilles de capacité inférieure à 5 litres, qui sont à l'heure actuelle exclues du système de traçabilité. Le nombre de bouteilles de ce type est actuellement en hausse, car elles facilitent la distribution dans les zones urbaines denses.

Parmis les travaux sur la réalisation de tags RFID-UHF flexibles sur objets métalliques [BBB+12, ASEP12], il y a ceux de H.W. Son [SJC12] qui montrent que la courbure de l'antenne n'induit pas de variations conséquentes sur son fonctionnement et sur ses performances. Les travaux de R. Lech [LMK14] quant à eux indiquent que la variation du rayon de courbure n'a qu'un effet minime sur les caractéristiques de rayonnement (directivité et gain) de l'antenne. Le tableau 3.1 présente les caractéristiques et performances d'antennes souples pour objets métalliques présent dans l'état de l'art. De ces informations, nous tirons deux conclusions :

— la première concerne la méthode de conception de l'antenne du tag. Elle pourra se faire sur un logiciel de simulation 2D étant donné que la courbure a un effet négligeable sur le comportement de l'antenne ;

— la seconde concerne la généralisation des performances que nous considérerons valables pour l'ensemble des rayons de courbure que pourra prendre le tag en

fonction du volume de bouteille sur lequel il sera équipé.

Table 3.1 – Comparatif des performances de tags RFID UHF flexibles pour objets métalliques

	Type d'antenne	Dimensions	Distance de lecture	Puissance du lecteur (EIRP)	Substrat	Rayon de courbure
Babar [BBB+12]	Dipôle	28x13 mm	2,4 m	3,28 W	h=1,5 mm ϵ_r=12 (BaTiO3 et polymère)	35 mm
Alarcon [ASEP12]	Dipôle	64x29 mm	3,3 m	3,28 W	h=1 mm ϵ_r=2,5 (silicone)	50 mm
Son [SJC12]	Patch	100x40 mm	9,7 m	4 W	h=2,1 mm ϵ_r=2,62 (Polychlorure de vinyle)	150 mm

Le Tableau 3.2 présente une comparaison entre trois matériaux souples, pouvant servir à la confection du tag. Les trois paramètres qui nous intéressent sont la constante diélectrique, la tangente de perte ainsi que le niveau de souplesse du matériau. Ce dernier est exprimé en dureté de Shore qui mesure l'élasticité dans le domaine des polymères, avec l'indice A pour les matériaux mous et D pour les matériaux durs. Ces lettres servent en réalité à définir la méthode utilisée pour mesurer le niveau de dureté. La Figure 3.1 à travers l'échelle de la dureté de Shore A permet de situer le niveau de dureté des résines comparées. La valeur numérique donne une indication sur le niveau de dureté, plus elle est élevée et plus le matériau est rigide.

Table 3.2 – Comparatif de matériaux flexibles pour une utilisation en tant que substrat

	Permittivité à 50 Hz	Pertes diélectriques à 50 Hz	Dureté (en échelle de Shore)
Résine de silicone SC3001	3,0	0,0026	A20
Résine de polyuréthane UR5044	**4,93**	**0,04**	**A40**
Résine de polyuréthane UR5547	5,0	0,14	A80-90

Notre choix s'est porté sur la résine de polyuréthane UR5044 qui représente le compromis idéal entre la valeur de permittivité que nous souhaitons la plus élevée possible et la valeur de pertes diélectriques que nous voulons la plus petite possible. De plus sa dureté de A40 nous donne une bonne garantie de flexibilité.

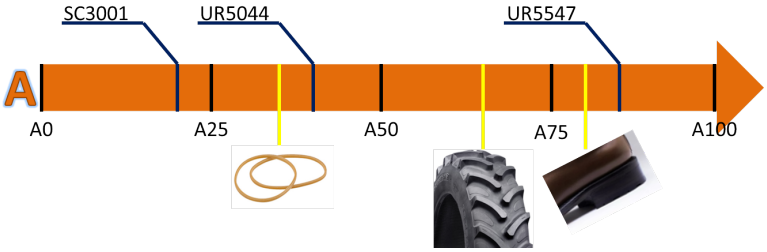


Figure 3.1 – Echelle de la dureté de Shore A pour différents types de polymères dis mous

Finalement, le choix de packaging pour nos premiers prototypes de tag flexible est présenté au niveau de la Figure 3.2. L'antenne est imprimée sur du Kapton souple d'une épaisseur de 50 µm et de constante diélectrique de 3,4. Une couche de vernis est ensuite ajoutée afin de protéger les pistes. L'ensemble est ensuite déposé sur la résine de polyuréthane de 5 mm d'épaisseur. Le Kapton ainsi que la résine de polyuréthane, ayant respectivement une épaisseur de 50 µm et 5 mm, garantissent une souplesse et un robustesse suffisante pour le tag.

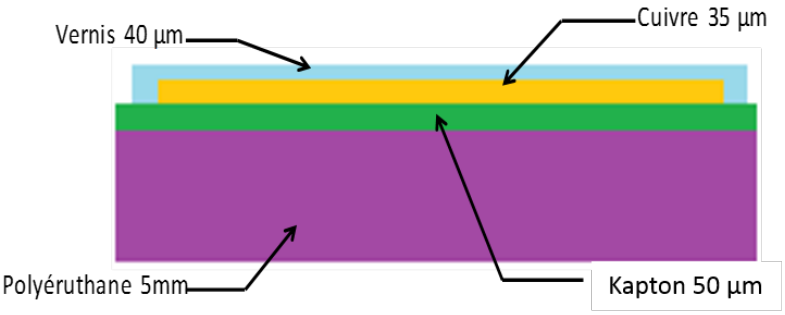


Figure 3.2 – Les différentes couches constitutives de notre tag RFID UHF

3.2.2 Choix de la puce RFID UHF et détermination de son impédance d'entrée

La sélection de la puce du tag se fait sur les critères techniques suivants :

— la sensibilité en écriture, qui représente la puissance minimum nécessaire pour permettre une écriture dans la mémoire de la puce ;

— la sensibilité en lecture, définie comme la puissance minimum pour une lecture de la mémoire de la puce ;
— la taille de la mémoire utilisateur, qui est une mémoire optionnelle selon EPC Gen2 et qui permettra le stockage d'information autre que celles ayant trait à l'identification de l'objet.

Nous présentons dans le Tableau 3.3 une comparaison de ces paramètres sur les puces du commerce présentant les meilleures performances au moment de la sélection.

Table 3.3 – Comparaison des sensibilités et espaces mémoires (EPC et utilisateur) des puces Ucode7m, Monza5 et Monza R6-P

	Sensibilité en lecture(dBm)	Sensibilité en écriture(dBm)	Dimensions (mm)	Mémoire (bits)	
				EPC	utilisateur
NXP UCODE 7m	-21	-16	1,45x1 (SOT886)	128	32
Impinj Monza 5	-17,8	-13,75	0,465x0,465	128	32
Impinj Monza R6-P	-20	-15,2	0,464x0,442	128	64

La puce Ucode 7m de NXP présente une meilleure sensibilité en lecture et en écriture. Sa capacité mémoire utilisateur est plus faible que celle du Monza R6-P, mais elle reste suffisante pour notre cas d'usage. Nous avons donc sélectionné cette puce.

Détermination de l'impédance de la puce à 867 MHz :

La puce Ucode 7m dont nous disposons est intégrée dans un boitier SOT886. Pour ce type de boitier, la valeur d'impédance Z_{chip} n'est donnée que pour la fréquence de 915 MHz. Afin de déterminer Z_{chip} à 867 MHz, nous passons par le circuit équivalent de la puce et du boitier présenté dans la Figure 3.3.

Nous réalisons une simulation de type S-Parameter sur une plage de fréquence comprise entre 100 et 1000 MHz. Le résultat est présenté à travers l'abaque de Smith de la Figure 3.4.

À 867 MHz, Z_{chip} = (14,6 - j 261,45) Ω

Ce résultat est conforté par le fait que dans la documentation technique du composant, à 915 MHz l'impédance est égale (12,8 - j 248) Ω. À cette même fréquence, le résultat en simulation nous donne une impédance de (13,1 - j 247,8) Ω. La différence (en valeur absolue) entre les deux valeurs est de seulement 0,06%.

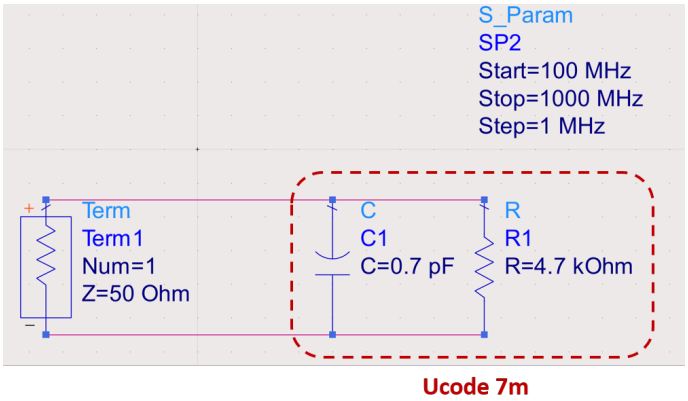


Figure 3.3 – Circuit équivalent de la puce Ucode 7m dans un boitier SOT886

3.2.3 Choix du type d'antenne

La géométrie de l'antenne doit permettre :

— d'ajuster sa fréquence de résonance sans trop de difficulté. Bien souvent et cela est encore plus vrai dans le cas d'environnement perturbant, il existe un écart entre les résultats de simulations et de mesures. Pour pallier ces écarts, l'antenne doit être facilement ajustable et son comportement maitrisé ce qui est le cas pour l'antenne dipôle ;

— d'avoir un rayonnement le plus omnidirectionnel possible afin de maximiser les chances du tag d'être vu quand il est dans le champ de l'antenne du lecteur.

Au vu de ces constatations, l'antenne dipôle semble être la plus adaptée. En effet, une simple modification de la longueur des brins de l'antenne suffit à décaler sa fréquence de travail. Elle est aussi quasi-omnidirectionnelle.

De plus, l'antenne dipôle peut être adapté à la puce à l'aide d'une simple boucle inductive (du fait de l'impédance capacitive des puces RFID UHF, celle de l'antenne devra être inductive). Cette même boucle peut également servir à améliorer le couplage entre le lecteur portable et le tag pour une lecture en champ proche (cas d'une lecture unitaire avec lecteur portable).

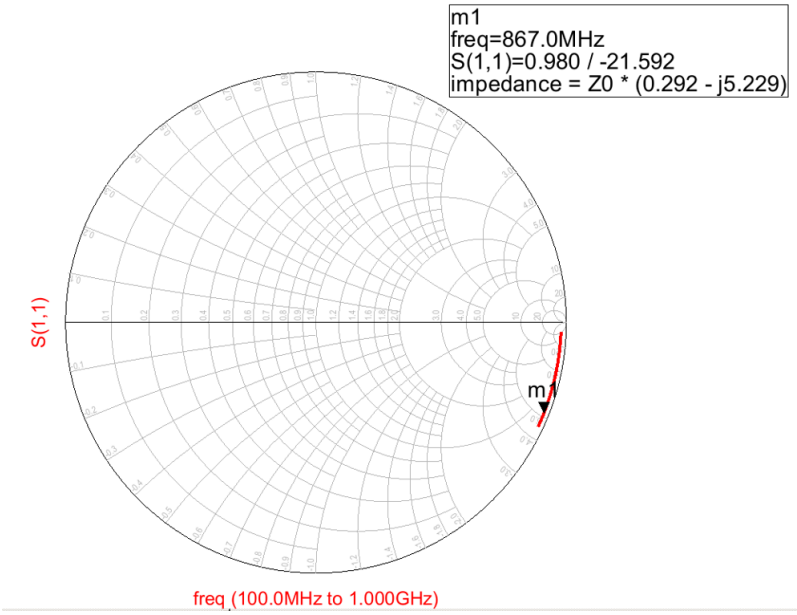


Figure 3.4 – Résultat de simulation de l'impédance du circuit équivalent de la puce Ucode 7m dans un boitier SOT 886 avec $Z_0 = 50\ \Omega$

3.3 Étapes de conception d'un premier prototype de tag RFID UHF utilisant une antenne dipôle

3.3.1 Design de l'antenne dipôle

La première phase de conception de l'antenne a été effectuée via le logiciel de simulation électromagnétique ADS Momentum.

Le recours à un logiciel de simulation électromagnétique est indispensable afin de se rapprocher au mieux du comportement réel de l'antenne dans son environnement [Per14]. Il permet de prendre en compte l'environnement de l'antenne dès les premières phases de conception.

Pour la réalisation du tag, le cahier des charges n'impose pas de dimensions maximales à respecter. Le plus petit volume de bouteille de gaz est de 5 litres. Une longueur de dipôle comprise entre 8 cm et 12 cm est acceptable. Il est souvent constaté que plus l'antenne est grande et plus ses performances de communication seront bonnes. Il est important de réaliser le bon compromis et de choisir une taille

d'antenne qui s'adapte aux bouteilles et qui possède les meilleures performances possibles.

Technique d'adaptation d'impédance utilisée :

Comme nous avons pu le déterminer en 3.2.2, Z_{chip} = 14,6 - j 261,45 Ω. La partie réelle est faible et la partie imaginaire est fortement capacitive. Il est donc nécessaire de présenter à la puce une impédance d'antenne Z_a = 14,6 + j 261,45 Ω pour une adaptation parfaite et un transfert de puissance vers la puce maximal. Nous réalisons pour cela une adaptation dans la géométrie même de l'antenne, pour optimiser coût et rendement. Les composants passifs induisent forcément des pertes en raison des effets parasites [SBB16]. Moins ils en engendrent et plus ils sont chers d'autant plus s'il s'agit de composants RF.

L'élément utilisé pour l'adaptation est une boucle inductive, comme nous pouvons le voir sur la Figure 3.5. Cette boucle peut aussi servir à un couplage magnétique à plus courte distance, dans le cas d'une lecture unitaire à l'aide d'un lecteur portable positionné à quelques centimètres du tag.

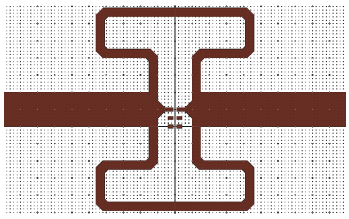


Figure 3.5 – Boucle d'induction pour l'adaptation en impédance de l'antenne du premier prototype

3.3.2 Réalisation du tag

Les étapes de sa conception sont les suivantes :

1. l'antenne est imprimée sur du Kapton (flexible) d'une épaisseur de 50 µm puis recouverte par une couche de vernis ;
2. la solution de poyuréthane est réalisée à partir de deux réactifs ainsi que l'impression 3D des moules dans lesquels sera coulé le polyuréthane ;
3. une fois la solution dans le moule, l'antenne imprimée est directement posée sur le polyuréthane avant que celui-ci ne sèche afin que la fixation se fasse sans l'ajout d'une colle ;
4. une fois séchée, la résine avec l'antenne dessus est démoulée ;

5. pour finir, la puce est connectée à l'antenne à l'aide de laque d'argent qui est un vernis conducteur. Le résultat est présenté au niveau de la Figure 3.6.

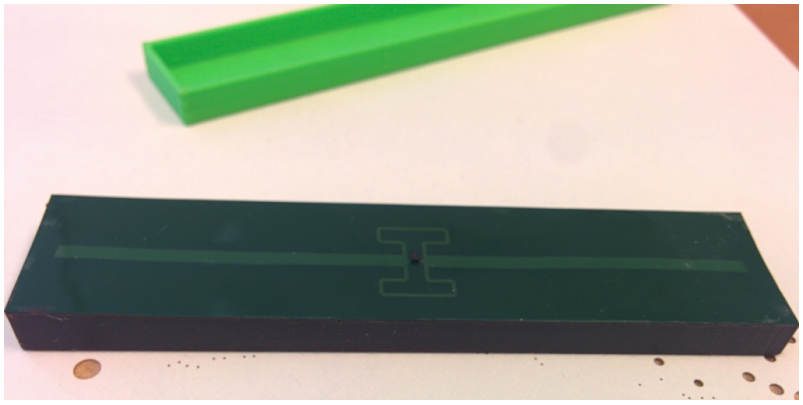


Figure 3.6 – Premier prototype de tag RFID UHF souple

Les dimensions de ce tag sont : 90x20x5 mm, ce qui est parfaitement adapté aux différents volumes de bouteilles de gaz.

3.4 Résultats de simulation de l'antenne dipôle du premier prototype

Coefficient de réflexion :

La Figure 3.7 indique que, placée sur un plan conducteur, l'antenne du tag résonne à 867,2 MHz. La référence prise dans l'abaque de Smith est l'impédance de la puce : 14,6 - j261,45 Ω. L'amplitude du coefficient de réflexion est à la résonance de -17,5 dB.

Paramètres de rayonnement :

D'après la Figure 3.8, le diagramme de rayonnement montre bien que le rayonnement ne se fait que sur le demi-espace supérieur en raison de la présence du plan de masse. L'intensité de rayonnement en Watt par stéradian ($W.sr^{-1}$) donne une idée de l'intensité énergétique du champ électromagnétique transférée dans une direction donnée. Celui-ci donne une meilleure idée de l'angle de communication privilégié par l'antenne par rapport au diagramme de rayonnement.

Puissance rayonnée :

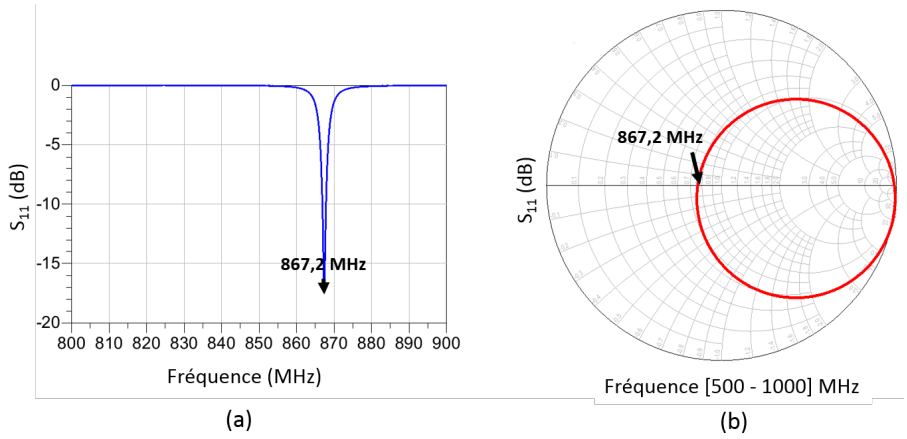


Figure 3.7 – Coefficient de réflexion en amplitude (a) et adaptation d'impédance de l'antenne à la puce Ucode 7m en (b) du premier prototype de tag

La puissance rayonnée (voir la Figure 3.9) est donnée pour une tension du générateur vers l'antenne de 1 V d'amplitude à travers son impédance complexe. Le rendement affiché de 94% permet d'obtenir une puissance rayonnée de 5,43 mW. Les niveaux de rendement et de puissances rayonnées très optimistes montrent les limitations des logiciels de simulation pour une caractérisation exacte du fonctionnement de l'antenne. Une phase expérimentale s'impose afin de déterminer les performances réelles du prototype.

3.5 Résultats de mesure du premier prototype de tag

La caractérisation du prototype réalisé s'est faite au sein du laboratoire d'Électronique, SYstèmes de COmmunications et Microsystèmes (ESYCOM) de l'Université de Paris Est Marne la Vallée (UPEM) qui dispose de deux bancs de mesures destinés à la caractérisation de tags RFID UHF. Dans cette section, nous ne présentons que le premier banc. Le second ne sera employé que lors des mesures sur le second prototype.

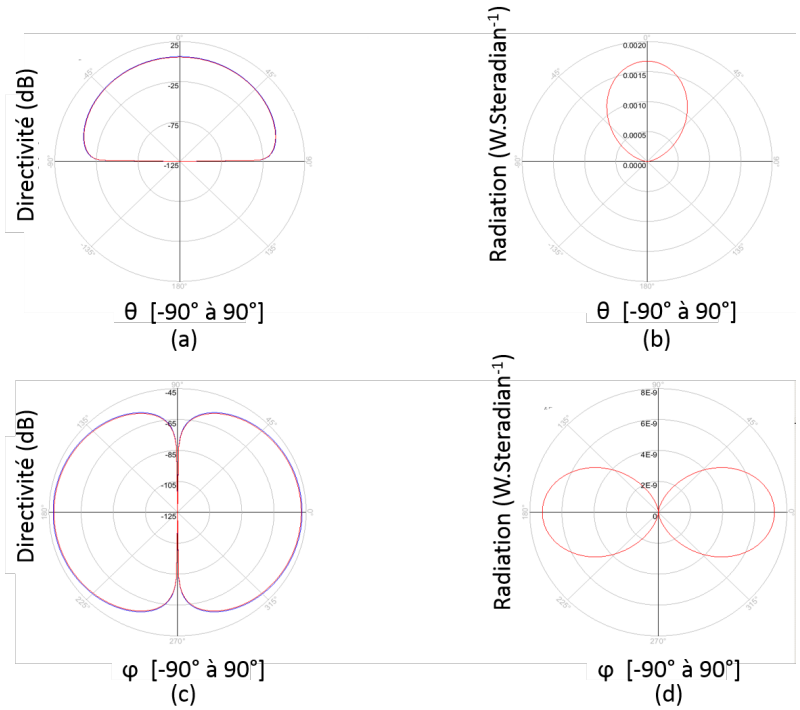


Figure 3.8 – Caractéristisation du rayonnement du second prototype avec : (a) diagramme de rayonnement et (b) intensité de rayonnement sur le plan E, (c) diagramme de rayonnement et (d) intensité de rayonnement sur le plan H

3.5.1 Présentation du premier banc de mesure pour la caractérisation de fonctionnement de tags RFID UHF : le Tagformance Hand Carry Kit

Dispositif expérimental de mesure des paramètres caractéristiques du tag RFID UHF :

Comme le montre la Figure 3.10, ce banc de mesure est composé :

— d'un lecteur RFID UHF : le Tagformance Lite ;

— d'un circulateur entre les voies d'entrée, de sortie du lecteur et l'antenne ;

— d'une antenne lecteur RFID UHF ;

— d'un tag de référence pour la phase de calibration ;

— d'un support de permittivité neutre d'une hauteur de 30 cm ;

— du logiciel de contôle : Tagformance 7.

Le principe de fonctionnement est le suivant : l'antenne reliée au lecteur envoie une requête avec une puissance croissante. De la puissance minimum à laquelle le tag répond, nous pouvons déduire sa distance d'activation maximum avec 2 W ERP (3,28 W EIRP) de puissance, pour une fréquence donnée. Cette opération est répétée

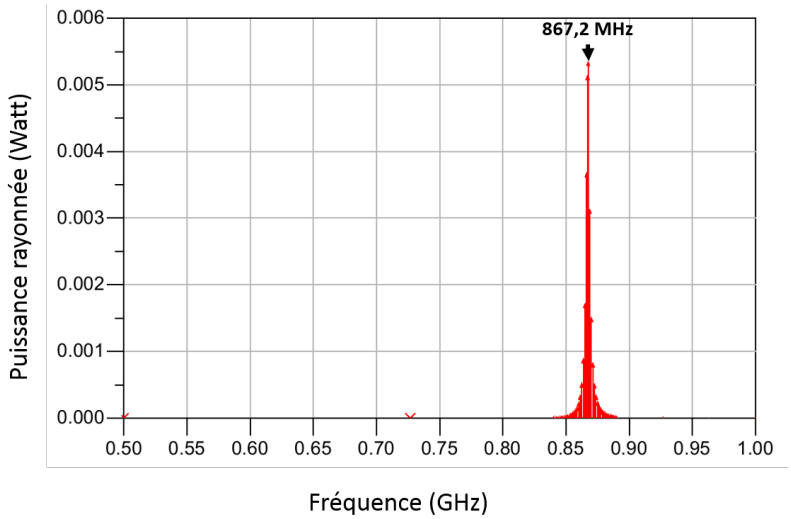


Figure 3.9 – Puissance rayonnée de l'antenne du premier prototype

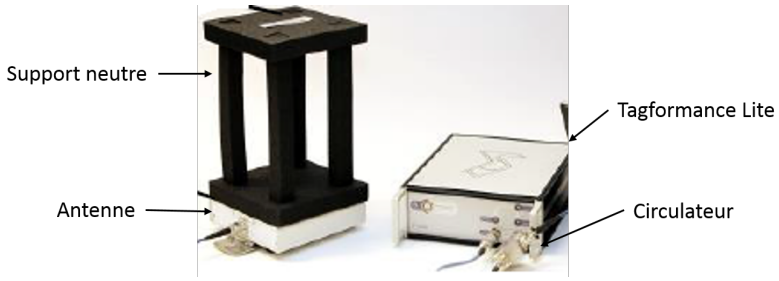


Figure 3.10 – Banc expérimental Hand Carry Kit servant à la caractérisation des performances du tag

sur l'ensemble de la plage 800 MHz - 1 GHz, avec un pas ajustable.

3.5.2 Distance d'activation du tag RFID UHF

Le principal indicateur de performance d'un tag est la distance d'activation. La détermination de la distance d'activation du tag en fonction de la puissance est donnée par la formule suivante :

$$d_{read} = \sqrt{\frac{P_{EIRPmax}}{P_{tag}}} \frac{c}{4\pi f} \tag{3.1}$$

Avec $P_{EIRPmax}$ la puissance maximale autorisée dans la bande RFID UHF en Europe (3,28 W), P_{tag} la puissance d'activation du tag, c la célérité de l'onde électromagnétique dans l'air et f sa fréquence.

D'après les résultats de la Figure 3.11, le fonctionnement du tag n'est pas centré dans la bande RFID UHF Européenne. Le tag est effectivement adapté pour fonc-

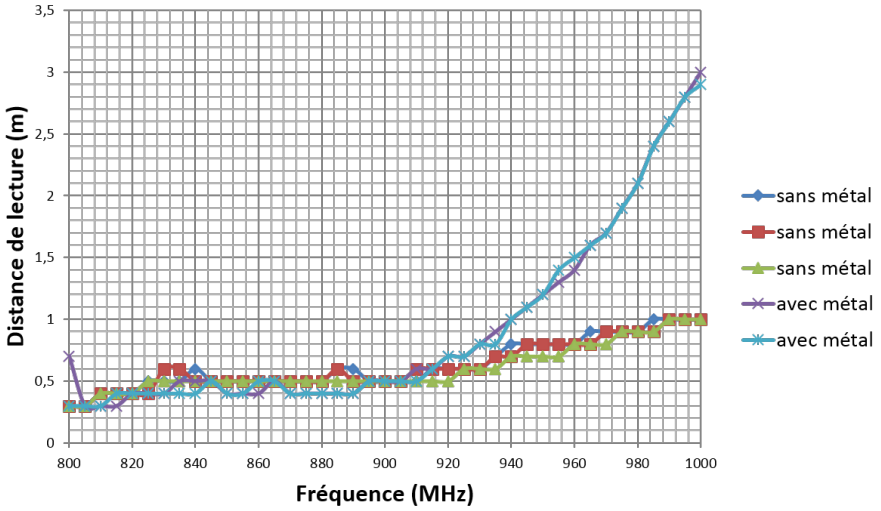


Figure 3.11 – Distance d'activation de notre premier prototype de tag RFID UHF

tionner sur du métal mais sa réponse est décalée en fréquence autour de 1 GHz. Le plan métallique employé pour la mesure est de dimension suffisamment grande pour être considéré comme infini comme cela est le cas en simulation. Nous voyons également sur les résultats de mesure l'influence du plan métallique sur l'impédance que présente l'antenne à la puce.

L'un des paramètres entrés dans la phase de conception de l'antenne n'est pas correct. Il s'agit de la permittivité du polyuréthane qui joue un rôle important dans la fréquence de résonance de l'antenne. C'est le seul paramètre influant sur la fréquence de résonance, comme le montre les équation 3.2 et 3.3 et qui n'est pas garanti à 100%.

$$f = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}\lambda} \tag{3.2}$$

Avec en première approximation, ϵ_{eff} la permittivité effective telle que :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \tag{3.3}$$

La plage de fréquence du banc de mesure est limitée à 200 MHz (de 800 MHz à 1 GHz). Nous ne savons pas si le pic autour de 1 GHz représente la fondamentale ou un harmonique. Il est possible que la fondamentale se trouve en dessous de 800 MHz. Pour ces raisons nous avons décidé de concevoir, sans changer les paramètres de simulation et du substrat par rapport au premier prototype, trois antennes A6, A8 et A10 résonnant en simulation respectivement à 667 MHz, 867 MHz et 1067 MHz. A6

présente une fréquence de résonance en mesure de 867 MHz, A8 affiche des résultats identiques à ceux du premier prototype. Enfin pour la dernière antenne A10, aucune fréquence de résonance n'apparait en mesure entre 800 MHz et 1 GHz. L'ensemble de ses résultats confirment que la résonance autour de 1 GHz du premier prototype est bien la fondamentale et que la permittivité du polyuréthane à été surestimée. La réalisation du polyuréthane se fait en mélangeant la résine à son durcisseur. Cette manipulation peut entrainer, par introduction d'air, une baisse significative de la permittivité. Il est donc nécessaire de mesurer de manière expérimentale la valeur de la permittivité ϵ_r de notre substrat.

Avant de concevoir le prochain prototype de tag, nous désirons déterminer avec précision la permittivité du polyuréthane. La méthode employée pour cela est présentée dans la section suivante.

3.6 Technique de mesure de la permittivité du substrat dans le domaine UHF

La détermination de la constante diélectrique du polyuréthane dans le domaine micro-onde se fait en deux étapes. Nous allons dans un premier temps via une étape de mesure, observer l'effet du matériau sur deux lignes à résonateur, l'un série et l'autre parallèle. Ensuite, en s'appuyant sur les résultats de mesures, une étape de simulation permettra de remonter à la valeur de la permittivité du matériau.

3.6.1 Étape expérimentale

À l'aide d'un analyseur de réseau, nous observons l'influence du matériau sur la résonance de deux lignes résonateurs présentées dans les Figures 3.12 et 3.13. Ces résonateurs sont imprimés sur du téflon d'une épaisseur de 1,524 mm et de constante diélectrique ϵ_r de 2,55.

Pour le résonateur série, les fréquences de résonance mesurées sont :

— $f_{\text{à}vide}$ = 4,235 GHz

— $f_{chargé}$ = 3,949 GHz

Pour la configuration (b), les fréquences de résonance mesurées sont :

— $f_{\text{à}vide}$ = 4,324 GHz

— $f_{chargé}$ = 4,068 GHz

Une fois la mesure du décalage fréquentiel induit par le matériau obtenue, nous

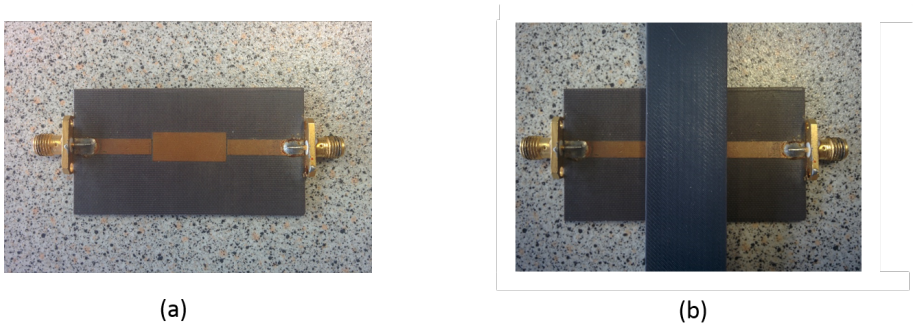


Figure 3.12 – Résonateur série à vide en (a) et chargé par la résine de polyuréthane UR5044 en (b)

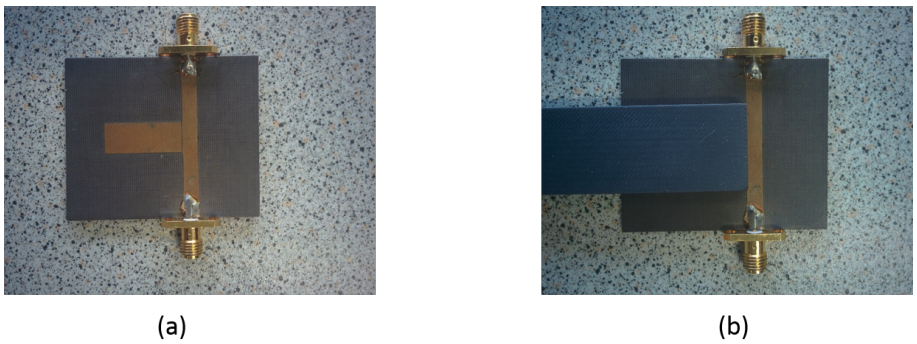


Figure 3.13 – Résonateur parallèle à vide en (a) et chargé par la résine de polyuréthane UR5044 en (b)

pouvons passer à la partie simulation sous ADS pour remonter à la valeur de permittivité du UR5044.

3.6.2 Étape de simulation

Dans cette partie, nous simulons une ligne de 10 cm sur un substrat de mêmes caractéristiques que celui employé durant la phase expérimentale : 1,524 mm d'épaisseur et une permittivité relative ϵ_r de 2,55.

Pour avoir une impédance caractéristique égale à 50 Ω, sa largeur devra être égale à 4,29 mm.

En résumé, nous avons pour les mesures en simulation une ligne de 10 cm de longueur et 4,29 mm de largeur sur un substrat téflon de 1,524 mm de hauteur et de permittivité relative égale à 2,55.

Nous définissons les accès de ligne des deux côtés comme des ports 50 Ω type TML (Transmission Line Calibration).

Nous effectuons ensuite une simulation type S-Parameter.

Nous traçons alors la constante de propagation γ_1 pour récupérer la constante de phase β telle que $\beta = Im(\gamma_1)$.

Simulation à vide :

$\beta = 30{,}744\ rad.m^{-1}$

À partir de β, nous remontons à la valeur de ϵ_{eff} à partir des deux égalités suivantes :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{3.4}$$

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}} f} \tag{3.5}$$

Des équations 3.4 et 3.5 nous déduisons l'égalité suivante :

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c\beta}{2\pi f}\right)^2 \tag{3.6}$$

Ce qui nous donne une permittivité effective à vide : $\epsilon_{eff-vide} = 2{,}16$

Simulation en charge :

Pour remonter à la valeur de la permittivité relative de l'UR5044, nous partons de l'égalité suivante :

$$\epsilon_{eff-chargé} = \epsilon_{eff-vide} \left(\frac{f_{\text{à}vide}}{f_{chargé}}\right)^2 \tag{3.7}$$

En utilisant la configuration série de la partie mesure expérimentale avec $f_{\text{à}vide} = 4{,}324$, $f_{chargé} = 4{,}068$ et $\epsilon_{eff-vide} = 2{,}16$, nous obtenons :

$\epsilon_{eff-chargé} = 2{,}44$

Il s'agit maintenant de déterminer de manière empirique la valeur de permittivité relative du matériau placé au dessus de la ligne afin de remonter à la valeur de $\epsilon_{eff-chargé}$ ci-dessus.

La valeur de permittivité relative du UR5044 obtenue, dans le domaine micro-ondes est alors :

$\epsilon_{UR5044} = 2,3$

Pour vérifier l'exactitude du résultat, nous effectuons le même calcul mais cette fois à partir des valeurs mesurées avec la configuration parallèle, pour laquelle la permittivité relative de l'UR5044 est égale à 2,3. Ce qui est bien loin de la valeur

du constructeur à 50 Hz de 4,9. Ceci est une explication raisonnable au décalage fréquentiel constaté en mesure sur le premier prototype.

En effectuant une simulation avec la nouvelle valeur de permittivité du polyurethane, nous obtenons une fréquence de résonance de 1054 MHz, comme le montre la phase du coefficient de réflexion de la Figure 3.14. Ce résultat va dans le sens des résultats de mesure obtenus pour le premier prototype (3.11) et corrobore ainsi cette méthode de détermination de permittivité de matériaux.

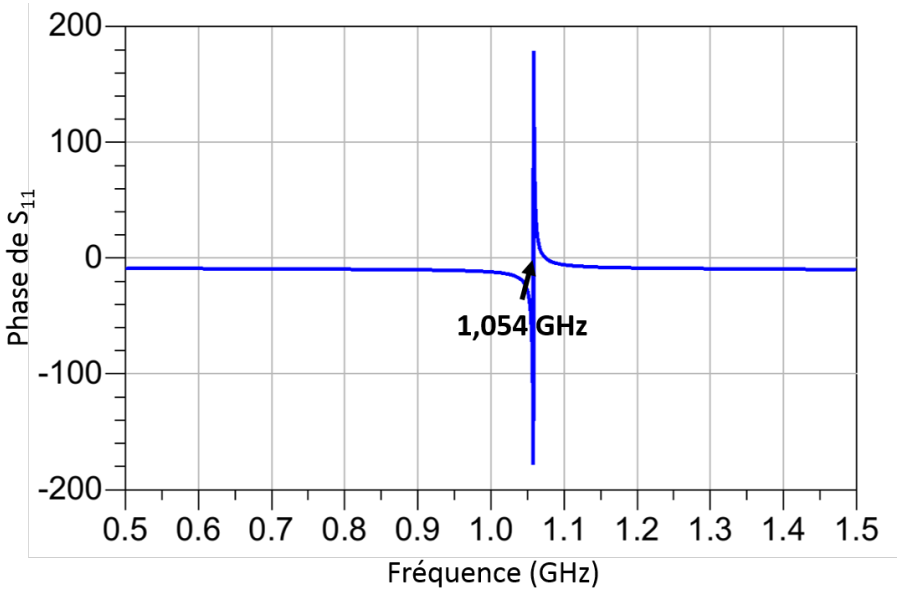


Figure 3.14 – Mise en évidence de la fréquence de résonance du premier prototype de tag avec la nouvelle valeur de permittivité mesurée

3.7 Réalisation et résultats de simulation du second prototype d'antenne

À partir de la valeur mesurée de constante diélectrique du polyuréthane, nous réalisons un second prototype de tag avec les mêmes étapes que pour le premier. L'antenne réalisée est visible au niveau de la Figure 3.15.

Coefficient de réflexion S_{11} :

Comme nous pouvons le voir dans la Figure 3.16, les résultats de simulation de l'antenne indiquent une résonance à 866,3 MHz. En raison de la proximité du métal,

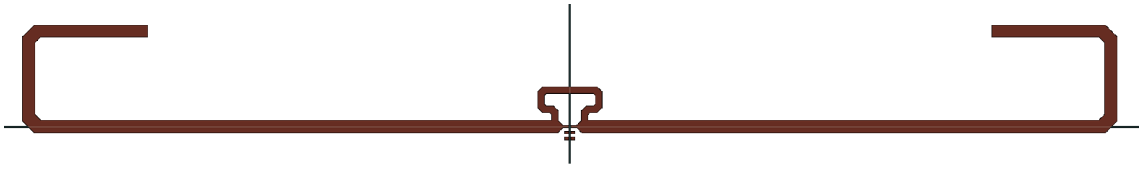


Figure 3.15 – Antenne dipôle pour le second prototype de tag

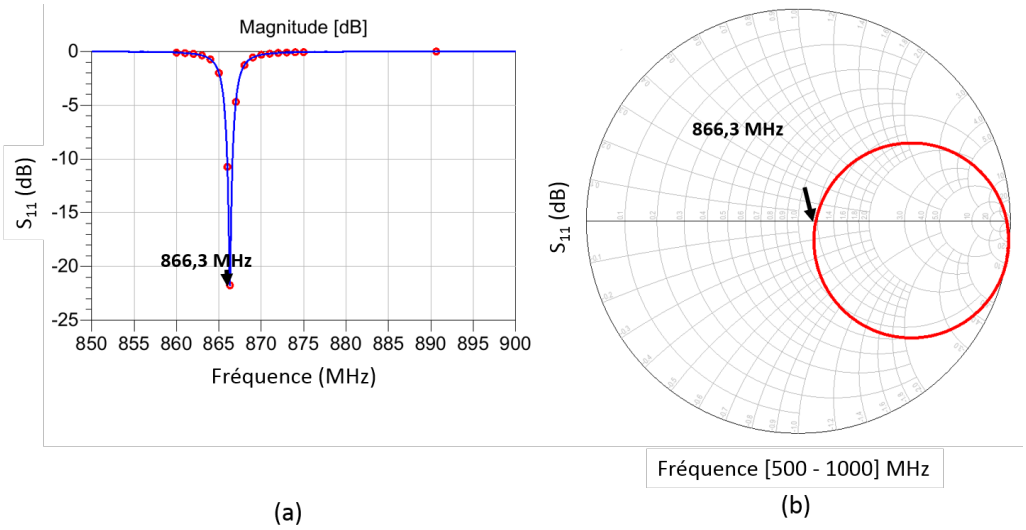


Figure 3.16 – Coefficient de réflexion en amplitude (a) et adaptation d'impédance de l'antenne à la puce Ucode 7m en (b) de l'antenne du second prototype de tag

la bande passante n'est que de 1 MHz. Nous verrons, plus tard, qu'en mesure le tag s'avère être moins sélectif.

Paramètres de rayonnement :

Le rayonnement de l'antenne du second prototype est équivalant à celui du premier prototype comme le montre la Figure 3.17.

Puissance rayonnée :

Avec un rendement affiché de 96%, la puissance rayonnée par l'antenne est de 5,8 mW pour une tension d'alimentation de 1 V, comme le montre la Figure 3.18.

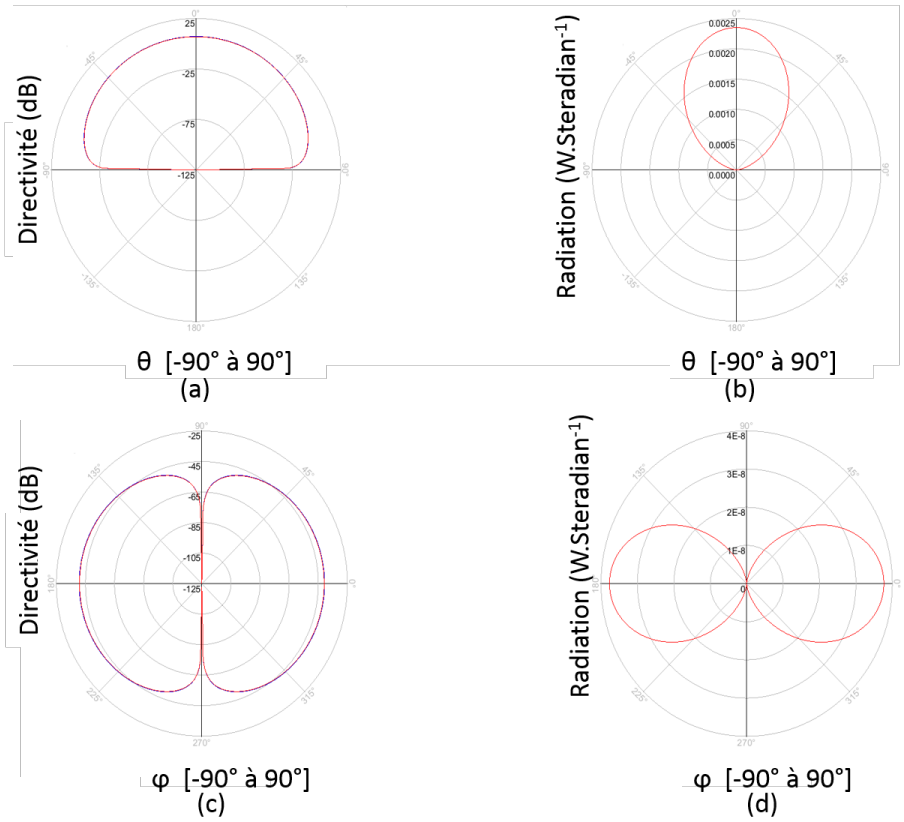


Figure 3.17 – Caractéristisation du rayonnement de l'antenne du second prototype avec : (a) Diagramme de rayonnement et (b) intensité de rayonnement sur le plan E, (c) diagramme de rayonnement et (d) intensité de rayonnement sur le plan H

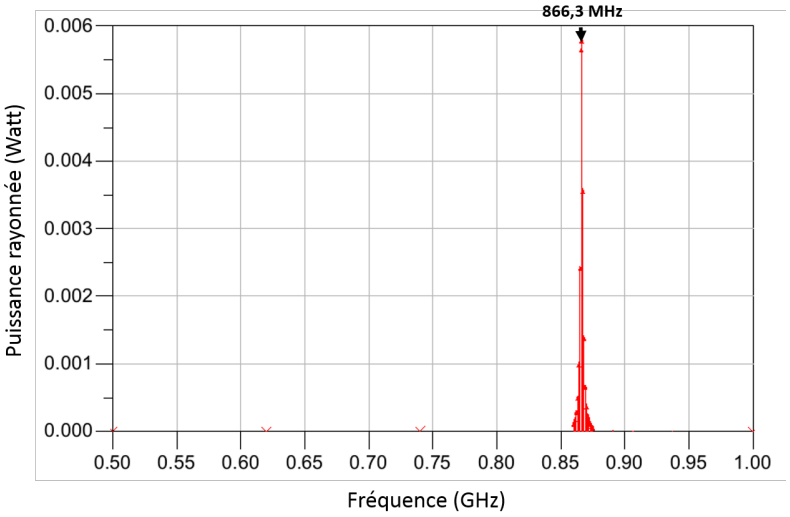


Figure 3.18 – Puissance rayonnée par l'antenne du second prototype en fonction de la fréquence

3.8 Mesures de performances du second prototype de tag

Le second tag RFID UHF conçu est présenté dans la Figure 3.19. Ses dimensions sont : 108x15x5 mm. Nous avons pour celui-ci fait en sorte que les pistes de l'antenne soient à nu. Cela permettra de modifier ses dimensions pour un éventuel ajustement de sa fréquence de résonance.

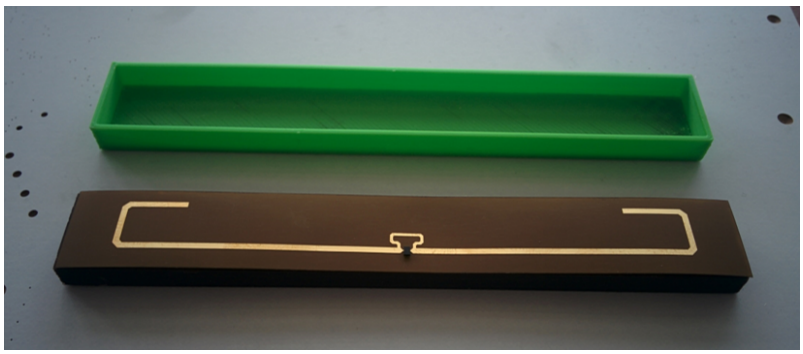


Figure 3.19 – Second prototype de tag RFID UHF

3.8.1 Distance d'activation du tag

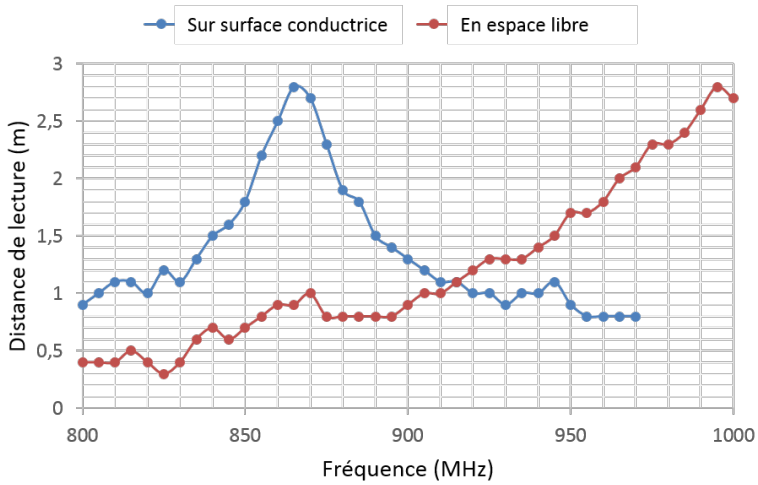


Figure 3.20 – Distance de lecture du tag mesurée avec et sans métal

Sur la Figure 3.20, nous pouvons voir que disposé sur un objet conducteur, le tag fonctionne à une distance maximale légèrement inférieure à 3 m. Nous pouvons également constater le décalage fréquentiel induit par la présence du métal en dessous

du tag. Le tag que nous avons réalisé fonctionne bien dans la bande RFID UHF lorsqu'il est disposé sur un objet métallique.

3.8.2 Diagramme de rayonnement

Maintenant que le tag répond bien à la fréquence désirée, nous allons pouvoir caractériser son rayonnement à l'aide d'un second banc expérimental de la plateforme expérimentale dédiée à la RFID UHF du laboratoire ESYCOM.

Dispositif expérimental de mesure du diagramme de rayonnement du tag RFID UHF :

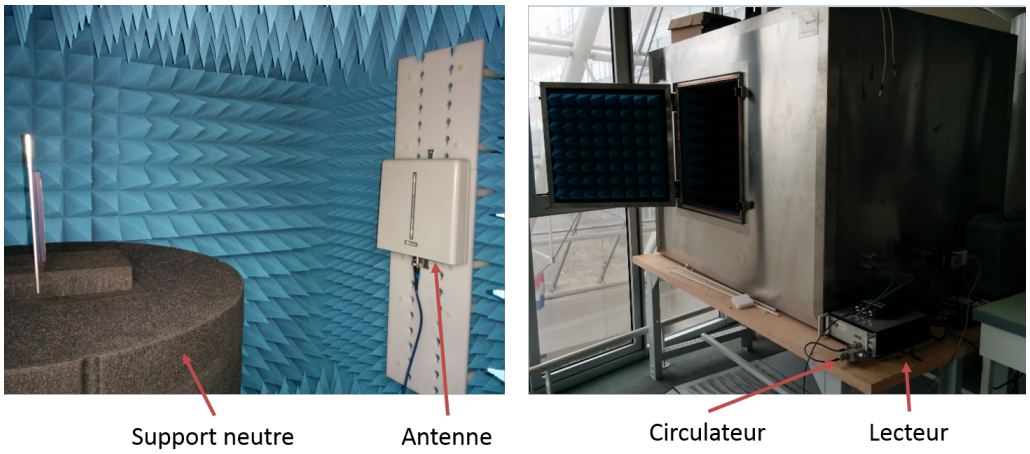


Figure 3.21 – Banc expérimental de mesure du diagramme de rayonnement pour tag RFID UHF

Comme nous le montre la Figure 3.21, ce dispositif est une "mini"-chambre anéchoïque. Il se sompose des éléments suivants :

— d'un lecteur RFID UHF : le Tagformance Lite ;
— d'une antenne RFID UHF ;
— d'un socle rotatif de permittivité neutre ;
— du logiciel de contôle : Tagformance 7.

Le principe de fonctionnement est le même que pour le banc expérimental précédent : la puissance de l'antenne augmente jusqu'à activer le tag. Le calcul pour déterminer la distance de lecture est donné dans l'équation 3.1. Ce processus est répété pour tous les angles sur 360° avec un pas ajustable, que nous réglons à 5°. La mesure se fait pour une fréquence fixe, il n'y a pas de balayage fréquentiel.

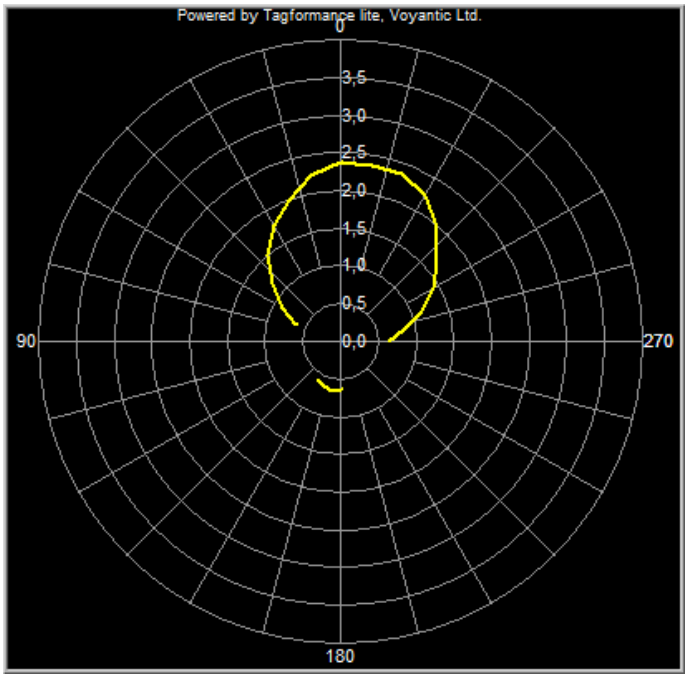


Figure 3.22 – Diagramme de rayonnement dans le plan E du tag donnée en distance maximale d'activation (en m)

Résultat de mesure du diagramme de rayonnement :

Sur le diagramme de rayonnement de la Figure 3.22, nous constatons une distance maximale inférieure à celle mesurée sur le premier banc de mesure. Ceci peut s'expliquer par une différence de positionnement du tag qui, dans le cas de la chambre anéchoïque, n'est pas parfaitement collé au plan conducteur lors de la rotation du support central neutre. Cela a pour conséquence une variation de l'impédance de l'antenne et une légère désadaptation de celle-ci.

Nous observons un lobe arrière malgré la présence du plan métallique qui s'explique par le fait que les parois n'ont pu éviter les réflexions pour un certain niveau puissance de l'antenne du lecteur et une orientation du tag donnée.

3.8.3 Autres paramètres de fonctionnement du tag mesurés à partir du Tagformance Hand Carry Kit

La présentation des paramètres caractéristiques des performances du transpondeur est basée sur les formules de l'Annexe A et celles présentées dans la documentation technique du Tagformance Hand Carry Kit [Voy15].

Distance maximale de lecture retour T → L :

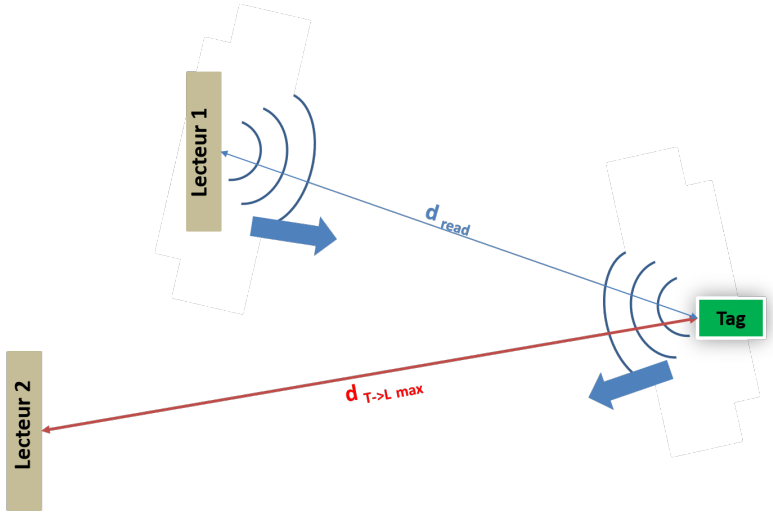


Figure 3.23 – Schéma de principe de la détermination de la distance maximale de lecture retour T→L

Pour cette mesure, comme le présente la Figure 3.23, nous considérons deux antennes différentes pour la mesure, une émettrice et une seconde réceptrice. Il s'agit là de déterminer la distance (en réception) à laquelle un lecteur équipé d'une antenne avec une sensibilité de -70dBm et un gain de 4dBi peut encore déchiffrer la réponse venant du tag. Pour mesurer ce paramètre, l'antenne émettrice envoie la puissance EIRP maximale à la distance d'activation maximale. La mesure réalisée s'appuie sur la formule suivante :

$$d_{T\rightarrow Lmax} = \sqrt{\frac{P_{T\rightarrow L}}{P_{EIRP,BS,limit}}}\frac{c}{4\pi f} \tag{3.8}$$

Avec la sensibilité du lecteur 2 (cf Figure 3.23) $P_{EIRP,BS,limit}$ = -74 dBm = 40 pW.

D'après les résultats de la Figure 3.24, à 867 MHz, la distance de lecture retour maximale est de 13,5 m. La distance communication entre le tag et le lecteur est limitée par la communication dans le sens L → T, principalement en raison de la sensibilité de la puce et de la désadaptation d'impédance entre l'antenne et la puce au niveau du tag. La sensibilité des antennes de lecteur est supérieure à -70 dBm tandis que celle d'une puce RFID UHF est de -20 dBm en moyenne, ce qui ne peut être atteint que dans le cas d'une adaptation d'impédance parfaite avec son antenne.

Surface équivalente radar différentielle $\Delta\sigma$ La surface équivalente radar différentielle peut être mesurée à l'aide du Hand Carry Kit, elle nous donnera une

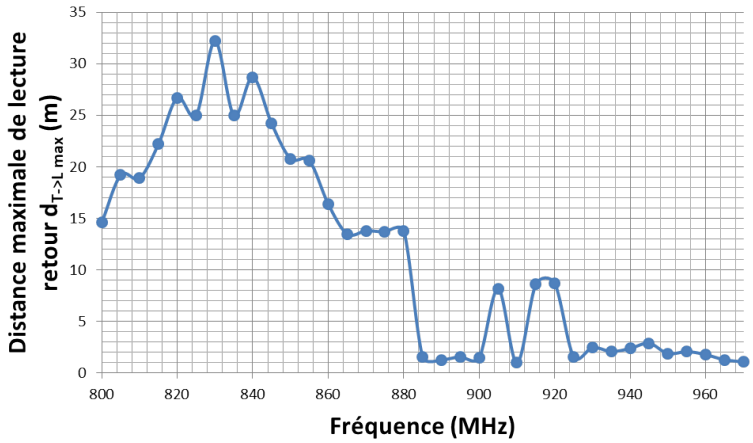


Figure 3.24 – Distance de lecture retour maximale du tag en fonction de la fréquence

information sur la qualité de la rétro-modulation du transpondeur.

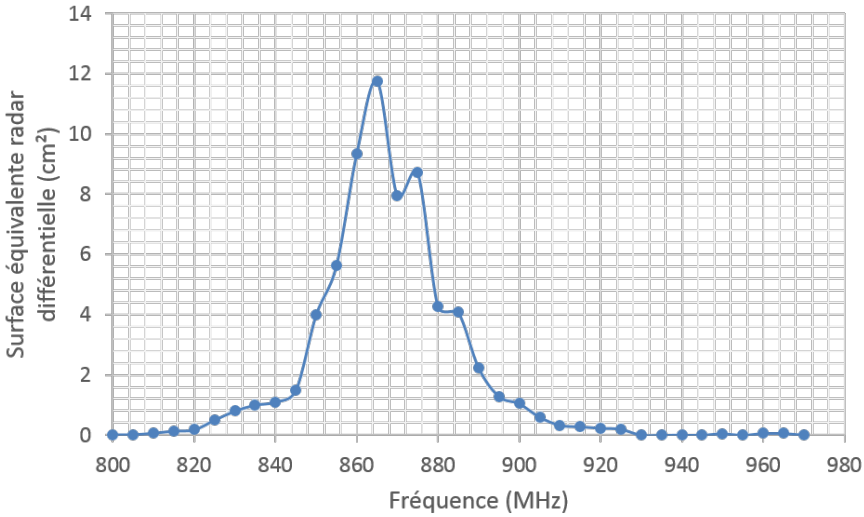


Figure 3.25 – Surface équivalente radar différentielle du tag en fonction de la fréquence

L'amplitude de rétro-modulation est maximale à 865 MHz. La courbe de la Figure 4.6 suit globalement la tendance de celle de la distance maximale d'activation du tag.

Puissance du signal reçu par le lecteur $P_{Lecteur}$:

Cette puissance correspond à la puissance du signal reçu au niveau du port d'entrée du lecteur. Son calcul se fait à partir des valeurs de puissances du signal complexe P_1 et P_2, correspondants aux 2 états du signal retour rétro-modulé, comme le montre la Figure 3.26.

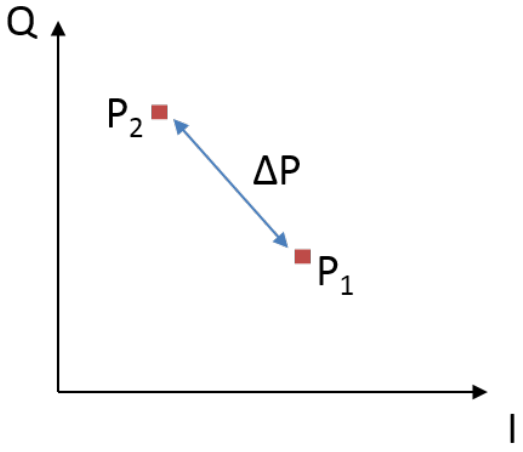


Figure 3.26 – Diagramme de constellation de la réponse du tag reçu par le lecteur

$$P_{Lecteur} = \frac{1}{2}\Delta P \tag{3.9}$$

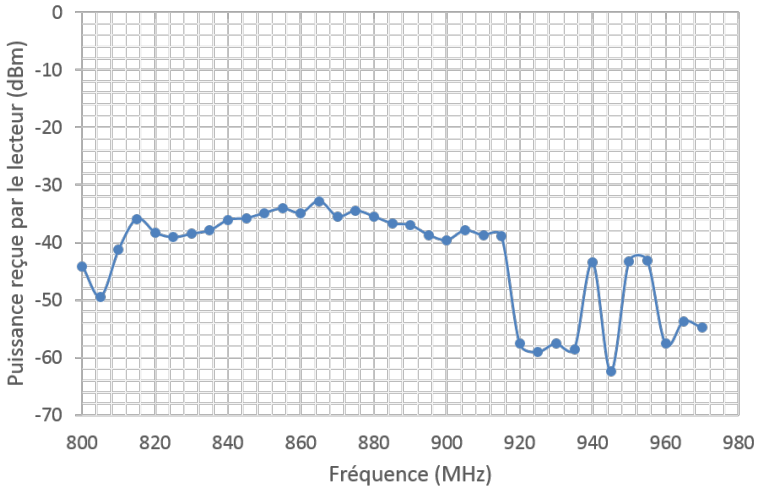


Figure 3.27 – Puissance moyenne provenant du transpondeur au niveau du lecteur

Les lecteurs du commerce possèdent une sensibilité inférieure à -70 dBm. Le résultat de la Figure 3.27 nous confirme que le paramètre limitant les performances d'une solution RFID UHF est la sensibilité du tag.

3.8.4 Discussions des résultats

Avec ce second prototype, la distance de communication maximum à 867 MHz entre le lecteur et le tag est de trois mètres environ. Les performances sont intéressante et valident l'approche de conception en mettant en priorité l'aspect pratique et économique pour un déploiement à l'échelle industrielle. Dans le cas d'un usage d'un portique RFID UHF, la distance entre les antennes du lecteur et les tags est de l'ordre de 2 à 3 mètres. Les performances de ce second prototypes sont satisfaisantes au vu des matériaux utilisés mais peuvent être un peu justes. Pour améliorer les performances tout en gardant le même packaging, nous équiperons le prochain prototype d'une antenne fente, analogue à l'antenne dipôle comme présenté dans le premier chapitre (1.6), plus performante sur du métal [Zho10, CLM09].

Il aurait été intéressant de continuer à optimiser cette solution de tags souples mais un changement de stratégie du coté d'Air Liquide consistant à mettre en priorité l'accent sur le développement d'une solution intégrée dans l'architecture des futures bouteilles, nous contraint à laisser de coté le développement de tags flexibles pour les bouteilles existantes.

3.9 Intégration de la solution RFID UHF dans les nouvelles générations de bouteilles

3.9.1 Conception du tag intégré et de son antenne fente

Les nouvelles générations de cylindres intégreront dans leur architecture même des systèmes embarqués communicants. Les différentes technologies de communication dont RFID UHF seront prises en considération pour l'élaboration du cahier des charges incluant un aspect objets connectés auquel devront répondre les futures réalisations.

Dans cette nouvelle bouteille, au niveau du col, un emplacement est réservé au tag RFID UHF. L'emplacement de la solution RFID UHF dans la configuration, visible sur la Figure 3.28, fait que le tag devra être incurvé. Cette fois la partie métallique sera en dessous mais également sur le coté extérieur du col. Ces paramètres environnementaux seront pris en compte dans la conception du nouveau prototype.

Afin de réaliser et caractériser l'antenne fente, les trois phases de conception sont les suivantes :

1. design de l'antenne non incurvée sous ADS Momentum ;

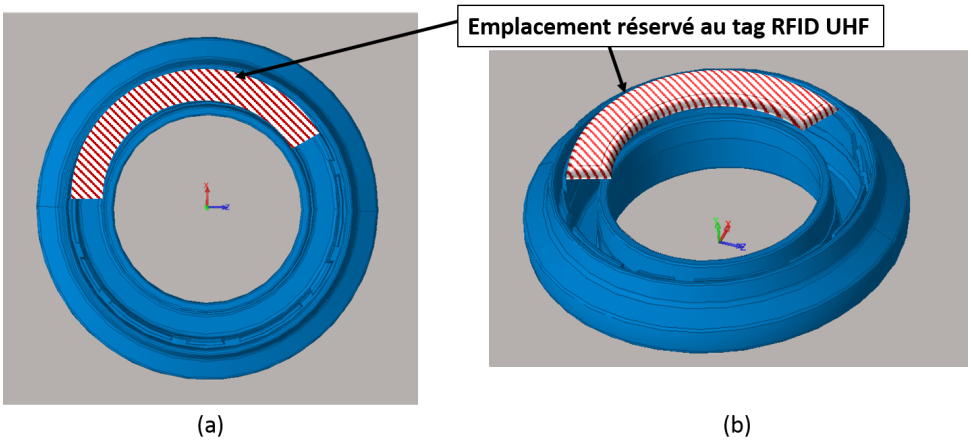


Figure 3.28 – Vue global de la pièce supérieure de la bouteille et de l'emplacement réservé au tag RFID UHF avec en (a) une vue du dessus et en (b) une vue en perspective

2. l'antenne est alors exportée sous EMPro pour être courbée et intégrée dans son emplacement au niveau du col ;
3. puis l'ensemble est à nouveau importée sous Momentum pour la caractérisation.

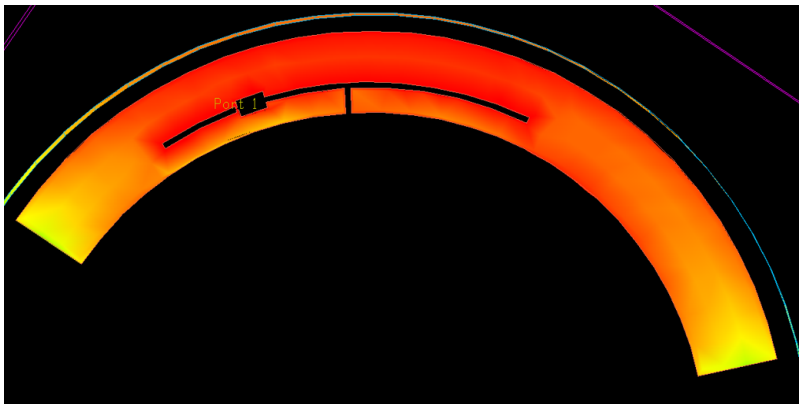


Figure 3.29 – Antenne fente pour tag RFID UHF

L'antenne réalisée pour le tag est présentée dans la Figure 3.29. elle est constituée de trois niveaux :

— sur la couche supérieure se trouve l'antenne fente ;
— sur la couche inférieure, nous avons un plan métallique ;
— entre les deux, nous avons une substrat FR4 avec une permittivité relative de 4,3 et d'une épaisseur de seulement 1,55 mm. Il n'est plus nécessaire d'avoir un substrat flexible ;
— sur la partie latérale extérieure, un plan métallique vertical, pour représenter

le bord extérieur du col qui est conducteur, allant de la couche inférieure jusqu'à la couche supérieure où se trouve l'antenne.

3.9.2 Simulation de l'antenne fente incurvée

Nous obtenons pour cette antenne les performances présentées dans la Figure 3.30.

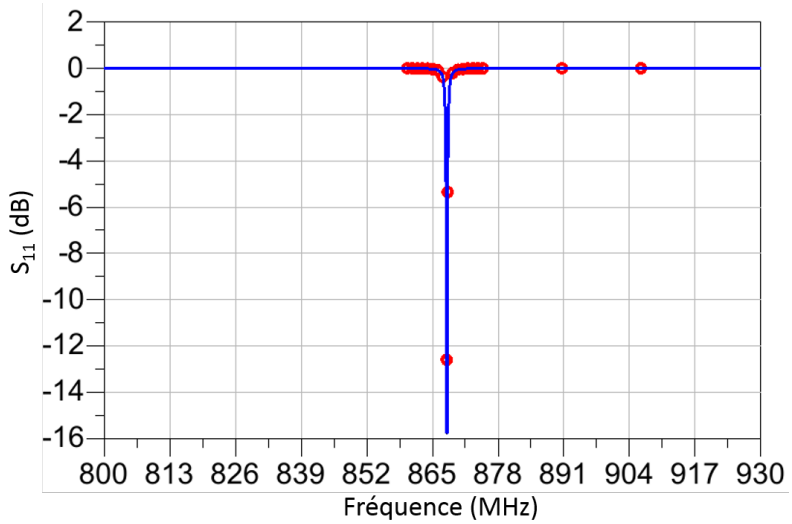


Figure 3.30 – Coefficient de réflexion de l'antenne fente en fonction de la fréquence

Comme pour l'antenne dipôle, les résultats de simulations laissent à penser que le facteur de qualité Q de l'antenne est très important, ce qui n'est pas le cas en réalité comme nous avons pu le voir dans les résultats expérimentaux.

Le diagramme de rayonnement est de la même forme que celui de l'antenne dipôle, comme le montre la Figure 3.31, avec un angle d'ouverture légèrement plus important et une intensité de radiation supérieure. Les performances de rayonnement sont donc améliorées avec cette antenne.

La Figure 3.32 présente la puissance rayonnée de l'antenne fente. Pour un rendement de 92% environ, la puissance rayonnée atteint 9 mW pour une tension du générateur de 1 V à la fréquence de résonance, contre 5,8 mW pour l'antenne dipôle (voir Figure 3.18).

L'antenne fente, malgré des conditions moins favorables comme une distance au plan de masse bien plus faible (1,55 mm contre 5 mm), présente des performances en simulation plus intéressantes que l'antenne dipôle. Pour un même niveau de tension injecté en entrée, la puissance de rayonnement est plus importante.

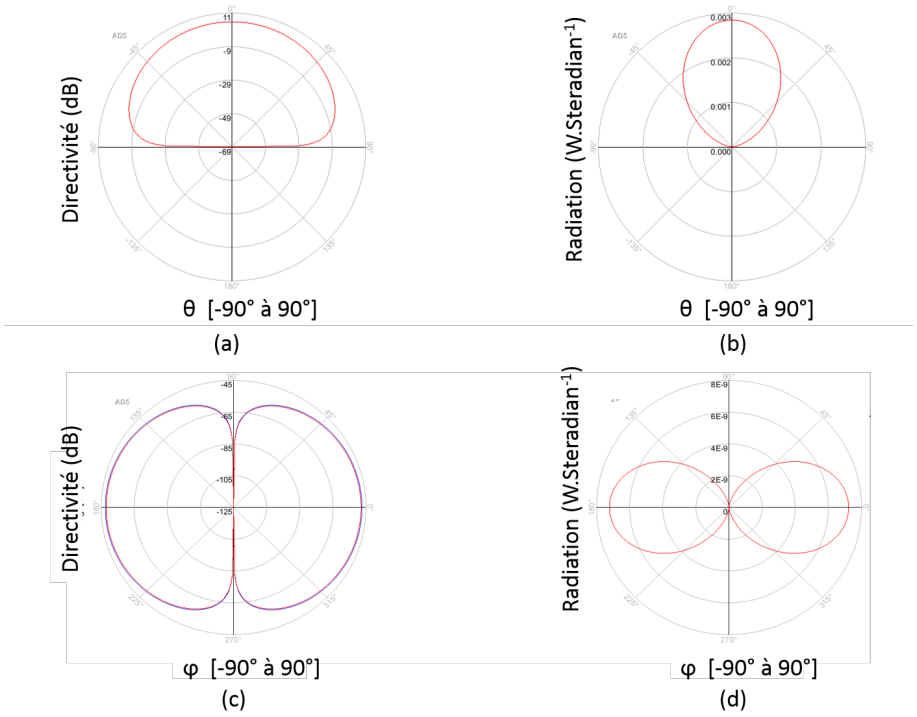


Figure 3.31 – Caractéristisation de l'antenne fente incurvée : (a) Diagramme de rayonnement et (b) intensité de rayonnement sur le plan E, (c) diagramme de rayonnement et (d) intensité de rayonnement sur le plan H

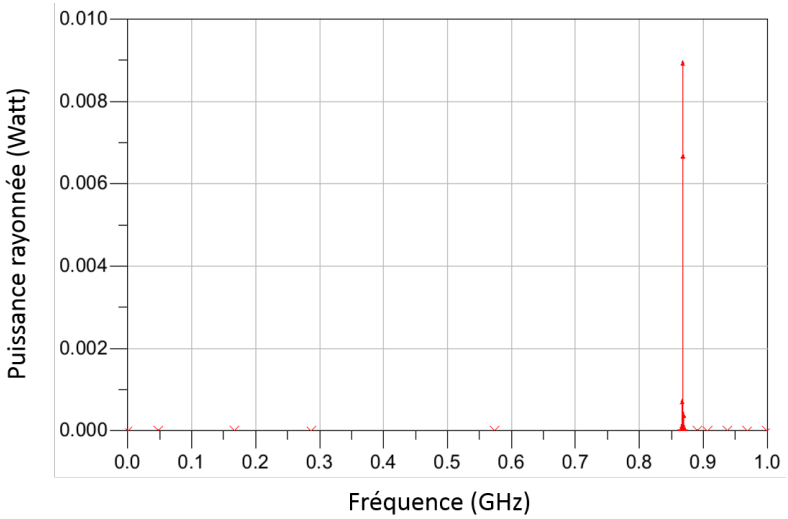


Figure 3.32 – Puissance rayonnée par l'antenne fente en fonction de la fréquence

3.10 Conclusion

Le développement des premiers prototypes de tag a été l'occasion d'avoir une idée claire sur les paramètres à prendre en considération dans le développement d'une solution RFID UHF en environnement hostile. Notre second prototype présente des performances de communication permettant une distance de lecture de presque 3 mètres. Nous souhaitons cependant obtenir de meilleurs résultats. Pour cela nous avons développé et simulé une solution de tags RFID UHF dotée d'une antenne fente et directement intégrée dans le design des bouteilles de nouvelle génération.

Comme présenté dans le Chapitre 1, l'antenne fente est plus adaptée à un milieu métallique. Les deux premiers prototypes ont permis de mettre en évidence les points clés pour une optimisation du système et d'appréhender les étapes de conception et de caractérisation, ce qui est plus facile sur une antenne dipôle que sur les autres types d'antenne.

Pour continuer dans l'optimisation de la logistique, nous étudions la possibilité d'intégrer au tag RFID UHF un capteur embarqué doté d'un circuit de récupération d'énergie RF, afin d'apporter en plus d'une information d'identification, une information sur l'état de la bouteille. C'est le sujet du chapitre suivant.

Chapitre 4

Réalisation d'un circuit de récupération d'énergie RFID UHF pour capteur connecté

Sommaire

4.1 Introduction 107

4.2 Système de récupération d'énergie en RFID UHF 108

4.2.1 Principe de fonctionnement général de la récupération d'énergie RF 108

4.2.2 État de l'art des circuits de récupération d'énergie RFID UHF 110

4.3 Architecture globale du tag RFID UHF augmenté conçu 112

4.3.1 Le circuit de mesure et de communication 113

4.3.2 Le circuit de récupération d'énergie 116

4.3.3 Superviseurs 118

4.4 Étude et optimisation du circuit de récupération d'énergie 120

4.4.1 Présentation et caractérisation du DC-DC Boost converter 120

4.4.2 L'étage multiplieur et son circuit d'adaptation d'impédance 122

4.5 Performances du circuit prototype de récupération d'énergie 127

4.5.1 Caractérisation par mesure expérimentale du multiplieur et du réseau d'adaptation d'impédance 128

4.5.2 Étude de performances de l'ensemble du circuit 131

4.6 Conclusion 132

4.1 Introduction

La récupération d'énergie est aujourd'hui un domaine en plein essor. Elle vise à exploiter une ou plusieurs sources d'énergie présentes dans notre environnement, afin d'alimenter un système allant du simple circuit composé d'une LED à un immeuble 100% autonome. Il existe différents niveaux de récupération d'énergie allant du nanowatt provenant de l'impact des gouttes de pluie à plusieurs kilowatts issus du rayonnement solaire. La finalité d'un dispositif de récupération d'énergie peut être :

— **écologique** : il garantit en effet une source énergétique avec un impact environnemental réduit voir presque nul. De plus, face à la multiplication des équipements sans fil il s'avère être une alternative plus respectueuse de l'environnement par rapport à la pile ;

— **économique** : le retour sur investissement de ces équipements peut être intéressant : les sources d'énergies embarquées ont un coût plus ou moins important et leur entretien également.

— **pratique** : les systèmes sont plus faciles à installer et nécessitent peu voir pas d'entretien ;

— **stratégique** : l'indépendance énergétique est aujourd'hui une nécessité pour certains pays. De même que pour les entreprises aux besoins énergétiques importants, la récupération d'énergie permettrait d'être moins sujet aux fluctuations tarifaires de l'énergie et ainsi de mieux maitriser ses dépenses.

Dans notre cas, la RFID UHF étant utilisée pour l'identification des bouteilles, il serait intéressant d'exploiter l'énergie provenant des lecteurs afin d'alimenter un capteur de pression qui viendrait se greffer au tag. Dans cette étude, nous n'aborderons pas le principe de fonctionnement du capteur mais uniquement le circuit de récupération d'énergie. À l'échelle des actifs industriels tels que les bouteilles de gaz, le faible niveau d'encombrement toléré nous impose le recours à des solutions qui fournissent un quantité d'énergie assez limitée. Ce qui est le cas de l'énergie transportée par les OEM. Elle reste cependant suffisante pour alimenter un système de mesure peu élaboré.

Concrètement, notre principal défi réside dans la conception d'un circuit de récupération d'énergie RFID UHF au coût convenable et dont le niveau d'efficacité est au diapason de l'état de l'art. Il ne s'agit pas de concevoir un prototype de

laboratoire avec d'excellentes performances et de négliger les contraintes imposées par un déploiement industriel. L'avantage d'une solution de capteur connecté et autonome permettrait de monter en classe pour le tag tout en restant totalement passif. Comme évoqué précédemment, cela permettra également de s'affranchir des contraintes d'entretien qu'imposerait la présence d'une batterie ou d'une pile, ce qui présente à la fois un intérêt économique et écologique.

Le tag augmenté que nous souhaitons développer doit permettre une meilleure gestion du parc de bouteilles dans les centres de stockage et de remplissage. Pour certains d'entre eux, les inventaires peuvent parfois nécessiter le blocage du centre. Quand ce n'est pas cas, cela constitue un réel challenge logistique du fait de l'entrée et sortie continuelle des bouteilles. La solution apportée par le fait d'équiper les bouteilles d'un tag augmenté est d'identifier les bouteilles mais également d'avoir une information supplémentaire sur le contenu. Pour cela, la zone où les bouteilles sont entreposées serait continuellement arrosée par des lecteurs RFID UHF. Cette énergie émise par les lecteurs et récupérée à l'aide d'un circuit de récupération d'énergie au niveau du tag permettra d'effectuer des mesures de pression de gaz contenu dans les bouteilles et ainsi avoir en continu un inventaire du nombre de cylindres vides ou pleins dans des centres pouvant en contenir plusieurs dizaines de milliers.

Dans ce chapitre nous commencerons par exposer un état de l'art de la récupération d'énergie dans le domaine RF et des solutions proposées au niveau de la RFID UHF. Ensuite nous détaillerons l'architecture générale de notre tag augmenté et de son circuit d'alimentation. Ce dernier fera l'objet d'une étude plus approfondie dans la troisième section. Enfin, les résultats de mesures sur une carte prototype de notre circuit de récupération d'énergie seront présentés avant de conclure ce chapitre.

4.2 Système de récupération d'énergie en RFID UHF

4.2.1 Principe de fonctionnement général de la récupération d'énergie RF

La récupération d'énergie RF se fait à l'aide de ce que l'on appelle une rectenna ou antenne redresseuse, qui convertit l'énergie radiofréquence en un courant continu.

Elle est composée d'une antenne et d'un circuit de redressement. L'énergie des OEM est collectée au niveau de l'antenne. Ensuite, à l'aide d'un circuit de conditionnement, le signal est redressé puis envoyé dans une cellule de stockage ou directement à la charge.

Les trois phases de récupération d'énergie RF, illustrées dans la Figure 4.1 sont :

1. la collecte de l'énergie des OEM, convertie en énergie électrique. Ceci a lieu au niveau de l'antenne ;
2. le conditionnement du signal avec un circuit de conditionnement ;
3. le stockage de l'énergie à l'aide d'une capacité de charge ou d'une mini batterie ou son utilisation directe par la charge.

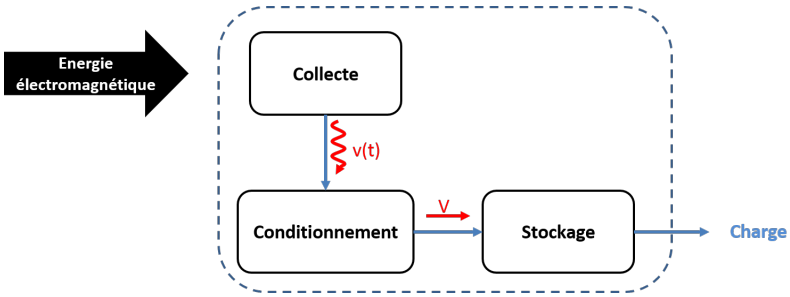


Figure 4.1 – Schéma bloc des étapes de la récupération d'énergie RF

Le niveau d'énergie des OEM limite fortement les cas d'application. Cela reste cependant suffisant dans le cas de circuits basiques fonctionnant avec seulement quelques µW [SCH16]. L'énergie collectée servira à alimenter un simple capteur ou actionneur. Ceci est de nos jours envisageable grâce aux avancées technologiques permettant d'avoir des circuits intégrés très basse consommation.

La puissance récupérée P_r au niveau de l'antenne est fonction de la distance d de la source émettrice, de la longueur d'onde λ du signal et de la puissance d'émission P_e. Elle peut être déterminée en première approximation à l'aide de la formule de Friis [Fri46] présentée dans l'équation 4.1 :

$$P_r = P_e G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \tag{4.1}$$

Avec G_e et G_r respectivement le gain de l'antenne émettrice et celui de l'antenne réceptrice.

Facteurs de mérite :

Nous utilisons deux facteurs de mérite pour caractériser les performances de ce type de circuit :

— l'efficacité de conversion en puissance ECP : elle définit le niveau de rendement de l'ensemble du système par la formule 4.2 :

$$ECP = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{4.2}$$

Où P_{in} et P_{out} représentent respectivement la puissance en entrée et celle obtenue en sortie du circuit.

Les pertes proviennent essentiellement des courants de fuite, des tensions de seuil de certains composants et des effets parasites [Val14].

— la sensibilité qui est définie comme la puissance minimum à partir de laquelle nous obtenons en sortie du circuit de conditionnement un niveau de puissance exploitable.

4.2.2 État de l'art des circuits de récupération d'énergie RFID UHF

Nous proposons une vision globale des principaux aspects d'un circuit de récupération d'énergie afin de concevoir une solution de récupération d'énergie RFID UHF pour tag augmenté.

En RFID UHF comme en RF de manière générale, la source d'énergie peut être de deux sortes :

— ambiante, ce qui peut être intéressant si l'antenne utilisée est large bande. Dans ce cas elle pourra récupérer l'énergie, provenant de plusieurs sources, présente sur un large spectre. Cependant, le niveau d'énergie collecté dépend de l'endroit où se trouve l'objet. La possibilité de récupérer un niveau d'énergie exploitable n'est pas garantie en tout lieu.

— ciblée, dans ce cas le niveau d'énergie collecté est conditionnée par la présence d'une source émettant dans la bande de fréquence ciblée.

Les trois principales architectures de système autonomes sont :

— la configuration à une antenne avec switch [ZZH13a, LZC13, JZ14] ;

— la configuration à deux antennes [ZH13, ZLZQ14]. La première est dédiée à la récupération d'énergie et la seconde à la communication ;

— la configuration à une antenne doté d'un système de récupération d'énergie

et de traitement de l'information en séquentiel [ZZH13b].

Nous pouvons observer un synoptique de ces trois configurations au niveau de la Figure 4.2.

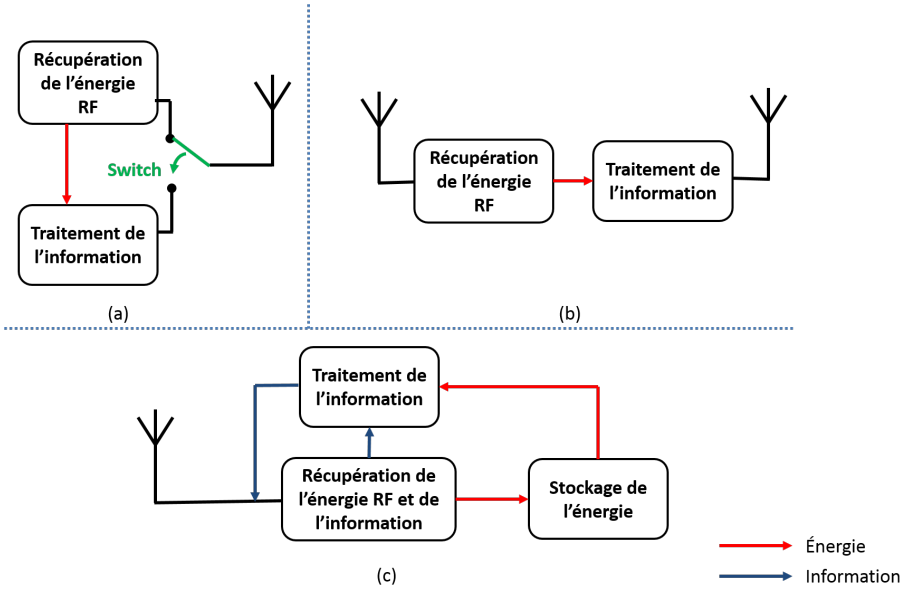


Figure 4.2 – Synoptique des trois principales configurations de systèmes communicants à récupération d'énergie avec en (a) la configuration avec switch, en (b) celle à deux antennes et en (c) la configuration séquentielle

Dans la littérature, l'approche utilisée pour la conception et l'optimisation du circuit de récupération d'énergie peut être définie selon les trois points suivants :

— méthode analytique, avec le développement d'un modèle mathématique pour mieux comprendre le comportement du système. Si le modèle est assez robuste (hypothèses d'application pas trop restrictives), il permettra de réaliser une optimisation dès les premières phases de conception [AvBDV05, LHW16, DVI05].

— méthode expérimentale, après une première détermination de la configuration et des composants optimaux à l'aide d'un logiciel de simulation, une étape d'ajustement sur circuit prototype est réalisée. [BSG+13, VUP+07, APSP14].

— le développement d'une nouvelle structure ou de nouveaux composants qui permettrait par exemple d'annuler les effets parasites dégradant l'efficacité du système comparé à certaines structures de bases, comme cela est le cas dans les travaux [LWZ+12, LVDN13, SCL16].

Il est à noter que ces méthodes de conception peuvent être complémentaires les unes des autres. En fonction de l'approche une, deux ou même les trois peuvent être em-

ployées. Tout est une question de temps et d'outils à disposition.

Un autre aspect essentiel pour la conception du circuit de récupération est le mode d'utilisation de l'énergie collectée qui peut se diviser en deux catégories :

— utilisation instantanée ou presque de l'énergie collectée. L'énergie collectée n'est pas stockée mais directement envoyée à la charge ;
— périodique ou différée. Dans ce cas, une cellule de stockage est nécessaire afin d'emmagasiner l'énergie en attendant son utilisation par la charge.

4.3 Architecture globale du tag RFID UHF augmenté conçu

Dans le cadre de la gestion des stocks de bouteilles de gaz, l'énergie RF semble être la seule exploitable. Cela à condition d'élaborer à la fois un circuit de mesure et de communication très faible consommation (de l'ordre de quelques µW) et un circuit d'alimentation avec un niveau de rendement suffisant.

Le circuit de mesure ne sera activé que lorsqu'une commande dans ce sens provenant du lecteur sera reçue et que l'énergie mise à disposition par le circuit d'alimentation sera suffisante. Si une requête est envoyée par le lecteur nécessitant de donner l'état de la bouteille et que l'énergie d'activation n'est pas encore atteinte, alors c'est la dernière mesure qui sera envoyée. Le tag augmenté devra disposer d'un système de contrôle de l'énergie disponible pour décider de l'activation ou non du capteur. Ce système permettra par la même occasion de s'assurer d'un autre point important, qui est la stabilité du système. Cela passe par une régulation de la tension de sortie du circuit d'alimentation afin d'optimiser le fonctionnement de l'ensemble du système et éviter une fluctuation de la tension qui pourrait nuire au circuit de mesure si cela se produisait en plein fonctionnement, surtout dans la phase de démarrage. Nous expliquerons plus en détails cet aspect dans la partie traitant des superviseurs.

En ce qui concerne les configurations possibles, celle à deux antennes nous semble la plus adaptée à notre usage. Elle permet en effet de dissocier physiquement la partie alimentation de la partie traitement de l'information. De plus, les switchs présents sur le marché ne sont pas adaptés à de la récupération d'énergie RF étant donné leur niveau de consommation énergétique. Ce qui écarte la configuration à une antenne. La configuration séquentielle nécessite un système beaucoup plus développé et donc

bien plus onéreux.

Enfin, dans le cas d'inventaire d'un parc de bouteilles à l'aide d'une solution RFID UHF, la source d'énergie est ciblée. Il s'agit du signal radio provenant du lecteur. Le capteur n'aura à effectuer une mesure que sur demande du lecteur. L'arrivée de la requête au niveau du tag implique que le circuit de récupération d'énergie reçoit également de l'énergie car il se trouve dans le champ du lecteur. Celui émettra en continu (dans le respect des normes, notamment sanitaires et, en termes de puissance et de période d'émission continue), pour permettre aux circuits d'alimentation de se charger.

À partir des objectifs de performances, des contraintes de coûts et des solutions présentes dans l'état de l'art, nous proposons une architecture d'un tag augmenté représenté dans la Figure 4.3.

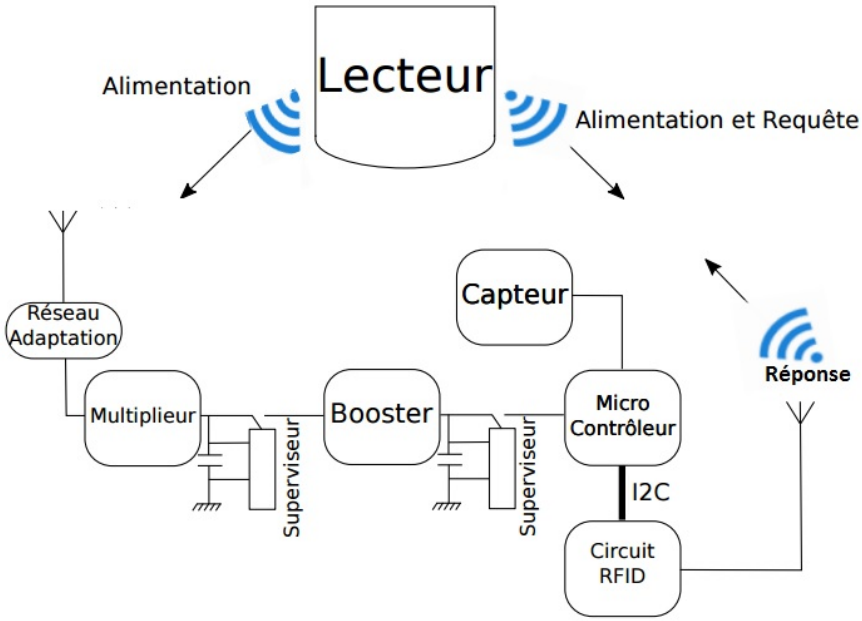


Figure 4.3 – Schéma bloc du capteur autonome et de son circuit de récupération d'énergie

4.3.1 Le circuit de mesure et de communication

Comme le montre la Figure 4.4, la partie mesure et communication du système est composée :

— d'un capteur de pression pour les mesures ;

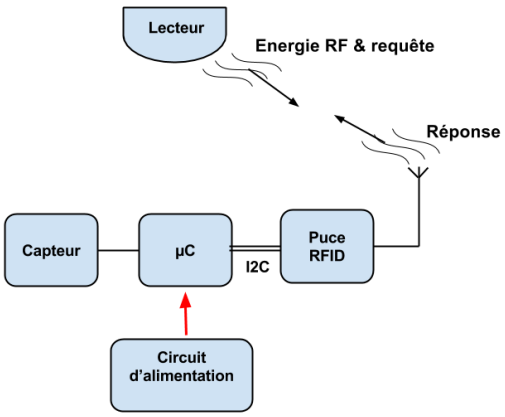


Figure 4.4 – Schéma de principe du circuit de mesure et de communication

— d'un microcontrôleur basse consommation
— d'une puce RFID UHF double interface.

Le capteur est connecté et piloté par un microcontrôleur qui est lui même relié à la puce RFID UHF via un bus I2C (Inter Integrated Circuit). Le fonctionnement du capteur connecté peut se diviser en deux parties :

1. la mesure :
   a Quand le microncontrôleur reçoit l'instruction de procéder à une mesure et que l'énergie stockée est suffisante à son activation, il initie une mesure via le capteur de pression ;
   b le capteur envoie au microcontrôleur le résultat ;
   c le microcontrôleur écrit le résulat de la mesure dans la mémoire de la puce RFID UHF via le bus I2C.
2. la communication :
   le lecteur envoie une requête au tag afin de connaitre l'état de l'objet, deux scénarios sont possibles :
   * le microcontrôleur ne peut pas être activé. Alors le tag renvoie la dernière mesure qu'il possède en mémoire ;
   * le microcontrôleur est actif alors la phase de mesure est réalisée et le résultat est envoyé au lecteur via le tag.

4.3.1.1 La puce RFID UHF

Une simple puce RFID UHF comme la Ucode 7m, employée pour les protoypes de tags présentés dans le chapitre précédent, avec une simple interface RF ne suffit plus. Dans le cas de systèmes RFID UHF plus complexes, il est nécessaire d'employer des puces avec un second type d'interface permettant de collecter des informations venant d'un capteur par exemple ou d'envoyer une commande à un actionneur. Des fabricants comme NXP ou Impinj ont développé des puces RFID UHF dotées d'une seconde interface de type I2C qui au même titre que l'interface RF peut accéder à la mémoire aussi bien en lecture qu'en écriture. Dans notre cas, elle permettra l'échange d'informations avec le microcontrôleur.

Les critères de sélection sont les mêmes que pour une puce classique, à savoir :

— la sensibilité en lecture ;
— la sensibilité en écriture ;
— l'espace mémoire utilisateur.

Nous avons dans ce cadre effectué une comparaison, exposée dans le tableau 4.1, entre trois puces RFID UHF du marché possédant une interface I2C.

Table 4.1 – Comparaison des sensibilités et espaces mémoires (EPC et utilisateur) des puces Ucode I2C de NXP, Monza X2K d'Impinj et SL900A d'AMS

Puce RFID UHF	Sensibilité en lecture(dBm)	Sensibilité en écriture (dBm)	Dimensions (mm)	Mémoires (bits)	
				EPC	Utilisateur
NXP UCODE I2C	-18	-11	1.6x1.6x0.5	160	3328
Impinj Monza X2K	-17	-12	1.6x1.6x0.375	128	2176
AMS SL900A	-15 (assistée d'une batterie)		3.25x3.25x0.9	144	8416

La puce SL900A même assistée d'une batterie ne peut atteindre les performances des puces Ucode I2C et Monza X2K qui présentent des performances presques similaires en terme de sensibilité de lecture et d'écriture. La puce de NXP se démarque au niveau de l'espace mémoire utilisateur 1,5 fois supérieure à la Monza X2K. C'est donc la Ucode I2C de NXP que nous avons sélectionné pour équiper notre tag augmenté.

4.3.1.2 Le microcontrôleur basse consommation

Le microcontrôleur est l'élément central du système. Il est à l'interface du circuit d'alimentation, de la partie communication et de la partie mesure. Il devra posséder une interface SPI (Serial Peripheral Interface) pour échanger avec le capteur de pression et une seconde de type I2C pour communiquer avec la puce RFID UHF. Nous avons fait le choix d'un microcontrôleur très basse consommation, le EFM8SB1 de Silicon Labs.

Bien que considéré comme un microcontrôleur très basse consommation, l'EFM8SB1 est de loin bien plus gourmand en énergie que le capteur de pression. En première approximation, le bilan d'énergie de l'ensemble du circuit peut se résumer à celui du microcontrôleur seul. Cette étude permettra de connaitre l'ordre de grandeur de l'énergie à fournir en sortie du circuit de récupération d'énergie.

Bilan d'énergie du EFM8SB1 :
Les caractéristiques d'activation de l'EFM8SB1 sont les suivantes :
— une tension de démarrage de 1,8 V ;
— un temps de mise en route de 31 ms ;
— une consommation de 19,4 µJ sur la période d'activation.

Ces valeurs vont nous permettre de fixer la tension à fournir ainsi que le dimensionnement de la cellule de stockage finale du circuit d'alimentation. En prenant une certaine marge de sécurité, nous fixons la tension de sortie permettant d'activer le circuit de mesure à 2,5 V. Le dimensionnement de l'élément de stockage sera explicité plus bas car il dépend du choix du type de stockage.

4.3.2 Le circuit de récupération d'énergie

Du fait de l'énergie nécessaire au circuit de mesure, un simple redresseur est insuffisant. Il est indispensable de développer un circuit plus élaboré, que nous détaillons dans ce qui suit.

Comme le montre la Figure 4.5, notre circuit de récupération d'énergie s'articule autour de deux capacités de charge chacune couplée à un superviseur. Plus précisément, le système se compose :
— d'une antenne qui transforme l'OEM incidente en signal électrique ;
— d'un réseau d'adaptation d'impédance LC (Matching Network), créant une surtension afin de passer plus facilement la tension de seuil des diodes du

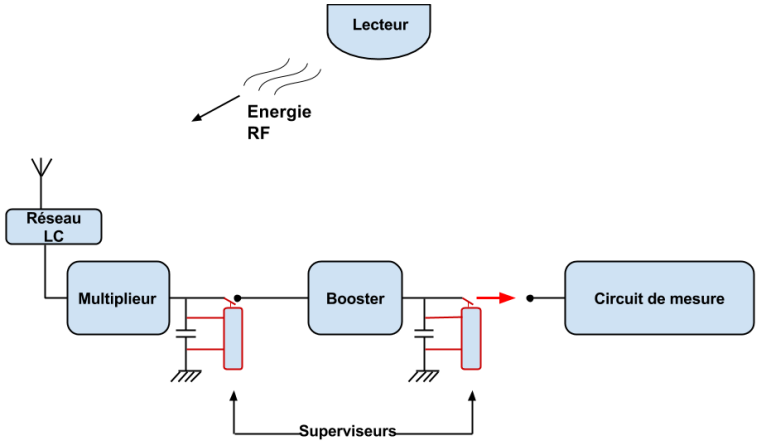


Figure 4.5 – Schéma de principe du circuit de récupération d'énergie RFID UHF

multiplieur en aval ;

— d'un multiplieur constitué d'un ensemble de rectifieurs en cascade. Il redresse le signal alternatif entrant et multiplie sa tension ;

— d'une première capacité de charge avec superviseur, le superviseur n'active le booster qu'au dessus d'un certain seuil de tension (avec hystérésis) ;

— d'un booster qui permet d'élever la tension qu'il reçoit en entrée (convertisseur DC-DC à découpage). La fluctuation de l'énergie aux bornes de l'antenne induit une instabilité de la tension redressée en sortie du multiplieur. Un convertisseur DC-DC peut éviter cela en régulant sa tension de sortie autour de la valeur désirée ;

— d'une seconde capacité de charge avec superviseur.

4.3.2.1 Cellules de stockage de l'énergie collectée

Pour notre cas d'usage, cet élément s'avère être indispensable car l'apport en énergie nécessaire sur une période entière de fonctionnement (réveil + exécution de la tâche) ne peut être garantie par le circuit de conditionnement seul. Dans le Tableau 4.2, nous présentons les prinicpaux avantages et inconvénients des super-capacités et des mini-batteries, qui sont les deux solutions envisageable pour stocker l'énergie collecté.

Les critères de sélection établis pour nos cellules de stockage sont les suivants :

— le taux de décharge ;

Table 4.2 – Comparaison des avantages et inconvénients des super-capacités et des mini-batteries

	Super capacité	Mini batterie
Avantages	• Nombre de cycles de charge/décharge important • Faible encombrement	• Faible autodécharge
Inconvénients	Courants de fuite importants	• Prix élevé • Tension d'alimentation élevée • Dimensions importantes

— les dimensions ;
— le coût ;
— la capacité de stockage en fonction de l'énergie nécessaire pour le fonctionnement du circuit en aval ;

$$E_{capa} = \frac{1}{2}CV^2 \tag{4.3}$$

Avec C la capacité et V la tension aux bornes de la capacité.

D'après le niveau d'énergie requis par le microcontrôleur E_n(cf 4.3.1.2) qui est de 19,4 µJ pour la phase d'activation et la valeur de tension V que nous fixons à 2,5 V, il faut une capacité C telle que :

$$C > 2\frac{E_n}{V^2} \tag{4.4}$$

Soit C > 6,208 µF. Il n'est pas utile de prendre une capacité bien supérieure, car les temps de charge et de décharge deviendraient inutilement élevés. De plus, les courants de fuite seront d'autant plus important que la capacité est élevée. Pour la seconde capacité en sortie du convertisseur DC-DC, nous choisissons une capacité de charge de 10 µF. Pour la capacité de charge en sortie du multiplieur, nous sélectionnons une capacité de 1 µF.

4.3.3 Superviseurs

Afin d'augmenter l'efficacité du circuit de récupération d'énergie, nous proposons un stockage de l'énergie collectée en deux temps. Les convertisseurs DC-DC ont une tension en dessous de laquelle leur rendement est fortement dégradé. Pour cela en plus de la capacité de stockage en sortie du convertisseur, nous proposons d'en

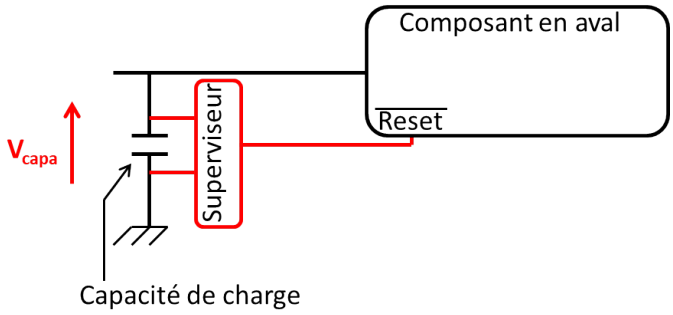


Figure 4.6 – Schéma bloc du superviseur et du composant en aval dont il gère l'activation

ajouter une en amont afin de s'assurer, à l'aide du superviseur, que le convertisseur ne soit activé que dans les conditions les plus favorables. Comme le montre la Figure 4.6, cette optimisation de la gestion de l'énergie à disposition s'effectue à l'aide de capacités de charge couplées à des superviseurs.

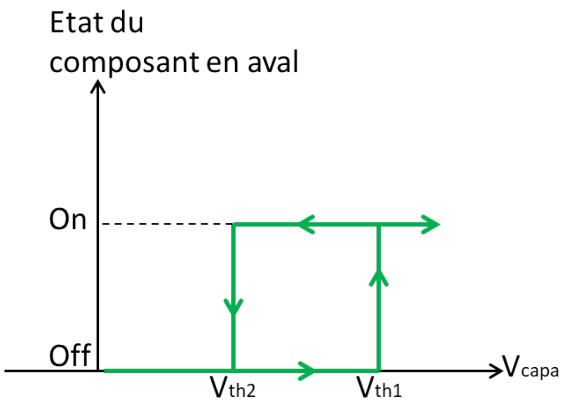


Figure 4.7 – Hystérésis de l'état du composant controlé par le superviseur en fonction de la tension au bornes de la capacité de charge

La principale difficulté dans un circuit de récupération d'énergie est de dépasser les tensions d'activation des composants. Le superviseur, composant clé de notre système, laisse le temps à la capacité de se charger suffisamment afin de fournir l'énergie nécessaire au reste du circuit. Il active et désactive l'élément qui suit en fonction de la tension aux bornes de la capacité avec un hystérésis comme le montre la Figure 4.7. Quand la tension au niveau de la cellule de stockage V_{capa} dépasse la tension d'activation V_{th1}, le superviseur active le composant en aval et le désactive quand V_{capa} chute en dessous de V_{th2}. La Figure 4.8 présente le principe de fonctionnement du système d'activation des composants à l'aide de superviseurs.

Grâce à cette technique de gestion de l'énergie collectée, nous évitons au système

de se trouver dans un état intermédiaire dans lequel les capacités n'auraient jamais le temps de se charger suffisamment afin d'atteindre les points fonctionnement optimaux des composants. Par exemple, le convertisseur DC-DC peut démarrer à partir de 700 mV mais avec un très mauvais rendement. En laissant la capacité en amont atteindre 1 V, nous nous assurons d'avoir un composant dont le rendement sera optimal.

Pour nos séries de mesures, présentées plus bas, nous utilisons des superviseurs TPS383X, de la marque Texas Instruments. Ceux-ci présentent une consommation de seulement 0,15 µA.

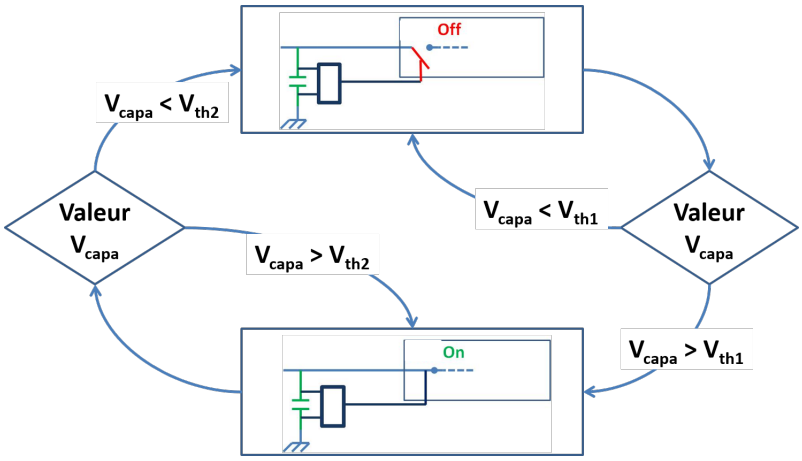


Figure 4.8 – Diagramme d'état du fonctionnement du superviseur

4.4 Étude et optimisation du circuit de récupération d'énergie

Dans cette section, nous présentons l'étude des différents étages du circuit d'alimentation et leur optimisation en fonction des degrés de liberté imposés par l'aspect industriel du projet, à savoir le coût et la disponibilité des composants du circuit.

4.4.1 Présentation et caractérisation du DC-DC Boost converter

Le convertisseur DC-DC sélectionné pour notre système est le TS3310 de Silicon Labs. Sa tension de sortie régulée peut être comprise entre 1,8 V et 5 V avec une tension d'entrée minimum de 900 mV. Le courant consommé par ce composant est de

seulement 150 nA. Pour notre cas d'usage et afin de s'assurer d'un démarrage et d'un fonctionnement correct du circuit de mesure en aval (microcontrôleur + capteur), nous paramétrons ce composant afin que sa tension de sortie V_{out-B} soit régulée à 2,5 V. Pour cette valeur de tension de sortie, nous effectuons des mesures pour observer le rendement de ce composant. Le but de cette manipulation est de s'assurer qu'avec le TS3310, le rendement du système complet n'est pas trop dégradé. La Figure 4.9 présente les résultats de la mesure du rendement du TS3310 en fonction du courant de sortie I_{out-B}. Nous pouvons voir que celui-ci reste constant autour de 90% pour les valeurs de courant de sortie I_{out-B} allant de quelques µA à plusieurs mA.

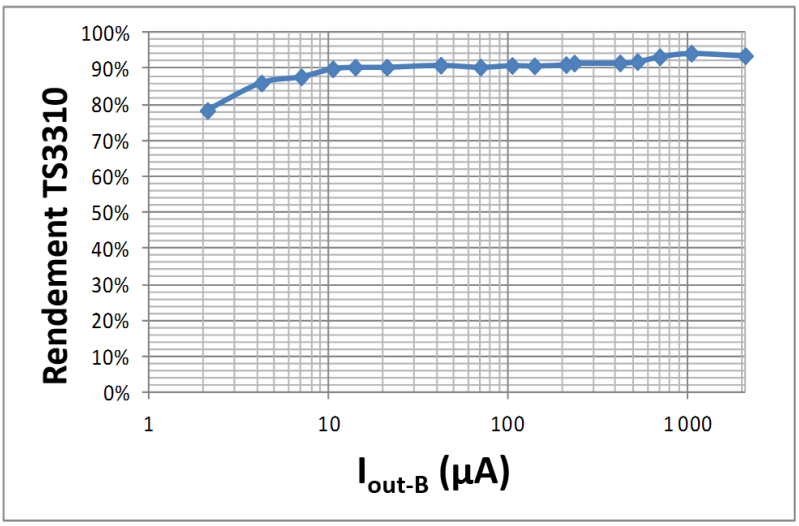


Figure 4.9 – Rendement du booster en fonction de son courant de sortie

Au niveau de la Figure 4.10, nous traçons la tension de sortie du convertisseur DC-DC en fonction de son courant d'entrée. Cela va nous permettre de connaitre la valeur du courant minimal I_{in-B} nécessaire à son fonctionnement, ce qui aura une influence sur la configuration de l'étage en amont, à savoir le multiplieur. En effet, une multiplication de la tension induit de manière proportionnelle une division du courant. Il faudra alors veiller à maintenir un niveau de courant suffisant pour permettre de démarrer le TS3310.

Ces résultats nous confortent dans l'idée d'utiliser ce convertisseur DC-DC dans le système, d'autant plus que son prix, comparé à ceux des autres convertisseurs du marché comme le BQ25504 de Texas Instrument ou l'ADP5090 d'Analog Devices, fait de lui un candidat potentiel pour une industrialisation à grande échelle.

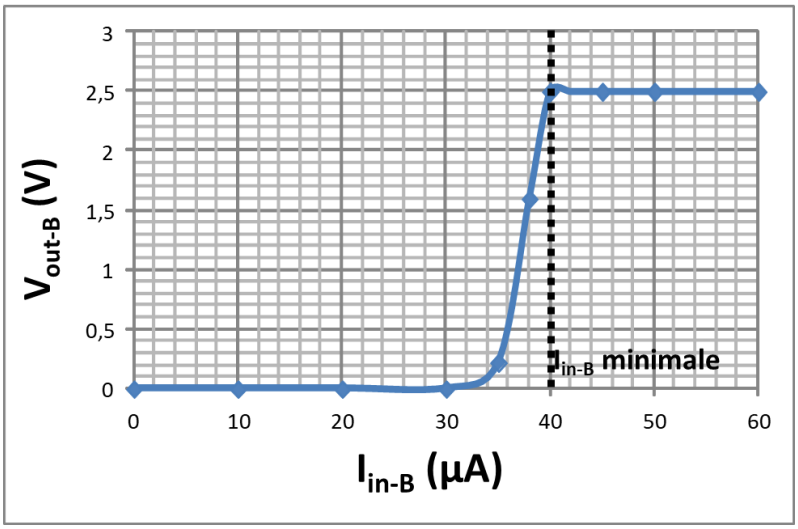


Figure 4.10 – Tension de sortie du booster V_{out-B} en fonction de son courant en entrée I_{in-B}

4.4.2 L'étage multiplieur et son circuit d'adaptation d'impédance

Les trois principaux types de redresseurs sont :

— le redresseur simple série (Figure 4.11(a)) : il est intéressant dans le cas de faibles puissances en entrée. Le fait que la tension de sortie est également faible le rend difficilement employable pour notre cas d'usage. Il reste cependant à privilégier dans le cas de récupération de l'énergie ambiante ;

— le pont de diodes (Figure 4.11(b)) : il présente un bon niveau de rendement pour les fortes puissances. Il est inadapté pour de faibles puissances comme cela est le cas en RFID UHF. Nous privilégierons son utilisation dans le cas de transfert d'énergie en électronique de puissance ;

— le multiplieur (Figure 4.11(c)) : il permet d'obtenir une tension de sortie élevée. Son rendement est plutôt faible mais reste acceptable dans le cas de transfert d'énergie à faible puissance comme dans notre cas d'usage.

Nous avons sélectionné le multiplieur car il permet d'atteindre des tension suffisamment élevées avec un niveau de rendement plus intéressant que le pont de diodes [Kuh15].

L'optimisation du multiplieur passe par une étude à deux niveaux : le niveau système pour le choix de la configuration et le niveau circuit pour le choix des composants.

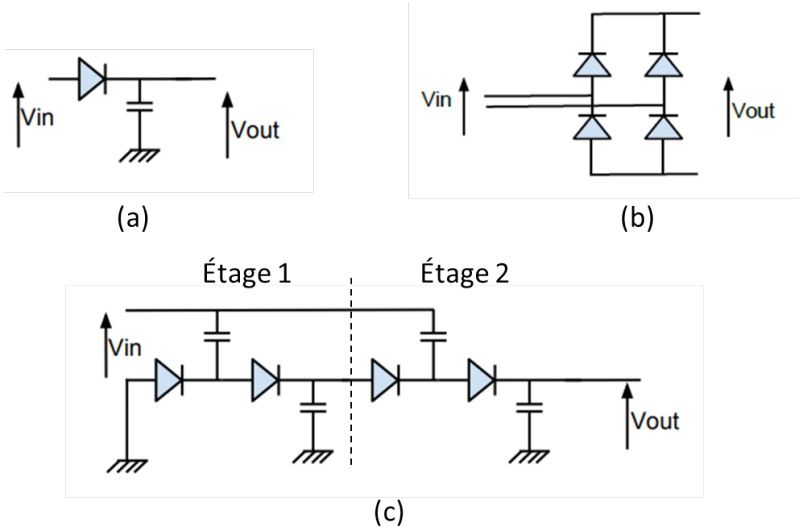


Figure 4.11 – Architectures de redresseur (a) redresseur simple série, (b) pont de diodes et (c) multiplieur 2 étages en configuration Greinacher-modifiée

4.4.2.1 Choix de configuration et sélection des valeurs de composants par simulation

Après une étude des performances en simulation de différentes configurations (redresseur série, différentiel, Greinacher et Greinacher modifiée), nous avons sélectionné celle de Greinacher-modifiée, que nous pouvons voir au niveau de la Figure 4.12. C'est par ailleurs la configuration que nous trouvons le plus souvent dans les circuits de récupérations d'énergie RFID UHF [SKH+14, SYP+08, MBDGP14]. D'après I. Chaour [CBFK16], elle est plus efficace qu'une autre topologie également très courante pour un multiplieur, celle de Villard visible dans la Figure 4.13.

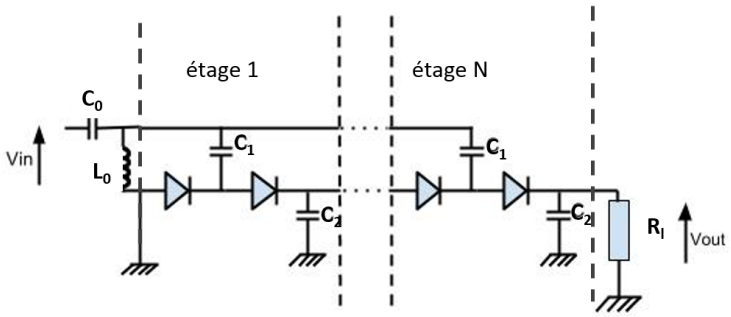


Figure 4.12 – Multiplieur en configuration de Greinacher modifiée et son réseau d'adaptation d'impédance LC

Pour une puissance d'entrée faible, la première difficulté est de dépasser la tension

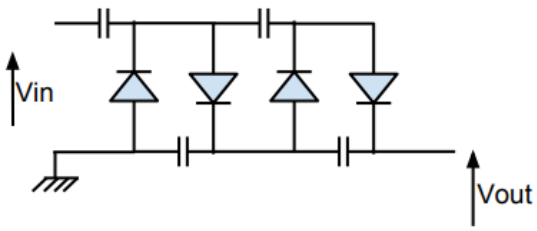


Figure 4.13 – Multiplieur à 2 étages en configuration de Villard

seuil des diodes du multiplieur. Pour contourner ce problème, nous avons dans un premier temps fait le choix d'employer des diodes Schottky qui possèdent une tension seuil V_{th} plus faible (environ 0,15 V) que les diodes standards (en moyenne 0,6 V pour les diodes en silicium) ainsi qu'un temps de recouvrement et donc de commutation plus petit. En première approximation, la tension de sortie du multiplieur $V_{out-Mult}$ est donnée par la formule suivante [Sei11] :

$$V_{out-Mult} = 2N \ max\left(V_{in} - V_{th}\right) \tag{4.5}$$

Les autres paramètres pris en compte pour le choix de la diode sont les valeurs des capacités parasites, de la résistance série mais également du courant de saturation [Val15]. Les deux premiers paramètres se doivent d'être les plus petits possible tandis que pour le courant de saturation, il est préférable qu'il soit le plus élevé possible, comme les études présentées dans l'article [KF03] le préconisent. L'article de De Vita [DVI05] nous indique qu'il y a un compromis à faire entre les différents paramètres d'une diode Schottky, qui sont principalement fonction des dimensions de la surface de la jonction. Le courant de saturation est proportionnel à la largeur de la diode, tandis que la résistance série est inversement proportionnelle à cette surface. Augmenter sa largeur de jonction est avantageux en termes de rendement de la diode. Or le fait d'augmenter la largeur de la jonction augmente de la même manière les valeurs de la capacité de jonction ainsi que la capacité parasite entre la diode et le substrat. Il est donc important de trouver un compromis concernant les dimensions de la diode [PLGF11]. Pour notre système, nous avons fait le choix de la diode Schottky HSMS285C, intégrant deux diodes par boitier, ce qui permettra de réduire la capacité parasite entre le boitier et le substrat mais également les pertes engendrées par les lignes.

Concernant les valeurs de capacité, nous avons dans un premier temps mené

deux études distinctes afin de déterminer les valeurs optimales pour C_1 et C_2 (voir Figure 4.12). Nous avons pu constater contrairement à ce que nous pouvons trouver dans la littérature, que la différence de valeur entre les deux capacités n'avait pas de conséquences notables sur l'efficacité du système. Nous faisons donc le choix d'employer la même valeur de capacité telle que C = C_1 = C_2.

La Figure 4.14 présente une comparaison de la puissance de sortie d'un multiplieur 4 étages et une puissance d'entrée de -10 dBm dans le cas idéal et le cas réel. Pour le cas parfait, la capacité est considérée comme idéale tandis que le cas réel prend en compte les effets parasites du composant comme les montre la Figure 4.15, où R_s représente la résistance série, L l'inductance parasite, R_f la résistance d'isolement. En tenant compte du comportement réel de la capacité, nous pouvons mettre en avant pour cette configuration la valeur de capacité optimale, soit 20 pF. Les résultats obtenus nous permettent d'affirmer qu'en augmentant la valeur de capacité, nous augmentons également l'effet inductif de la capacité ainsi que les pertes engendrées par les résistances parallèle et série. De ce fait, plus la capacité sera élevée, plus les courants de fuite seront importants.

Le modèle ADS réalisé afin de simuler comportement réel du circuit multiplieur est présenté dans la Figure 4.16. Dans ce circuit, nous prenons en compte les spécificités du substrat, les effets parasites des composants et les pertes dans les lignes. Le boitier des diodes HSMS285c est lui directement récupéré dans la bibliothèque des composants.

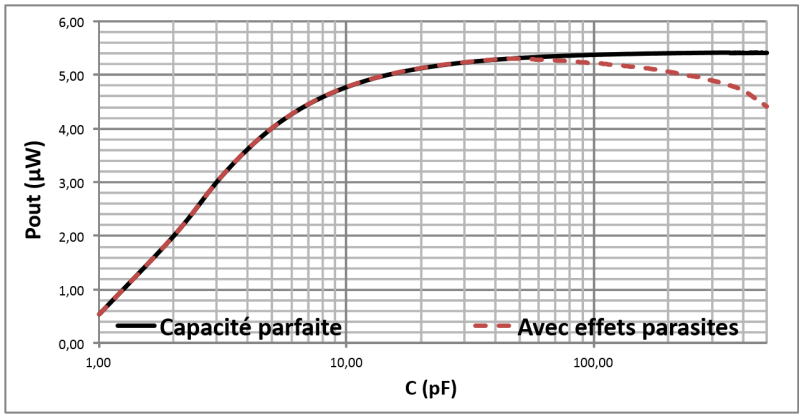


Figure 4.14 – Comparaison de la puissance en sortie du multiplieur dans le cas de capacités idéales et avec prise en compte de leurs paramètres réels

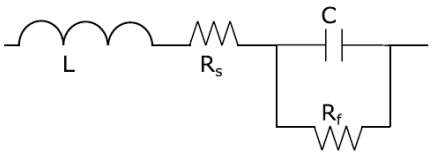


Figure 4.15 – Modèle équivalent de capacité utilisé pour les simulations

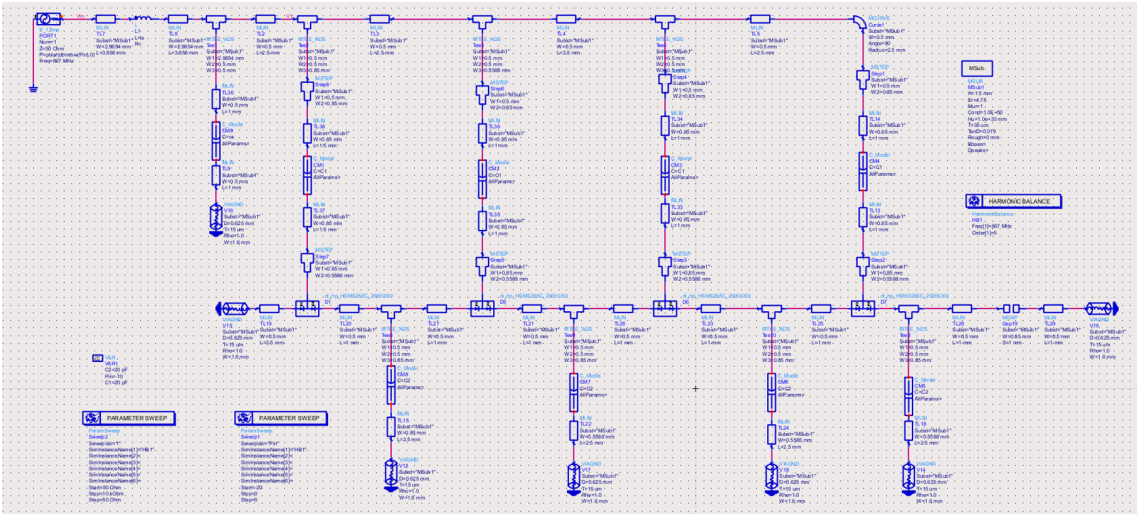


Figure 4.16 – Circuit Schematic du multiplieur 4 étages

4.4.2.2 Adaptation d'impédance

Le circuit d'adaptation d'impédance peut être considéré comme l'élément le plus critique. La moindre variation de la partie résistive ou réactive peut avoir un effet disproportionné sur le rendement de l'ensemble du circuit.

En raison de la présence de diodes, le multiplieur est considéré comme un circuit actif. Cela signifie notamment que l'impédance d'entrée varie en fonction de la puissance d'entrée. L'adaptation est réalisé pour une puissance d'entrée de -10 dBm.

Parmi les configurations possibles, nous faisons le choix du réseau en L abaisseur d'impédance comme le présente la Figure 4.17. Les réseaux en Π ou en T peuvent présenter comme avantage de baisser le facteur de qualité Q et par la même occasion augmenter la bande passante [Kuh15]. Les réseaux en L n'ont pas de degré de liberté au niveau du choix de la bande passante, ce qui n'est pas particulièrement problématique pour nous (la bande RFID UHF Européenne n'étant que légèrement supérieure à 4 MHz).

Au niveau de la Figure 4.18, nous comparons la tension de sortie du multiplieur avec et sans le réseau d'adaptation. Pour P_{in} = -10 dBm et f = 867 MHz, nous

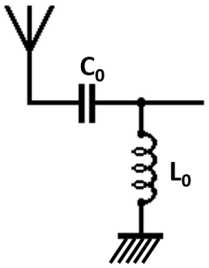


Figure 4.17 – Configuration du réseau LC en L abaisseur d'impédance retenue

passons d'une tension de sortie du multiplieur de 0,55 à 1,45 V.

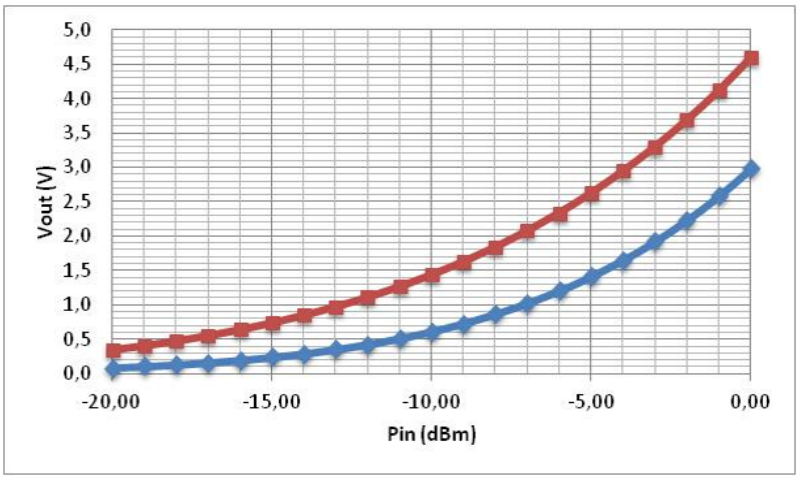


Figure 4.18 – Comparaison de la tension de sortie du multiplieur avec et sans réseau LC

4.4.2.3 Synthèse de la configuration sélectionnée

Le Tableau 4.3 résume les choix de configuration et de composants pour le multiplieur ainsi que le réseau d'adaptation d'impédance.

4.5 Performances du circuit prototype de récupération d'énergie

Afin de vérifier nos résultats de simulation, nous avons réalisé une carte prototype visible dans la Figure 4.19 et dont le schéma électrique est présenté dans la Figure 4.20. Elle nous permettra de caractériser l'étage multiplieur, le réseau d'adaptation d'impédance et le circuit de récupération et de conditionnement dans son ensemble.

Table 4.3 – Récapitulatif des choix de configuration pour le multiplieur et le réseau LC

Paramètres	Valeur inférieure	Valeur optimale	Valeur supérieure
Nombre d'étage	Tension trop faible donc inexploitable	4	Pertes par fuites
Capacité C	Manque d'efficacité	~20 pF	Pertes par fuites, lenteur de réaction
Résistance de charge R_l	Baisse des tensions et augmentation des pertes	55 kΩ	Impédance trop élevée
C_0	Baisse des tensions et augmentation des pertes	7 pF	Baisse des tensions et augmentation des pertes
L_0	Baisse des tensions et augmentation des pertes	15 nH	Baisse des tensions et augmentation des pertes

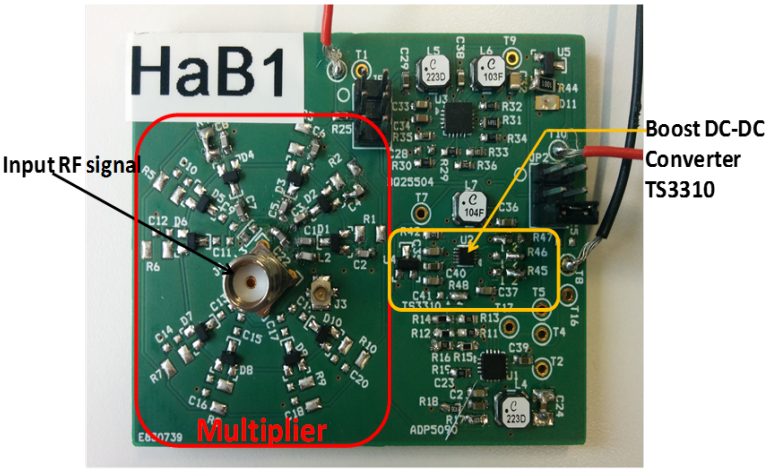


Figure 4.19 – Carte prototype du circuit de récupération d'énergie

4.5.1 Caractérisation par mesure expérimentale du multiplieur et du réseau d'adaptation d'impédance

Comme le montre la Figure 4.21, le multiplieur précédé par le réseau d'adaptation LC avec une puissance d'entrée P_{in} de seulement -10 dBm présente une tension de sortie $V_{out-Mult}$ de 2,5 V à 867 MHz, suffisant pour activer le booster en aval.

La Figure 4.22 représente le rendement du multiplieur en fonction de sa charge en sortie R_l, pour une fréquence de 867 MHz et une puissance d'entrée P_{in} de -10 dBm. Nous voyons que le convertisseur DC-DC doit être dimensionné pour constituer une charge optimale vue du multiplieur, ceci pour les puissances d'entrée les plus faibles visées. La carte prototype, d'après les résultats, présente de bonnes performances

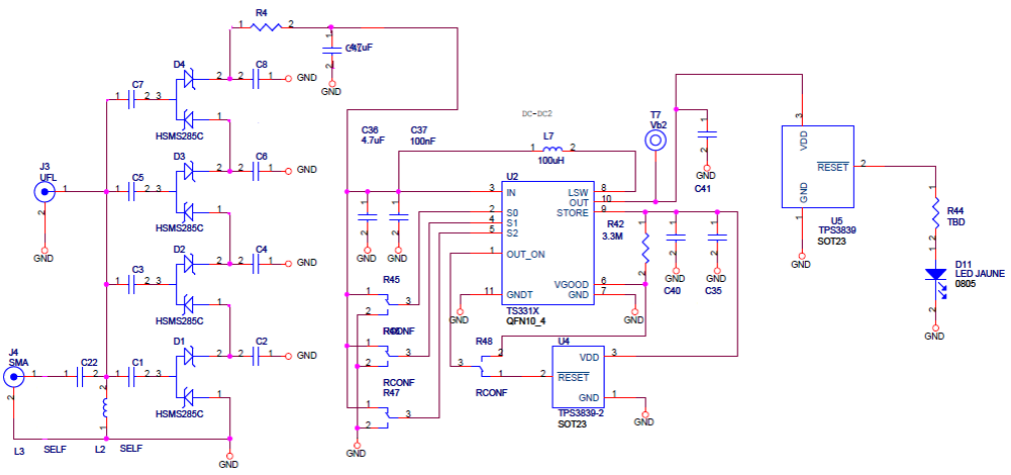


Figure 4.20 – Schéma électrique du circuit de récupération d'énergie

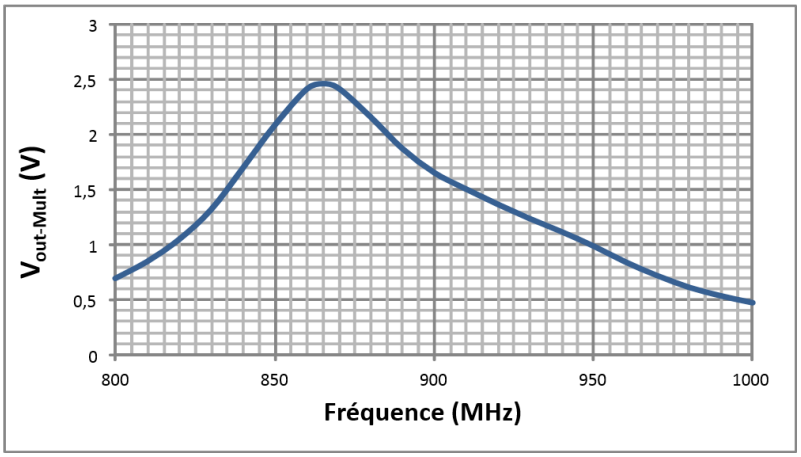


Figure 4.21 – Tension $V_{out-Mult}$ mesurée en sortie du multiplieur à vide en fonction de la fréquence du signal d'entrée, avec P_{in} = -10 dBm

comparées à la littérature [SKH+14, MBDGP14, CBFK16], pour lesquels le rendement est respectivement de 28%, 22% et 20% contre 29% pour notre multiplieur.

La Figure 4.23 permet de mettre en évidence l'aspect légèrement convexe de la courbe représentant la tension $V_{out-Mult}$ en fonction du courant de sortie $I_{out-Mult}$, contrairement à la récupération d'énergie solaire pour laquelle $V_{out-Mult}$ en fonction de $I_{out-Mult}$ est concave. Cela signifie que le fait de se décaler du point de fonctionnement optimal ($V_{out-Mult}$ = 1,27 V et $I_{out-Mult}$ = 22,3 µA) est moins critique d'un point de vue efficacité. En réalité, cette forme est due principalement aux courants de fuite en inverse des diodes qui augmentent rapidement quand la tension augmente. Nous observons qu'en pratique, pour ces faibles niveaux de courant, leur influence sur le rendement est plus importante que celle de la tension seuil. Ce qui justifie

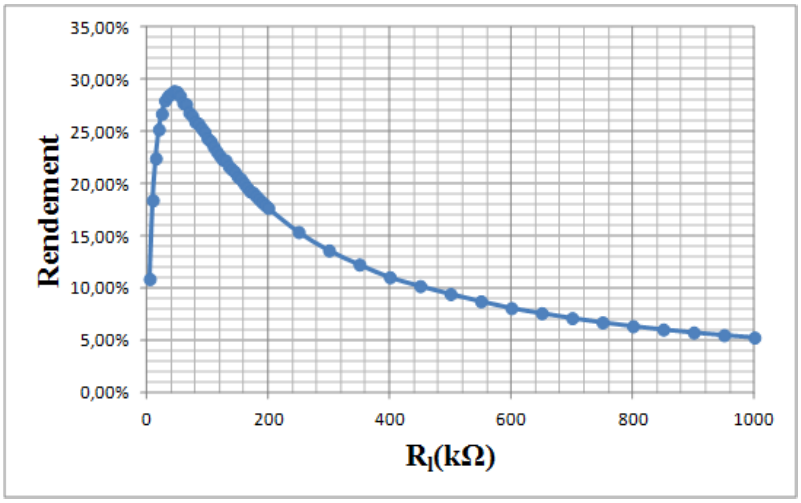


Figure 4.22 – Rendement du multiplieur mesuré en fonction de sa charge R_l en sortie, à 867 MHz et P_{in} = -10 dBm

notamment le recours au convertisseur DC-DC pour monter plus haut en tension plutôt que d'ajouter d'avantage d'étages au multiplieur. Si l'on souhaite obtenir le meilleur rendement possible pour ce multiplieur 4 étages, il faut alors se placer au point avec une puissance de sortie $P_{out-Mult}$ la plus haute soit 30 µW pour une valeur de charge idéale. Cela nous donnerait une tension de sortie $V_{out-Mult}$ de 1,1 V et un courant en sortie $I_{out-Mult}$ de 27 µA, ce qui n'est pas suffisant pour activer le convertisseur DC-DC TS3310. C'est ici que l'intérêt des superviseurs prend tout son sens, en permettant à chaque partie de fonctionner à son niveau de rendement maximal sans être perturbée par le reste du circuit.

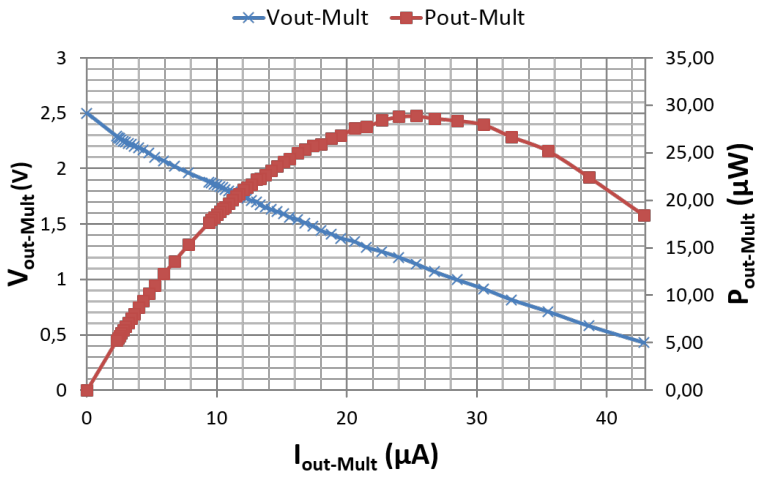


Figure 4.23 – Tension $V_{out-Mult}$ et puissance $P_{out-Mult}$ en sortie du multiplieur en fonction du courant $I_{out-Mult}$ pour une puissance d'entrée P_{in} = -10 dBm

4.5.2 Étude de performances de l'ensemble du circuit

4.5.2.1 Résultats de mesure du circuit prototype

Le but de cette partie est de mettre en évidence l'intérêt de recourir à des superviseurs entre différents étages du système afin d'optimiser la gestion de l'énergie collectée et ainsi améliorer le rendement.

Au niveau de la Figure 4.24, une comparaison des performances que nous obtenons pour le système avec et sans superviseurs est réalisée. Pour -10 dBm de puissance en entrée, nous obtenons un rendement global de 25% avec superviseurs. Sans ces derniers, le rendement n'est plus que de 10%. A l'optimum, le rendement de notre système avec superviseurs atteint 35% pour une puissance en entrée de -5 dBm contre 20% sans superviseurs. Comparé à un autre système de récupération d'énergie [DDCT13], dans lequel les auteurs font usage d'un superviseur, notre système présente de meilleures performances d'un point de vue rendement pour les mêmes gammes de puissances d'entrée[1]. Un autre gain important apporté par les superviseurs est l'amélioration de la sensibilité. En effet toujours d'après la Figure 4.24, nous observons que la puissance de démarrage du système, permettant de fournir une tension exploitable pour le circuit de mesure en sortie est nettement améliorée. Elle passe de -11 dBm sans superviseurs, à seulement -15 dBm avec ceux-ci.

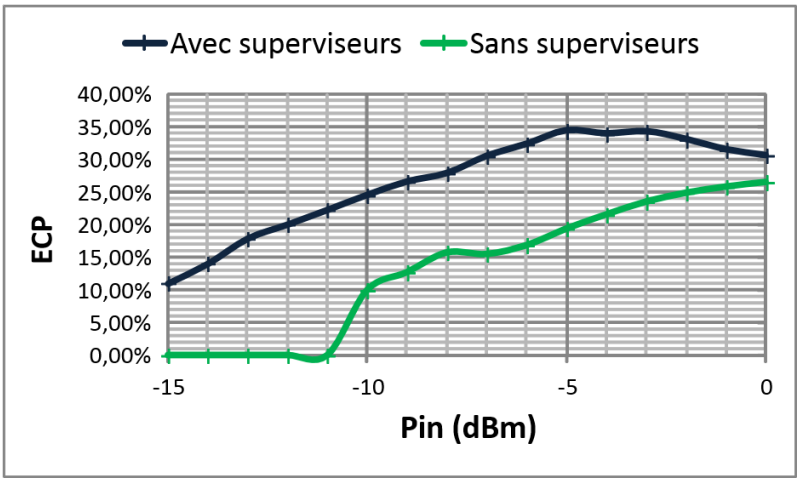


Figure 4.24 – Efficacité de conversion en puissance ECP mesurée du circuit de récupération d'énergie avec et sans superviseurs en fonction de la puissance d'entrée à 867 MHz

1. Une comparaison des performances est présentée dans le Tableau 4.4.

4.5.2.2 Comparaison des performances de notre circuit à l'état de l'art

Dans le Tableau 4.4, nous comparons les performances de notre circuit à ceux présents dans l'état de l'art. Pour des objectifs de niveaux de sortie différents, la difficulté réside dans la manière de donner une cohérence à cette comparaison. C'est pour cela que nous précisons la tension de sortie des circuits.

Table 4.4 – Comparaison des performances de circuits de récupération d'énergie en RFID UHF

Référence	[SKH+14]	[DDCT13]	[MBDGP14]	[KBJ+15]
ECP	28%	22%	22%	20%
Tension de sortie (V)	2	2,4	n.i	2,9
Sensibilité (dBm)	-18	-14	-15	n.i
Référence	[CBFK16]	[CH16]	[FMC15]	Ces travaux
ECP	20%	25%	12%	25%
Tension de sortie (V)	1,99	n.i	n.i	2,5
Sensibilité (dBm)	n.i	n.i	n.i	-15

Les performances de notre premier prototype de circuit de récupération d'énergie se trouve au niveau de l'état de l'art actuel malgré les contraintes qu'impose l'objectif de déploiement industriel. Ses résultats pourraient être améliorés en baissant l'objectif de tension de sortie. En effet, 2,5 V en tension de sortie, à l'heure où les plus récents microprocesseurs basse consommation peuvent être activés avec 1,6 V, n'est plus justifié.

4.6 Conclusion

En se basant sur une étude bibliographique, résumée dans la première section, nous avons conçu l'architecture globale de notre capteur connecté et autonome. Ce circuit doit répondre à des exigences de performances et de coût.

Le circuit d'alimentation que nous avons réalisé dans sa configuration optimale nous permet de récupérer l'énergie nécessaire au fonctionnement du circuit de mesure. Ceci est valable pour des puissances d'entrée plus faibles que si le système était dépourvu de superviseurs faible consommation. En effet grâce à eux la sensibilité est nettement améliorée, passant d'une puissance en entrée exploitable minimum de -11

dBm à -15 dBm. De même qu'à puissance équivalente, le rendement en puissance (ECP) du circuit est amélioré, avec un maximum de 35%.

L'objectif premier était de déterminer si techniquement une solution RF pour l'alimentation d'un simple système de mesure était viable à l'heure actuelle. D'après le bilan d'énergie du circuit de mesure et les résultats de mesures obtenus sur la carte prototype, il semble que c'est effectivement le cas.

Cette étude n'en est qu'à ses débuts, la prochaine étape consistera à greffer ce circuit de récupération d'énergie au tag doté d'un circuit de mesure très faible consommation.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux menés dans le cadre de ce projet doctoral ont permis de définir les paramètres techniques optimaux afin d'être en mesure de déployer une solution RFID UHF pour la traçabilité des différents types de bouteilles de gaz dans un milieu métallique. Pour cela, la recherche s'est faite en deux étapes : la première théorique et la seconde pratique ont été abordées dans ce manuscrit à travers les quatre points suivants :

— le fonctionnement de la RFID UHF et l'influence de l'environnement notamment métallique sur son fonctionnement ;
— le protocole de communication EPC Gen2 et ses degrés de liberté ;
— la réalisation de prototypes expérimentaux de tags RFID UHF pour objets métalliques, respectant les spécificités des bouteilles de gaz et de déploiement à l'échelle industrielle ;
— la conception d'un circuit de récupération d'énergie RFID UHF pour l'autonomie énergétique d'un tag augmenté.

La première phase théorique de notre étude avait pour objectif de mettre en évidence les paramètres clés de la technologie RFID UHF, l'effet de l'environnement métallique mais également les points d'amélioration possibles tant au niveau matériel que logiciel.

Techniquement, la traçabilité d'objet métallique à l'aide d'une solution RFID UHF est possible malgré la baisse des performances du tag dans un environnement métallique. L'essentiel est que cet environnement soit pris en compte dès les premières phases de conception, afin d'en maitriser ses effets sur le fonctionnement du tag.

Au niveau logiciel, nous avons pu mettre en évidence que le protocole de com-

munication ne possède que peu de degrés de liberté, le principal étant l'initialisation du paramètre Q à travers l'estimation de la population de tag. Nous en avons déduit que l'optimisation de la solution de traçabilité allait se faire principalement au niveau matériel et plus précisément au niveau du tag.

Les tests expérimentaux sur portique ont quant à eux validé le recours à la RFID UHF comme solution de traçabilité des bouteilles de gaz. Cependant les tags présents sur le marché ne répondent ni aux spécificités techniques ni aux règles de sécurité strictes entourant les bouteilles de gaz. Il s'agissait alors de concevoir un tag RFID UHF répondant au cahier des charges spécifique d'Air Liquide.

Au niveau des réalisations, le second prototype de tag flexible, constitué de matériaux abordables et disponibles sur le marché, présente des performances suffisantes pour notre cas d'usage avec une activation à 3 m environ. Nous avons grâce à cela respecté les objectifs de performances. mais également de coûts pour un déploiement massif de la solution visant à équiper des millions de bouteilles. L'étude menée nous a également permis d'appliquer un protocole expérimental visant à déterminer la constante diélectrique du substrat utilisé, validé par les résultats de simulation et de mesure.

Le projet de départ prévoyait de concevoir un tag pour équiper les anciennes bouteilles de tags souples. Un changement de stratégie de la traçabilité des bouteilles de gaz, nous a amené à réorienter nos efforts sur l'intégration du tag RFID UHF directement dans l'architecture des futures bouteilles. L'antenne fente qui était le type d'antenne sélectionné pour notre troisième prototype flexible a donc été retravaillé afin d'être intégré dans le col de la bouteille.

Le développement d'un circuit de récupération d'énergie pour tag augmenté se base sur la volonté d'améliorer la connaissance de l'objet suivi. Ce gain en information implique d'intégrer au tag de nouvelles fonctionnalités avec des composants qu'il faut fournir en énergie. Le circuit conçu répond également aux contraintes de coût. Il est capable, d'après les mesures effectuées, d'alimenter le circuit de mesure et de communication.

Concernant le recours à la RFID UHF pour le suivi d'objets métallique, la prochaine étape sera de concevoir le tag et de l'intégrer dans son environnement final pour procéder à sa caractérisation dans les conditions réelles d'utilisation. Pour le

tag augmenté, la partie mesure et communication devra être ajoutée à la carte prototype afin de valider les premières mesures effectuées sur le circuit de récupération d'énergie. Le challenge technique majeur de ce tag augmenté passif final sera d'être aussi compétitif qu'un tag augmenté actif, tant au niveau des performances que de la rentabilité.

L'objectif premier de ce projet doctoral était de valider la possibilité de recourir à la RFID UHF pour l'optimisation de la logistique de bouteilles de gaz métalliques. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude permettent de répondre de manière affirmative. Au niveau industriel, cela ouvre le champ des possibles en terme d'innovation et d'optimisation des procédés, au-delà de la logistique et de la gestion des stocks.

À plus long terme, l'étude ouvre la voie à la maintenance prédictive pour les infrastructures difficiles d'accès comme les pipelines. De manière plus générale, l'écosystème connecté (actifs et passifs) ainsi développé permettra d'optimiser les coûts de maintenance ainsi qu'une meilleure gestion du parc de bouteilles de gaz.

Annexes

Annexe A : Définition des paramètres d'antenne

Caractéristiques d'une antenne en émission

Le média de transmission entre le lecteur et le tag est l'espace libre. L'élément permettant de réaliser le transfert d'information et d'énergie dans ce média est l'antenne. Celle-ci équipe aussi bien le lecteur que l'étiquette RFID.
Une antenne est un transducteur capable de convertir un signal électromagnétique en un signal électrique et inversement, un signal électrique en un rayonnement électromagnétique. Quand l'antenne travaille en émission, le champ électromagnétique rayonné dépend de la densité de courant présent au niveau de l'antenne. En réception, c'est la densité de courant à la surface de l'antenne qui sera fonction du champ électromagnétique incident.

En émission, une antenne est caractérisée par :

La directivité :

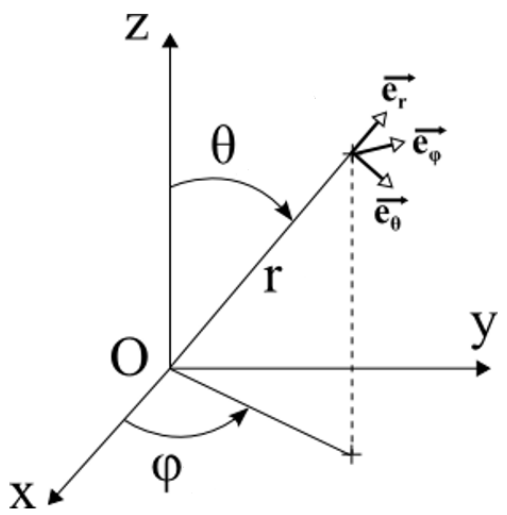


Figure 25 – Repère sphérique dont l'origine est au centre de l'antenne

Pour une antenne rayonnant de manière isotrope, sa densité de puissance rayonnée dans la direction e_r est :

$$d_i(\theta, \phi) = \frac{W_e}{4\pi r^2} \tag{6}$$

Avec r la distance par rapport à l'antenne et W_e (Watt) la puissance rayonnée

telle que :

$$W_e = \frac{r^2}{2\eta} \iint_S ||\mathbf{E}(\theta, \phi)||^2 \, \mathrm{d}^2\Omega \tag{7}$$

Avec S la sphère de rayon R, E le champ électrique (V.m^{-1}), Ω l'angle solide et η (Ohm) l'impédance d'onde du milieu telle que :

$$\eta = \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tag{8}$$

où H représente le champ magnétique (A.m^{-1}). μ et ϵ représentent respectivement la perméabilité (H.m^{-1}) et la permittivité (F.m^{-1}) du milieu. Dans l'air, l'impédance intrinsèque vaut 120π Ω.

La densité de puissance rayonnée dans la direction e_r est donc :

$$d(\theta, \phi) = \frac{1}{2\eta} ||E(\theta, \phi)||^2 \tag{9}$$

Dans ce cas, la directivité $D(\theta, \phi)$ de l'antenne dans la direction e_r peut être définie comme le rapport entre la densité de puissance rayonnée dans la direction e_r et la densité de puissance de l'antenne dans le cas où elle rayonnerait de manière isotrope.

$$\mathbf{D}(\theta, \phi) = \frac{\mathbf{d}(\theta, \phi)}{d_i(\theta, \phi)} \tag{10}$$

Le gain :

D'un point de vue théorique, nous considérons que l'antenne rayonne l'ensemble de la puissance P_e envoyée à ses bornes par le générateur. En réalité, une partie de la puissance P_{diss} est dissipée par effet Joule. La formule du gain 11 prend alors en considération le rendement de l'antenne 12.

$$G(\theta, \phi) = rdt \; D(\theta, \phi) \tag{11}$$

avec rdt le rendement de l'antenne tel que :

$$rdt = \frac{Puissance\ rayonnée}{Puissance\ reçue\ par\ l'antenne} = \frac{P_t}{P_e} \tag{12}$$

où P_t est la puissance qui sera rayonnée, en tenant compte des pertes par effet Joule.

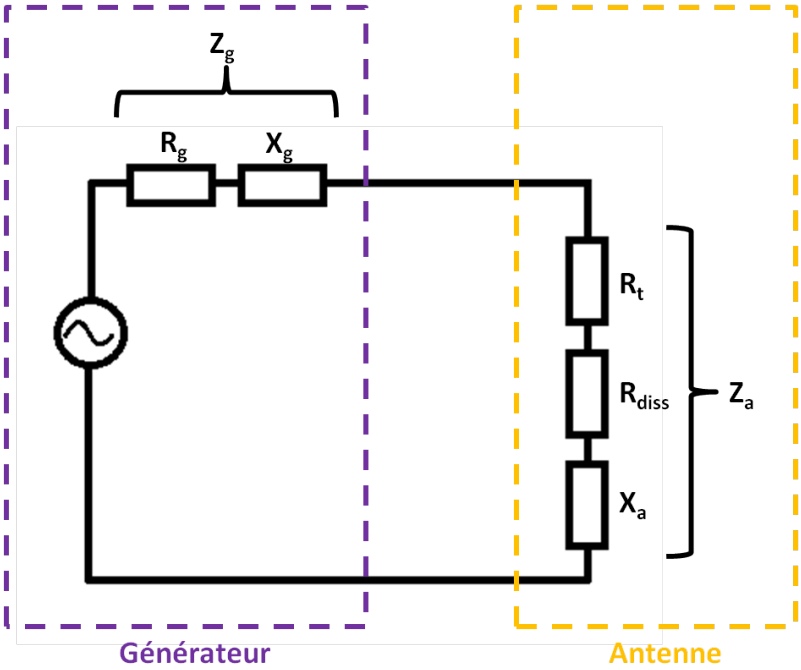


Figure 26 – Circuit équivalent de l'antenne en émission

La Figure 26 représente le circuit équivalent d'une antenne en émission où Z_g et Z_a sont respectivement l'impédance du générateur et celle de l'antenne. R_t modélise la puissance de rayonnement, R_{diss} la puissance dissipée par effet Joule. X_a est la partie imaginaire de Z_a, elle caractérise la puissance réactive. X_g représente la partie imaginaire de Z_g. Le rendement r de l'antenne peut alors également être défini à sa fréquence de résonnance (i.e. $X_a = 0$) de la manière suivante :

$$rdt = \frac{Puissance\ rayonnée}{Puissance\ reçue\ par\ l'antenne} = \frac{R_t}{R_t + R_{diss}} \tag{13}$$

Polarisation :

En champ lointain, pour une onde électromagnétique, la polarisation représente l'amplitude et la direction du champ électrique. Ainsi les trois principaux types de polarisation sont :

— elliptique, le champ E tourne autour de la direction de propagation de l'onde. Les deux composantes perpendiculaires du champ peuvent être définies de la façon suivante :

$$\boldsymbol{E}_\phi = |\boldsymbol{E}_\phi| \cos(k\mathbf{z} - \omega t) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{E_\theta} = |\boldsymbol{E_\theta}| \cos(k\mathbf{z} - \omega t - \Phi) \tag{15}$$

avec $\omega = \dfrac{2\pi c}{\lambda}$ (c est la célérité de l'onde dans le vide), $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ le nombre d'onde, $\mathbf{z}$ la variable d'espace dans la direction de propagation et Φ le déphasage entre $\boldsymbol{E_\phi}$ et $\boldsymbol{E_\theta}$.

— circulaire. C'est en réalité un cas particulier de la polarisation elliptique, pour lequel les amplitudes des composantes $\boldsymbol{E_\phi}$ et $\boldsymbol{E_\theta}$ sont égales et leur déphasage vaut $\dfrac{\pi}{2}$. C'est généralement ce type de polarisation que nous trouvons dans les lecteurs RFID UHF du commerce.

— linéaire, le champ E ne tourne plus autour de l'axe de propagation mais oscille toujours dans une même direction.

Pertes de polarisation :

Quand une antenne a une polarisation différente de l'onde incidente alors, il y a ce que l'on appelle des pertes par polarisation L_p définies par :

$$L_p = |\boldsymbol{P_I} \otimes \boldsymbol{P_{ant}}|^2 \tag{16}$$

$\boldsymbol{P_I}$ représente le vecteur de polarisation de l'onde incidente et $\boldsymbol{P_{ant}}$ celui de l'antenne réceptrice. Le Tableau 5 donne une idée des pertes de polarisation en dB, en fonction de la polarisation de l'émetteur et du récepteur.

Table 5 – Pertes de polarisation en dB en fonction de la polarisation de l'émetteur et du récepteur

	Linéaire Horizontale	Linéaire Verticale	Elliptique RHCP	Elliptique LHCP
Linéaire Horizontale	0	20	3	3
Linéaire Verticale	20	0	3	3
Elliptique RHCP	3	3	0	20
Elliptique LHCP	3	3	20	0

RHCP : Right Hand Circular Polarized, LHCP : Left Hand Circular Polarized.

Bande passante et facteur de qualité Q_f :

Pour une antenne, la bande passante Δf est définie comme la valeur absolue de la différence entre les deux valeurs de fréquence pour lesquelles le signal est inférieur à un seuil spécifié. La bande passante la plus courante est celle à -3 dB (Δf_{-3dB}. En prenant en compte, à l'aide du rapport d'onde stationnaire (VSWR) [2], la désadaptation d'impédance entre l'antenne et le générateur (ou la charge), nous définissons le facteur de qualité Q_f par l'équation 17.

$$Q_f = \frac{f\sqrt{VSWR}}{\Delta f_{-3dB}(VSWR - 1)} \tag{17}$$

Formule de Friiss

Dans le cas idéal, la puissance reçue P_r par une antenne de gain G_r à une distance R d'une antenne émettrice de gain G_t émettant un rayonnement de longueur d'onde λ à une puissance P_t est donnée par l'équation suivante[Fri46] :

$$P_r = G_r G_t P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \tag{18}$$

$\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2$ est appelé facteur d'affaiblissement en espace libre.

Adaptation d'impédance d'une antenne

L'adaptation d'impédance est un point fondamental dans l'optimisation de la transmission des signaux en télécommunication. Quand deux éléments ne sont pas adaptés en impédance, les pertes engendrées provoquent une dégradation de la qualité de communication. Nous présentons ici les définitions essentielles à la compréhension de ce qu'est l'adaptation d'impédance.

le coefficient de réflexion de l'antenne est donné par la formule suivante :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_g}{Z_a + Z_g} \tag{19}$$

Cette grandeur sans dimension permet de quantifier la réflexion d'énergie entre le générateur d'impédance Z_g et l'antenne d'impédance Z_a.

2. VSWR est défini plus bas dans la partie Adaptation d'impédance.

Rapport d'onde stationnaire : La qualité de l'adaptation d'impédance peut être estimée à l'aide du rapport d'onde stationnaire (VSWR pour voltage standing wave ratio), qui est défini de la manière suivante :

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \tag{20}$$

La valeur optimale est atteinte pour VSWR = 1, c'est-à-dire $\Gamma = 0$ (cas d'une onde progressive).

Coefficient de réflexion pour une antenne reliée à une charge complexe :

Le coefficient de réflexion d'une antenne reliée directement à une charge d'impédance complexe Z_c est définie par :

$$\Gamma^* = \frac{Z_c - {Z_a}^*}{Z_c + {Z_a}^*} \tag{21}$$

De même que Γ permet de quantifier la réflexion entre un générateur et son antenne, Γ^* quantifie la réflexion entre l'antenne et sa charge.

Coefficient de transmission : Il correspond au rapport de la puissance transférée à la charge sur la puissance maximale pouvant être transmise.

$$T = 1 - \Gamma^* \tag{22}$$

Caractéristiques d'une antenne en réception

L'étude de cette partie se base sur le circuit équivalent de la Figure 27 (modèle de Thévenin) d'une antenne en réception.

Pour une antenne en réception, la tension créée par une OEM incidente aux bornes de l'antenne est définie par l'équation suivante :

$$v_r = \frac{\sqrt{R_a G_a}\lambda \cos(D_\Phi)}{\sqrt{\pi\eta}} E_i \tag{23}$$

v_r : tension du schéma équivalent de Thevenin ;
R_a : partie réelle de l'impédance de l'antenne ;
G_a : gain de l'antenne de réception ;
λ : longueur d'onde de l'onde incidente ;

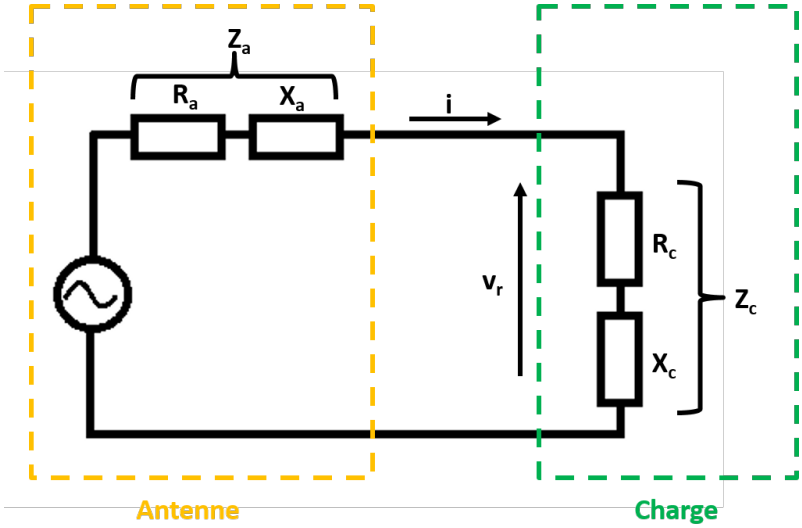


Figure 27 – Circuit équivalent de l'antenne en réception

D_Φ : angle de dépolarisation (angle entre la polarisation de l'onde incidente et celle de l'antenne ;
η : impédance de l'air (377 Ω) ;
E_i : champ électrique incident.

Surface équivalente radar σ :

Cette grandeur permet de caractériser la réflexion par l'antenne de l'onde incidente.

$$\sigma = |1 - \Gamma^*|^2 \frac{\lambda^2}{4\pi} G^2 \tag{24}$$

Surface équivalente radar différentielle :

Lors de la phase de rétro-modulation, comme c'est le cas au niveau d'un tag RFID UHF passif, la modulation de charge entraine une modification de la valeur de la surface équivalente radar. Il y aura donc deux valeurs de coefficient de réflexion ${\Gamma_1}^*$ et ${\Gamma_0}^*$. Cela nous amène à définir la surface équivalente radar différentielle $\Delta\sigma$ telle que :

$$\Delta\sigma = \frac{\lambda^2 G^2}{4\pi} . |{\Gamma_1}^* - {\Gamma_0}^*|^2 \tag{25}$$

Aire équivalente de rayonnement : Cette grandeur est reliée au gain par la formule suivante :

$$A_e(r,\theta,\phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G(r,\theta,\phi) \tag{26}$$

L'aire équivalente de rayonnement en émission est égale à l'aire d'absorption lorsque l'antenne est en réception. Pour une antenne en réception, la constante de proportionnalité entre la densité de puissance reçue S_r (W. m^{-2}) et la puissance électrique générée aux bornes de l'antenne P_r sera A_e.

$$P_r = A_e S_r \tag{27}$$

En tenant compte des pertes dues à la différence de polarisation L_p, cette formule devient :

$$P_r = A_e S_r L_p \tag{28}$$

Puissance maximale disponible :

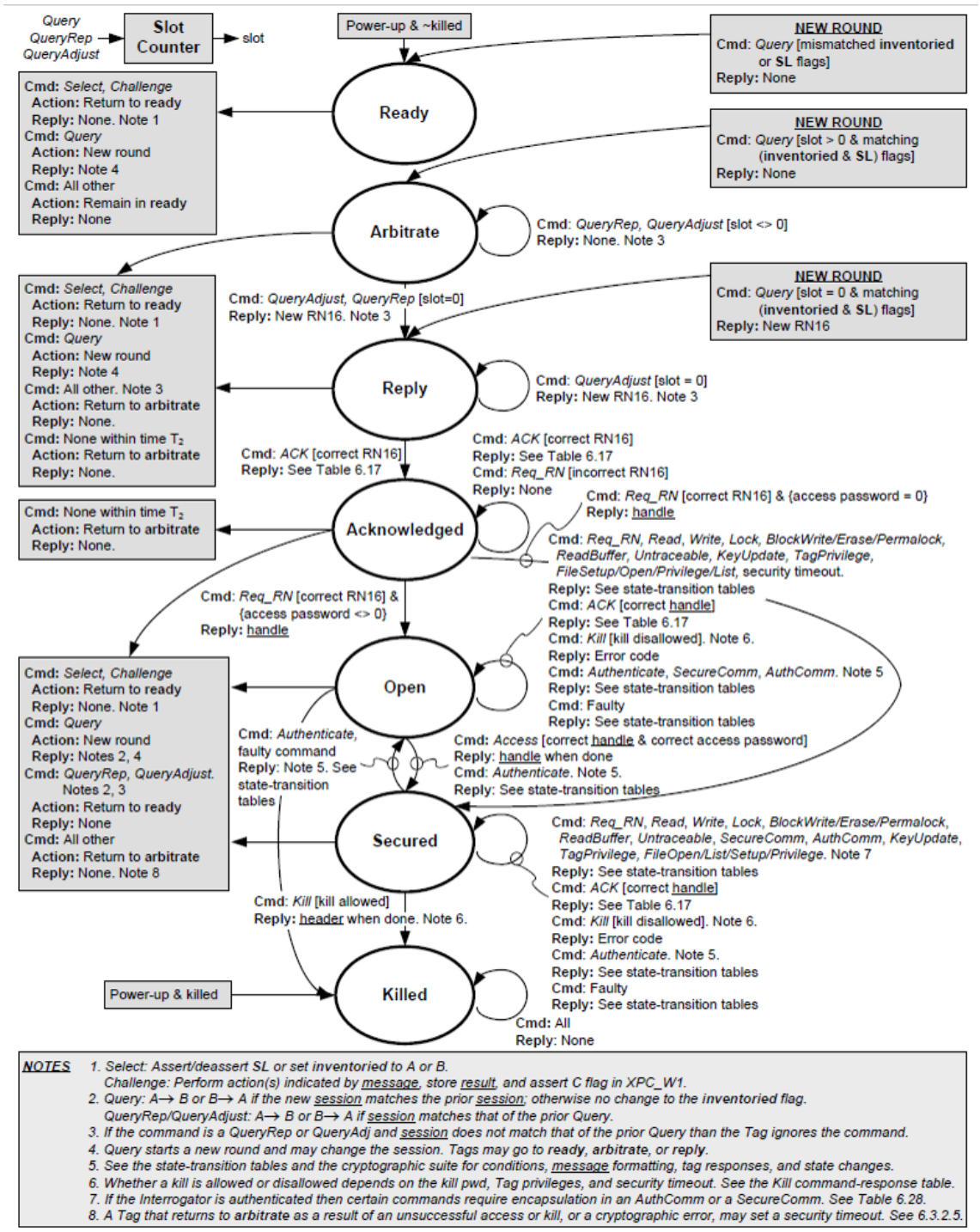
$$P_{r,max} = \frac{G_a \lambda^2}{480\pi^2} {E_i}^2 \tag{29}$$

Coefficient de re-rayonnement : Il permet d'évaluer la qualité de la rétromodulation de l'antenne. Ce paramètre est au re-rayonnement ce qu'est le coefficient de transmission à la transmission de la puissance à la puce.

$$K = \frac{4{R_a}^2}{|Z_a + Z_c|^2} \tag{30}$$

L'ensemble des paramètres définis dans cette annexe met en avant les point essentiels sur lesquels tout concepteur de tags doit se focaliser pour optimiser les performances de communication de sa solution RFID UHF.

Annexe B : Diagramme d'état complet d'un tag RFID UHF [noa14]



Bibliographie

[Abr70] Norman Abramson. The aloha system : Another alternative for computer communications. In *Proceedings of the November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference*, AFIPS '70 (Fall), pages 281–285, New York, NY, USA, 1970. ACM. :1970 :ASA :1478462.1478502

[AMH08] M. C. d Azambuja, C. A. M. Marcon, and F. P. Hessel. Survey of Standardized ISO 18000-6 RFID Anti-collision Protocols. In *2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications (sensorcomm 2008)*, pages 468–473, August 2008. 54

[APSP14] S. Agrawal, S.K. Pandey, J. Singh, and M.S. Parihar. Realization of efficient RF energy harvesting circuits employing different matching technique. In *2014 15th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED)*, pages 754–761, March 2014. 111

[ASEP12] J. Alarcon, R. Saba, M. Egels, and P. Pannier. A flexible UHF RFID tag for harsh environments. In *2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*, pages 267–270, November 2012. 76, 77

[AvBDV05] J. A. G. Akkermans, M. C. van Beurden, G. J. N. Doodeman, and H. J. Visser. Analytical models for low-power rectenna design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 4 :187–190, 2005. 111

[BBB+12] A.A. Babar, T. Bjorninen, V.A. Bhagavati, L. Sydanheimo, P. Kallio, and L. Ukkonen. Small and Flexible Metal Mountable Passive UHF RFID Tag on High-Dielectric Polymer-Ceramic Composite Substrate. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11 :1319–1322, 2012. 76, 77

[BCLL09] Okkyeong Bang, Ji Hwan Choi, Dongwook Lee, and Hyuckjae Lee. Efficient Novel Anti-collision Protocols for Passive RFID Tags, March 2009. 51

[BDU+11] T. Bjorninen, K.E. Delzo, L. Ukkonen, A.Z. Elsherbeni, and L. Sydanheimo. Long range metal mountable tag antenna for passive UHF RFID systems. In *2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*, pages 202–206, September 2011. 42

[BSG+13] Norberto Barroca, Henrique M. Saraiva, Paulo T. Gouveia, Jorge Tavares, Luis M. Borges, Fernando J. Velez, Caroline Loss, Rita Salvado, Pedro Pinho, Ricardo Goncalves, Nuno BorgesCarvalho, Raul Chavez-Santiago, and Ilangko Balasingham. Antennas and circuits for ambient RF energy harvesting in wireless body area networks. In *2013 IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 532–537, September 2013. 111

[BSURS14] T. Bjorninen, L. Sydanheimo, L. Ukkonen, and Y. Rahmat-Samii. Advances in antenna designs for UHF RFID tags mountable on conductive items. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 56(1) :79–103, February 2014. 32, 35, 38

[BW11] M. Buettner and D. Wetherall. A software radio-based UHF RFID reader for PHY/MAC experimentation. In *2011 IEEE International Conference on RFID*, pages 134–141, April 2011. 52

[CBFK16] I. Chaour, S. Bdiri, A. Fakhfakh, and O. Kanoun. Modified rectifier circuit for high efficiency and low power RF energy harvester. In *2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*, pages 619–623, March 2016. 123, 129, 132

[CH16] S. S. Chouhan and K. Halonen. Voltage multiplier arrangement for heavy load conditions in RF energy harvesting. In *2016 IEEE Nordic Circuits and Systems Conference (NORCAS)*, pages 1–5, November 2016. 132

[CLM09] Sung-Lin Chen, Ken-Huang Lin, and R. Mittra. A novel triple-feed I-shaped slot antenna for an RFID tag designed for metallic objects. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. APSURSI '09*, pages 1–4, June 2009. 100

[CT10] H. D. Chen and Y. H. Tsao. Low-profile pifa array antennas for uhf band rfid tags mountable on metallic objects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(4) :1087–1092, April 2010. 38

[CUS10] Hervé Chabanne, Pascal Urien, and Jean-Ferdinand Susini. *RFID et l'internet des choses*. Hermes Science Publications, Paris ; Paris, 2010. 14, 21, 53

[DDCT13] D. De Donno, L. Catarinucci, and L. Tarricone. An UHF RFID Energy-Harvesting System Enhanced by a DC-DC Charge Pump in Silicon-on-Insulator Technology. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 23(6) :315–317, June 2013. 131, 132

[DDTLT12] D. De Donno, L. Tarricone, V. Lakafosis, and M.M. Tentzeris. Multi-packet reception MAC schemes for the RFID EPC Gen2 protocol. In *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pages 311–315, August 2012. 62

[Dio13] Ibra Dioum. *Design of multi-antenna systems for diversity and MIMO techniques : applications to small communicating devices*. Theses, Université Nice Sophia Antipolis, December 2013. :tel-00935084

[DPD14] Litian Duan, Wenwen Pang, and Fu Duan. An Enhanced Posterior Probability Anti-Collision Algorithm Based on Dynamic Frame Slotted ALOHA for EPCglobal Class1 Gen2. *Journal of Communications*, 9(10) :798–804, October 2014. 57

[DVI05] G. De Vita and G. Iannaccone. Design criteria for the RF section of UHF and microwave passive RFID transponders. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(9) :2978–2990, September 2005. 111, 124

[Flo06] C. Floerkemeier. Transmission control scheme for fast RFID object identification. In *Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06)*, pages 6 pp.–462, March 2006. 61

[FM10] Klaus Finkenzeller and Dörte Müller. *RFID Handbook : Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near–Field Communication*. Wiley-Blackwell, Chichester, 3rd edition edition, 2010. 14

[FMC15] C. Felini, M. Merenda, and F. G. Della Corte. Autonomous rfid sensor platform with highly efficient energy harvesting circuit. In *2015 XVIII AISEM Annual Conference*, pages 1–3, Feb 2015. 132

[Fri46] H. T. Friis. A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5) :254–256, May 1946. 109, 144

[FRI+16] N. M. Faudzi, A. N. A. Rashid, A. Ibrahim, M. F. Khyasudeen, and M. T. Ali. Microstrip Dipole UHF-RFID Tag Antenna for Metal Object Tagging. In *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, pages 36–41, July 2016. 35

[GDHK06a] J. D. Griffin, G. D. Durgin, A. Haldi, and B. Kippelen. Rf tag antenna performance on various materials using radio link budgets. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 5 :247–250, 2006. 75

[GDHK06b] J.D. Griffin, G.D. Durgin, A. Haldi, and B. Kippelen. RF Tag Antenna Performance on Various Materials Using Radio Link Budgets. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 5(1) :247–250, December 2006. 36

[GY11] Bo Gao and M.M.F. Yuen. Passive UHF RFID Packaging With Electromagnetic Band Gap (EBG) Material for Metallic Objects Tracking. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 1(8) :1140–1146, August 2011. 37, 42

[HID] All-purpose rain® uhf tags mount to any surface material. www.hidglobal.com. 10

[HZ13] Yejun He and Huaxia Zhang. A new UHF anti-metal RFID tag antenna design with open-circuited stub feed. In *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 5809–5813, June 2013. 42

[JB13] K. U. Jan and S. Bashir. Compact size EBG with wider band gap and scalable features for printed antenna and arrays. In *2013 IEEE 9th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, pages 1–5, December 2013. 76

[JC09] Ki Yong Jeon and Sung Ho Cho. Performance of RFID EPC C1 Gen2 Anti-collision in Multi-path Fading Environments. In *Second International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service, 2009. CTRQ '09*, pages 125–128, July 2009. 52

[JZ14] H. Ju and R. Zhang. A novel mode switching scheme utilizing random beamforming for opportunistic energy harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(4) :2150–2162, April 2014. 110

[KA09] R. Kanan and A. Azizi. UHF RFID transponders antenna design for metal and wood surfaces. In *2009 IEEE International Conference on RFID*, pages 270–277, April 2009. vi, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42

[KBJ+15] S. Kim, J. Bito, S. Jeong, A. Georgiadis, and M. M. Tentzeris. A flexible hybrid printed RF energy harvester utilizing catalyst-based copper printing technologies for far-field RF energy harvesting applications. In *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pages 1–4, May 2015. 132

[KCR10] D. K. Klair, K. W. Chin, and R. Raad. A Survey and Tutorial of RFID Anti-Collision Protocols. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 12(3) :400–421, 2010. 57, 59

[KF03] U. Karthaus and M. Fischer. Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7- µW minimum RF input power. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 38(10) :1602–1608, October 2003. 124

[Kuh15] Véronique Kuhn. *Capture opportuniste d'énergie micro-onde pour l'autonomie des objets communicants*. phdthesis, Télécom Bretagne ; Université de Bretagne Occidentale, November 2015. 122, 126

[KYLS06] G. Khandelwal, A. Yener, K. Lee, and S. Serbetli. ASAP : A MAC Protocol for Dense and Time Constrained RFID Systems. In *2006 IEEE International Conference on Communications*, volume 9, pages 4028–4033, June 2006. 60

[LCM13] Ken-Huang Lin, Sung-Lin Chen, and R. Mittra. A Looped-Bowtie RFID Tag Antenna Design for Metallic Objects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(2) :499–505, February 2013. 36

[Leh08] Harvey Lehpamer. *RFID Design Principles*. Artech House, 2008. 14

[LGV09] Antonio Lazaro, David Girbau, and Ramon Villarino. Effects of Interferences in UHF RFID Systems. *Progress In Electromagnetics Research*, 98 :425–443, 2009. 53, 64

[LHW16] C. H. P. Lorenz, S. Hemour, and K. Wu. Physical Mechanism and Theoretical Foundation of Ambient RF Power Harvesting Using Zero-Bias Diodes. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(7) :2146–2158, July 2016. 111

[LLT10] MingYin Lai, RongLin Li, and M.M. Tentzeris. Low-profile broadband RFID tag antennas mountable on metallic objects. In *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, pages 1–4, July 2010. 42

[LMK14] R. Lech, W. Marynowski, and A. Kusiek. Coplanar waveguide fed ultra-wideband antenna over the planar and cylindrical surfaces. In *2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pages 3097–3100, April 2014. 76

[LVDN13] Huichu Liu, R. Vaddi, S. Datta, and V. Narayanan. Tunnel FET-based ultra-low power, high-sensitivity UHF RFID rectifier. In *2013 IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*, pages 157–162, September 2013. 111

[LWZ+12] Qing Liu, Xiaobo Wu, Menglian Zhao, Lu Wang, and Xiaoting Shen. 30-300mv input, ultra-low power, self-startup DC-DC boost converter for energy harvesting system. In *2012 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*, pages 432–435, December 2012. 111

[LZC13] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(1) :288–300, January 2013. 110

[Mar08] G. Marrocco. The art of UHF RFID antenna design : impedance-matching and size-reduction techniques. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 50(1) :66–79, February 2008. 35

[MBDGP14] D. Michelon, E. Bergeret, A. Di Giacomo, and P. Pannier. Optimization of integrated dickson voltage-multipliers for RF energy harvesting. In *New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), 2014 IEEE 12th International*, pages 448–451, June 2014. 123, 129, 132

[MLS06] Jihoon Myung, Wonjun Lee, and J. Srivastava. Adaptive binary splitting for efficient RFID tag anti-collision. *IEEE Communications Letters*, 10(3) :144–146, March 2006. 55

[MSD09] N.A. Mohammed, M. Sivakumar, and D.D. Deavours. An RFID tag capable of free-space and on-metal operation. In *IEEE Radio and Wireless Symposium, 2009. RWS '09*, pages 63–66, January 2009. 35

[MSW11] Stephen B. Miles, Sanjay E. Sarma, and John R. Williams, editors. *RFID Technology and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge, reissue edition, April 2011. 14

[NDDR12] Vinod Namboodiri, Maheesha DeSilva, Kavindya Deegala, and Suresh Ramamoorthy. An extensive study of slotted Aloha-based RFID anti-collision protocols. *Computer Communications*, 35(16) :1955–1966, September 2012. 63

[noa14] EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, November 2014. 25, 44, 45, 61, 148

[noa16] Radio frequency identification equipment operating in the band 865 mhz to 868 mhz with power levels up to 2 w and in the band 915 mhz to 921 mhz with power levels up to 4 w, November 2016. 10

[noa17] ERC Recommendation 70-03, September 2017. 26

[NR08] P. V. Nikitin and K. V. S. Rao. Antennas and Propagation in UHF RFID Systems. In *2008 IEEE International Conference on RFID*, pages 277–288, April 2008. 64

[NR09] P.V. Nikitin and K.V.S. Rao. Effect of Gen2 protocol parameters on RFID tag performance. In *2009 IEEE International Conference on RFID*, pages 117–122, April 2009. 51

[oMRB17] P. Šolić, J. Maras, J. Radić, and Z. Blažević. Comparing Theoretical and Experimental Results in Gen2 RFID Throughput. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 14(1) :349–357, January 2017. 63

[oRR14] P. Šolić, J. Radić, and N. Rožić. Energy Efficient Tag Estimation Method for ALOHA-Based RFID Systems. *IEEE Sensors Journal*, 14(10) :3637–3647, October 2014. 64

[Par08] Dominique Paret. *RFID en ultra et super hautes fréquences UHF-SHF : Théorie et mise en oeuvre*. Dunod, Paris, March 2008. 14, 30, 40, 46, 52

[Per14] Etienne Perret. *Identification par radiofréquence*. ISTE, Londres, collection réseaux et télécommunications edition, September 2014. 14, 81

[PLGF11] María Teresa Penella-López and Manuel Gasulla-Forner. *Powering autonomous sensors : an integral approach with focus on solar and RF energy harvesting*. Springer Science & Business Media, 2011. 124

[QC07] X. Qing and Z. N. Chen. Proximity effects of metallic environments on high frequency rfid reader antenna : Study and applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(11) :3105–3111, Nov 2007. 75

[RLN08] K.V.S. Rao, S.F. Lam, and P.V. Nikitin. Wideband metal mount UHF RFID tag. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008*, pages 1–4, July 2008. 35, 42

[Rob72] Lawrence G. Roberts. Extensions of Packet Communication Technology to a Hand Held Personal Terminal. In *Proceedings of the May 16-18, 1972, Spring Joint Computer Conference*, AFIPS '72 (Spring), pages 295–298, New York, NY, USA, 1972. ACM. 57

[RSU+03] P. Raumonen, L. Sydanheimo, L. Ukkonen, M. Keskilammi, and M. Kivikoski. Folded dipole antenna near metal plate. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with : USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450)*, volume 1, pages 848–851 vol.1, June 2003. 39

[SBB16] A. Shlykevich, T. Bystřický, and T. Blecha. Influence of manufacturing processes on rf planar passive components electrical parameters. In *2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, pages 33–36, May 2016. 82

[SBS+17] P. Solic, Z. Blazevic, M. Skiljo, L. Patrono, R. Colella, and a J. J. P. C. Rodrigues. Gen2 RFID as IoT Enabler : Characterization and Performance Improvement. *IEEE Wireless Communications*, 24(3) :33–39, 2017. 63

[SCH16] T. Soyata, L. Copeland, and W. Heinzelman. RF Energy Harvesting for Embedded Systems : A Survey of Tradeoffs and Methodology. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 16(1) :22–57, 2016. 109

[Sch17] Klaus Schwab. *La quatrième révolution industrielle*. Dunod, New York, NY, 2017 edition, 2017. 1

[SCL16] J. Shi, D. Cui, and X. Lv. A CMOS Schottky barrier diode with the four-sided cathode. In *2016 International Conference on Integrated*

Circuits and Microsystems (ICICM), pages 103–107, November 2016. 111

[Sei11] Gary Seigneuret. *Analyse et Optimisation de télé-alimentation pour systèmes RFID UHF*. Electronic Thesis or Dissertation, Text, December 2011. 124

[SJC12] H.-W. Son, H.-G. Jeon, and J.-H. Cho. Flexible wideband UHF RFID tag antenna for curved metal surfaces. *Electronics Letters*, 48(13) :749–750, June 2012. 76, 77

[SKH+14] Mohammad Reza Shokrani, Mojtaba Khoddam, Mohd Nizar B. Hamidon, Noor Ain Kamsani, Fakhrul Zaman Rokhani, and Suhaidi Bin Shafie. An RF Energy Harvester System Using UHF Micropower CMOS Rectifier Based on a Diode Connected CMOS Transistor. *The Scientific World Journal*, 2014 :e963709, March 2014. 123, 129, 132

[SYP+08] A.P. Sample, D.J. Yeager, P.S. Powledge, A.V. Mamishev, and J.R. Smith. Design of an RFID-Based Battery-Free Programmable Sensing Platform. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(11) :2608–2615, November 2008. 123

[TBH15] D. A. Tesch, E. L. Berz, and F. P. Hessel. Rfid indoor localization based on doppler effect. In *Sixteenth International Symposium on Quality Electronic Design*, pages 556–560, March 2015. 31

[Val14] Christopher Ryan Valenta. *Microwave-energy harvesting at 5.8 GHz for passive devices*. Electronic Thesis, Georgia Institute of Technology, June 2014. 110

[Val15] C.R. Valenta. Fundamental limitations for Schottky diode RF energy harvesting. In *2015 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, pages 188–193, September 2015. 124

[Vog02] Harald Vogt. Efficient Object Identification with Passive RFID Tags. In *Pervasive Computing*, Lecture Notes in Computer Science, pages 98–113. Springer, Berlin, Heidelberg, August 2002. 59

[Voy15] Voyantic. *Tagformance Measurement System*, 2015. 96

[VUP+07] Alexander Vaz, Aritz Ubarretxena, Daniel Pardo, Inaki Sancho, and Roc Berenguer. Design Methodology of a Voltage Multiplier for Full Passive Long Range UHF RFID. In *2007 3rd European Workshop*

on RFID Systems and Technologies (RFID SysTech), pages 1–4, June 2007. 111

[ZH13] Rui Zhang and Chin Keong Ho. MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(5) :1989–2001, May 2013. 110

[Zho10] Yongming Zhou. A novel slot antenna for UHF RFID tag. In *IET 3rd International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks (ICWMNN 2010)*, pages 254–257, September 2010. 100

[ZKS05] Bin Zhen, Mamoru Kobayashi, and Masashi Shimizu. Framed aloha for multiple rfid objects identification. 88-B :991–999, 03 2005. 60

[ZLZQ14] S. Zhao, Q. Li, Q. Zhang, and J. Qin. Antenna selection for simultaneous wireless information and power transfer in mimo systems. *IEEE Communications Letters*, 18(5) :789–792, May 2014. 110

[ZZH13a] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho. Wireless information and power transfer in multiuser ofdm systems. In *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 4092–4097, Dec 2013. 110

[ZZH13b] Xun Zhou, Rui Zhang, and Chin Keong Ho. Wireless Information and Power Transfer : Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff. *IEEE Transactions on Communications*, 61(11) :4754–4767, November 2013. 111

Publications

Conférences internationales avec acte et comité de lecture

A. Safraou, P. Bacot, S. Dudret, E. Bourdel, and B. Granado, "RF Harvesting Circuit for Batteryless Connected Sensor," Proceedings Eurosensors, vol. 1, no. 5, p. 583, Aug. 2017.

Conférences nationales avec acte et comité de lecture

Ahcine Safraou, Emmanuelle Bourdel, Patrick Bacot, Stéphane Dudret, Frédéric Verpillat, Bertrand Granado. *Récupération d'énergie dans la bande RFID UHF pour capteurs connectés*. Energie et Radiosciences, Mars 2016, Rennes, France.

Ahcine Safraou, Patrick Bacot, Stéphane Dudret, Emmanuelle Bourdel, Bertrand Granado. *Étude et Optimisation d'un Circuit de Récupération d'Énergie RFID UHF pour Capteurs Autonomes*. 20èmes Journées Nationales Micro-Ondes, Mai 2017, Saint-Malo, France.

Colloques nationaux

Ahcine Safraou, Emmanuelle Bourdel, Patrick Bacot, Stéphane Dudret, Frédéric Verpillat, Bertrand Granado. *UHF RFID Harvesting System for Wireless Sensor*. GDR SOC-SIP, Juin 2016, Nantes, France.

Résumé

Dans le contexte actuel de transformation numérique, Air Liquide souhaite moderniser le suivi logistique de ses bouteilles de gaz à l'aide de la technologie d'identification radio (RFID) à ultra haute fréquence (UHF) qui remplacerait la solution code-barres actuelle et permettrait de dépasser certaines de ses limites. La numérisation de la traçabilité aura pour conséquence en outre d'enrichir l'interaction entre les actifs industriels et le système de gestion et de production pour ainsi créer l'écosystème IOT (Internet Of Things) spécifique à l'entreprise.

Le recours à la RFID UHF est de nos jours largement répandu pour la logistique et la gestion de stocks. Cependant, les environnements métalliques, comme celui que l'on trouve avec les bouteilles de gaz, induisent des perturbations qui dégradent fortement la qualité de la communication radio fréquence (RF). Cela constitue un frein au déploiement de cette technologie dans un tel cadre. Il est nécessaire de comprendre les perturbations induites par les milieux conducteurs afin de s'en affranchir et ainsi proposer une solution efficiente. En plus de cela, les faibles niveaux d'énergie mis en jeu impliquent qu'une étude de l'ensemble des points d'amélioration des dispositifs RFID UHF tant au niveau matériel que logiciel soit réalisée.

De cette étude théorique, nous avons fait le choix de concentrer nos efforts sur la conception d'un tag RFID UHF pour objets métalliques répondant au cahier des charges spécifique de l'industriel. Pour aller plus loin dans l'optimisation de la logistique et de la gestion des stocks, nous nous sommes également penchés sur l'étude et la réalisation d'un circuit de récupération d'énergie RFID UHF pour tag augmenté passif équipé d'un capteur. L'objectif est d'apporter une information sur l'état de l'actif en plus de son identité tout en évitant les contraintes liées à la présence d'une batterie ou d'une pile.

Mots clés : RFID UHF, Récupération d'énergie, EPC Gen2, portique RFID, environnement métallique, conception d'antenne, conception et caractérisation de tag, logistique, gestion de stocks, IOT, RF.

Abstract

In the current context of digital transformation, Air Liquide explores the use of Ultra High Frequency (UHF) Radio Frequency IDentification (RFID) in the gas cylinders supply chain, as a replacement for the current, barcode-based, tracking and inventory solution. Digitalization will also provide the company an opportunity to develop its IOT ecosystem through enriched interaction between assets and their management system.

UHF RFID is nowadays commonplace in logistics. However, metal surroundings as found in the gas cylinder's case, yield disturbances in the RF communication, and decreased inventory performances. Therefore, it is necessary to understand the adverse effects of metal surroundings to propose an ad-hoc solution. In addition, dealing with low levels of energy in the RF communication suggests leveraging both hardware and software aspects of RFID devices for potential performance improvements.

On the basis of our theoretical study, we focus on the design and testing of an industrial UHF RFID tag suitable for the gas cylinder use case. To enable an even richer, more interactive supply chain, we also design and test an energy harvesting device for the UHF band, to power a tag enriched with an active sensor, without the logistic burden of a battery of limited durability.

Key word : UHF RFID, energy harvesting, EPC Gen2, on-metal antennas, RFID gate, antenna design, tag design and characterisation, supply chain, stock management, IOT, RF.