
UNIVERSITÉ DE LILLE
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCE POUR L'INGÉNIEUR - 072

Dispositif de détection et localisation basé sur un
système RFID UHF intelligent : application au
domaine de la grande distribution

T H È S E

préparée et soutenue publiquement le **27 Mars 2019** par

Hadi FARHAT

pour obtenir le grade de Docteur en

**Électronique, microélectronique, nanoélectronique et
micro-ondes**

préparée à l'Institut d'électronique de microélectronique et de
nanotechnologie

Composition du Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Aziz BENLARBI-DELAI	-	Professeur, Université Pierre-et-Marie-Curie
	Robert STARAJ	-	Professeur, Université Nice Sophia Antipolis
<i>Directrice :</i>	Nathalie ROLLAND-HAESE	-	Professeur, Université de Lille
<i>Co-Encadrant :</i>	Philippe MARIAGE	-	MCF, Université de Lille
<i>Encadrant en entreprise :</i>	Plamen ILIEV	-	Directeur technique, Décathlon
<i>Examineurs :</i>	Mohamed HIMDI	-	Professeur, Université de Rennes 1
	Divitha SEETHARAMDOO	-	Chargé de recherche, IFSTTAR
	Claude TÉTELIN	-	Directeur opérationnel, Connectwave

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à la directrice de ce mémoire, Nathalie Rolland, pour ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désirerais aussi remercier Philippe Mariage pour son co-encadrement de ce travail, pour son accompagnement à l'élaboration des travaux, pour ses conseils et son écoute. Je lui remercie aussi de m'avoir laissé la liberté de ré-orienter les travaux pendant le déroulement de la thèse et aussi d'avoir facilité mon intégration à l'IRCICA.

Je voudrais remercier également Plamen Iliev, pour cette opportunité qui m'a permis de réaliser mes travaux au sein de Décathlon. Je le remercie aussi pour sa confiance et son intérêt de tout instant à l'avancée des travaux. Son engagement et celui de l'entreprise étaient substantiels à l'adaptation de cette thèse aux besoins du marché et à sa réussite.

Je souhaiterais remercier aussi les membres du jury, notamment Pr. Robert Staraj et Pr. Aziz Benlarbi-Delaï, d'avoir accepté d'examiner cette thèse et d'avoir assisté à la soutenance. Leurs remarques et commentaires m'ont permis d'apporter des améliorations à ce mémoire.

Enfin, je tiens à témoigner toute ma gratitude et ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Résumé

La technologie RFID UHF, également appelée RAIN RFID, est une technologie passive permettant l'identification automatique des objets. Elle comble ainsi le fossé entre les mondes physique et numérique en permettant à un objet de devenir « vivant » sur l'internet des objets grâce à des étiquettes RFID (tags) peu coûteuses et sans batterie. La technologie RFID UHF passive témoigne d'un développement significatif en raison de la croissance accélérée de dispositifs technologiques sophistiqués. Ce développement est en grande partie poussé par la chaîne d'approvisionnement et la grande distribution. Dans ces domaines, la RFID UHF passive de deuxième génération (Gen2), parmi d'autres solutions de traçage et d'identification possibles, constitue un choix logique compte tenu du faible coût des tags lorsqu'ils sont produits en gros volumes, de leur facilité d'impression et de l'absence de batterie.

La principale préoccupation des revendeurs détaillants est la disponibilité du produit. Celle-ci peut être affectée par l'existence d'erreurs liées à la visibilité (écarts de stockage, vol, perte) et d'erreurs humaines. Il est donc nécessaire d'améliorer la visibilité et d'automatiser le processus. Malgré ses avantages, le déploiement de la technologie RFID dans la grande distribution est toujours confronté à de nombreux obstacles et défis. Dans cette thèse, nous nous sommes attachés à répertorier toutes les technologies de composants et de lecteurs proposées sur le marché ou encore à l'état de prototype, puis, après avoir identifié et analysé les différents défis liés à ce domaine particulier d'application, à élaborer et à tester de nouvelles solutions.

En premier lieu, les distances maximales de lecture des tags passifs sont évaluées dans différents environnements afin d'identifier les facteurs les impactant. À l'issue de cette étude, une méthode de caractérisation alternative est proposée pour contrôler les performances des tags et identifier les objets tagués ayant de faibles performances. Deuxièmement, nous nous appuyant sur cette méthode pour proposer une nouvelle solution d'amélioration de la détection. Les algorithmes conçus et réalisés pour traduire cette solution permettent aux lecteurs de négocier leurs configurations avec l'environnement et entre eux. Enfin, un nouvel algorithme de localisation est proposé afin d'améliorer la précision. Son élaboration et son implémentation sont basées sur l'exploitation de la réponse des tags identifiés comme les plus fiables du milieu. Les solutions proposées sont particulièrement avantageuses car universelles, compatibles avec les lecteurs du marché et n'ajoutant aucun coût au matériel utilisé pour la détection.

Abstract

UHF RFID technology, also known as RAIN RFID, is a passive technology that enables the automatic identification of items. Thus, it bridges the gap between the physical and digital worlds by allowing an item to become alive on the Internet of things thanks to inexpensive and battery-free RFID tags. Passive UHF RFID technology has witnessed a significant development due to the accelerated growth of sophisticated technological devices. This development is largely driven by the supply chain and the retail industries. Passive UHF RFID Gen2, among other tracing and identification solutions, is the logical choice given the low costs of large-volume tags, ease of printing and being battery-free, the need for maintenance is completely eliminated.

The main concern of retailers is the availability of the product. This can be affected by the existence of errors related to visibility (storage gaps, theft, loss) and human errors. It is therefore necessary to improve visibility and automate the process. Despite its advantages, the deployment of RFID technology in retail still faces many obstacles and challenges. In this thesis, we endeavored to list the technologies, components and readers, proposed on the market or still in the prototype state. Then, after having identified and analyzed the various challenges related to this particular field of application, we develop and test new solutions.

First, the maximum reading distances of passive tags are evaluated in different environments to identify the factors impacting them. At the end of this study, an alternative characterization method is proposed to control tag performances and to identify tagged objects with poor performances. Secondly, we rely on this method to propose a new solution to improve detection. The algorithms are designed and built to allow readers to negotiate their configurations with the environment and with each other. Finally, a new positioning algorithm is proposed to improve accuracy. Its elaboration and its implementation are based on the exploitation of the response of the tags identified as the most reliable of the environment. The proposed solutions are particularly advantageous because they are universal, compatible with market readers and do not add any cost to the equipment used for detection.

Table des matières

Introduction Générale	1
1 Introduction	2
1.1 Historique	2
1.2 L'identification radio-fréquence	3
1.2.1 Décomposition du système	4
1.2.2 Technologies actives et passives	4
1.2.3 Gamme de fréquences	5
1.2.3.1 Bandes LF et HF	6
1.2.3.2 Bandes UHF et SHF	6
1.3 Domaines d'application	7
1.3.1 Chaîne d'approvisionnement et grande distribution	7
1.3.2 Santé	7
1.3.3 Autres	8
1.4 Standardisation et réglementations des technologies RFID	8
1.5 La RFID UHF passive dans la grande distribution	9
1.5.1 Code de Produit Électronique	10
1.5.2 Les bénéfices de la RFID	11
1.5.3 Règlementation de la RFID UHF passive en France	12
1.5.4 Les environnements de déploiement de la RFID passive	12
1.5.4.1 L'usine	12
1.5.4.2 La logistique et le magasin	13
1.6 Le marché de la RFID	13
1.7 Tags UHF passifs du commerce	15
1.8 Solutions de lecture passives	16
1.9 La RFID chez Decathlon	17
1.10 Conclusion et axes de recherche	18
2 La technologie RFID UHF passive	20
2.1 Introduction	20
2.2 L'activation des tags passifs	20
2.2.1 Architecture du lecteur	21
2.2.2 Architecture du tag	22
2.3 La communication passive	23
2.3.1 Communication Lecteur-Tag	24
2.3.2 Communication Tag-Lecteur	25
2.4 État de l'art : Les tags passifs	26
2.4.1 Procédés de fabrication des antennes	26

2.4.2	Conception des antennes	27
2.4.3	Caractérisation des tags	29
2.5	État de l'art et expérimentation : amélioration de la détection	30
2.5.1	Solutions autour du tag	30
2.5.1.1	Optimisation du facteur de qualité de la puce	30
2.5.1.2	L'auto-adaptation	32
2.5.1.3	Autres propositions	35
2.5.2	Les systèmes de lecture	36
2.5.2.1	Un point sur les antennes	37
2.5.2.2	Les étagères intelligentes	38
2.5.2.3	Les robots	41
2.5.2.4	Les systèmes montés au plafond	41
2.6	Conclusion	45
3	Les tags UHF passifs	47
3.1	Introduction	47
3.2	Les performances d'un tag passif	47
3.3	Limitations	49
3.4	Analyse des antennes des tags UHF RFID	49
3.4.1	L'adaptation T-match	49
3.4.2	Dissection d'un tag du marché	50
3.4.3	Effet de la désadaptation	53
3.5	Technique de caractérisation d'un tag	53
3.5.1	Pourquoi caractériser un tag ?	53
3.5.2	Plate-formes de caractérisation	53
3.5.3	Performances des tags dans un milieu réel	55
3.5.3.1	Performances des tags en espace libre	55
3.5.3.2	Observations dans un milieu de type magasin	56
3.5.3.3	Isolation des facteurs pertinents	57
3.6	L'adaptation d'un tag à son environnement	60
3.6.1	Observation de l'effet de la proximité	60
3.6.2	Étude expérimentale	61
3.6.2.1	Matériels et méthodes	62
3.6.2.2	Mesure des effets de divers paramètres	63
3.6.2.3	Simulation de différents facteurs liés à la proximité	66
3.6.3	Explication de l'effet de la proximité	70
3.6.3.1	Étude analytique du couplage magnétique	70
3.6.3.2	Modélisation de la désadaptation	72
3.6.4	Validation du modèle et perspectives	73
3.6.4.1	Validation du modèle	73
3.6.4.2	Proposition d'une nouvelle méthode de conception	74
3.6.4.3	Résultats et discussion	75
3.7	Conclusion	77
4	L'évaluation des performances d'un système RFID	79
4.1	L'influence du milieu réel dans la RFID	79
4.2	Étapes de caractérisation dans différents milieux	80
4.2.1	Contexte	80
4.2.2	Les différents milieux de lecture	81

4.2.2.1	Caractérisation d'un tag seul	81
4.2.2.2	Caractérisation d'un tag sur un produit	82
4.2.2.3	Caractérisation de l'effet de l'agencement	83
4.2.2.4	Caractérisation en milieu réel	84
4.2.3	Mesure du changement des performances	85
4.2.4	Discussion	88
4.3	Nouvelle méthode alternative aux méthodes de caractérisation classiques	90
4.3.1	Évaluation des performances en milieu réel	90
4.3.2	Mise en place et configuration des systèmes de caractérisation	90
4.3.3	Étude de la détection	92
4.3.4	Classification des produits selon leur performances	94
4.3.4.1	Motivations et nouvelle approche	94
4.3.4.2	Classification non supervisée	95
4.3.4.3	Indicateurs de performances	96
4.3.5	Nouvelles capacités d'anticipation de performances	98
4.3.5.1	Validation des indicateurs	98
4.3.5.2	Résultats et discussion	98
4.4	Conclusion	101
5	Optimisation de la détection dans un environnement dense	103
5.1	Introduction	103
5.2	Limites et contraintes	104
5.2.1	Aperçu des contraintes liées à la sensibilité du lecteur	104
5.2.2	Contraintes liées à la conception du tag	104
5.2.3	Contraintes liées à la propagation	106
5.3	Premiers essais	107
5.3.1	Contexte	107
5.3.2	Optimisation de la propagation	108
5.3.3	Amélioration de l'activation	112
5.3.4	Exploitation des interférences constructives	115
5.4	Un nouveau système RFID intelligent	119
5.4.1	Mise en place du nouveau système	119
5.4.1.1	Matériels	119
5.4.1.2	Les paramètres étudiées	120
5.4.1.3	Indicateurs de performance	120
5.4.1.4	Méthodologie	121
5.4.2	Analyse de divers effets	122
5.4.2.1	Effet de la puissance	122
5.4.2.2	Effet de la fréquence	124
5.4.2.3	Effet de la temporisation de l'émission	125
5.4.2.4	Effet des paramètres Gen2	126
5.4.3	La randomisation comme solution	131
5.4.3.1	Architecture du système	132
5.4.3.2	Optimisation des temps de lecture	133
5.4.3.3	Sélection des paramètres à varier	134
5.4.3.4	Effet des pertes des câbles	135
5.4.3.5	Optimisation du montage : en face vs. au plafond	136
5.4.3.6	Optimisation des paramètres physiques de l'installation	137

5.4.3.7	Optimisation de la propagation	138
5.4.3.8	Discussion	139
5.4.4	Optimisation génétique et auto-configuration	140
5.4.4.1	Les algorithmes génétiques	141
5.4.4.2	Éléments d'un algorithme génétique	141
5.4.4.3	Cibles d'optimisation	142
5.4.5	Résultats et discussion	145
5.5	Conclusion	147
6	La localisation des produits dans un magasin	149
6.1	Localisation des produits dans un magasin	149
6.1.1	Quel intérêt	149
6.1.2	Systèmes de positionnement intérieur	150
6.1.2.1	Les technologies radio-fréquence	150
6.1.2.2	La lumière	151
6.1.2.3	La vision	152
6.1.2.4	Autres technologies	153
6.1.3	Techniques de localisation	153
6.1.4	Choix de la technologie	154
6.2	Localisation par la RFID UHF passive	156
6.2.1	Défis	156
6.2.2	Tendances	157
6.2.3	Les éléments d'un système de localisation RFID	158
6.2.3.1	Collecte des données	158
6.2.3.2	Mesures physiques	159
6.2.3.3	Traitement et techniques	161
6.3	Évaluation d'une solution du marché	164
6.3.1	Évaluation de la localisation 2D	164
6.3.1.1	Système sous test	164
6.3.1.2	Technique de localisation	165
6.3.2	Environnement de test	165
6.3.2.1	Rayon cible	165
6.3.2.2	Installation du système	166
6.3.3	Procédure de test	167
6.3.4	Résultats et discussion	168
6.4	Nouvelle solution de localisation	173
6.4.1	Caractéristiques de la solution	173
6.4.1.1	Localisabilité et localisation	173
6.4.1.2	Mode de fonctionnement envisagé	173
6.4.1.3	Choix des lecteurs et implémentation	174
6.4.2	Étude préliminaire	175
6.4.2.1	Mesures dans la chambre anéchoïque	175
6.4.2.2	Mesure dans un milieu de type magasin	177
6.4.3	Technique de localisation en deux dimensions	178
6.4.3.1	Architecture de l'algorithme	178
6.4.3.2	Première phase : sélection	179
6.4.3.3	Phase 2 : technique de localisation	180
6.4.3.4	Phase 3 : Estimation des autres positions	182

6.4.4	Résultats : évaluation de la précision et de la résolution de la localisation	184
6.4.4.1	Plan d'évaluation	184
6.4.4.2	Évaluation des phases 1 et 2	187
6.4.4.3	Évaluation de la troisième phase	190
6.5	Discussion	193
6.6	Perspectives : la hauteur des produits dans le rayon	195
6.7	Conclusion	196
Conclusion Générale		198
Annexes		I
A Catalogue de tags		I
B Laird SP8658WPR		II
C Rayon et tags cibles		III
D Informations relatives à la technique de localisation de l'xArray		V

Table des figures

1.1	Exemple d'un système RFID	4
1.2	La place de la RFID dans le spectre électromagnétique. (Source : CNRFID)	5
1.3	Couplage magnétique entre les antennes du lecteur et du tag [8]	6
1.4	Les différents standards dans un système RFID	9
1.5	Exemple d'un EPC binaire stocké dans la puce d'un tag (source : [15]) . .	10
1.6	Marché RFID total en milliards de dollars US (source : IDTechEx [28]) . .	14
1.7	Acteurs du marché	14
1.8	Chaîne de valeur d'un tag (source : IDTechEx [28])	16
1.9	Trois types de tags passifs différents	16
1.10	La RFID chez Decathlon (source : Decathlon)	18
1.11	Le déploiement de la RFID dans le magasin	19
2.1	Architecture de la puce Indy R2000 [33]	22
2.2	Architecture simplifié de la puce du tag RFID passif	23
2.3	Un schéma type d'un démodulateur	23
2.4	Exemple d'inventaire d'un tag [36]	25
2.5	La référence GB3 en deux versions R6 et Ucode7	33
2.6	Les distances de lectures maximales du GB3	35
2.7	Les tendances de la recherche autour les systèmes de lecture	37
2.8	L'antenne NeWave pour les applications SmartShelves [123]	38
2.9	Les pourcentages de détection pour les différentes configurations du tableau 2.2	40
2.10	Vue de dessus du montage avec deux interrogateur (hauteur = 2,5 mètres)	42
2.11	Les pourcentages de détection correspondants aux meilleures configurations	44
2.12	Les pourcentages de détection en fonction des tags utilisés	44
3.1	Schéma montrant les deux chemins entre le lecteur et le tag	48
3.2	Le schéma du Web G2iL	50
3.3	Les impédances réelles et imaginaires de différents composants de l'antenne	51
3.4	L'adaptation entre la puce et les composants de l'antenne	51
3.5	La distance maximale d'activation	52
3.6	Le schéma bloc du banc de test	54
3.7	Équipement certifié de caractérisation	54
3.8	Performances des tags en espace libre	55
3.9	Configuration des produits tagués dans un magasin	56
3.10	Performances d'un tag attaché à plusieurs matériaux	57
3.11	Performances d'un tag attaché à un matériau en PU	58
3.12	Performances d'un tag courbé	58
3.13	Performances d'un tag parmi un empilement de 5	59

3.14	Performances d'un produit avec différents tags agencé en configuration dense	61
3.15	Configuration des tags dans le caisson anéchoïque	62
3.16	La distance de lecture maximale en présence d'un deuxième tag à 5 mm de distance	64
3.17	L'effet de la distance entre deux tags	64
3.18	L'effet du nombre de tags	65
3.19	L'effet de l'ordre d'un tag	66
3.20	Deux montages de simulation	67
3.21	Le champ électrique et le courant surfacique mesurés sur le deuxième tag, non-alimenté	67
3.22	L'effet de l'ordre sur les performances des tags placés à proximité	68
3.23	La puissance émise par l'antenne Laird, disponible à la position de chaque tag	69
3.24	Visualisation du champ électrique dans la liaison descendante	69
3.25	Les performances des tags en présence des multi-chemins	70
3.26	Dimensions de la boucle rectangulaire	71
3.27	Variation du couplage en fonction des dimensions de la boucle	72
3.28	Comparaison entre mesures et calcul	74
3.29	Stabilisation des performances d'un tag situé en proximité à un deuxième tag	75
3.30	Comparaison entre le Web G2iL et le Nouveau tag proposé	76
3.31	Le courant mesuré sur le deuxième tag (simulation)	76
4.1	Tag seul dans le caisson anéchoïque	82
4.2	Produit tagué dans le caisson anéchoïque	82
4.3	Rayon complet dans la chambre anéchoïque	84
4.4	Rayon complet dans un milieu magasin	85
4.5	Effet du produit	86
4.6	Effet de l'agencement	87
4.7	Effet du milieu	88
4.8	Pertes du chemin	89
4.9	L'installation des antennes dans le milieu réel	91
4.10	Le gabarit du rayon, vue de face	92
4.11	Les taux de détection pour chaque famille de produits en milieu réel	93
4.12	Distribution des valeurs du RSSI et RC des tags	97
5.1	Les diagramme de rayonnement, Directivité (dB)	109
5.2	Le gain en directivité entre deux antennes en déphasage et l'antenne Laird seule	110
5.3	Le système de lecture dans la chambre anéchoïque	110
5.4	Les pourcentages de détection avec une seule antenne Laird (configuration 1.a) et $P_{\text{rayonnée}} = 24 \text{ dBm}$	111
5.5	Le schéma du système de lecture à multiple porteuses	113
5.6	Un schéma montrant un tag qui se trouve dans la zone d'interférence de deux interrogateurs	116
5.7	Le placement des deux antennes correspondants aux deux lecteurs	116
5.8	La distance maximale en fonction de la distance de séparation entre le tag et I2	118
5.9	Le système de lecture basé sur deux modules ThingMagic M6e	120

5.10	Interface graphique du logiciel développé	121
5.11	L'impact de la puissance sur les performances du système	123
5.12	L'impact de la fréquence sur les performances du système	125
5.13	L'impact des taux du temps de lecture active sur les performances du système	126
5.14	L'impact du TARI sur les performances du système	128
5.15	L'impact de l'encodage sur les performances du système	129
5.16	L'impact du facteur Q sur les performances du système	130
5.17	Montage des antennes au plafond	132
5.18	Phase 1	134
5.19	Phase 2	135
5.20	Phase 3	136
5.21	Phase 4	137
5.22	Phase 5	138
5.23	Phase 6	139
5.24	Taux de détection des tags du rayon	139
5.25	Interface graphique de l'application pour l'auto-configuration	142
5.26	L'évolution de la détection des tags uniques	145
5.27	Les gains en RSSI pour les 298 tags cibles détectés	146
6.1	Les points forts et faibles des technologies	155
6.2	La variation du nombre des publications et des citations pendant les douze dernières années	157
6.3	La position et division des faisceaux générés	164
6.4	Le rayon cible pour évaluer le système de localisation	166
6.5	Installation des deux <i>xArray</i> à une hauteur de 265 cm	167
6.6	Les erreurs absolues moyennes (EAM), les erreurs quadratiques moyennes (EQM) et les taux de détection en fonction du paramétrage des deux <i>xArrays</i>	170
6.7	La fonction de répartition des erreurs absolues moyennes	170
6.8	Les erreurs absolues moyennes (EAM) et les taux de détection en fonction de la configuration et l'agencement du tag pour le test numéro 9	172
6.9	Implémentation de la solution de localisation	174
6.10	Agencement des tags dans la chambre anéchoïque	175
6.11	Évaluation des variations du RSSI	176
6.12	Évaluation des variations de la phase	176
6.13	L'évaluation des variation du RSSI en milieu réel	177
6.14	L'évaluation des variation de la phase en milieu réel	178
6.15	Architecture de la solution de localisation	178
6.16	Bilatération de la position d'un tag	181
6.17	L'évaluation des erreurs de localisation en fonction des paramètres de sé- lection	188
6.18	Les erreurs en fonction des paramètres de calcul de la distance	189
6.19	L'erreur absolue moyenne de la position en fonction de la configuration du produit	190
6.20	L'évaluation des erreurs en fonction du facteur "k" et des indicateurs . . .	191
6.21	L'évaluation des erreurs en fonction du temps de lecture en Temps Réel . .	192
6.22	Comparaison de la répartition des erreurs absolues	194
6.23	Comparaison des erreurs absolues moyennes en fonction de la configuration du produit	195

6.24	La relation entre les faisceaux du calcul et la hauteur d'un produit dans le rayon	196
C.1	Rayon Cible	IV
D.1	Captures du brevet [302] qui résumant la technique de localisation utilisée pour le xArray	VI

Liste des tableaux

2.1	Comparaison des puces du marché	33
2.2	Les différentes configurations de puissance et distance	40
2.3	Quelques configurations et résultats pour les deux systèmes évalués	43
3.1	Comparaison de la dégradation de la distance maximale de lecture causée par chaque facteur d'impact	59
3.2	Les meilleurs dimensions de l'optimisation	74
4.1	L'agencement des 11 produits sélectionnés	83
4.2	Comparaison entre les trois cas	98
4.3	La répartition des produits en fonction des trois catégories prédéfinie, comparée à la détectabilité de chaque famille (cf. partie 4.3.3)	99
4.4	Comparaison de divers méthodes de caractérisation utilisées	101
5.1	Les pourcentages de détection dans deux configurations avec une seule (a) et deux antennes (b)	111
5.2	Comparaison des puces du marché	113
5.3	L'amélioration de la distance maximale de lecture avec un deuxième lecteur	117
5.4	L'ordre d'impact de chaque paramètre sur chaque indicateur	131
5.5	Plages de variations	133
5.6	Phase 1	133
5.7	Phase 2	134
5.8	Phase 3	135
5.9	Phase 4	136
5.10	Phase 5	137
5.11	Phase 6	138
5.12	Les pires et meilleurs gain en RSSI	146
5.13	Comparaison des deux cas	147
6.1	Les configurations correspondants à chaque numéro de test	169
6.2	Plan d'évaluation de la solution de localisation proposée	186
A.1	Catalogue de tags utilisés	I
C.1	Famille de produits	III

Liste des Pseudocodes

1	Algorithme k-moyennes	97
2	Algorithme de la génération aléatoire	122
3	Algorithme de l'auto-configuration	143
4	Algorithme d'évaluation de l'aptitude	144
5	Algorithme de sélection	179
6	Algorithme de calcul	182
7	Algorithme de la phase 3	183

Introduction Générale

J'ai eu l'opportunité de réaliser cette thèse sur la détection et la localisation de produits commercialisés dans la grande distribution grâce à une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) entre le laboratoire IEMN et la société Embisphere. Cette société a été absorbée par la société Décathlon dans le courant de l'année 2018 et les travaux ont continué au sein de cette dernière.

La technologie RFID a été retenue comme technique pour effectuer la détection et la localisation des produits exposés en rayons dans des grandes surfaces. L'identification Radio-fréquence (RFID) est une méthode d'identification automatique permettant à un objet de stocker des informations uniques, et de les communiquer, grâce à des étiquettes/marqueurs RFID. Ces étiquettes—plus souvent désignées par "Tags"—qui décrivent des caractéristiques uniques de l'objet auquel elles sont attachées, peuvent être lues à plusieurs mètres de distance sans le besoin d'être dans la ligne de vue directe d'un lecteur.

De nos jours, grâce à ses nombreuses avantages, la RFID est la technologie la plus populaire pour la gestion de la chaîne d'approvisionnement dans la grande distribution. Dans cette thèse nous miserons sur ces bénéfices afin de proposer un système de localisation, entièrement basé sur la technologie RFID. La localisation des produits dans le secteur de la grande distribution peut aider à améliorer l'efficacité des opérateurs dans un magasin, d'optimiser l'expérience des clients et de fournir des données analytiques au détaillant.

Bien évidemment, afin de pouvoir localiser les articles étiquetés, il faut, en premier lieu, assurer leur détection et la communication entre les éléments passifs (sans-batterie) et le lecteur. Dans ce contexte, ce mémoire est organisé en six chapitres principaux. Le premier chapitre introduit la technologie RFID et ses applications en s'appuyant sur son usage dans la grande distribution et les bénéfices qu'elle apporte. Le deuxième chapitre décrit cette technologie d'un point de vue technique en analysant les composants d'un système RFID passif et la communication entre le tag et le lecteur. Le troisième chapitre se concentre sur l'élément passif du système et ses performances. En se basant sur cette étude, les performances d'un système RFID dans un milieu réel sont étudiées dans le chapitre 4. Dans le chapitre cinq, des travaux sont menés autour de l'amélioration de la détection des tags dans un milieu réel, pour des applications d'inventaire massif afin d'assurer l'identification du maximum d'articles. Finalement, dans le sixième chapitre, la localisation des articles dans un milieu réel et dense, basée sur la technologie RFID, est étudiée. Les solutions proposées doivent pallier les contraintes de l'environnement réel et d'un agencement dense de tags RFID dans un magasin Décathlon, tout en respectant un faible coût d'implémentation.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Historique

Les développements dans le domaine de la radiofréquence sont le résultat des premières phases de la recherche fondamentale autour des ondes électromagnétiques, qui a produit des lois et des formules qui décrivent leurs natures. Les travaux de Marconi (en 1896) sur la radiotéléphonie, de Alexanderson (1906) sur la génération et la transmission des ondes entretenues et de Watson (1935) sur le radar signalaient la naissance de la communication par radio fréquences ¹.

La notion de l'identification par radio-fréquences est apparue pour la première fois lors de la seconde Guerre Mondiale. Les Allemands, les Japonais, les Américains et les Britanniques utilisaient tous un radar pour avertir des avions qui approchaient alors qu'ils étaient encore à des kilomètres. Le problème était qu'il n'y avait aucun moyen de déterminer si l'avion en approche appartenait à l'ennemi ou pas. Les Allemands découvrirent que si les pilotes faisaient tanguer leurs avions selon une séquence convenue à l'avance, lors de leur retour à la base, le signal renvoyé serait différent. Cette méthode alertait l'équipage radar au sol si l'avion appartenait à un allié ou à un ennemi. A la fin de la guerre, la recherche continue autour de cette technologie et devient de plus en plus concentrée sur son usage civil. En Octobre 1948, un article scientifique intitulé "Communications by Mean of Reflected Power" est publié, qui marque la naissance de la technologie RFID.

Pendant les années 50 et 60, l'exploration de cette technologie et le développement de la théorie étaient prises en charge par plusieurs entités gouvernementales, commerciales et académiques. Les travaux concernaient principalement la communication passive et l'activation à distance des appareils à partir des ondes radiofréquences. En 1960, les sociétés Checkpoint et Sensormatic ont développé le premier équipement commercial. Ce dispositif consiste en une étiquette de surveillance électronique d'article («EAS») à base d'un seul bit. Ces systèmes toujours disponibles de nos jours, sont capable de détecter la présence d'un article sans l'identifier ; ils sont couramment utilisés pour des applications de sécurité et d'anti-vol.

Les années 70 et 80 témoignaient des premières adoptions et commercialisation de la technologie RFID. Suite aux avancements dans le domaine de la communication avec des ondes rétro-modulées et le développement du premier transpondeur passif en 1978, les premières applications simples telles que la gestion du bétail et des applications de péage sur les autoroutes ont été mises en service. A cet époque, plusieurs entreprises dont l'activité était concentrée autour de la RFID ont émergé, telles que Identronix, Alfa Laval

1. Informations condensées à partir de plusieurs références générales détaillant de la RFID : [1] [2] [3]

et Nedap. Au début des années 1990, Texas Instruments et Europe Mikron lançaient leurs systèmes TIRIS et MIFARE respectivement, qui sont toujours utilisés. D'autre part, IBM, concentrait ses travaux sur la technologie RFID UHF et plusieurs pilotes sont montés avec Walmart sans aucune commercialisation.

A la fin des années 1990 et suite aux avancements dans le domaine des systèmes informatiques, un ordinateur était capable d'accéder à internet et de battre le champion du monde d'échecs mais incapable de savoir combien de rouges à lèvres étaient présents sur une étagère. Visant à équiper les ordinateurs avec des capacités sensorielles pour résoudre ce problème, Kevin Ashton [4] plaçait une puce et une antenne dans un tube sur une étagère pour créer un système de stockage automatique. Sur base de cette idée, le terme "l'Internet des objets" est introduit. Suite à cette innovation, le laboratoire Auto-ID est fondé dans le but de rassembler plusieurs organisations afin de normaliser l'usage de la technologie RFID, notamment dans la chaîne d'approvisionnement et dans la gestion des biens. Plus tard, profitant de l'avancement dans le domaine de l'informatique, David Brock et Sanjay Sharma (co-fondateurs d'Auto-ID) introduisaient l'idée de stocker les données dans des bases de données au lieu de la puce RFID. Cette idée de simplifier les cas d'usage d'un tag a permis de concentrer les travaux sur l'identification. En 2003, Auto-ID a fusionné avec EPCglobal et le code de produit électronique (EPC) était proposé pour remplacer les codes barre. En 2005, l'EPCglobal devenait entièrement opérationnel et ses standards étaient adoptés par l'ISO en 2007.

Suite à la standardisation de la technologie et aux développements dans le domaine des circuits radio-fréquences et des matériaux—permettant une baisse considérable des prix des tags—, l'adoption de la RFID à grande échelle commençait au début des années 2000. En 2003, des entreprises comme Walmart et Tesco exigeaient que leurs fournisseurs soient compatibles EPC. En 2010, Decathlon devient une des premières entreprises française à adopter la RFID. Plus tard, grâce à l'adoption de la technologie par Macy's, Hudson Bay Company et Marco Polo, elle est devenue très populaire. De plus, dans les dernières années, cette technologie est indispensable et elle est considérée comme un outil nécessaire dans le commerce de gros [5].

1.2 L'identification radio-fréquence

L'identification radio-fréquence, est une technologie d'identification automatique qui permet à un objet de stocker des informations uniques, et de les communiquer à distance, grâce à des étiquettes/marqueurs RFID. Ces étiquettes sont plus souvent désignées par le terme anglais tag; ils peuvent être collés, attachés, ou intégrés aux objets et même implantés dans des animaux.

Comme toute autre méthode d'identification automatique, le but de cette technologie est d'assurer la récupération des données, sans intervention humaine directe, dans les systèmes informatiques, ainsi équipant ces systèmes d'organes sensoriels. Afin d'interagir avec les objets tagués (ou étiquetés), un interrogateur (capteur/lecteur) RFID est nécessaire. Son rôle est de communiquer avec le tag pour récupérer les informations portées par le tag et les acheminer vers le système informatique. De ce fait, chaque système RFID doit se composer d'un tag et d'un interrogateur.

Par rapport aux autres techniques d'identification automatique telles que les codes barre, la reconnaissance optique des caractères et la biométrie, la RFID présente plusieurs avantages. D'un point de vue sécuritaire, les données portées par le tag RFID ne sont pas lisibles par les êtres humains et il est possible de les protéger contre la suppression et

la modification. En ce qui concerne la récupération des données, les tags RFID sont généralement capables de stocker jusqu'à 64 kbits et de communiquer avec le lecteur avec un débit plus important sans être impacté par des obstacles optiques. Enfin, par rapport aux autres technologies citées, les coûts d'implémentation sont moyens et ceux d'exploitation sont très faibles [6].

1.2.1 Décomposition du système

Un système RFID comporte trois composants principaux : l'interrogateur (lecteur) RFID, le tag et la machine hôte. L'interrogateur sert d'interface entre la structure informatique et les tags. Pour exécuter les commandes émises par la structure informatique et de renvoyer les résultats, l'interrogateur doit être connecté à un réseau filaire ou sans fil. D'autre part, afin de communiquer avec les tags, l'interrogateur est équipé d'une antenne intégrée ou externe.

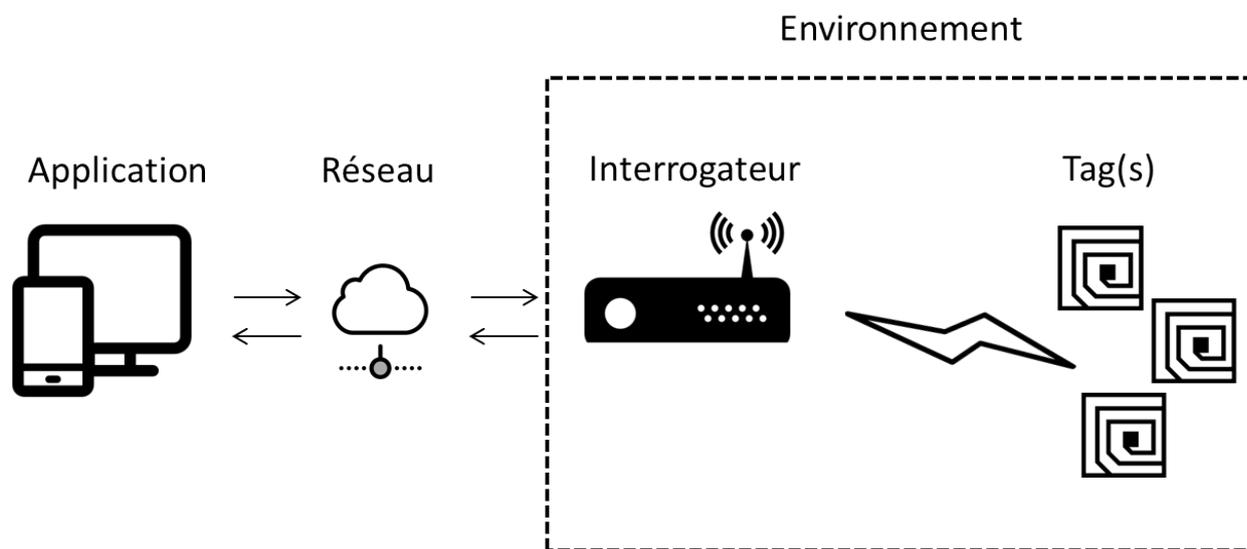


FIGURE 1.1 – Exemple d'un système RFID

Comme le montre la figure 1.1, la communication entre l'interrogateur et les tags est sans-fil et prend place dans un environnement spécifique. Cet environnement de "lecture", change en fonction de l'application et du milieu dans lequel le système est déployé. Selon le type de technologie RFID adopté, le milieu de lecture peut être simple (cartes de transports) ou complexe (lecture de tags multiples dans un magasin).

En plus du pilotage des lecteurs, les machines hôtes peuvent héberger plusieurs types d'applications pour le traitement et la visualisation des données et peuvent servir d'interfaces pour des applications métiers, comme les applications de gestion de ressources.

1.2.2 Technologies actives et passives

Plusieurs versions existent de la technologie RFID et généralement, il est possible de distinguer deux catégories : passive et active.

Les étiquettes RFID passives, n'ayant aucune source d'alimentation interne, récupèrent leur énergie à distance de l'interrogateur. Ils communiquent avec l'interrogateur en réfléchissant et en modulant les ondes qu'il a envoyées ; la réponse du tag est alors un signal

retromodulé qui porte les informations stockées dans la puce. Ceci se traduit par des plages de lecture relativement courtes.

Contrairement à ces principes, les tags actifs ont leur propre source d'alimentation (une batterie) et un circuit émetteur. Ces deux composants sont utilisés pour diffuser les informations à l'interrogateur. Ce type de tag peut toujours émettre même sans la présence d'un interrogateur ; cette fonction est appelée «*beaconing*» ou balisage. La distance de lecture de ces balises peut dépasser les 100 mètres et grâce à l'alimentation interne, une plus grande mémoire peut être supportée permettant ainsi le stockage de plus de données et davantage de fonctionnalités peuvent être implémentées. D'autre part, la technologie passive, malgré les limitations de la distance de lecture, de la mémoire et des fonctionnalités, a une durée de vie plus longue et est plus facile à fabriquer et à maintenir. Par conséquent, le coût d'un tag passif est considérablement plus bas que celui d'un tags actif.

Enfin, un troisième type de tag, hybride, existe. Les tags semi-passifs ont une source d'alimentation interne mais pas de circuit émetteur. La batterie est seulement utilisée pour l'activation de la puce. Comme c'est le cas pour les tags passifs, le signal du lecteur est rétro-modulé par les données stockées dans la mémoire. Ce type de tags a une portée de lecture plus importante que celle des tags passifs grâce à l'activation interne, qui en même temps, permet l'utilisation d'une mémoire plus large. D'autre part, les coûts devient plus élevés et la maintenance plus complexe à cause de la batterie.

1.2.3 Gamme de fréquences

Le spectre électromagnétique regroupe l'ensemble des ondes électromagnétiques en fonction de leur fréquence, longueur d'onde ou énergie. On le divise en plusieurs grandes catégories, qui présentent chacune leurs spécificités. Les ondes électromagnétiques qui constituent le spectre n'ont pas besoin de support matériel pour se propager : un champ électromagnétique nous entoure en permanence, de la même manière que l'air nous entoure [7]. Dans le cas des systèmes RFID, nous nous intéressons uniquement au spectre radio-fréquence et plus particulièrement aux bandes de fréquences situées entre 30 kHz et 30 GHz.

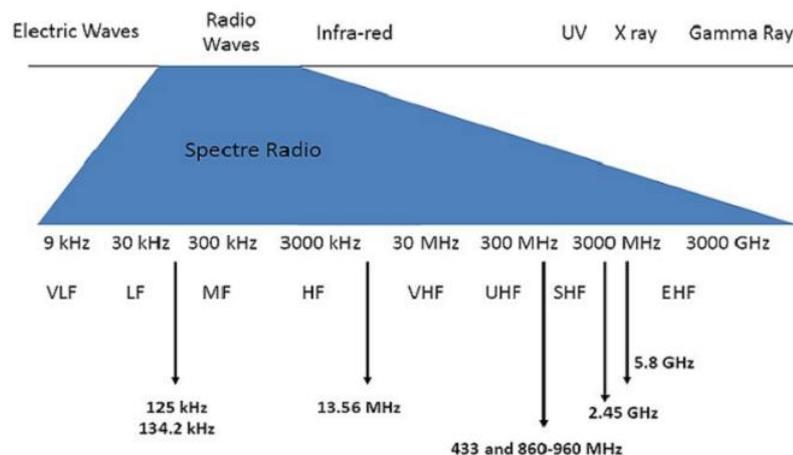


FIGURE 1.2 – La place de la RFID dans le spectre électromagnétique. (Source : CNRFID)

1.2.3.1 Bandes LF et HF

Comme le montre la figure 1.2, la communication dans les deux bandes LF («*Low Frequency*») et HF («*High Frequency*») prend place autour de 125 kHz et 13,56 MHz respectivement. À ces fréquences, l'alimentation de l'étiquette et la transmission des données se font par couplage magnétique grâce à la présence de l'étiquette dans le champs proche de l'antenne émettrice. En effet, ceci est dû aux basses fréquences utilisées (longueur d'onde de 22 mètres à 13,56 MHz). Comme illustré sur la figure 1.3, des lignes de champs perpendiculaires au plan de l'antenne sont émises vers le tag. Lorsque l'intensité du champ magnétique émis au niveau de ce dernier est suffisante, il est activé et un échange de données peut avoir lieu.

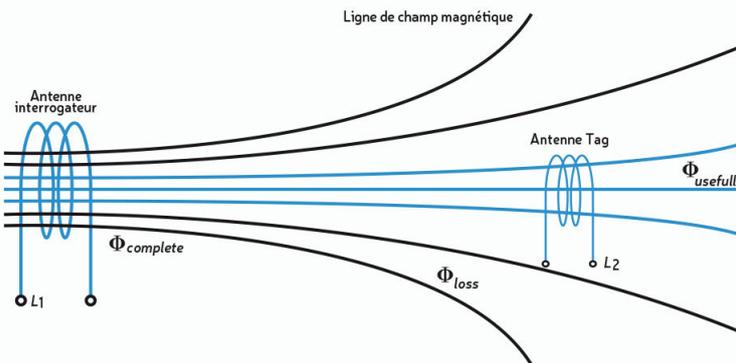


FIGURE 1.3 – Couplage magnétique entre les antennes du lecteur et du tag [8]

Par rapport aux autres modes de communication, le couplage magnétique est moins sensible aux perturbations de l'environnement (matériaux humides, présence du liquide, ..). Toutefois, la portée de lecture est très courte à cause de l'affaiblissement rapide du champs magnétique, inversement proportionnel au cube de la distance.

À 13,56 MHz la résistance du système aux perturbations externes est moins bonne que celle à 125 KHz. Néanmoins, sa portée maximale (1 m) est supérieure à la portée maximale à 125 KHz (50 cm environ). Dans ces bandes de fréquences, les systèmes proposés sont à base de tags passifs. Les systèmes à 13,56 MHz sont les plus répandus et sont parfois désignés par le sigle NFC (*Near-Field Communication*) lorsqu'il utilisent ce protocole d'échange particulier.

1.2.3.2 Bandes UHF et SHF

Dans les bandes supérieures, l'énergie et les données sont véhiculées par propagation d'ondes électromagnétiques. Ce type de communication est plus sensible aux facteurs de l'environnement de lectures telles que les interférences dans le milieu, la nature du matériau, et la présence de métal ou de liquide. Néanmoins, sa portée maximale est supérieure à celle des bandes inférieures puisque le champ électromagnétique est inversement proportionnel à la distance. De plus, dans ce type de systèmes, les taux de lecture sont plus élevés et il est possible de réaliser la lecture de plusieurs tags en même temps.

Dans la bande UHF, nous distinguons deux gammes d'utilisation différentes. La première autour de 433 MHz est dédiée aux systèmes RFID actifs. La deuxième, est un plage de fréquence qui s'étend entre 840 MHz et 960 MHz, il est principalement dédié aux applications passives. Les systèmes semi-passifs peuvent opérer sur les mêmes fréquences et

les mêmes interrogateurs peuvent être utilisés. Il est important de noter qu'en fonction de la région géographique, des canaux de fréquence spécifiques sont attribués pour la RFID.

D'autre part, la bande SHF présente tous les avantages de la bande UHF avec un taux de lecture plus élevés mais une liaison plus sensible au milieu de propagation. Deux fréquences (2,45 GHz et 5,8 GHz) sont exploitables par la RFID dans cette bande et sont généralement exploitées par les systèmes RFID actifs. La taille des antennes est plus petite, ce qui permet la miniaturisation de divers composants du système.

1.3 Domaines d'application

1.3.1 Chaîne d'approvisionnement et grande distribution

La RFID permet le suivi de stocks en temps réel dans l'entrepôt, en transit et en magasin. La réduction des délais de vérification, l'amélioration de la précision de l'inventaire et la traçabilité des produits à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement améliorent l'efficacité et réduit les coûts.

La précision de l'inventaire et la localisation sont particulièrement importantes dans les entrepôts. La possibilité de savoir avec précision le stock disponible et sa localisation permet une meilleure gestion du réapprovisionnement et fournit de meilleures données pour la prévision de la demande future.

Dans le magasin, les produits sont généralement agencés dans des rayons ou sur des étagères. L'utilisation de la RFID permet d'améliorer la visibilité de l'inventaire présent dans le magasin et de réduire le temps d'inventaire. De plus, le fait d'avoir un identifiant unique sur chaque article permet de lier des données supplémentaires telles que la date d'expiration par exemple.

Plusieurs types de technologies RFID peuvent intervenir dans ces applications. Les étiquettes actives sont utilisées dans la logistique pour le suivi des conteneurs terrestres et maritimes, des véhicules et d'autres biens qui ont une grande valeur. En raison des coûts élevés et des besoins en énergie, la technologie RFID active est principalement utilisée pour la traçabilité des palettes et des conteneurs. La technologie passive UHF intervient dans la logistique et dans le magasin, plutôt pour identifier les articles unitaires. Grâce aux faibles coûts, les tailles miniatures des tags flexibles, et leur longue durée de vie (pas de batterie), la technologie passive est privilégiée. De plus, il est possible d'utiliser la RFID passive HF (NFC) afin de permettre aux clients d'interagir avec les produits avec leurs smart-phones.

1.3.2 Santé

L'adoption de la technologie RFID dans le secteur de la santé permet à différentes applications d'améliorer la sécurité des patients, de gérer les instruments, et d'automatiser le réapprovisionnement et la facturation des médicaments par exemple.

Grâce à l'adoption de cette technologie [9], un suivi précis des patients est possible. Ceci peut améliorer la sécurité des patients dans de nombreux cas. Il a été reconnu que cette technologie pourrait être utile lors du suivi de patients errants présentant un risque de fugue, en particulier chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer et de démence. Dans le domaine de la surveillance des nouveau-nés, la RFID est utilisée pour faciliter la mise en correspondance des nouveau-nés avec leur mère et à des fins de prévention des enlèvements.

D'autre part la RFID permet de capturer une grande quantité de données issues de plusieurs sources (tags) sans être proche ou visible du lecteur. Cela facilite le suivi en temps réel des patients, des médicaments et de l'équipement. Grâce à ses différents avantages, il est possible d'automatiser le suivi des réceptions/transferts de produits et la gestion des stocks. De plus, la RFID peut augmenter l'efficacité par rapport à la technologie de code à barres standard en lisant plusieurs étiquettes à la fois. L'étude [9] confirme que utilisation de la RFID permettait un suivi rapide, efficace et précis des données des membres de la chaîne logistique Santé, une précision accrue des données, une réduction du temps consacré aux tâches administratives et des économies liées aux stocks.

1.3.3 Autres

La grande distribution et la santé sont les domaines les plus investis par technologie RFID. Cependant, les applications de la technologie n'y sont pas limitées. Les systèmes RFID passive dans la bande LF sont couramment utilisés pour le suivi des animaux (bétail et animaux domestiques) ainsi que dans les systèmes d'immobilisation de voiture. Les systèmes HF, plus répandus sur le marché, sont souvent utilisés pour les cartes de contrôle d'accès. D'autres applications incluent l'étiquetage des produits pharmaceutiques, de livres de bibliothèque ou de blanchisserie.

Les systèmes passifs longue portée (bande UHF) connus pour leur application dans la grande distribution, peuvent être utilisés pour le suivi du personnel, des patients et la gestion des événements ou des conférences. De plus, il est possible de les utiliser pour lutter contre la contrefaçon.

En ce qui concerne les systèmes actifs, leur utilisation reste principalement le suivi des palettes et des conteneurs, surtout dans le domaine militaire. De plus, ces système sont utilisés pour la gestion du trafic et le péage "main libre" ainsi que pour la localisation Temps Réel. De plus, la présence d'un source d'énergie interne, permet la conception des applications à base de capteurs.

1.4 Standardisation et réglementations des technologies RFID

Grâce aux effort de l'Auto-ID (GS1 EPCglobal depuis 2003), et leur adoption par les standards ISO, la technologie RFID est devenue un ensemble de protocoles de communication sans fil qui n'est plus restreint à l'identification. En effet, c'est grâce à sa standardisation que son usage dans le domaine de la grande distribution a éclaté. Sur la figure 1.4, nous reproduisons une version simplifiée du diagramme présenté en [10] afin de monter les différents standards correspondants aux différentes couches d'un système RFID.

Le standard ISO/IEC 15961 se concentre sur l'interface abstraite entre une application et l'interrogateur et inclut la spécification et la définition des commandes et des réponses de l'application. Il permet de spécifier les données et les commandes de manière normalisée [11].

Le standard ISO/IEC 15962 se concentre sur le codage de la syntaxe de transfert, conformément aux commandes de l'application définies dans l'ISO/IEC 15961 [12].

Les standards 18000, à la différence des standards précédents, décrivent la communication sans fil entre le lecteur et le tag et définit les paramètres de propagations à respecter.

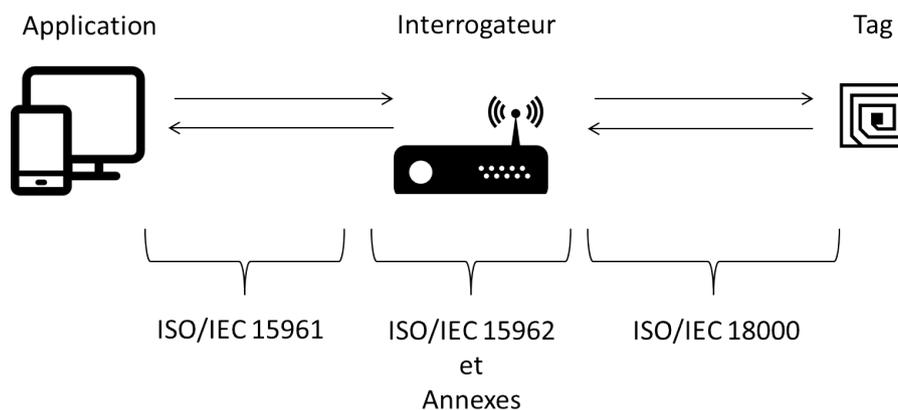


FIGURE 1.4 – Les différents standards dans un système RFID

Les standards principaux sont :

- ISO/IEC 18000-2 pour la RFID passive à 125 KHz.
- ISO/IEC 18000-3 pour la RFID passive à 13,56 MHz.
- ISO/IEC 18000-6C pour la RFID passive entre 860 et 960 MHz, EPCglobal Class 1 Gen 2.
- ISO/IEC 18000-4 pour la RFID passive et active à 2,45 GHz.
- ISO/IEC 18000-7 pour la RFID active à 433 MHz.

Cette technologie est réglementée par des organisations différentes selon la zone géographique. Aux Etats-Unis, ceci est géré par la FCC (Federal Communication Commission). En Europe, ceci est réalisé par la CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) à travers l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute).

1.5 La RFID UHF passive dans la grande distribution

A travers nos travaux, nous nous intéressons spécifiquement à l'usage de la technologie RFID dans la grande distribution. Parmi les différentes technologies, la RFID UHF passive, constitue le choix le plus convenable pour la chaîne logistique dans la grande distribution. Ceci est dû aux faibles coûts des tags passifs et à la facilité d'impression des étiquettes et leur attachement aux divers objets. Ajouté à cela, le fait que les tags sont sans batterie, le besoin de maintenance est éliminé.

De plus, la RFID, comparée à l'autre technologie classiquement utilisée dans la grande distribution (les codes barre) fournit des informations supplémentaires et peuvent être lues à plusieurs mètres sans le besoin d'être dans la ligne de vue directe d'un lecteur. De plus, les lecteurs RFID UHF peuvent collecter les informations détaillées en un seul passage, sans besoin de scanner chaque produit.

D'autre part, la RFID UHF passive est un compromis entre les technologies RFID dans les bande HF d'un part et dans la bande SHF. Comparé à la technologie NFC, les tags opérant dans la bande UHF, sont plus petits, moins chers et ont une portée de lecture moyenne qui peut aller jusqu'à 10 mètres. Comparé aux technologies RFID dans la bande SHF, les tags UHF sont moins sensibles aux différents matériaux et environnements de lecture.

Enfin, la standardisation de cette technologie a facilité le développement de plusieurs

applications autour de divers cas d’usage dans la chaîne logistique de la grande distribution. En effet, le développement la RFID passive UHF a principalement progressé grâce à son adoption dans la grande distribution avec 4600 millions objets étiquetés (jusqu’à 2016) [13]. Selon la même étude [13], le commerce de détail devrait rester en tête des domaines d’applications avec 15000 million articles (textile et chaussures) étiquetés. Ajouté à cela, 7000 millions d’article d’autre type étiquetés et déployés en 2021. Au moment de l’écriture de l’étude [13], le prix d’une étiquette RFID UHF passive était en moyenne de 5,8 cents de dollar américain.

1.5.1 Code de Produit Électronique

La RFID UHF la plus utilisée dans la chaîne logistique de la grande distribution est autrement connue comme «*EPCglobal Class 1 Gen 2*». Le terme «*Class 1*» désigne une catégorie de tags passifs UHF qui permet plusieurs lectures et une seule écriture. La codification de l’identifiant unique (EPC), stocké dans la puce du tag passif, est normalisée par EPCglobal GS1.

Le code de produit électronique (EPC ou «*Electronic Product Code*») est un identifiant universel pour tout objet physique. Il est utilisé dans les systèmes d’information pour suivre ou faire référence à des objets physiques. Un très grand nombre d’applications qui utilisent le code de produit électronique se base sur les étiquettes RFID de deuxième génération en tant que support de données. En plus de la normalisation et de la codification, ce standard définit un système de numérotation à base de 96 bits. Nous nous intéressons particulièrement à la numérotation SGTIN («*Serialized Global Trade Item Number*»), destinée à l’usage dans la grande distribution pour l’étiquetage des articles sérialisés de produits [14].

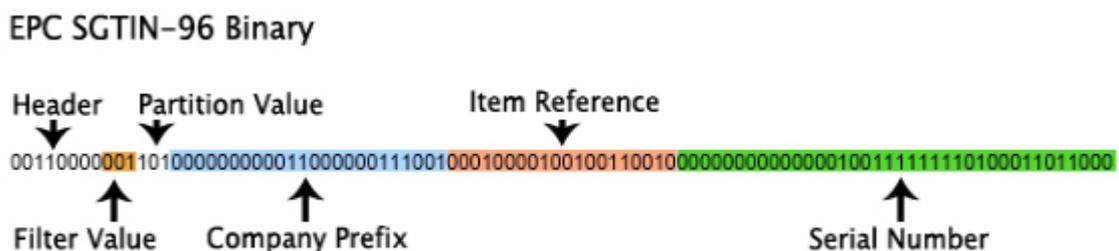


FIGURE 1.5 – Exemple d’un EPC binaire stocké dans la puce d’un tag (source : [15])

Sur la figure 1.5, un exemple de code EPC binaire est montré avec une numérotation SGTIN sur 96 bits. La valeur de la préambule («*Header*») dépend du système de numérotation utilisé ; pour la numérotation SGTIN-96 bits, sa valeur en hexadécimal est égale à 0x30. La valeur du filtre indique le niveau de conditionnement de l’objet (article unique pour les points de vente, une palette complète pour transport, ..). La partition définit le nombre de bits alloués au préfixe de l’entreprise et au reste. Le préfixe de l’entreprise («*Company Prefix*», accordé par GS1 est unique à chaque entreprise souhaitant identifier ses produits. Finalement la référence de l’article («*Item Reference*»), et le numéro de série («*Serial Number*») servent à identifier une série de produits et le numéro des articles dans la série.

1.5.2 Les bénéfices de la RFID

Selon Google [16], le succès d'un détaillant dépend de sa capacité à atteindre les clients où qu'ils soient. Cela signifie que de plus en plus, les détaillants doivent avoir une présence physique et numérique. En effet, les clients ne font plus la différence entre les achats, que ce soit dans un magasin ou sur un site de commerce électronique. Cela crée de nouvelles réalités pour les détaillants, dont la principale est le fait que le numérique ne fait pas que diriger le commerce électronique ; il amène les clients dans le magasin. Cette influence ne s'arrête pas à l'entrée du magasin. Les détaillants omni-canal, avec une présence physique et numérique doivent par conséquent garantir à leurs clients des expériences homogènes dans les différents canaux hors ligne et en ligne, tout en prenant en compte les différents appareils que les consommateurs utilisent pour interagir avec l'entreprise [17].

Une telle transition implique une évolution de l'infrastructure et l'organisation des détaillants. En [18], la technologie RFID est identifiée comme la technologie avec un grand potentiel pour améliorer les processus logistique et de grande distribution. Ceci est dû à sa capacité à fournir ou à libérer un nombre considérable de ressources humaines et à rendre plus efficace le déroulement des opérations, comme faciliter la possibilité de rendre l'information visible par tous tout au long de la chaîne de valeur.

La RFID passive bénéficie aux détaillants suivant trois axes principaux :

1. Informations sur l'inventaire en temps réel : grâce à l'étiquetage de chaque article, les informations sur les stocks et leur localisation dans les entrepôts ou dans les magasins permettant ainsi au détaillant d'éviter ou de réduire les ruptures et les freintes de stock. Selon une étude récente menée par GS1 et Auburn RFID Lab, plus tôt la technologie est adoptée dans la chaîne d'approvisionnement, plus précises sont les informations sur l'inventaire.
2. Diminution des coûts de main-d'œuvre : avant tout, la RFID est une technologie d'identification automatique ; ce qui, par définition, implique que certaines tâches d'identifications confiées auparavant à des ressources humaines peuvent être éliminées. En modifiant leurs processus métiers, les détaillants, peuvent même éliminer l'intervention humaine grâce à la RFID [19]. Des opérations comme la réception, le stockage et le comptage d'inventaire peuvent devenir entièrement automatique.
3. Prévention des vols et des pertes : grâce à la RFID, il est possible d'alerter le personnel lorsque des articles sont volés, ou mal placé dans le magasin.

En plus de ces trois bénéfices de base, suite à un déploiement complet de la technologie dans le magasin, il est possible de déduire et de suivre le comportement des clients [20]. Ceci peut permettre de mieux présenter les produits, mieux agencer les rayons et créer des expériences personnalisées. Pour implémenter ces solutions à base de la RFID et d'autres technologies [21], 89% détaillants ont des équipes internes, 25% ont leurs propres laboratoires d'innovation, 23% sollicitent les services des cabinets de conseil et 14% montent des partenariats avec des universités.

En 2016, une enquête menée par le cabinet de conseil Kurt Salmon sur la RFID dans la grande distribution [22] confirme les bénéfices cités ci-dessus de la RFID. Parmi 60 détaillants interviewés, 73% ont implémenté la technologie ou sont en phase de pilote ; en 2014, seulement 34% des participants à l'enquête l'ont adopté. La plupart des détaillants mesurent le retour sur investissement en terme de précision d'inventaire. En effet, après l'implémentation de la RFID, une amélioration de 25,4% de la précision est constaté. De plus, les ruptures de stock sont réduite de 40,6%, les freintes de stock ont diminué

de 33,7%, et la satisfaction des clients a augmenté de 11%. Plus important, la marge bénéficiaire moyenne des détaillants a augmenté de 60,7%.

Plus concrètement, parmi les divers projets d'implémentation dans la grande distribution, nous citons quelques succès [23]. Target a réussi à implémenter le processus de commande en ligne et récupération de la commande dans le magasin grâce à l'amélioration de la précision de l'inventaire. Tesco a réussi à réduire les coûts de 10%. Mark & Spencer, a déployé la RFID dans 550 magasins afin de devenir multicanal. Finalement, nous citons Decathlon qui a réussi à améliorer la disponibilité des stocks et d'augmenter les ventes de 2,5%.

1.5.3 Règlementation de la RFID UHF passive en France

Le déploiement et l'opération des systèmes RFID UHF passive dans la grande distribution sont contraints par des réglementations, différentes selon les pays. En France, les réglementations de l'ETSI sont adoptées et diffusées par l'ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes) [24]. Ces réglementations ont définissent principalement les niveaux de puissances permises, les fréquences de communications et leur utilisation.

Selon la dernière version des réglementations de l'ETSI (302 208), 15 canaux de fréquences sont allouées à la technologie UHF RFID avec une séparation de 200 KHz entre eux. Ces canaux sont situés entre 865 MHz et 868 MHz. Une puissance maximale de 2 W ERP est permise sur 10 canaux dans la bande entre 865,6 MHz et 877,6 MHz. D'autres réglementations concernant l'utilisation du spectre fréquentiel, les temps d'émission, les limites de sensibilité et les masques de modulations sont spécifiées.

Par ailleurs, le 11 octobre 2018 la Commission européenne a publié sa décision (UE) 2018/1538 concernant l'utilisation de la bande de fréquences hautes (entre 915 et 921 MHz) en Europe. La date limite de mise en œuvre étant fixée au 1er février 2019, la bande haute sera une réalité dans le futur proche.

1.5.4 Les environnements de déploiement de la RFID passive

1.5.4.1 L'usine

La RFID passive peut être trouvée tout au long de la chaîne logistique dans la grande distribution. Premièrement, dans l'usine la technologie RFID est utilisée pour optimiser l'efficacité de la production [25]. L'emplacement et le mouvement des composants, des produits semi-finis et finis peuvent être détectés par le système RFID pour contrôler la production. Il est même possible, en surveillant le mouvement des produits de surveiller la production des individus et des machines ; ceci aide à améliorer la productivité et la qualité du travail.

Avec la RFID, les équipes de production peuvent utiliser les informations en temps réel pour optimiser la production, mieux contrôler la production, et optimiser le contrôle de la qualité. De plus, grâce à l'identification automatique, il serait possible d'individualiser les produits dans les environnements de fabrication de masse. Les produits ou composants tagués peuvent indiquer aux machines (équipées d'un lecteur RFID) des informations uniques qui aideront à la personnalisation [26]. Par conséquent, ces optimisations permettent une visibilité complète du produit pendant son cycle de vie, de l'usine au magasin.

L'environnement de fabrication contient de la machinerie lourde et il est conçu en première place pour assurer une production soutenue. Dans ce type d'environnement, la lecture des tags passifs peut être limitée par la présence du métal et des machines. De plus, les solutions de lecture doivent être robustes pour durer dans cet environnement complexe. Les points de lecture dans une usine peuvent se trouver sur les lignes de productions, à la réception (entrée) et l'expédition (sortie) des produits et aux stations d'encodage de tags.

1.5.4.2 La logistique et le magasin

Dans la chaîne logistique classique, les opérations sont coûteuses et inefficaces. En absence d'un système automatique pour suivre en temps réel le stock, des doublons de commandes et des pertes de stock et d'équipements en résultent. En implémentant la RFID, la visibilité des stocks est augmentée, et les différents processus sont optimisés tout en perfectionnant l'utilisation des ressources [27].

Dans la grande distribution, la RFID peut être utilisée pour la réception et l'enregistrement en plaçant des points de lecture dans les centres de distribution et dans les magasins. Ceci permet de mettre à jour automatiquement les quantités en stock. Deuxièmement, il est possible d'automatiser l'entrée en stock et le réapprovisionnement. En effet, les produits sont automatiquement scannés. De même, pour le réapprovisionnement, les opérateurs sont directement dirigés vers les stocks qui sont automatiquement localisés. De plus, toute analyse supplémentaire du produit ou toute procédure de vérification seront automatisées. Troisièmement, en préparant les commandes, les opérateurs seront dirigés vers le bon endroit afin de récupérer les produits cibles. Suite au remplissage, le système RFID doit vérifier automatiquement la commande et mettre à jour l'inventaire. Finalement, l'expédition est optimisée grâce à la lecture automatique des palettes. De plus, les convoyeurs peuvent fonctionner à des vitesses plus élevées grâce à la RFID et à l'élimination de la technologie de code à barres. En général, la RFID peut éliminer le travail manuel intensif impliqué dans l'entrepôt. En résumé, dans les entrepôts, les points de lecture peuvent être placés sur les convoyeurs, aux points de réception, d'expédition, sur les transpalettes et aux endroits de stockage [18].

Dans le magasin, l'usage de la technologie est complémentaire à celui en entrepôt. Des points de lecture peuvent être placés à l'entrée et à la sortie du magasin pour des applications d'enregistrement, de réception, d'anti-vol ou même pour des applications d'encaissement automatique. Dans les magasins classiques, les caisses peuvent être optimisées en utilisant la RFID pour réduire le temps de passage d'un client. Dans le magasin, des lecteurs RFID sont utilisés pour contrôler l'inventaire et la localisation des produits sur les étagères. Ces points de lectures, peuvent être manuels ou fixes (automatiques).

L'état des lieux des applications de la RFID dans la grande distribution montre que les différents environnements de déploiement et les opérations peuvent largement bénéficier de cette technologie. Dans les parties suivantes, nous examinons le marché de la RFID et les différents composants du système disponible pour répondre aux besoins identifiés ci-avant.

1.6 Le marché de la RFID

Selon les spécimens de la dernière étude du marché RFID menée par IDtechEx [28], la taille du marché RFID est de 11,2 milliards de dollars. Comme le montre la figure 1.6, la

technologie passive domine le marché. En premier lieu les tags passifs dont la plus grande part de marché suivi par les services et enfin les solutions de lecture (interrogeurs).

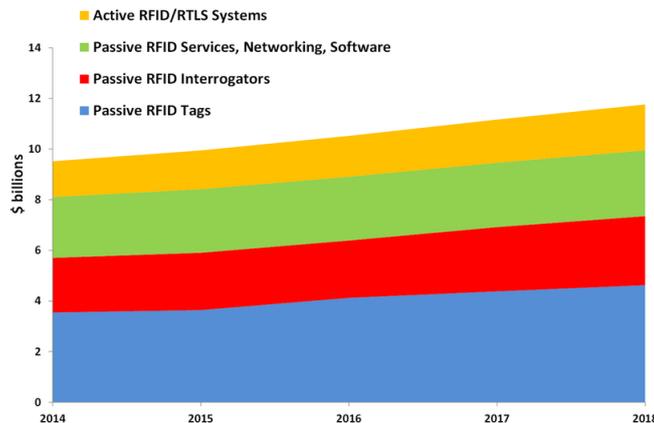


FIGURE 1.6 – Marché RFID total en milliards de dollars US (source : IDTechEx [28])

En reprenant le schéma d’un système RFID, nous plaçons les acteurs du marché selon les différents domaines d’intervention. Nous distinguons quatre types de fournisseurs : les fournisseurs de solutions logicielles, des solutions de lecture (interrogeurs), des tags et de services (intégrateur des systèmes RFID). Les acteurs du marché sont présentés par ordre de notoriété de leur marque. Ceci est mesurée auprès de plusieurs industries (fabrication, grande distribution, RFID, ..) en fonctions des réponses sur deux questions principales :

- Quels fournisseurs de solutions RFID sont les mieux connus auprès des acheteurs et influenceurs RFID ?
- Les acheteurs RFID connaissent-ils les sociétés RFID et leurs produits ?

Cette enquête a été menée par RFID journal en 2018 [29].

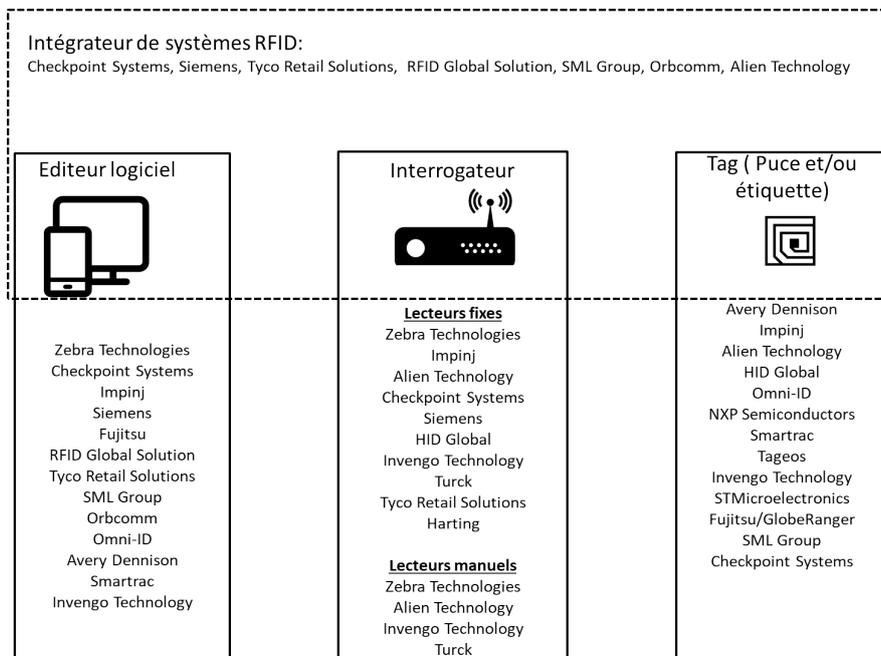


FIGURE 1.7 – Acteurs du marché

Pour les solutions de lecture, deux types de lecteurs sont distingués : fixes et manuels. Du côté tag, les acteurs sont reconnus pour la fabrication des puces ou des étiquettes

RFID (conception d'antenne et assemblage). La plupart de ces acteurs appartiennent dans les services de l'édition du logiciel. Une quatrième catégorie de fournisseurs regroupe les intégrateurs de systèmes RFID. Ces intégrateurs aident les entreprises à monter leur projets RFID et à déployer des solutions logicielles et matérielles. Il est clair qu'un acteur peut intervenir dans plusieurs domaines ; nous citons Zebra Technologies, Impinj, Alien Technology, Checkpoints systems et Avery Dennison.

La part importante du marché que tient les tags RFID passifs d'un part et l'organisation des acteurs du marché et leurs activités d'autre part montrent en premier lieu la cohérence de l'offre du marché à la demande dans la grande distribution. En deuxième lieu, ceux-ci confirment le rôle important que joue le secteur de la grande distribution dans le développement et la popularisation de la technologie UHF RFID passive. L'offre est détaillée davantage dans les deux parties suivantes, en présentant les différents types commercialisés des deux composants principaux d'un système RFID passif (le tag et le lecteur).

1.7 Tags UHF passifs du commerce

Les tags RFID UHF passifs sont les tags les plus utilisés dans la grande distribution. Lorsque plusieurs technologies existent, nous nous intéressons aux tags entièrement passifs composés d'une antenne, d'une puce et d'un support.

Les étapes de la création de l'étiquette RFID ainsi que les composants, les matières premières et les équipements sont illustrés sur la figure 1.8. Dans un premier temps, l'antenne du tag est conçue et réalisée en utilisant de l'encre conductrice, un support souple et des équipements d'impression adaptés. La puce est généralement fournie par des fabricants de circuits intégrés comme NXP semiconductors et Impinj. En utilisant la puce et l'antenne, l'inlay RFID est assemblé et il est prêt pour conversion. L'étape de conversion est nécessaire pour mettre en format l'inlay, le rendant ainsi exploitable. Après la conversion, l'étiquette est encodée et imprimée. Les étapes de conception d'antenne, assemblage d'inlay et conversion peuvent parfois être prise en charge par la même entreprise.

Plusieurs types de tags passifs existent sur le marché. Nous en montrons sur la figure 1.9 trois types différents. Le premier constitue un tag RFID sur support souple. Ce type de tag peut être le seul utilisé pour identifier les articles dans la grande distribution dans le secteur du textile. Ils sont généralement convertis en papier et collés sur différents produits ou en tissu et cousus aux produits textiles. Deuxièmement, les tags anti-métal passifs. Ce type de tag est plus volumineux, plus rigide et généralement destiné à usage dans des environnements industriels très contraignants. Finalement, nous prenons l'exemple d'un fil RFID UHF. Cette technologie fait partie de la RFID intégrée. Dans cet exemple, le fil RFID peut être cousu dans les vêtements et entièrement intégré au produit.

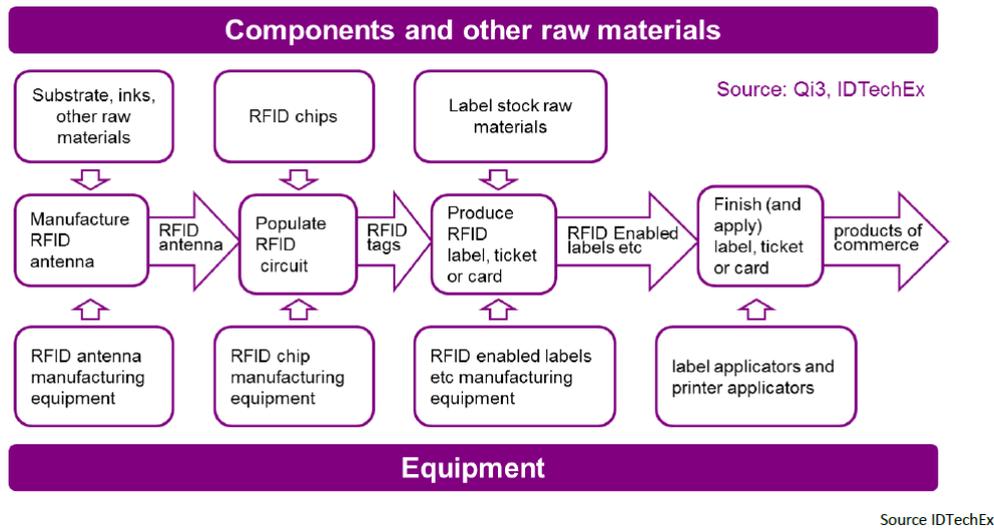


FIGURE 1.8 – Chaîne de valeur d’un tag (source : IDTechEx [28])



(a) Inlay souple (source : Avery Dennison) (b) Tag Anti-metal (source : rfidtags.com) (c) Fil RFID (source : fashionunited.uk)

FIGURE 1.9 – Trois types de tags passifs différents

1.8 Solutions de lecture passives

Les solutions de lecture RFID UHF passive disponibles sur le marché peuvent être divisées en trois catégories. Dans la première catégorie, nous plaçons les module RFID ; les modules sont composés d’un circuit intégré RFID pour lecteur (qui contient le protocole de communication) et d’une interface analogique. Un exemple de module RFID est l’Indy RS2000 fabriqué par Impinj. Un exemple d’un circuit RFID est l’Indy R2000, fourni par le même fabricant. La deuxième catégorie concerne les lecteurs RFID. Ces lecteurs peuvent être fixes ou manuels et sont conçus autour d’un module RFID. Ajouté aux modules, les lecteurs offrent des interfaces de communications additionnels et peuvent même avoir des antennes intégrées, comme par exemple, le lecteur manuel ATID AB700. Les lecteurs fixes peuvent être exploités pour créer des solutions plus adaptées à des cas d’usages spécifique. Finalement, des solutions plus sophistiquées sont présents sur le marché, telles que le xArray. Ce type de système, en plus d’être un lecteur RFID, contient un système antennaire adapté, qui offre une solution complète et prête à être déployer pour une ou plusieurs applications. En plus, ce type de systèmes est généralement accompagné d’une solution logicielle qui intègre plusieurs processus métiers et peut être facilement intégré au système informatique du détaillant.

Sur le marché, plusieurs systèmes de lecture existent qui répondent aux différents cas d’usage. Nous identifions par la suite trois usages principaux et des exemples de systèmes adaptés pour répondre à des besoins spécifiques.

— Inventaire et localisation : l’inventaire est généralement réalisé avec des solutions

de lecture manuelles telles que l'ATD AB700 ou le Nedap !D Hand. Ces lecteurs prennent la forme d'un pistolet ou d'une raquette et servent à détecter les articles tagués à une faible portée du lecteur. Ces solutions nécessitent une intervention humaine pour les opérer. D'autres solutions comme l'xArray (Impinj) et SmartLens (Zebra Technologies) offrent des lecteurs fixes montables au plafond à une distance importante des articles afin de couvrir une large zone de détection. Ces solutions promettent l'élimination de l'intervention humaine en automatisant l'inventaire. De plus, elles proposent des solutions de localisation des articles unitaires dans un environnement de grande distribution.

- Encaissement : nous citons pour cet usage le !D POS (Nedap), qui est un lecteur RFID intégré aux points de vente ou aux caisses. Cette solution, comme d'autres disponibles sur le marché est basée sur des lecteurs fixes et intégrés. Dans le futur, il est prévisible d'exploiter les solutions d'inventaire automatique afin de faciliter l'encaissement et le rendre complètement transparent.
- Détection des pertes et des vols : finalement la gamme de Checkpoint Systems est considérée pour illustrer les différentes formes que peut prendre une solution anti-vol RFID. Trois structures sont proposées : l'Overhead 2.0 est une solution montable au plafond pour faciliter la détection des pertes, des vols et d'autres opérations au point de sortie d'un magasin. L'Underfloor, est une autre solution d'anti-vol intégrée au sol du magasin. Comme l'Overhead 2.0, cette solution sert à optimiser les performances sans encombrer le sol du magasin et sans être visible au clients. Finalement, une solution G35 est proposée. Elle est composée de plusieurs antennes montées comme une portique à l'entrée ou à la sortie du magasin. Ce type de solution est le plus déployé et de nos jours, peut être trouvé à la sortie de la majorité des magasins de grande distribution.

1.9 La RFID chez Decathlon

Décathlon, est l'une des premières entreprises Françaises à adopter la RFID. Les premiers essais et pilotes RFID ont commencé dans les magasins Décathlon en 2010. En 2015, l'utilisation de la RFID est généralisée dans la chaîne d'approvisionnement pour suivre et améliorer la gestion des stocks et 85% des produits sont équipés par des étiquettes RFID UHF passifs. En 2018, la RFID est utilisée chez Décathlon de l'usine au magasin et 100% des produits doivent être tagués.

Le déploiement de la RFID est illustré sur la figure 1.10. En usine, l'étiquetage des produits est réalisé et grâce à des équipements de lecture manuels et fixes, l'expédition est contrôlée.

En entrepôt, les inventaires sont plus efficaces, plus fiables et plus rapides et l'optimisation des processus permet l'amélioration de la production des opérateurs. Grâce aux tunnels RFID et les lecteurs de palettes, le contrôle des produits est optimisé et les erreurs d'expéditions sont réduites.

En magasin, la disponibilité des produits sur les étagères est améliorée, les vols sont réduits, les inventaires sont plus rapides et les temps de passage en caisse sont réduits. De plus, grâce à la RFID, de nouveaux services sont proposés tels que l'expédition depuis le magasin, la commande en-ligne et la collecte de la commande au magasin.

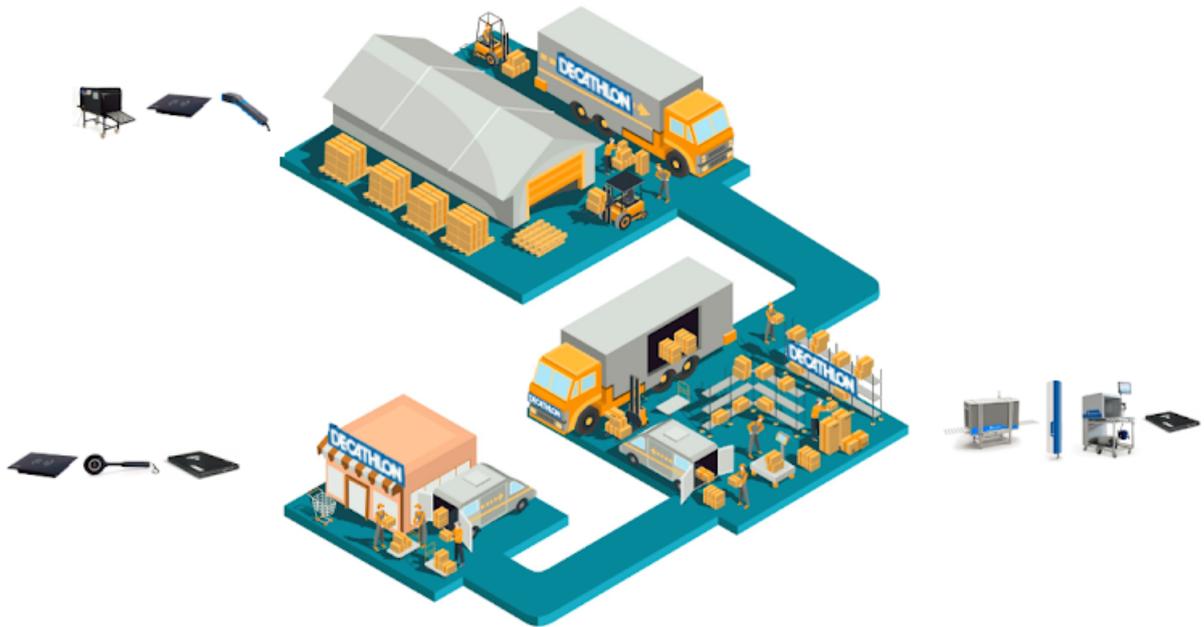


FIGURE 1.10 – La RFID chez Decathlon (source : Decathlon)

1.10 Conclusion et axes de recherche

La grande distribution est le domaine responsable du développement technologique de la RFID et de sa popularisation. De l'autre côté, la technologie RFID peut permettre aux détaillants de devenir omni-canal. Malgré ses divers avantages détaillés tout au long de ce chapitre, le déploiement de la RFID dans la chaîne logistique et la grande distribution est toujours confronté à de nombreux obstacles et défis à relever dans la prochaine décennie. En [30], différents facteurs environnementaux de l'adoption de la technologie RFID dans la chaîne d'approvisionnement et la grande distribution sont identifiés, telles que la disponibilité technologique, l'incertitude sociale, la pression concurrentielle, etc ..

Dans notre projet de recherche, nous nous concentrons sur la disponibilité technologique en définissant et analysant les différents défis et en proposant, éventuellement, les solutions appropriées pour répondre à l'un des cas d'usage primaires : la localisation des articles sur les étagères. Dans le cadre de cette étude nous nous intéressons à l'environnement magasin vu les différentes applications et le potentiel de cette technologie par automatiser le magasin, optimiser les différents cas d'usage et améliorer l'expérience client.

Actuellement, selon une étude menée par Zebra Technologies et SML (fabricant de tag passifs) [31], le rôle de la RFID dans l'amélioration des performances omnicanal grâce à la précision de l'inventaire est mis en valeur. La figure 1.11 montre les types de lecteurs RFID utilisés dans le magasin dans 10 pilotes RFID concernés par l'étude.

Les résultats montrent qu'aucun des pilotes n'a déployé des lecteurs montés au plafond («*overhead*») ou d'autres solutions d'inventaire automatique. Ce type de solution est particulièrement important pour le développement de la localisation dans le magasin puisqu'elles nécessitent l'installation des points de lecture fixes et automatiques. Pour cela, en fonction des observations, quatre axes de travail sont identifiés afin de développer une solution de localisation à base de technologie RFID.

Case-study Companies	Store Readers					
	Handheld	Transition		Integrated POS	Overhead	Exit
		Pad	Overhead			
1	✓	✓				
2	✓					
3	✓	✓		✓		
4	✓					
5	✓	✓	✓			
6	✓			✓		✓
7	✓	✓		✓		
8	✓	✓		✓		✓
9	✓		✓			
10	✓					
	10	5	2	4	0	2

FIGURE 1.11 – Le déploiement de la RFID dans le magasin

Dans un premier temps, le tag est étudié. Dans les systèmes passifs, les tags n'ont aucune source d'énergie et leurs caractéristiques définissent la portée maximale du système et sont un facteur déterminant de ses performances et de son efficacité. Les performances de ces tags peuvent être fortement impactées par plusieurs facteurs de l'environnement tels que le matériau du produit sa forme et les autres tags dans le milieu.

Les résultats de cette étude seront exploités dans un deuxième temps pour pousser l'étude des performances d'un tag dans un milieu réel tout en prenant en compte l'effet du système de lecture utilisé. Ceci est particulièrement important dans le cas d'un magasin Décathlon où les étagères sont métalliques et peuvent entièrement changer les performances d'un système.

Troisièmement, une fois le comportement des tags est évalué dans un milieu réel, un système de détection fixe et automatique est étudié. La réalisation d'un tel système a pour but d'améliorer la détection dans des conditions complexes où les articles tagués sont situés à des grandes distances tout en permettant de localiser les produits en temps réel sans aucune intervention humaine.

Finalement, en fonction des études précédentes, une solution de localisation automatique sera développée pour des applications dans un magasin et l'inventaire serait contrôlé d'une manière continue. En améliorant la détection et la localisation, les quatre cas d'usage fondamentaux (précision de l'inventaire, les freintes de stock, les vols et la localisation des produits) pour passer à l'omnicanal sont améliorés.

Chapitre 2

La technologie RFID UHF passive

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, les divers technologies RFID et leurs domaines d'applications sont présentés en se concentrant plus particulièrement sur la technologie UHF passive dans la grande distribution, les bénéfices qu'elle apporte et ses limites.

Après l'analyse du marché et du besoin dans la grande distribution nous avons identifiés plusieurs axes de recherche, dans le but d'améliorer deux types de processus dans le magasin : l'inventaire et la localisation. Nous visons réaliser ceci en optimisant la disponibilité technologique des solutions RFID passive. Pour cela, l'amélioration de la détection dans un milieu réel et dense, est considérée comme un défis clé à relever.

L'objectif de ce chapitre est en premier lieu de détailler le principe de fonctionnement d'un système RFID UHF passif et les architecture du tag et du lecteur. Puis, en deuxième lieu, un état de l'art est réalisé autour de l'amélioration de la détection en se concertant tout d'abord sur le tag puis, sur les solutions de lecture. A travers ce chapitre, des expériences sont mises en place afin de vérifier les performances d'une solution et sa pertinence vis-à-vis notre application.

2.2 L'activation des tags passifs

Le lecteur initie l'interrogation en envoyant une requête qui sert à la fois à activer le tag et l'interroger. Si le tag passif est à portée du lecteur, une tension est induite dans l'antenne du tag par l'intensité du champ électrique E_{tag} (V/m) qui se produit au niveau du tag. Une partie de cette tension est rectifiée aux bornes de l'antenne et elle est, seule, disponible pour la puce du tag comme tension d'alimentation. Cette tension doit être supérieure à une valeur minimale nécessaire pour le fonctionnement du circuit : la valeur seuil de la sensibilité de la puce. La sensibilité du tag, est donc, l'intensité du champ minimal à la position du tag et nécessaire pour l'activer. Selon Nikitin et Rao [32], la sensibilité de l'intensité du champ et celle de la puissance sont directement liées par l'équation 2.1.

$$E_{tag} = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{30P_{tag}} \quad (2.1)$$

P_{tag} (Watt) est alors la puissance minimale nécessaire à la position du tag pour assurer que la puce absorbe une puissance suffisante pour son activation. La distance maximale de lecture, est inversement proportionnelle à P_{tag} [32]. Cette relation, est exprimée par

l'équation de Friis 2.2, en champ lointain et en espace libre supposant que l'antenne du tag est parfaitement alignée avec l'antenne du lecteur et parfaitement adaptée à la puce.

$$d_{tag} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{lecteur} G_{lecteur} G_{tag}}{P_{tag}}} \quad (2.2)$$

Dans un environnement réel, plusieurs facteurs affectent cette distance de lecture. Nous citons la désadaptation puce-antenne, les pertes de polarisation et les interférences destructives parmi d'autres facteurs discutés dans les chapitres 3 et 4. De plus, il est manifeste que le tag n'est pas le seul à déterminer la portée du système dans la liaison descendante mais le lecteur joue un rôle substantiel.

Tout bien considéré, cette liaison est responsable de fournir suffisamment d'énergie pour l'activation du tag puis de son interrogation. Par la suite, nous examinons les architectures du lecteur et du tag. En premier lieu, nous nous intéressons aux blocs responsables de la génération de l'onde du côté lecteur et ceux de la réception du côté tag.

2.2.1 Architecture du lecteur

Le rôle d'un lecteur RFID passive dans un système ne se résume pas à l'interrogation. En effet, ce dispositif est responsable de télé-alimenter le tag et d'orchestrer la communication. Dans ce paragraphe, nous nous intéressons surtout à la télé-alimentation. Généralement, ce dispositif transmet en deux modes : émission et réception. En émission, des données modulées sont transmises vers le tag. En réception, une onde continue (CW) est transmise. La figure 2.1 montre l'architecture du système sur puce R2000 d'Impinj.

Le bloc logique (« *digital core* ») reçoit une commande d'un terminal externe et puis génère les signaux dans la bande de base. Ceux-ci seront ensuite modulés par le modulateur I-Q en les multipliant par le signal venant de l'oscillateur local. Selon les régulations [cf. 34, p.13], dans la bande européenne par exemple, la communication n'est possible que sur quatre canaux de fréquences séparés de 600 kHz dans la bande de fréquence entre 865,7 MHz et 866,9 MHz et dans la limite de 2W PAR. Les signaux à multiples fréquences sont générés à partir d'une boucle à verrouillage de phase (PLL) avec un oscillateur à cristal compensé en température (TCXO). La séparation minimale entre les canaux, ainsi que la fréquence du signal sont définies par les diviseurs. Après la modulation, une partie du signal transposé sera envoyée vers l'amplificateur de puissance et une autre vers le démodulateur. Cette partie est nécessaire pour réaliser une détection cohérente lors de la réception de la réponse du tag.

La partie du signal envoyée vers l'amplificateur de puissance est celle qui sera transmise au tag via une antenne de transmission. Cette antenne peut être utilisée pour la transmission et la réception dans le cas d'une architecture mono-statique à l'aide d'un circulateur ou un coupleur directionnel. Une autre antenne sera ajoutée pour la réception au cas d'une architecture bi-statique ; cette architecture nécessite plus d'espace.

Le type d'antennes utilisé dépend largement de la problématique liée à une application et à l'approche pour apporter la solution. Les éléments clés pour définir le cahier de charge sont le prix, le facteur de forme, la directivité et la bande passante. Ceci dit, les antennes planaires ou « *patch* » restent les plus utilisées pour la majorité des applications.

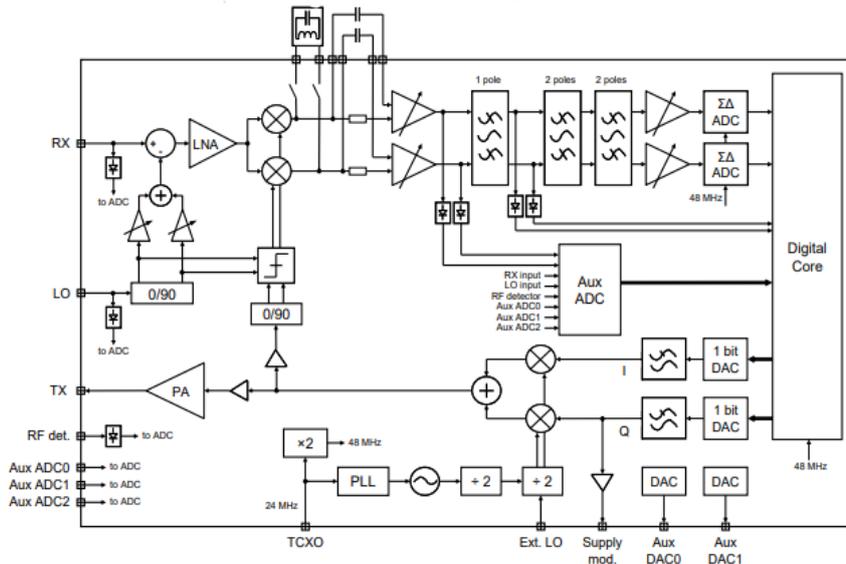


FIGURE 2.1 – Architecture de la puce Indy R2000 [33]

2.2.2 Architecture du tag

Le tag RFID, ne possédant pas une source d'énergie interne, dépend du lecteur pour son fonctionnement. Un tag est composé d'une antenne, d'une puce et d'un support. L'antenne sert à récupérer la puissance présente à son niveau. Quant au circuit, il s'agit essentiellement d'une mémoire non-volatile, un bloc de contrôle logique et un bloc analogique. La figure 2.2 illustre l'architecture simple d'une puce RFID passive. Alors que cette description peut représenter divers types de tag passifs, seuls les tag UHF passifs conformes au standard GS1 classe 1, génération 2 sont concernés par cette étude.

De manière générale, les tags passifs récupèrent de l'énergie en rectifiant la puissance absorbée par l'antenne. Cette énergie est ensuite stockée pour assurer une tension continue. Si cette tension est suffisamment haute, le bloc logique de la puce sera réveillé. Le bloc logique [35] a pour but de gérer : l'ordre de l'arrivée du signal, le décodage des trames reçues, la vérification des erreurs de transmission (Contrôle de redondance cyclique), la gestion du protocole, l'interfaçage avec la mémoire et enfin l'encodage et le renvoi des trames vers le bloc analogique.

La mémoire est organisée en quatre zones utiles [cf. 36, p.44-51] : une zone "Réservée" pour stocker les mots de passe d'accès, une zone "EPC" qui contient l'EPC unique, une zone "TID" qui contient des informations d'identification uniques et propres au tag utilisé et une zone "Utilisateur", optionnelle.

L'opération de la récupération et le redressement de l'énergie est assurée par le bloc analogique. Ce dernier comporte un rectifieur, un oscillateur et un modulateur/démodulateur.

Le rectifieur est un multiplicateur qui reçoit la puissance RF absorbée par l'antenne et doit fournir une tension continue pour activer le circuit. Le régulateur, à son tour, protège le circuit de la surtension au cas où le tag est très proche du lecteur. Cet ensemble doit avoir une efficacité maximale de conversion tout en limitant la tension de sortie et en contrôlant les impédances d'entrée et de sortie, pour un transfert d'énergie optimale avec l'antenne.

Le POR (Power-On-Reset) est un circuit dont l'objectif est de déterminer si la tension de sortie du bloc précédent est suffisante pour activer le circuit ; dans le cas contraire

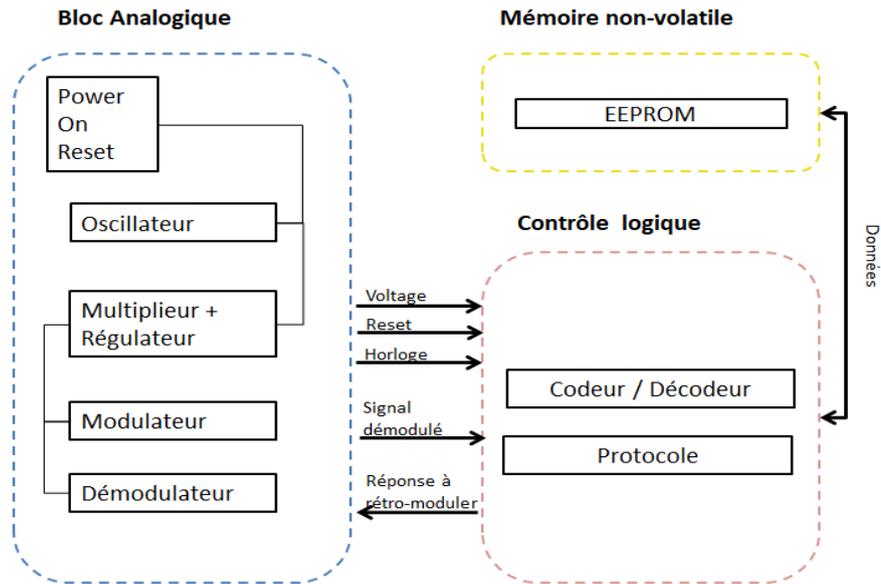


FIGURE 2.2 – Architecture simplifiée de la puce du tag RFID passif

ce dernier se désactive. Or, si la tension est suffisante, le circuit logique est activé et l'oscillateur local se met à osciller. Ce dernier est indispensable pour le fonctionnement du bloc logique puisqu'il sert d'horloge interne.

Le circuit modulateur est responsable de la rétro-modulation, il réfléchit le signal reçu par le lecteur. Dans le cas où une modulation ASK est choisie, le modulateur fonctionne comme un interrupteur entre une absorption ou réflexion totale ou partielle du signal.

Le démodulateur sert à convertir le signal modulé en un signal numérique. Par exemple, la figure 2.3 illustre un schéma d'un démodulateur. La première étape de démodulation est de supprimer la porteuse par le biais du détecteur d'enveloppe [37]. La bascule détecte les fronts montants et descendants de l'enveloppe et élimine le bruit. Après intégration, la sortie est envoyée vers un comparateur qui a pour but de discriminer si l'état du bit transmis est haut ou bas et sera ensuite envoyée vers le bloc logique de la puce.

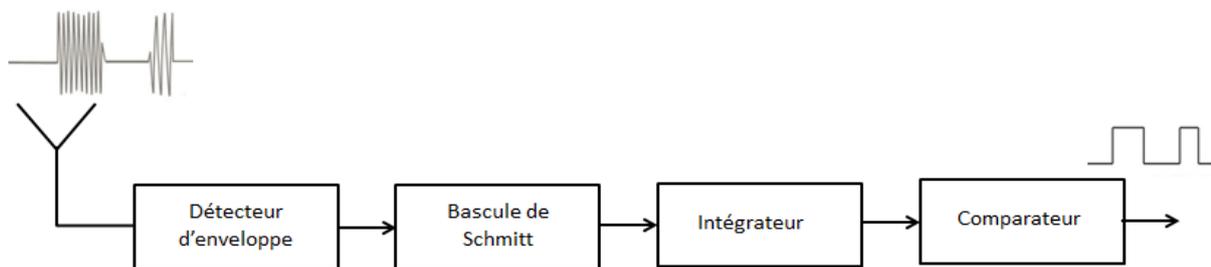


FIGURE 2.3 – Un schéma type d'un démodulateur

2.3 La communication passive

A la réception d'une puissance à la position du tag supérieure à un certain seuil, le circuit du tag sera activé et le tag devient capable de communiquer avec le lecteur. La communication dans la liaison descendante se fait par le biais de la rétro-modulation. Ce

faible signal subit les mêmes pertes de propagation que le signal envoyé par le lecteur, ajoutées aux pertes de modulation. La modulation se fait soit, en variant l'impédance de la puce du tag entre deux états (adaptation totale ou désadaptation) dans le cas d'une modulation d'amplitude; soit, en adaptant la partie réelle de l'impédance de la puce à celle de l'antenne tout en variant la partie imaginaire entre deux valeurs dans le cas d'une modulation de phase.

Pour déterminer la puissance du signal rétro-modulé, la surface équivalente radar différentielle ($\Delta\sigma$) est étudiée [32]. Selon Nikitin et Rao, cette caractéristique propre au tag dépend du gain de l'antenne (G_{tag}), l'adaptation d'impédance puce-antenne et les états de modulation 2.3.

$$\Delta\sigma = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{tag}^2 K \quad (2.3)$$

K représente les pertes de modulation et dépend des coefficients de réflexion entre la puce du tag et son antenne pour les différents états de modulation. De ce fait, un tag ayant une antenne de gain (G_{tag}) qui reçoit une puissance P_{tag} peut-être considéré comme une source radio fréquence émettant un signal avec une PIRE différentielle $\Delta PIRE$. Cette puissance est calculée à partir du $\Delta\sigma$ et de la densité de puissance en air libre d'une onde incidente (S) [32].

$$\Delta PIRE = S \Delta\sigma = P_{tag} G_{tag}^2 K \quad (2.4)$$

En considérant les pertes de chemin en air libre (L_{chemin}) subit par le signal dont la puissance est définie en équation 2.4, un lecteur ayant une antenne d'un gain $G_{lecteur}$ reçoit un signal atténué $P_{lecteur}$ définie en 2.5 [32].

$$P_{lecteur} = \Delta PIRE G_{lecteur} L_{chemin} \quad (2.5)$$

Si la sensibilité du lecteur est supérieur à $P_{lecteur}$, le signal rétro-modulé serait donc détecté.

2.3.1 Communication Lecteur-Tag

Dans ce qui précède, l'activation du tag a été discutée et les composants participants à cette opération ont été signalés. Tant que le tag reste activé, une communication avec le lecteur est possible. Le but de cette communication initiée par le lecteur est d'obtenir l'identifiant ou l'«EPC» du tag. Dans cette section, les caractéristiques du signal envoyé du lecteur vers le tag sont détaillées. Il convient de noter que nous nous référons au protocole de communication EPC Gen2 [36] pour la technologie UHF RFID.

La figure 2.4 montre un exemple d'inventaire d'un tag par un lecteur. Il importe de constater que la procédure d'interrogation est séquentielle et que c'est le lecteur qui initie l'interrogation en envoyant une requête. Sur ce, le signal temporel envoyé par le lecteur devrait-être composé de deux parties : la première comporte la requête et la deuxième un signal énergisant pour assurer l'activation du tag.

Selon le protocole Gen2, les données envoyées par le lecteur doivent être tout d'abord modulées avec un encodage PIE («Pulse interval encoding»). Un encodage de type PIE est privilégié puisqu'il fournit plus d'énergie pour le tag. Il est basé sur des impulsions de largeur constante et des intervalles variables. Deux symboles existent, le Data-0 représente une transmission du signal énergisant indiquant un 0 binaire durant une période dénoté TARI («Type A Reference Interval»). Le Data-1 représente un signal énergisant atténué qui dure entre 1.5 et 2 TARI.

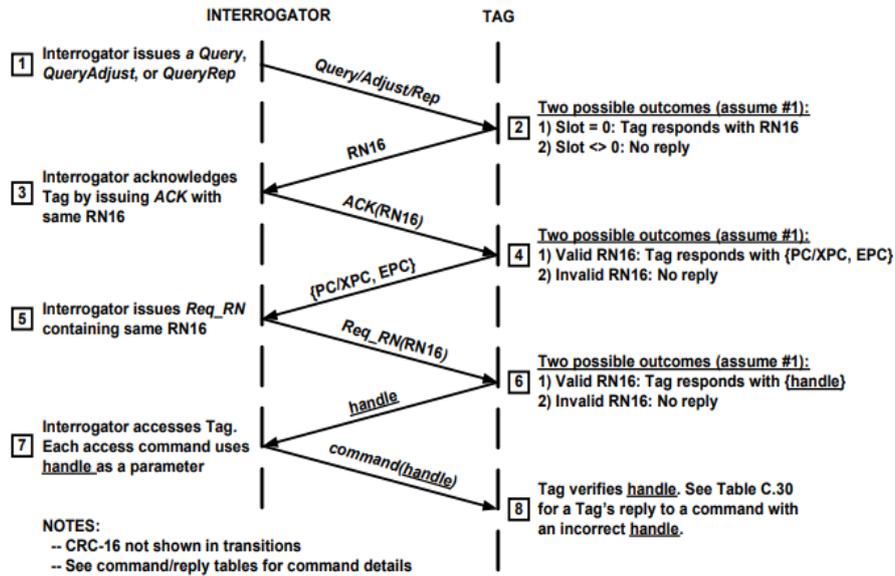


FIGURE 2.4 – Exemple d'inventaire d'un tag [36]

Quant à la modulation, il est possible que le signal soit modulé en DSB-ASK, SSB-ASK, ou PR-ASK. Il est important de noter que le lecteur doit s'arrêter pour un minimum d'une milliseconde avant de se réveiller pour effectuer une modulation différente du signal.

L'interrogateur gère les tags avec trois opérations de base : la sélection, l'inventaire et l'accès. La sélection est utilisée pour adresser un tag ou une population bien identifiée, l'inventaire sert à identifier les tags présents dans le champ du lecteur et l'accès comprend des tâches comme la lecture dans une zone de mémoire, le verrouillage ou l'écriture. Cette partie de la thèse s'intéresse exclusivement à l'opération d'inventaire.

Chaque opération d'inventaire est initiée par une préambule et doit inclure des informations telles que : la fréquence de la liaison descendante, le TARI, le type d'encodage, la session, etc ... Ces termes seront définis par la suite tout en expliquant leur contribution à la définition de la réponse du tag.

2.3.2 Communication Tag-Lecteur

Le tag peut répondre à l'interrogateur en deux modes : immédiat et différé ; cela est précisé par une commande inventaire. Le protocole GS1, précise les durées à respecter pour les deux modes. Ces durées sont cruciales à respecter puisqu'ils assurent que le lecteur émet un signal énergisant lorsque le tag est censé répondre ; autrement, aucune réponse ne peut se produire. Ce signal est, selon le protocole GS1, une onde entretenue («*Continuous wave*») sinusoïdale d'une amplitude et fréquence constantes.

A la réception de la requête du lecteur, le tag calcule la fréquence de la liaison montante («*Backscatter-link Frequency*» ou «*BLF*»). La valeur de cette fréquence dépend de la calibration de la communication tag vers lecteur ; cette calibration doit être supérieure à 2.75 et inférieure à 9 TARI. En fonction de la valeur du BLF et du TARI, le choix de l'encodage est fait. Le tag doit supporter un encodage FM0 ou des encodages Miller (2, 4 et 8) de la porteuse. Une modulation ASK (modulation d'amplitude) ou PSK (modulation de phase) du signal est possible au choix du fabricant de la puce du tag.

Comme indiqué dans le protocole GS1 Gen2 [36], lorsque plusieurs tags sont présents dans le champ du lecteur, d'autres paramètres seront essentiels à considérer. Le paramètre

«Q», sert comme compteur de créneaux : le lecteur fournit au tag un nombre pseudo-aléatoire entre 0 et 2^Q-1 . Pour chaque tag ce nombre est décrémenté d'un à chaque lecture par une commande d'ajustement et le tag ne répond au lecteur avec son nombre aléatoire (RN16) sauf si le compteur est à zéro. Ce paramètre contribue à la gestion des collisions dans la communication tag-lecteur et la valeur de Q peut-être renseignée d'une manière statique ou ajustée dynamiquement par des algorithmes d'anti-collisions. Cette procédure d'inventaire d'une population de tags par un lecteur est appelée une session. Pour un cycle d'inventaire seulement une session peut-être choisie. Quatre sessions sont disponibles (S0, S1, S2 et S3) et chaque tag doit garder un drapeau (A ou B) indiquant s'il a été inventorié ou pas. Ce drapeau est propre à une session et a une durée de persistance—pendant laquelle le tag reste dans ce statut— dépendante de la session [cf. 36, Tableau 6.20].

2.4 État de l'art : Les tags passifs

Dans l'objectif d'explorer les efforts et les solutions proposées autour des tags UHF RFID passifs, une analyse de la littérature est menée autour de trois axes principaux. Le premier concerne les procédés de fabrication des antennes. Le deuxième, concerne la conception des antennes des tags et plus particulièrement, les pistes abordées lors de l'amélioration de leurs performances. Troisièmement, les études concernant la caractérisation des tags et l'évaluation de leurs performances sont identifiés et discutées. Lors de l'attachement des tags au différents produits, leurs performances peuvent changer. Une méthode d'évaluation correcte peut éviter des pertes de performances en fournissant des éléments critiques au choix du tag pour les différents produits. Généralement, dans cette revue, nous concentrons sur les antennes des tags RFID UHF passifs.

2.4.1 Procédés de fabrication des antennes

Dans l'industrie de l'électronique imprimable, la gravure chimique est le procédé traditionnellement adopté pour fabriquer les circuits. Toutefois, ce procédé contient de nombreuses phases et emploie différents produits chimiques qui ne sont pas écologiques et qui augmentent les coûts. De plus, le métal indésirable enlevé de la surface non protégée constitue des déchets qu'il faut éliminer. D'autre part, le substrat doit également tolérer le traitement chimique, ce qui limite le choix. Dans le cas des tags RFID passifs, la fabrication à grande échelle nécessite des coûts compétitifs et des procédés rapides. Pour ces raisons, la fabrication additive, plus particulièrement, l'impression avec de l'encre conductrice gagne en popularité [38] [39] [40].

Nombreuses sont les techniques d'impressions. Nous citons l'impression par jet d'encre, la flexographie, la sérigraphie, et l'héliogravure, les procédés les plus populaire de nos jours. La sérigraphie et l'impression par jet d'encre donne la possibilité d'imprimer sur tous les supports. L'impression par jet d'encre a en plus l'avantage d'imprimer sur des surfaces irrégulières. Par contre la sérigraphie nécessite la fabrication d'un masque, ajoutant ainsi une étape à la procédure de fabrication. Néanmoins entre les deux méthodes, la sérigraphie reste la méthode la plus rapide avec les coûts les plus bas. De plus, parmi les différents techniques d'impression, elle garantit de meilleures performances. Les deux autres procédés (héliogravure et flexographie) garantissent mieux la reproductibilité des antennes mais sont limités par le substrat utilisé. La flexographie reproduit une qualité d'impression inférieure à celle de l'héliogravure à des coûts plus réduits [39] [40] [41]. Malgré les performances réduite de l'héliogravure, un article publié par IDtechEx datant de

2006 signale que Avery Dennison—leader mondiale de la fabrication des tags RFID UHF— a adopté l'héliogravure dans l'objectif de remplacer la flexographie [42]. Un autre acteur mondial, SML, indique sur son site internet que l'impression avec des encres conductrices est utilisée pour les antennes UHF, en contraste avec la gravure chimique utilisée pour les structure d'antennes plus complexes (les antennes pour les cartes de transport par exemple) [43]. Lorsqu'une information sur la technique exacte utilisée chez SML et d'autre grande entreprise n'est pas disponible, il est possible de déduire—en fonction de l'offre des encres conductrices sur le marché— que la sérigraphie est la procédé le plus populaire. En effet, la plupart des encres proposées sur le marché, comme «*Thermoset #1*» par Dow Corning, 5028 par Dupont et «*Paramod Screen Inc*» par Paralec sont destinées à des impressions par sérigraphie.

En ce qui concerne l'effet de l'impression sur les performances, les contraintes principales sont l'épaisseur de la couche d'encre, sa conductivité et la résolution maximale visée. Lorsqu'il est possible d'augmenter la conductivité de l'encre en diminuant la taille des particules et en ajoutant du contenu solide de l'encre, cela augmente les coûts de fabrication [38] [39]. Les compromis entre les coûts et les performances, le support de l'antenne (substrat) et sa forme sont alors importants à considérer afin de choisir la meilleure méthode. Enfin, un contrôle de la qualité de l'impression est nécessaire. En [44], la largeur de la ligne conductrice est surveillée puisqu'elle peut affecter l'impédance, le gain et la fréquence de l'antenne. Dans le cas de la sérigraphie et le jet d'encre, la robustesse et le flou, sont encore à considérer puisqu'il réduisent les propriétés électriques de l'antenne. Nous tenons à préciser que de nos jours, et malgré l'avancée dans le domaine de l'impression, cette technique n'est toujours pas utilisée et les antennes des tags existants sur le marché sont fabriquées par gravure chimique («*Etching*»).

2.4.2 Conception des antennes

La conception des antennes est une étape déterminante des performances globales du tag. Plusieurs paramètres tels que le gain, l'impédance d'entrée et la bande passante sont nécessaire à maîtriser afin d'atteindre des performances optimales dans la bande de fréquence UHF allant de 840 MHz jusqu'à 960 MHz. En même temps, les faibles coûts, la flexibilité mécanique et la taille réduite du tag posent des contraintes additionnelles. Pour cela, le concepteur du tag doit faire des compromis, motivés dans la plupart des cas par des applications spécifiques visées. Dans l'objectif de concevoir un tag plus stable vis-à-vis son environnement, les auteurs en [45] proposent d'améliorer sa bande passante. En effet, en se basant sur le fait que le changement de la permittivité diélectrique (matériau du produit) cause un décalage fréquentiel, l'amélioration de la bande passante du tag est proposée en modifiant les dimensions de l'antenne. Ainsi, en élargissant la bande passante, l'effet du décalage fréquentiel est réduit. De même en [46], la bande passante est élargie ou rétrécie en fonction des dimensions du circuit d'adaptation. En [47], ceci est atteint en chargeant les extrémités du dipôle du tag avec des disques circulaire. Ces charges facilitent l'adaptation du dipôle à la puce et améliorent la bande passante. Les études citées ci-dessus prouvent qu'il est possible d'améliorer les performances du tag en modifiant seulement les dimensions des antennes. Ces techniques permettent d'obtenir un tag plus robuste, déployable dans plusieurs régions du Monde (différentes bandes de fréquence), tout en conservant les faibles coûts de fabrication. Néanmoins, la conception des antennes large bande implique la réduction de la distance maximale de lecture du tag sur une fréquence précise afin de l'améliorer sur la totalité de la bande. En contraste avec ces efforts, la

réduction de la taille du tag est importante puisqu'il est doit être attaché à une diversité de produits dont les tailles ne sont pas maîtrisables. En [48], un tag de dimensions 17,9 mm x 47,3 mm est proposé, son gain à 866 MHz est de 1,7 dBi et la distance maximale de lecture à la même fréquence est de 12,66 m. Toutefois, la bande passante à -3 dB est égale à 8 MHz. En [49], une antenne de dimensions égales à 12 mm x 55 mm est proposée comme une antenne miniature. La bande passante simulée est de 241 MHz pour un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB. Lorsque la puce utilisée est un UCODE ([50] ou [51] ou [52]), l'antenne proposée est fortement capacitive avec une impédance d'entrée de $43 + j800$ dans la bande UHF. Lorsque ces tailles commencent à devenir des standards pour les tags du marché, des études proposent l'utilisation des méta-matériaux afin de réduire la taille de l'antenne puisque l'utilisation de tels éléments permet de diminuer la fréquence de résonance de la structure [53]. De plus, en [54] l'utilisation des cellules méta-matériaux au-dessous du tag résulte en un gain de 7,66 dB permettant d'atteindre une distance de lecture maximale de 32 mètres au détriment de la bande passante.

Autrement, la tendance de proposer des tags fonctionnant à la fois sur des matériaux diélectriques et sur du métal est constatée. Lorsqu'il existe des tag conçus spécifiquement pour le métal sur le marché, ceux-ci sont rarement efficaces sur des matériaux diélectriques puisqu'ils se servent du produit métallique comme d'un plan de masse. Lorsqu'en [55] et [56] ceci est réalisé en introduisant une séparation entre la surface du matériau (produit) et l'antenne du tag, augmentant ainsi le volume du tag, des solutions plus pertinentes sont proposées en [57] et [58] où des éléments parasites sont introduits dans la structure de l'antenne. En [57] l'élément parasite est couplé au métal du produit lorsqu'il est placé sur une surface métallique. Autrement, lorsqu'il est en espace libre, l'élément parasite est couplé à l'antenne du tag. En [58], la taille du tag proposée est plus réduite (50 mm x 20 mm) grâce à la simplicité de l'élément parasite. Par contre, l'utilisation d'un substrat d'une épaisseur égale à 1,6 mm augmente son volume. Les résultats présentés dans ces études sont encourageants et proposent une solution qui n'existe pas sur le marché. Cette solution peut répondre aux besoins des tags plus robustes pour les milieux industriels ainsi que dans le commerce où la composition des produits est complexe.

D'autres applications visées lors de la conception du tag concerne son intégration dans le textile. L'interconnexion puce-antenne est étudiée en [59] où la colle est substituée à la broderie avec des fils conducteurs. Les résultats montrent une meilleure distance de lecture par rapport à une interconnexion traditionnelle. D'autre part, une solution en [60] est proposée à base du textile électronique. Le tag composé de deux parties est censé être résistant à l'étirement du matériau. Après 100 cycles d'étirement, les résultats montrent l'efficacité de l'antenne proposée. Plus récemment, la conception des tags avec de l'encre conductrice à base de Graphène est proposée. Ses propriétés conductrices supérieures, sa rigidité, la maintenance des performances sur plusieurs surfaces et sa compatibilité avec les méthodes d'impressions 3D sont les éléments principaux qui ont motivés ces propositions [61] [62] [63]. Néanmoins, sa toxicité et sa sensibilité aux environnements oxydants peuvent freiner son adoption.

En résumé, l'avancement dans le domaine de la conception des antenne, affronté à des problème classique—tels que la réduction de la taille, la largeur de la bande passante, le gain et l'adaptation à la puce—s'oriente de plus en plus vers des solutions innovante visant à le rendre fonctionnel sur plusieurs types de surfaces ou intégrables aux objets. Dans le paragraphe suivant, les avancées dans le domaine de caractérisation permettant d'évaluer l'effet des différents surfaces ou objets sont présentées.

2.4.3 Caractérisation des tags

Comme établi précédemment l'impédance de l'antenne doit être adaptée à l'impédance de la puce afin d'optimiser le transfert d'énergie entre les deux composants. La caractérisation de l'impédance de la puce est le sujet de recherche en [64] : à l'aide d'un analyseur de réseau, l'impédance de la puce est mesurée lorsqu'elle est en opération et le changement des impédances d'entrée (en réflexion et en absorption) est surveillé en fonction de la puissance d'entrée. A partir de ces mesures l'efficacité de la rétro-modulation (écart entre les impédances de réflexion et absorption) est mesurée afin de distinguer entre les performances de plusieurs puces à différents niveaux de puissance. Cette information permet de mieux concevoir l'antenne et gérer les compromis sur les performances afin de répondre à un cahier de charge spécifique à une application. En deuxième lieu, la caractérisation de l'impédance de l'antenne d'un tag RFID passif est confronté à un obstacle. Les dipôles conçus pour les tag RFID sont généralement équilibrés, et la mesure de telles antennes n'est pas possible avec des instruments dont les ports sont déséquilibrés (port coaxial) [65]. En [66], l'effet de l'interconnexion équilibré-déséquilibré s'est avéré important. Afin de réduire cet effet, un connecteur semi-rigide est proposé. Cette configuration suppose la présence d'un plan masse dont ses dimensions affectent la précision des mesures.

Autrement, en analysant la littérature autour de la caractérisation du tag nous déduisons que plus récemment, l'intérêt se focalise autour de l'évaluation des performances du tag entier afin de le comparer aux autres tags. En [67], la méthode de Kurokawa est utilisée afin d'analyser le coefficient de réflexion du tag. A partir de ces analyses, la distance maximale de lecture d'un tag est représentée en fonction du coefficient de réflexion pour différentes valeurs du gain d'antenne. L'identification de la position du tag dans ce repère permet d'une part de déduire ses performances et de le classer par rapport aux autres tags d'autre part. En [68], la classification des tags est proposée en fonction de la distribution du courant sur la surface de l'antenne vu son influence sur la directivité et le gain de l'antenne. En [69], les auteurs proposent de caractériser un tag en fonction de la puissance minimale normalisée pour l'activer. La puissance normalisée correspond à la puissance additionnelle nécessaire afin d'activer un tag à une distance inconnue par rapport à la puissance minimale nécessaire pour activer le même tag à une distance de référence connue. Lorsque des équipements adoptant cette même technique existent dans le commerce (Voyantic tagformance Lite), cet étude met en évidence la caractérisation des performances du tag en champ proche et en champ lointain en fonction de la distance de séparation entre le lecteur et le tag.

Nikitin et al. identifient deux méthodes de mesure des performances des tags [70]. La première consiste à fixer la puissance émise par le lecteur et à faire varier la distance de séparation entre le lecteur et le tag. Cette méthode est appliquée en [71] afin d'évaluer et de surveiller la conception d'un tag. La deuxième méthode consiste à fixer la distance entre le lecteur et le tag et à faire varier la puissance émise jusqu'à ce que le tag soit activé. Cette méthode est la plus adoptée par les équipements commerciaux de mesure comme le Voyantic Tagformance Lite, le CISC RFID Xplorer et le Testcom TC-2600A. Généralement les mesures de performances sont menées dans des chambres anéchoïques. Néanmoins, pour des tests dans une bande très large l'usage d'une cellule TEM est recommandée [70]. En [72], une chambre de réverbération est utilisée pour mesurer le signal rétro-modulé du tag en présence de multi-chemins. Malgré la recherche continue des solutions de caractérisation dans un environnement contrôlé [73] [74] et les résultats atteints à des coûts inférieurs aux solutions du marché, les applications de ces propositions restent limitées à cause de l'exclusion de plusieurs facteurs présents dans un milieu réel. En

[75], le tag est attaché à plusieurs matériaux dans un chambre anéchoïque afin de mesurer ses performances. D'autres facteurs qui peuvent affecter les performances du tag sont également étudiés dans d'autres études. A part l'effet du matériau, l'effet de la courbure de l'antenne du tag lorsqu'il est attaché à une surface elliptique est étudié en [76]. Il est démontré que l'impédance d'entrée, et plus particulièrement la partie imaginaire est impactée par la surface. En [77], l'effet de la présence du liquide dans le produit tagué est mis en évidence. Il est important de noter l'utilisation d'un lecteur RFID avec une antenne planaire afin de mesurer la puissance du signal reçu. D'autres indicateurs comme la distribution des tags qui ont passé les tests est utilisée en [78] afin d'évaluer l'impact de différents facteurs environnementaux tels que la courbure, la température et l'humidité.

Finalement, nous soulignons les études concernant les tags présents dans des agencements denses où les uns sont placés à proximité des autres. La réduction de la puissance reçue par le tag est étudiée lorsqu'ils sont placés en proximité et une réduction de 40% est constatée [79]. Cette dégradation de performances varie lorsque la distance de séparation entre tags et leur nombre varient. Les auteurs en [80] identifient ce phénomène comme une interférence entre tags et un modèle est proposé pour estimer la variation des niveaux de puissance. En [81], la variation de l'impédance d'un tag est mesurée lorsqu'un autre tag est placé à proximité. D'autres études comme [82] se concentrent plus sur la proposition des solutions comme l'utilisation des antennes à polarisation circulaire afin de réduire l'effet de la proximité. Cela est censé réduire l'effet de l'interférence grâce à la diversité de polarisation. Il est important de noter que dans les dernières études citées, les auteurs se sont orientés vers la simulation, la modélisation et les tests terrain afin d'explorer l'effet de la proximité. Cela signifie que lorsque les facteurs impactant les performances du tag se multiplient les tests en chambre anéchoïque ne sont plus représentatifs. Cette conclusion est aussi vraie pour toute autre facteur d'impact présent dans un milieu réel.

2.5 État de l'art et expérimentation : amélioration de la détection

2.5.1 Solutions autour du tag

2.5.1.1 Optimisation du facteur de qualité de la puce

Dans la partie précédente, l'importance de l'adaptation puce-antenne du tag pour l'amélioration de la portée de lecture de ce dernier est mise en avant. L'impédance de la puce est celle de l'étage multiplicateur qui détermine aussi la sensibilité du tag passif. Différentes solutions sont recherchées pour améliorer les performances de cet étage. Cette amélioration pourrait signifier que les pertes de puissance dans le circuit sont minimisées, la conversion RF-DC est plus efficace ou que l'adaptation puce-antenne est moins affectée pendant la modulation. En définitive, une sensibilité plus élevée et robuste de la puce est visée. Le premier axe d'amélioration consiste à limiter les pertes énergétiques dans le circuit. En [83], cette approche est exploitée en utilisant des diodes Schottky, favorables pour la télé-alimentation, puisqu'elles disposent d'un haut courant de saturation et une basse tension d'activation ; ajouté à cela, une meilleure vitesse de commutation. Plus important encore, est la faiblesse des pertes à effet joule dans ces diodes (dus à une résistance plus faible) relativement à celles dans les transistors MOSFETs. Il est ensuite démontré que pour réaliser une meilleure sensibilité, il faut assurer un facteur de qualité élevé (impliquant de faibles pertes dans le circuit). Un compromis est trouvé entre le nombre d'étages

et la taille des diodes pour réaliser un étage multiplieur à facteur de qualité élevé et une basse tension d'activation grâce à l'optimisation des diodes. Plus récemment, Vamsi et al [84] ont proposé une solution qui consiste à implémenter un circuit d'adaptation à facteur de qualité élevé entre la puce et l'antenne. Pour cela, une méthode d'adaptation différentielle appelée «*Differential T-Matching network*» est utilisée. Les simulations montrent que la puissance d'entrée à la sortie du circuit d'adaptation est améliorée de -20 dB. Cette amélioration permet de réaliser une haute efficacité de conversion (70.1% pour une puissance reçue de -22 dBm) en utilisant deux étages cascades dans le circuit du multiplieur et une sensibilité de -30 dBm est vérifiée par la simulation. Toujours dans le même objectif d'améliorer l'efficacité, Wang et al. [85] proposent de remplacer une batterie externe par un circuit qui consiste en deux capacités et deux transistor MOS pour émuler la fonctionnalité d'une batterie. Les circuits de compensation sont placés entre les drains et les grilles des transistors. La compensation de la tension de seuil entraîne forcément la diminution de la tension nécessaire pour l'activation du circuit et par conséquent cette diminution entraîne la détérioration du facteur de qualité. En [86], cette solution est améliorée et adaptée à une puce RFID UHF où un facteur de qualité élevé est nécessaire. L'étude propose deux circuits de pompe à charge ; le premier s'appuie sur la polarisation des grilles pour la compensation de la tension du seuil et le deuxième s'appuie sur la polarisation du substrat du rectifieur en plus des grilles. Les résultats montrent que l'efficacité de la rectification est améliorée sans détériorer le facteur de qualité. Ceci est réalisé grâce à la polarisation des substrats qui permet d'accroître la capacité d'entrée tout en diminuant la tension d'activation. Toutefois, l'inconvénient de cette solution est l'augmentation de la surface de la puce.

En réalité, réaliser un circuit High-Q ne dépend pas que de l'étage multiplieur mais aussi du démodulateur et d'autres circuits de la puce [87]. Selon [83], le comparateur est le circuit qui consomme le plus de puissance et donc en réduisant sa consommation, celle du démodulateur diminue significativement. Par exemple, en [83] l'optimisation du comparateur avec un circuit à MOSFET sous le seuil est proposé. La tension d'activation peut être diminuée en augmentant le courant de drain qui affecte négativement la vitesse d'interruption, qui à son tour détermine débit de données (150 Kb/s) requis par le protocole GS1 pour le démodulateur. Une autre solution abordée en [88] se base sur le fait que le rapport cyclique varie en fonction des temps de commutation des transistors et les variations introduits lors de la fabrication. Il est proposé d'ajuster le rapport cyclique en le comparant à un rapport idéal de 50%. Il en résulte d'une part, une meilleure sensibilité et d'autre part une consommation réduite.

La conception de tags UHF favorise les circuits à facteur de qualité élevé pour améliorer la sensibilité et à la fois diminuer la consommation. En contraste avec cela, il est important de prendre en compte que l'efficacité de la récupération d'énergie dépend aussi de l'antenne qui forme avec le rectifieur le «*rectenna*». Cela est important parce qu'un facteur de qualité élevé signifie que la partie imaginaire de l'impédance d'entrée de la puce est considérablement supérieure à sa résistance et que la bande passante est étroite. En même temps, pour que le transfert d'énergie entre l'antenne et la puce soit optimal, l'antenne doit être fortement réactive dans une bande passante convenable aux fréquences RFID UHF dans les pays où les tags sont censés être déployés. Ajouté à cela, des contraintes sur le coût et la taille du tag [89] [90].

En se basant sur les différentes études explorées, il est clair que la conception d'un tag est une affaire de compromis puisque l'optimisation d'un paramètre peut causer la détérioration d'un autre. Dans ce qui suit, l'auto-adaptation—une solution visant à adapter

le facteur de qualité—est explorée.

2.5.1.2 L’auto-adaptation

La sensibilité théorique est différente de la sensibilité réelle (et donc la distance de lecture). En réalité, elle varie énormément en fonction de nombreux facteurs : La fréquence radio avec laquelle l’étiquette est alimentée, les variations subies lors de la fabrication de la puce et l’impression de l’antenne, le matériau sur lequel l’étiquette est appliquée, etc.. L’optimisation sur un point peut conduire à une détérioration des performances sur un autre. Compte tenu des avantages d’un facteur de qualité élevé évoqués ci-dessus, il serait intéressant de le conserver sur une bande de fréquence plus large. Pour réaliser cela, plusieurs études [cf. 91, p.127-143] [92] [93] [94] ont exploré la possibilité d’adapter automatiquement la puce à l’antenne. En [91], il est conclu que pour un facteur de qualité plus élevé un tag peut mieux fonctionner pour une bande de fréquence bien déterminée. Tandis que pour un facteur moins élevé, ce tag peut fonctionner sur une plage de fréquence beaucoup plus large mais sa sensibilité diminue significativement. De plus, l’étude en [91] analyse les impédances des antennes et des puces pour déterminer les conditions qu’il faut respecter pour réadapter automatiquement l’impédance de la puce. Ces conditions sont montrées en équations 2.6 et 2.7.

$$R_{\text{antenne}} \approx \frac{1}{Q \cdot C_{//} \cdot \omega} \quad (2.6)$$

$$L_{\text{antenne}} \approx \frac{1}{C_{//} \cdot \omega^2} \quad (2.7)$$

La condition en équation 2.7 est la plus importante à respecter puisqu’elle montre une plus grande dépendance entre l’impédance et la fréquence. Cela est fait en ajoutant une capacité variable à l’entrée du circuit pour assurer une auto-adaptation face aux divers facteurs qui pourraient causer la désadaptation entre puce et antenne [91]. Plusieurs méthodes permettent d’effectuer la calibration de l’impédance pour réaliser un facteur de qualité élevé : les auteurs de [92] et [93] proposent une calibration digitale qui augmente la consommation du circuit et ajoute une complexité à la conception du circuit logique. Le premier [92] propose plusieurs modes de fonctionnement avec des compromis entre la consommation du circuit et la puissance livrée au rectifieur. En [94], un circuit d’adaptation automatique basé sur des résistances négatives est proposé. La valeur des résistances est contrôlée par la valeur de la tension en entrée par le biais de trois circuits : un convertisseur tension-courant, un échantillonneur et un circuit d’interruption contrôlé par l’horloge extraite du signal de la tension d’entrée. Cette solution est proposée pour une application RFID à basses fréquences (125 kHz) et comme prétendu, occupe une surface de puce faible tout en simplifiant la complexité de l’auto-adaptation au niveau logique et analogique. Finalement, Seigneuret et al. [95] [91] proposent une méthode qui favorise la basse consommation et qui consiste à utiliser des constantes de temps pour trouver la meilleure adaptation. L’architecture de ce circuit ne dépend pas d’un comparateur et utilise un circuit logique de contrôle très simple basé sur un bascule-D. A cause de l’absence du comparateur, une adaptation optimale ne peut être trouvée et l’adaptation s’arrête au moment où la tension d’alimentation convertie est suffisante pour déclencher le POR. Malgré la stabilité de cet architecture, la précision de l’adaptation est limitée lorsque le tag entre lentement dans le champ du lecteur ou lorsqu’il sort de ce champ.



FIGURE 2.5 – La référence GB3 en deux versions R6 et Ucode7

En surveillant les tags RFID UHF sur le marché, deux fabricants proposent des puces capables de l'auto-adaptation. Le premier est Impinj qui propose la famille Monza 6 (R6, R6-A, R6-P, S6-C), et l'autre est NXP qui propose la puce Ucode 8. Lorsque l'appellation de la technologie est différente entre le premier («*auto-tune*») et le deuxième («*self adjust*»), la promesse du fonctionnement est la même.

Puce	Fabricant	Taille (μm x μm)	Sensibilité (dbm)	Plage de l'auto-adaptation
Monza M5 [96]	Impinj	465 x 465	-20	Non applicable
Monza R6 [97]	Impinj	464.1 x 400	-22.1	-100 pF à +100 pF
Ucode 7 [50]	NXP	460 x 505	-21	Non applicable
Ucode 8 [52]	NXP	480 x 490	-23	-60 pF à +100 pF

Tableau 2.1 – Comparaison des puces du marché

Le tableau 2.1 montre deux exemples de puces qui permettent l'auto-adaptation (R6, U8) et les versions précédentes de puces (M5, U7). La puce R6 propose une variation sur la capacité d'entrée de la puce en quatre valeurs entre -100 pF et +100 pF sur sa valeur initiale. La puce Ucode 8 propose une variation en trois valeurs entre -60 et +60. L'amélioration de la sensibilité et la réduction de la taille de la puce malgré l'ajout du circuit de l'auto-adaptation est notable. Les versions postérieures de la famille M6 (R6-A, R6-P, S6-C)[98] [99] [100] optent pour une variation de plage entre -80pF et +100pF. En ce qui concerne la technologie derrière ces produits, des brevets déposés par Impinj sont trouvés. Le premier [101], protège une méthode d'auto-adaptation basée sur la comparaison de la puissance reçue pour les différentes valeurs d'une capacité variable ; l'inventeur réclame que le circuit d'auto-adaptation exige une tension d'activation inférieure à celle de la puce et bloque la communication avec le tag jusqu'à ce que la procédure d'adaptation de ce dernier est terminé. D'autres brevets traitent la polarisation du rectifieur pour optimiser son fonctionnement avec un circuit d'auto-adaptation [102], la gestion de l'horloge du circuit d'auto-adaptation [103] et enfin, la possibilité de changer l'impédance en fonction de la puissance reçue par le tag, vu la forte dépendance entre l'impédance d'entrée du tag et la puissance reçue à sa positions [104].

Pour mieux illustrer les avantages de l'auto-adaptation, un tag fourni par SML est considéré. Ce tag dont la référence est le GB3 est produit en deux versions. La première version de la même référence utilise une puce Impinj R6 2.5b et la deuxième une puce U7 2.5a. Comme il est évident dans la figure 2.5, les antennes ne sont pas tout à fait similaires, ce qui est dû à la considération de l'impédance de chaque puce lors de la phase

de conception des antennes. Les distances de lecture à 4W PIRE sont enregistrées pour les deux tags comme suit :

- le tag est placé dans un caisson anéchoïque tout seul en air libre.
- le tag est placé sous une plaque de polyuréthane de 1 cm d'épaisseur (permittivité relative égale à 4).
- le tag est empilé en dessous d'un autre tag similaire. Les deux tags sont séparés de 5 mm.

Ces trois tests sont répétés trois fois : la première fois avec le GB3 U7, la seconde, avec le GB3 R6 et la troisième avec le GB3 R6 en désactivant la fonctionnalité d'auto-adaptation. En effet, les puces R6 ont la fonctionnalité d'auto-adaptation activée par défaut et il est possible de la désactiver en affectant une valeur '1' au premier bit (A) du mot à l'adresse 5h. Donc, A=0, signifie que l'auto-adaptation est activée au contraire de A=1. En analysant les résultats de la figure 2.6, l'auto-adaptation se montre plus efficace en air libre et en configuration empilée. Sur la figure 2.6a, la distance est maximale pour une fréquence entre 900 et 920 MHz pour la version U7 ; cela est dû à son facteur de qualité optimisé pour une seule bande de fréquence plus étroite. La version R6 montre une distance de lecture réduite par comparaison à ce dernier mais plus homogène tout au long de la bande de fréquence. Lorsque la fonctionnalité auto-adaptation est désactivée, la courbe montre que la puce conserve des performances plus homogènes que le tag GB3 U7, mais échoue à réaliser les mêmes distances de lecture que le tag GB3 R6 pour les fréquences supérieures à 890 MHz. Dans la figure 2.6b, les différences entre les trois courbes sont subtiles, mais l'activation de la fonctionnalité de l'auto-adaptation montre une faible amélioration de la distance de lecture sur la totalité de la bande de fréquence. Sur la figure 2.6c, l'auto-adaptation s'avère très utile grâce à sa capacité de compensation de la désadaptation (voir chapitre 3) dû à l'empilement des tags.

Grâce à l'auto-adaptation puce-antenne, la sensibilité du tag doit être plus rigide face à l'environnement dans lequel se trouve l'étiquette. Ce qui résulte en une meilleure lisibilité des étiquettes dans des conditions variables. Deuxièmement, chaque région du monde utilise une bande de fréquence spécifique et le tag peut-être optimisé sur cette base. Cela pourrait entraîner par exemple, une distance de lecture plus importante en Europe par rapport à l'Asie. L'auto-adaptation permet d'atténuer cet effet, de sorte que la distance de lecture soit optimisée sur toute la bande de fréquence. Finalement, utiliser des étiquettes avec des puces qui possèdent la fonctionnalité de l'auto-adaptation aide à améliorer la détection lors des inventaires automatiques. Ce point en particulier est le sujet d'un brevet déposé par Avery Dennison qui stipule que ce type de tags est capable d'améliorer la détection lorsque ils sont placés en proximités les uns aux autres [105].

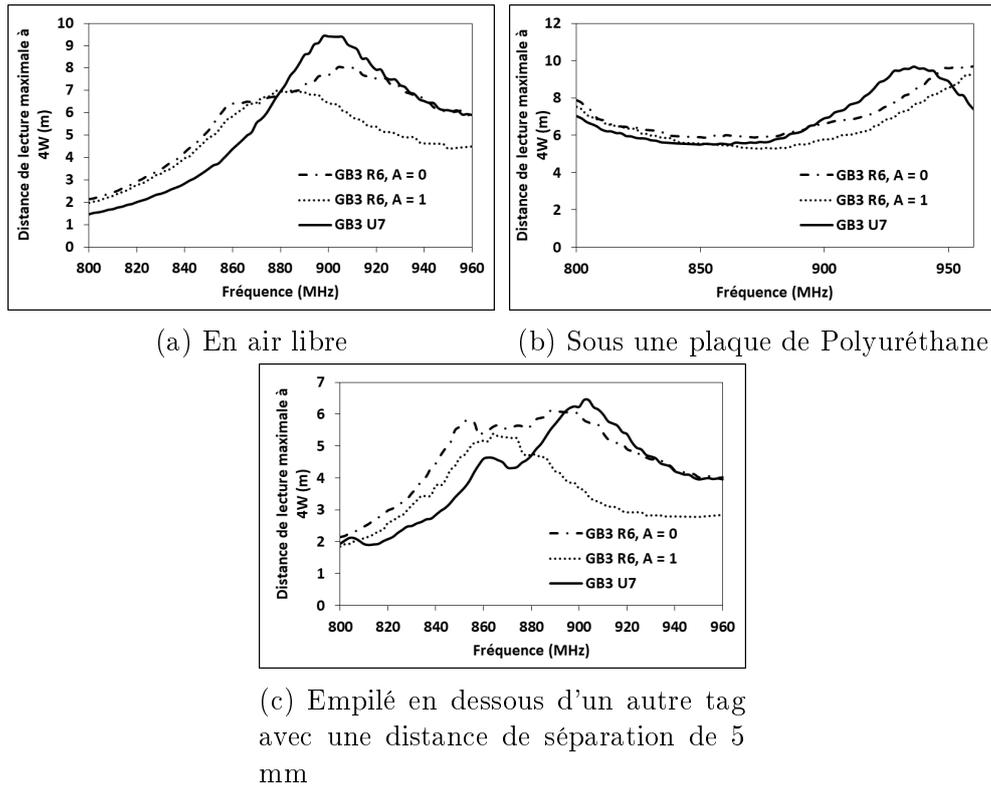


FIGURE 2.6 – Les distances de lectures maximales du GB3

2.5.1.3 Autres propositions

Ils existent plusieurs d'autres propositions non-commercialisées ou non-adoptées dans le domaine du commerce du détail autour du tag RFID passif. Dans cette partie, une multitude de solutions et d'études ont été examinée pour mettre en évidence les innovations les plus pertinentes et prometteuses.

En [106], la non-linéarité du rectifieur est exploitée pour améliorer la distance de lecture maximale d'un tag passif. La solution (compatible avec le protocole GS1) se base sur le fait qu'une troisième harmonique générée par le tag possède une amplitude comparable à celle de la fondamentale. Par exemple, pour un tag opérant à une fréquence de 866 MHz une troisième harmonique à une fréquence de 2.6 GHz a été détectée [106]. Dans cette étude, ce phénomène est exploité pour concevoir un circuit de récupération d'énergie pour étendre la distance de lecture maximale du tag. En [107], il est proposé de gérer un deuxième canal de communication à la fréquence de la troisième harmonique. Cela permet d'améliorer les performances globales du système pour plusieurs applications : l'anti-collision, la localisation et l'authentification. L'utilisation des harmoniques n'est pas tout à fait récent, en effet, en [108] un circuit basé sur une ligne de transmission non-linéaire est proposé : en générant une deuxième harmonique vers le lecteur, la précision de la phase et de la distance malgré les interférences dans un système RFID sont améliorées. D'autres études ont également traité le sujet des interférences et ont proposé une solution autour du tag. En [109], l'impédance de l'antenne est choisie pour la rendre invisible lorsque le tag est en un état d'invisibilité, introduit par cette étude. Cet état est sensé assurer une distribution du courant, minimale tout au long de l'antenne—minimisant ainsi la diffraction—d'un tag lorsqu'un autre tag est en communication avec le lecteur. En [110], un tag à fréquences multiples (13,56 MHz, 866 MHz et 2,45 GHz) est proposé avec un

capteur de température. Le plus intéressant de cette étude est la réalisation d'un rectifieur multi-fréquence tout en respectant les contraintes détaillées ci-avant. De plus, cette puce proposée permet son utilisation dans des applications multi-standards. Dans la même intention de maximiser les fonctionnalités du tag, en [111], un tag augmenté est proposé pour réaliser une communication bidirectionnelle entre le tag et le lecteur. Pour soutenir ses capacités sensorielles et de calcul, le tag dispose d'un circuit de récupération d'énergie équipé de deux antennes à polarisation orthogonale, l'un par rapport à l'autre.

D'autre part en [112], un tag actif compatible avec le standard EPC Gen2 est proposé. Le défi étant de synchroniser la porteuse du tag avec celle du lecteur, un circuit de récupération de la porteuse du dernier est étudié et une sensibilité de -39.5 dBm est atteinte. D'autres solutions existent pour assurer l'autonomie énergétique et maximiser la distance de lecture d'un tag RFID, telles que l'ajout d'une batterie [113] pour rendre le tag semi-passif ou une cellule photovoltaïque [114] [115]. Dans ce dernier [115], la récupération d'énergie photovoltaïque est utilisée en plus de la récupération de l'énergie RF. Cela est réalisé avec une antenne patch et une puce multi-port. L'utilisation d'une puce multi-port permettant la connexion à plusieurs dipôles pour améliorer la récupération d'énergie radiofréquence est également proposée. Son influence positive sur la distance de lecture maximale est bien illustré en [116] et [111]. Ces solutions, malgré les bénéfices qu'elles apportent, restent indisponibles sur le marché et introduisent un coût et une complexité additionnels au tag et au système RFID.

Les avancées dans ce domaine montre qu'il existe une forte volonté, visant à améliorer la capacité d'un tag à absorber l'énergie ou à l'économiser. Malheureusement, ces ébauches restent en phase de prototypage et aucune solution n'est commercialisée. Pour cela, nous orientons nous explorons dans le reste de ce chapitre, les innovations autour des solutions de lecture, puisqu'il peuvent avoir potentiellement un impact plus important sur les performances globales d'un système RFID.

2.5.2 Les systèmes de lecture

Le tag passif avec le(s) lecteur(s) et l'environnement dans lequel ils sont présents constituent le système. Par conséquence, l'amélioration des performances globales de ce système impliquerait l'amélioration de chacun de ces éléments. Toutefois, de diverses contraintes sont liées à l'agencement des produits dans un rayonnage magasin d'un côté et l'utilisation des tags conformes au protocole EPC Gen2 et disponibles sur le marché pour un déploiement massif de l'autre côté. Pour cela, dans cette partie les innovations concernant les lecteurs RFID ou des systèmes de lecture sont examinés pour alimenter la proposition et la réalisation du système dans la partie suivante.

Premièrement, il est intéressant de suivre les tendances de la recherche autour des systèmes de lecture. Cette étude des tendances consiste à recueillir les titres des publications et est divisée en deux périodes : la première entre début 2010 et fin 2014, et la deuxième entre début 2015 et Juin 2018. 248 articles et brevets sont trouvés pour la première période et 111 pour la deuxième. Les 81 mots les plus occurrents pour chacune sont présentés dans la figure 2.7¹. Tout d'abord, il est remarquable que le nombre publications autour du thème "lecteur RFID UHF" a diminué significativement entre les deux périodes. Deuxièmement, en analysant les deux nuages de mots, il est évident que

1. Les titres des publications ont été recueilli sur Scholar.google.com et après l'analyse de l'occurrence des mots, la représentation graphique est a été réalisée avec l'outil gratuit Vega (<http://trifacta.github.io/vega/editor/index.html?spec=wordcloud>)

dans lequel elle serait utilisée [117]. Même si des propositions de conception d'antennes "universelles" pourraient être trouvées, des compromis sur le coût, la taille ou l'efficacité de rayonnement [118] sont nécessaires.

La polarisation de l'onde est un autre facteur qui dépend de l'application. Si, le même exemple est considéré, l'utilisation des antennes fixes pourrait profiter d'une polarisation circulaire pour améliorer la probabilité de détecter les produits tagués et agencés dans le rayonnage du magasin d'une façon aléatoire. Ce facteur, avec le gain en puissance définissent la couverture du lecteur. Comme le montre l'équation 2.8, le gain et la directivité sont directement liés par l'efficacité de rayonnement de l'antenne (η), qui dépend des pertes diélectriques, des pertes de conductivité, et des pertes de réflexion [cf. 119, p.65-69].

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (2.8)$$

Généralement, il est préférable que le gain soit le plus élevé possible mais vu la dépendance de la directivité de ce dernier, cela n'est pas toujours souhaité. Deux approches existent concernant ce sujet : soit augmenter la directivité pour lire dans une zone bien précise, soit la diminuer pour assurer une couverture plus large devant l'antenne. Sachant que la couverture dans un système RFID passive est déterminée par le tag le plus loin dont sa réponse est correctement interprétée par le lecteur, il est nécessaire de prendre en compte ces facteurs pour optimiser l'implémentation.

2.5.2.2 Les étagères intelligentes

Pour réaliser une meilleure visibilité et précision de l'inventaire, un point de lecture intégré ou à proximité du rayonnage pourrait être installé pour couvrir une zone limitée dans le milieu. La lecture complète du rayon nécessite l'installation de plusieurs points de lectures [120]. Cette solution d'étagères intelligentes ou «*Smart Shelves*» est disponible commercialement chez NeWave RFID [121] et Keonn [122]. Le but étant de créer une zone bien confinée de lecture, cette solution se compose d'un lecteur central et des points de lecture composés des antennes optimisées pour un fonctionnement en champ proche. Les antennes proposées sont souvent «*Low-cost*». Les temps de lectures sont souvent gérés grâce à des multiplexeurs de sorte que deux lecteurs adjacents ne transmettent pas simultanément pour éviter les interférences.

Plusieurs propositions d'antennes existent dans la littérature pour ce type d'applications. En [124] une antenne est conçue pour un fonctionnement en champ proche. Une première zone de lecture de l'ordre de 10 cm est réalisée en émettant sur la surface du lecteur (champ proche réactif). Cette distance peut être augmentée jusqu'à 70 cm en champ proche radiatif. En [125], une antenne fonctionnant en champ proche et lointain



FIGURE 2.8 – L'antenne NeWave pour les applications SmartShelves [123]

est réalisée en intégrant des stub sur la surface d'une antenne patch. En [126], cela est réalisé en proposant une antenne à trois différents ports d'alimentation : la communication champs-proches est activée en alimentant l'antenne avec le premier port et la communication en champ lointain est activée en alimentant l'antenne via les ports deux et trois. Une quatrième étude [127] propose une antenne composée de plusieurs blocs de dipôles en méandres. Le gain de l'antenne ainsi que la surface à couvrir peuvent être configurés en ajoutant des blocs de dipôles. Finalement, en [128], une nouvelle antenne capable de s'auto-configurer est proposée. Cette antenne est composée de deux éléments formant un Yagi et un circuit d'interruption. En changeant l'impédance complexe aux bornes de l'élément parasite du Yagi, son fonctionnement bascule d'un réflecteur à un directeur, ainsi basculant la direction du lobe principal de l'antenne de 180°. Ce concept peut être une solution pour la lecture dans les rayons ou dans des zones de lecture confinées.

En revenant sur la solution commercialisée de NeWave dans la figure 2.8 (brevet [129]), il est clair que ce type d'antenne est le plus populaire pour une telle application (étagère intelligentes) [130] [131] [123]. Dans ce dernier [123], le fonctionnement et la conception de cette antenne (figure 2.8) sont détaillés. Le réseau composé est de trois double dipôles alimentés par une ligne de transmission méandree qui sert à augmenter le déphasage entre eux. La diversité des faisceaux et leurs polarisations servent à améliorer la détection des tags posés aléatoirement dans le rayon dans des configurations difficiles. Il est annoncé que cette antenne possède une zone de détection d'une hauteur de 1 m et d'un rayon 50 cm autour d'elle quelle que soit l'orientation du tag.

Pour confirmer cela, nous proposons une expérience avec une antenne NeWave à trois éléments (NSS Wave-N3-E) connectée au lecteur RFID Impinj Speedway 420. Un carton comprenant 264 tags est utilisé pour évaluer les performances. Ce carton (60 x 40 x 20 cm) comprend 11 planches en bois espacées de 5 centimètres. 24 tags sont collés sur chaque planche et chacune a une orientation différente de tags. Le carton est ensuite posé au-dessus de l'antenne. Premièrement, le but est de trouver la puissance minimale (P_{\min}) nécessaire pour détecter l'ensemble (ou le maximum) des tags dans le carton. Deuxièmement, 20 tags (parasites) sont posés autour de la configuration carton et antenne (dans son plan horizontal). Pour définir la zone de confinement les tags sont éloignés petit à petit du centre de l'antenne jusqu'à ce qu'il ne soient plus détectables à une puissance P_{\min} . Le nombre maximal de tags est détecté pour la puissance maximale autorisée de 33 dBm. Les différentes configurations sont ainsi notées dans le tableau 2.2. La puissance rayonnée constitue le gain de l'antenne (3 dBi) ajouté à la puissance transmise par le lecteur. Le rayon des tags parasites est la distance de séparation des tags parasites du centre de l'antenne.

Selon les résultats illustrés dans la figure 2.9, il est confirmé que la zone de détection annoncée en [123] pour 33 dBm est optimale pour la détection, et peut encore s'étendre jusqu'à 75 cm de rayon dans le plan horizontal. Néanmoins, les résultats montrent que pour réaliser un confinement autour de cette zone il est nécessaire de diminuer la puissance rayonnée. Cela impacte négativement la zone de détection ; ce qui en résulte la diminution du pourcentage de détection des tags dans le carton de 94.7% pour une puissance rayonnée de 33 dBm jusqu'à 66.3% pour 24 dBm. A 24 dBm, la lecture est confinée à un rayon de 75 cm avec une efficacité de 100% puisqu'aucun tag parasite n'est détecté.

Toutefois, cette solution ne correspond pas à notre cas d'étude. D'un côté, l'implémentation des antennes dans des rayons comportant différentes configurations (broches, panier, planche) s'avère complexe. Ceci est dû à la composition métallique des rayons qui impose une distance de séparation minimale de $(\frac{\lambda}{4})$ entre le métal et l'antenne pour

Id	Puissance émise (dBm)	Rayon tags parasites (cm)
1	33	10
2	33	20
3	33	30
4	33	40
5	33	50
6	33	75
7	30	75
8	27	75
9	24	75

Tableau 2.2 – Les différentes configurations de puissance et distance

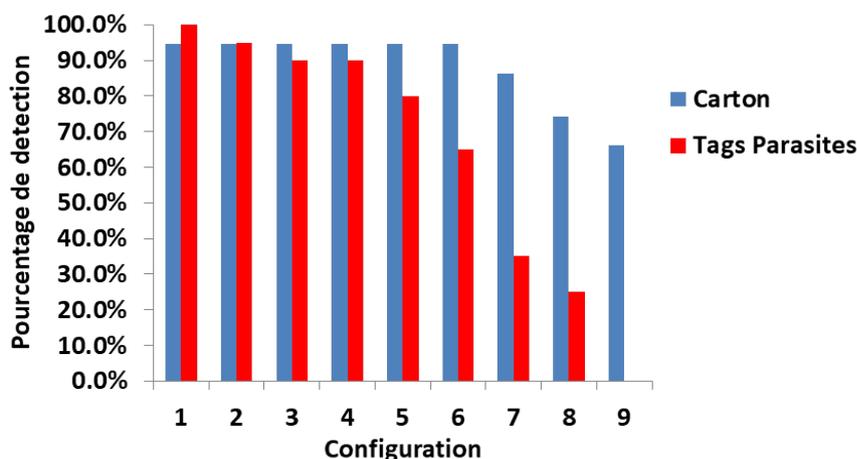


FIGURE 2.9 – Les pourcentages de détection pour les différentes configurations du tableau 2.2

conserver les propriétés de rayonnement de cette dernière. Cela impactera forcément la capacité du stockage dans le rayon. D'un autre côté, en se projetant sur l'étape de localisation, l'utilisation d'un tel système signifie que la liaison entre le tag et le lecteur devient de plus en plus complexe à cause du placement des points de lecture à proximité du métal. Ajouté à cela, la zone de confinement qui serait plus étendue à cause des interférences, ajoutant une couche de complexité supplémentaire à la localisation des produits tagués dans ce type de structures.

La complexité de l'implémentation des points de lecture dans des structures métalliques pose un vrai problème pour réaliser les solutions dites «*Smart-Shelves*». En [132] et [133], la technologie «*Concentrated Ground Plane Booster*» est proposée. Cette technologie est composée des éléments non-résonnants et non-rayonnants d'un volume de 5 mm x 5 mm x 5 mm (les «*boosters*»), d'un plan de masse et d'un circuit d'adaptation. La position de ces éléments sur le plan de masse détermine l'efficacité de rayonnement pour les différents modes de propagation. Cette solution est proposée pour répondre à la problématique des antennes multi-fréquences dans les appareils portables et ensuite commercialisée pour les objets connectés [134]. Néanmoins, ce n'est pas cet aspect qui pourrait nous intéresser mais plutôt la possibilité de transformer les surface métallique en éléments rayonnants. Pas très loin de cette application, Shuai et al. [135] proposent de

transformer les surfaces métalliques en antennes champs proches en les connectant à un lecteur RFID UHF passive. Cette connexion est optimisée avec un circuit d'adaptation et une distance de lecture de 30 mètres est annoncée pour un seul tag placé le long d'une barre de 50 mètres. Malgré les résultats encourageants, ce type de solution est très complexe à déployer, principalement à cause de la complexité de l'adaptation du circuit aux structures trouvées dans le commerce et l'imprévisibilité des changements d'impédance en fonction de l'agencement des rayons.

2.5.2.3 Les robots

L'idée d'utiliser des robots pour réaliser l'inventaire d'un magasin ou d'un entrepôt n'est pas complètement nouvelle dans le commerce. En 2006, IBM a déposé un brevet [136] qui décrit un robot capable de réaliser l'inventaire en capturant des photos de rayons ; l'inventaire est réalisée en traitant les photos des codes barres de chaque produit. Depuis, plusieurs robots équipés d'un interrogateur RFID UHF sont proposés sur le marché. Les sociétés Fetch Robotics et Sick proposent leurs solution *TagSurveyor* pour des applications dans les entrepôts. Keonn propose sa solution *AdvanRobot* pour le magasin et l'entrepôt comme le fait MetraLabs avec son robot *TORY*. Ces solutions promettent une meilleure visibilité de l'inventaire et une meilleure précision, mais il n'est pas possible d'obtenir une remontée en Temps Réel de l'état de l'inventaire dans le magasin. Cela est dû, d'un côté à la complexité de permettre à un robot de circuler dans le magasin dans la journée, puisque cela peut gêner le déplacement des clients. De l'autre côté, le temps de l'inventaire augmente proportionnellement à la taille du magasin et la complexité de l'agencement.

Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas pu organiser une évaluation d'un robot RFID, mais grâce à [137], [138] et une étude menée par les sociétés Keonn et Robotnik Automation avec l'université de Pompeu Fabra à Barcelone [139], il serait possible de résumer les défis et avantages de cette solution. En ce qui concerne les défis, trois problématiques doivent clairement être résolues :

- la localisation du robot et la gestion de la navigation dans le cas où il ne possède pas une carte du magasin.
- La nécessité d'assurer une connectivité au robot tout au long du temps d'inventaire pour la remontée d'information.
- L'autonomie énergétique du robot.

Compte tenu de ces défis, les robots sont capables d'apporter plus de précision à l'opération de l'inventaire tout en éliminant l'intervention humaine. Ajouté à cela, le niveau de fiabilité supérieure qu'ils apportent à la localisation des produits par rapport aux autres systèmes.

2.5.2.4 Les systèmes montés au plafond

Sans parler des performances brutes, un système monté au plafond constitue le choix le plus populaire et séduisant parmi les solutions d'inventaire automatique. Ceci est dû à sa capacité à effectuer un contrôle continu de l'inventaire en Temps Réel, sans encombrer la surface du magasin ou limiter la capacité de stockage dans les rayons. L'offre est cohérente avec cette popularité, et plusieurs fournisseurs proposent leurs propres solutions sur le marché. Nous citons l'AdvanTrack de Keonn, le xArray d'Impinj, le SNAP de Zebra, le Focus et Tile d'Invengo-Intellifi et l'IDA-3100 Sensormatic de Tyco Retail. Sans exception tous ces dispositifs se composent de plusieurs antennes. Le fonctionnement est soit en mode réseau pour réaliser du balayage et de la reconfiguration des faisceaux, soit en

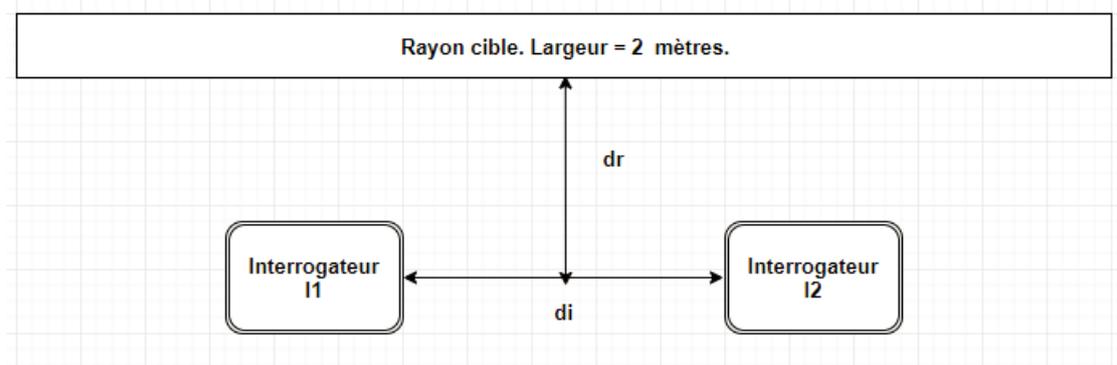


FIGURE 2.10 – Vue de dessus du montage avec deux interrogateur (hauteur = 2,5 mètres)

mode séquentiel pour couvrir le plus possible en volume en lisant sur chaque antenne séparément. Toutes ces solutions fournissent des antennes embarquées avec l'interrogateur pour former une seule unité de lecture. D'autres solutions comme PervasID, proposent un interrogateur central qui permet la connexion de plusieurs antennes via des câbles. Ces antennes seraient éventuellement distribuées pour définir une zone de couverture plus large et plus adaptable en fonction du milieu. La recherche est active sur ce sujet [140], [141], [142], puisque la plupart des publications récentes se concentrent sur les antennes à balayage automatique en portant un intérêt particulier pour la polarisation de l'onde. En ce qui concerne les performances des interrogateurs RFID montés au plafond, deux facteurs clés sont à considérer : la distance entre l'antenne et le produit tagué (qui pourrait dépasser les 5 mètres) et le nombre d'interrogateurs pour assurer un bon niveau de détection.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de ce type de solutions, nous avons mis en place une expérience pour évaluer deux systèmes commerciaux. Le premier (dénomé système 1 par la suite) est composé d'un interrogateur embarqué et neufs antennes à polarisation circulaire alimentées par un réseau pour former 52 faisceaux formant tous ensemble une ouverture (à -3 dB) de 120°. Le deuxième système, ou système 2 comme dénoté ci-après, est composé de quatre antennes à polarisation circulaire et capable de générer seize faisceaux, d'une largeur de 90° chacun. Le balayage s'effectue d'une façon séquentielle d'un faisceau à un autre. L'évaluation des performances de ces deux systèmes est divisée en trois étapes :

1. Évaluation de la détection d'un seul interrogateur en fonction de la distance le séparant du rayon.
2. Évaluation de la détection de deux interrogateurs (I1 et I2) pour chaque système en fonction des distances de séparations entre eux, les puissances émises et la distance les séparant du rayon.
3. Évaluation de la détection d'un interrogateur pour différents types de tags.

Les interrogateurs sont installés à une hauteur de 2,5 mètres et à une distance de séparation variable (dR) du rayonnement. Pour la deuxième étape, un paramètre de plus est introduit qui est la distance de séparation entre les deux interrogateurs (dI). Le montage est illustré sur la figure 2.10. Le tableau 2.3 montre huit configurations des systèmes de lecture. Cette configuration est en fonction des puissances rayonnées, des positions des interrogateurs (dR et dI), et de la stratégie. Deux stratégies de lecture sont définies pour la deuxième étape de l'évaluation ; les deux interrogateurs seront soit lancés en même temps

Configuration	1	2	3	4	5	6	7	8
Puissance I1 (dBm)	33	33	33	33	33	30	33	33
Puissance I2 (dBm)	-	-	-	33	33	30	33	33
dR (cm)	100	150	200	150	150	150	150	200
dI (cm)	-	-	-	150	150	150	200	250
Stratégie	-	-	-	I1 puis I2	I1 et I2	I1 et I2	I1 et I2	I1 et I2
Système 1	74%	69%	61%	74%	76%	70%	82%	77%
Système 2	64%	50%	33%	54%	65%	55%	68%	64%

Tableau 2.3 – Quelques configurations et résultats pour les deux systèmes évalués

ou l'un après l'autre. Dans le cas des configurations 1, 2 et 3, un seul interrogateur de chaque système est utilisé et donc la puissance I2, dI et la stratégie ne sont pas applicables.

Pour mieux comprendre les résultats de nos évaluations, les configurations 1, 2 et 3 affichés dans le tableau 2.3, sont considérées pour conclure sur la couverture de chacun des systèmes. Puisque, la couverture est liée directement à la réponse du tag et déterminée par le pourcentage de détection, il est acceptable de juger les performances du système en se basant sur ce critère. Il est évident que le système 1 est plus performant en terme de couverture : pour une distance de séparation de 2 mètres du rayon, 61% des produits sont détectés tandis que le système 2 atteint une détection de 64% pour la moitié de cette distance (1 mètre). En passant à la figure 2.11 pour comparer les performances de chaque système (configuration 2) à une puissance maximale, le système 1 réalise des meilleurs taux de détection sur la majorité des produits tagués/configurations, sauf les sachets de protéines, où il ne détecte aucune unité. Les meilleures performances de ce systèmes en terme de portée et couverture, sont probablement dues en premier lieu à la typologie d'antennes utilisée. La génération de 52 faisceaux (contre 16 pour le système 2) d'une largeur de 60° chacun (contre 90°) assure un meilleur bilan de liaison, tout en couvrant une zone importante.

L'amélioration des taux de lecture est étudiée en évaluant les performances de deux interrogateurs montés ensemble pour chaque système (configurations 4 à 8). Les performances dans ce cas ne se résument plus à la portée des deux interrogateurs mais aussi à leur interopérabilité. Pour cela deux paramètres sont introduits : la distance de séparation entre deux lecteurs et la stratégie de lecture. En comparant les taux de détection pour la configuration 7 par rapport à ceux de la configuration 2 (même distance de séparation du rayon et même puissance), une amélioration de 13% et 18% pour les deux systèmes 1 et 2 respectivement est notée. D'autre part, des taux de détection à 2 mètres sont améliorés de 16% pour le système 1 et 29% pour l'autre système. Toujours à une distance de séparation du rayon (dR) égale à 150 cm, en considérant une lecture simultanée avec les deux interrogateurs (configuration 5 et 7) au lieu d'une lecture séquentielle (configuration 4), les deux systèmes gagnent en performances. Pour le même positionnement des antennes (configuration 4 et 5), une augmentation de 2% pour le système 1 et de 11% pour le système deux est constatée. Ce résultat montre qu'il est possible de gagner en performance si les deux lecteurs fonctionnent en même temps. En écartant les deux lecteurs en fonctionnement simultané jusqu'au 2 mètres l'un de l'autre, la couverture optimale du rayonnement

Produits	Config 2 - Système 1	Config 2 - Système 2	Config 7 - Système 1	Config 7 - Système 2
Sacs à dos - Gris/Bleu	100%	50%	94%	100%
Sacs à dos - Rose/Marron	56%	56%	94%	94%
Sacs à dos - Gris/Orange	100%	69%	100%	75%
Sacs à dos - Bleu marine/Bleu	70%	70%	80%	80%
Sacs à dos - Bleu/Orange	100%	80%	90%	80%
Sacs à dos - Violet/Rose	100%	71%	100%	71%
Sacs à dos - Vert/Vert	100%	100%	100%	71%
T-shirts (cintre)	55%	50%	75%	55%
Cordes à sauter	0%	0%	0%	0%
Anti-Vibration Tennis	35%	30%	60%	60%
Tubes proteine	73%	51%	77%	64%
Sachets proteine tomate	0%	13%	13%	0%
Câbles de frein	83%	58%	92%	67%
Balles de Ping Pong	80%	60%	80%	80%
T-shirts enroulés	78%	22%	100%	89%
Shorts	75%	50%	88%	88%
Chaînes de vélo	93%	67%	100%	93%
Lampes frontales	100%	93%	100%	71%
T-shirt Gris	76%	52%	76%	57%
Chambre à air	79%	36%	93%	79%
Bouteilles	61%	37%	79%	79%
Chaussures (partie haute)	100%	78%	100%	100%
Chaussures (partie basse)	83%	78%	94%	78%
Serviettes	11%	4%	11%	11%

FIGURE 2.11 – Les pourcentages de détection correspondants aux meilleures configurations

est atteinte. En plus les taux de détection montent jusqu'à 82% et 68% pour les systèmes 1 et 2 respectivement. Cela est dû à la réduction des interférences destructives causant des zones sombres de lecture.

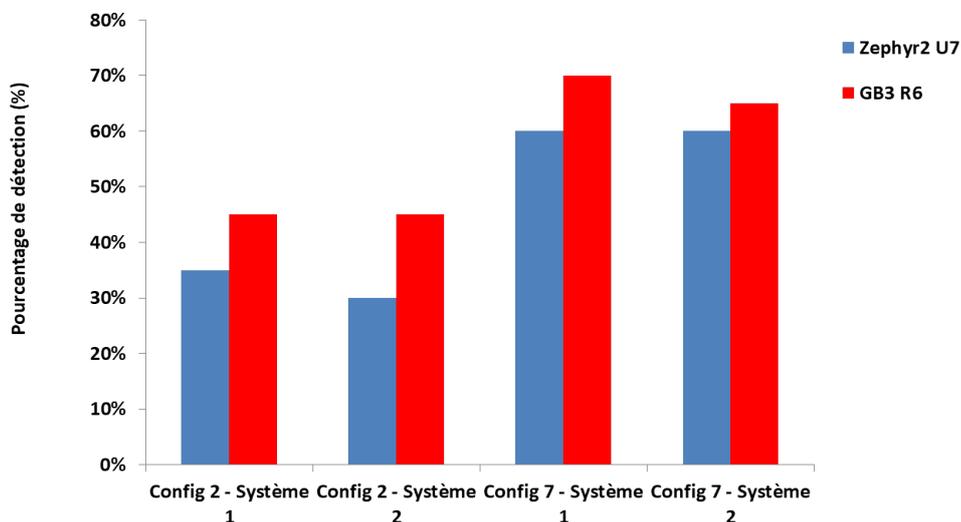


FIGURE 2.12 – Les pourcentages de détection en fonction des tags utilisés

En profitant du montage du système, une troisième étape d'évaluation est planifiée. Cette étape consiste à étudier les performances lorsqu'un autre tag est utilisé. Dans ce contexte, le tag GB3 R6 est utilisé pour évaluer les bénéfices que peut apporter un tag équipé d'une puce capable de s'auto-adapter. Comme il est déjà établi, l'utilisation de ce type de tag est notamment avantageuse lorsque les produits tagués se trouvent dans un agencement dense, où les tags se trouvent à forte proximité les uns des autres (ou

en «*stacking*»). Les produits d'anti-vibration sont choisis, vu le faible effet matériel sur le tag (carton, tag pratiquement en air libre) et l'agencement dense. Ces produits sont initialement tagués avec le tag Zephyr 2 (puce Ucode 7) qui a une portée théorique de lecture maximale de 5.8 mètres dans la bande de fréquence Européenne. Dans la même bande, le tag GB3 possède une portée théorique maximale de 6.5 mètres. Tout d'abord, avec un seul lecteur au centre, le rayon est éloigné peu à peu jusqu'à ce qu'aucun produit (anti-vibration) n'est lu. Avec le tag GB3 une distance de détection maximale (dans la configuration dense) de 4.8 mètres est enregistrée avec le système 1, et de 3.5 mètres avec le système 2. Avec le tag Zephyr 2, la portée avec les deux systèmes 1 et 2, est de 2.5 mètres. Ensuite, le taux de détection est calculé pour une distance de 1.5 mètre entre le rayon et les interrogateurs. Le graphe 2.12 montre clairement l'amélioration de la détection lorsque un tag avec une capacité d'auto-adaptation est utilisé pour les agencements denses.

L'analyse des résultats montre clairement que pour améliorer les performances d'un système le nombre d'interrogateurs présents dans un milieu, leurs positions, et les interactions entre eux, sont des éléments cruciaux à étudier avant le déploiement de la solution. Tous ces éléments seront revisités en chapitre 5 et leurs contributions aux performances d'un système RFID sont isolées et étudiées pour inspirer une nouvelle solution d'inventaire optimisée.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre le principe de fonctionnement d'un système RFID passif est détaillé, tout en explorant l'architecture du tag et du lecteur, la communication passive sur les liaisons descendante et montante et la contribution de chaque composant aux performances globales du système.

Ensuite, un état de l'art est réalisé afin d'étudier l'avancement de la recherche sur la conception du tag (l'élément passif du système) d'un part, et sur l'amélioration des performances en détection du système globale d'autre part. L'état de l'art autour la conception du tag passif a révélé un écart important entre l'actualité de la recherche et les solutions disponibles sur le marché. En ce qui concerne la fabrication des antennes, les techniques d'impressions très populaire sont toujours pas suffisamment fiable pour être commercialisées. Les innovations proposées autour des techniques de conception pourraient entraîner des coûts importants ou des dégradations d'autres aspects de performances. Néanmoins, il est important de noter que la recherche autour la conception des antennes pour plusieurs surfaces ou des antennes intégrables peut largement profiter les performances d'un système. Finalement, par rapport à la caractérisation, nous préconisons qu'elle n'est pas assez développée et ne prend pas compte des facteurs d'impact identifiés dans un milieu réel.

En ce qui concerne l'amélioration de la détection, la proposition de l'auto-adaptation du tag en fonction de divers variables—disponible sur le marché—constitue une solution d'amélioration de la détection qui peut aider à pallier l'impact de quelque facteur du milieu réel. D'autre part, les solutions de lecture sont explorées tout en concentrant sur les antennes et l'interopérabilité de plusieurs points de lectures. Parmi différents types de systèmes comme les étagères intelligentes, les robots et les systèmes fixes au plafond, nous avons identifié la dernière comme la solution la plus convenable à notre cas d'usage. L'utilisation des points de lecture fixe au plafond dans le champ lointain, permet leurs exploitations pour réaliser des opérations d'inventaire et de localisation dans un magasin tout en réduisant l'encombrement au niveau du sol. Néanmoins, l'amélioration de la détec-

tion est nécessaire puisque nos expériences nous ont mené à déduire des taux de détection maximale de 82% pour un rayon moins dense.

Chapitre 3

Les tags UHF passifs

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons exploré les diverses techniques de conception, fabrication et de caractérisation utilisées pour les tags RFID UHF passifs. Nous avons conclu, une certaine incohérence entre l'état actuel de la recherche et les solutions commercialisées. Pour cela, dans ce chapitre, nous souhaitons aborder cette problématique en focalisant sur les tags du marché et en proposant des solutions à faibles coûts qui se basent sur des techniques validées et commercialisées.

Dans cet objectif, nous étudions les variations de la sensibilité des tags en espace libre puis en fonction de plusieurs facteurs d'un milieu réel. Suite à l'analyse approfondie de ces variations, l'objectif est d'isoler les facteurs d'impact contribuant à ces variations et d'identifier et de modéliser l'effet le plus impactant afin de l'anticiper lors de la conception de l'antenne d'un tag. Nous prétendons que la problématique de conception d'un tag RFID passif adapté à des environnements denses en tags et en supports, est liée à la stabilisation des performances de son antenne.

3.2 Les performances d'un tag passif

Les tags passifs sont constitués d'un circuit intégré connecté à une antenne miniaturisée et consolidés par un support. Ils communiquent avec le lecteur en émettant un signal rétro-modulé portant les informations stockées dans la puce, lorsque une puissance minimale est fournie. Cette puissance est théoriquement déterminée par la sensibilité du circuit intégré et l'adaptation entre la puce et l'antenne miniaturisée.

Un tag passif est considéré activé s'il est placé dans le champ du lecteur et quand il reçoit suffisamment de puissance pour que sa puce se réveille. Dans un système RFID UHF passif, la liaison descendante (lecteur vers tag) est limitée par la sensibilité du tag. Cette dernière est déterminée par la sensibilité du couple puce-antenne. Dans un tel système, la puissance apparente rayonnée (PAR) nécessaire pour activer le tag est donnée par la formule de Friis dans l'équation 3.1a.

$$PAR = \frac{P_{tag}}{\alpha} \quad (3.1a)$$

$$P_{tag} = P_{puce} \cdot G_{tag} \cdot \tau \cdot p \quad (3.1b)$$

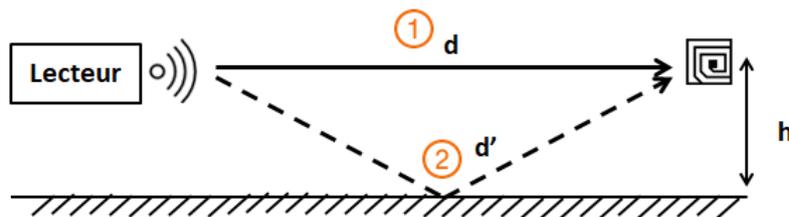


FIGURE 3.1 – Schéma montrant les deux chemins entre le lecteur et le tag

En équation 3.1a, P_{tag} est la puissance nécessaire à la position du tag, PAR est le produit du Gain de l'antenne du lecteur par la puissance émise, et α (3.2a) représente l'affaiblissement du chemin entre le lecteur et le tag. Quant à la sensibilité du tag (P_{tag}), elle dépend de la désadaptation puce-antenne (τ), de la sensibilité de la puce (P_{puce}), du gain de l'antenne du tag (G_{tag}) et de p , qui représente les pertes diverses comme la polarisation et l'angle d'incidence de l'onde. Comme l'ensemble de ces deux équations le montre, la sensibilité totale du tag (P_{tag}) dépend de la sensibilité de la puce et de l'antenne, ainsi que de la désadaptation entre les deux composants. De plus, lorsque la puissance nécessaire à la position du tag augmente, la puissance apparente rayonnée nécessaire augmente. Lorsque la valeur maximale de la PAR est limitée à 2 W en Europe par les réglementations régionales [34], deux facteurs peuvent soit améliorer, soit détériorer les performances du système : la sensibilité du tag et les pertes liées à la propagation. En contraste avec les pertes liées à la propagation qui dépendent entièrement du milieu, la sensibilité du tag peut être optimisée. En examinant l'équation 3.1b, nous constatons qu'en vue de la limitation de l'offre des puces et leurs sensibilités acceptable (-18 dBm), l'antenne est le composant le plus intéressant pour l'optimisation tout en respectant les coûts et la conformité aux normes GS1. Dans l'état actuel de la technologie, les antennes des tags—à cause de leur tailles réduites et les exigences de fonctionnement sur une bande de 20 MHz—impliquent une sensibilité totale du tag inférieure à la sensibilité théorique de la puce.

$$\alpha_{EspaceLibre} = \left(\frac{\lambda}{4.\pi.d}\right)^2 \quad (3.2a)$$

$$\alpha_{MilieuReel} = \left(\frac{\lambda}{4.\pi.d}\right)^2 \left|1 - \frac{d}{d'} \exp^{-jk(d'-d)}\right| \quad (3.2b)$$

En revenant à l'affaiblissement du chemin de propagation entre le lecteur et le tag, un espace libre est considéré lorsque le milieu de lecture est contrôlé (chambre anéchoïque par exemple). Autrement, dans un milieu réel, lorsque plusieurs chemins de liaison existent entre le lecteur et le tag, les pertes sur le chemin seront exprimées en fonction du coefficient de réflexions de chaque objet réfléchissant, la longueur de chaque chemin et le nombre total de chemins [32]. Pour simplifier, dans un milieu réel, nous considérons un modèle à deux chemins (chemin direct et chemin réfléchi par le sol) comme le montre la figure 3.1. Les pertes sur le chemin dans un milieu contrôlé et dans un milieu réel seront alors calculées par la formule des pertes en espace libre par l'équation 3.2a et la formule des pertes pour 2 chemins indiquée par l'équation 3.2b pour une réflexion idéale au niveau sol.

3.3 Limitations

A partir des différentes études analysées dans l'état de l'art en chapitre 2, il est possible de constater plusieurs contraintes qui peuvent limiter les performances des tags passifs dans un milieu réel. Puisque le tag est un élément crucial du système RFID passif, il est important d'identifier ces contraintes afin de proposer des solutions qui peuvent améliorer les performances globales du système. Dans ce chapitre nous nous concentrons uniquement sur l'antenne du tag et sa contribution aux performances. Les fonctionnalités de la puce et l'amélioration de ses performances seront abordées dans le chapitre 5 dans le cadre de l'amélioration de la détection des tags et de la communication lecteur-tag.

En ce qui concerne la conception des antennes nous identifions trois types de contraintes clés : les contraintes mécaniques, qui concernent la flexibilité du tag et sa taille ; les contraintes opérationnelles, liées à la fréquence d'opération, la distance de lecture maximale et l'adaptation du tag à différents produits ; les contraintes de coût à respecter afin de déployer le tag à grande échelle.

D'autre part, nous constatons que la caractérisation du tag n'a pas évolué suffisamment pour répondre aux besoins d'un déploiement massif. Lorsque les types de produits, la complexité de leur composition et les agencement deviennent plus nombreux et plus diversifiés, des méthodes de mesures de performances doivent être développées afin d'assurer des performances acceptables du système vis-à-vis l'application visée. L'inclusion des facteurs d'impact dans un milieu réel lors de la mesure des performances des tags n'est pas suffisamment développée afin de prévoir les dégradations éventuelles lors du déploiement.

3.4 Analyse des antennes des tags UHF RFID

3.4.1 L'adaptation T-match

Une conception réussie d'une antenne nécessite un respect du cahier de charge et un transfert d'énergie optimal entre la puce et l'antenne. Pour satisfaire cette condition, l'impédance de l'antenne doit être égale à l'impédance complexe conjuguée de la puce [143]. Puisque les impédances d'entrées des puces sont fortement capacitives, il est donc nécessaire d'augmenter la réactance inductive du dipôle. Ceci n'est pas évident, surtout dans un contexte où les faibles coûts de fabrication et les tailles réduites sont deux exigences cruciales à l'adoption d'un tag dans un déploiement massif. D'un côté, l'utilisation des éléments localisés pour adapter l'impédance de l'antenne à celle de la puce, n'est pas réalisable à cause des coûts élevés. De l'autre côté, la miniaturisation des antennes implique une diminution de l'inductance du dipôle [144]. Compte tenu de tous ces facteurs, un circuit d'adaptation intégré à l'antenne imprimée, est la solution adoptée par les concepteurs. En [144], plusieurs techniques d'adaptation sont passées en revues. En observant les tags disponibles sur le marché, le choix de technique le plus populaire est le «*T-match*». Ceci est dû à sa simplicité et son efficacité en termes de coût et de taille [145].

Cette technique consiste à introduire un stub court-circuit au centre du dipôle afin de changer l'impédance d'entrée de l'antenne. Lorsque cela augmente la réactance de l'antenne, l'ajout d'un stub décroît sa résistance [146]. Il est important de préciser que l'adaptation par stub n'est valable que pour une bande de fréquence très étroite. En [144], les équations de l'impédance de l'entrée d'une antenne avec le stub sont étudiées, et l'impact majeur de la boucle sur l'impédance totale de l'antenne est prouvé. Ces travaux sont révisés en [147], et surtout le rapport de la distribution du courant (α) entre le

dipôle et la boucle. Suivant cette nouvelle étude, quelques lignes directrices concernant la conception de boucles «*T-match*» sont mises en avance, nous en citons deux :

- L'augmentation de la largeur de la boucle qui, incrémente la résistance et la réactance d'entrée de l'antenne.
- L'augmentation du rapport de la distribution du courant (α), limite la dépendance de l'impédance de l'antenne à celle du dipôle, mais peut causer une divergence de la réactance le long de la ligne. Ajouté à cela, la limitation de la variation de l'impédance en fonction de la fréquence. Pour cela, il est généralement recommandé de minimiser la valeur de α

Pour mieux comprendre la procédure de conception et le rôle de la boucle, deux tags du marché sont simulés dans la partie suivante afin d'étudier les variations d'impédance de chacun de ces composants en fonction de la fréquence.

3.4.2 Dissection d'un tag du marché

Afin d'étudier davantage cette technique et de comprendre sa contribution aux performances du tag, un tag du marché est considéré. Le tag choisi a une antenne simple composée d'un dipôle replié et d'une boucle «*T-match*». Le «*Web G2iL*» fourni par Smarttrac [148], est conçu avec une puce «*G2iL*» fournie par NXP [51].



FIGURE 3.2 – Le schéma du Web G2iL

La figure 3.2 montre le schéma de l'antenne du tag considéré. Comme il est illustré sur la figure, le dipôle replié est connecté à la puce à travers la boucle d'adaptation placée au centre. Dans l'objectif de comprendre la contribution de la boucle et du dipôle, l'antenne du tag est simulée sous CST Microwave Studio [149] en trois étapes :

1. La réponse du dipôle sans la boucle.
2. La réponse de la boucle sans le dipôle.
3. La réponse de l'antenne entière.

A partir de la réponse simulée, les impédances réelles et imaginaires sont extraites. Le coefficient de réflexion (S_{11}) est initialement simulé pour un port d'entrée d'une impédance égale à 50 Ohm. En utilisant l'option schématique de CST, l'antenne est connectée à un port d'impédance égale à celle de la puce afin de réadapter le coefficient de réflexion.

En premier lieu, les impédances réelles conjuguées de chaque composant sont analysées. La figure 3.3 montre les deux graphes illustrant l'évaluation de l'impédance complexe dans une bande de fréquence entre 500 MHz et 1.5 GHz. Sur la figure 3.3a, les impédances réelles du dipôle seul, de la boucle seule et de l'antenne entière sont illustrées. La figure 3.3b, montre les impédances imaginaires correspondants en plus de l'impédance imaginaire de la puce. Comme l'indique sa fiche technique, son impédance d'entrée varie entre $25 - j237$, $23 - j224$ et $21 - j216$ Ohm à 866 MHz, 915 MHz et 953 MHz respectivement. Afin de représenter les trois points sur le graphique, la courbe de régression linéaire est illustrée.

En observant les courbes, la résistance du dipôle toujours positive, s'accroît en fonction de la fréquence. Or, sa réactance qui augmente en fonction de la fréquence devient

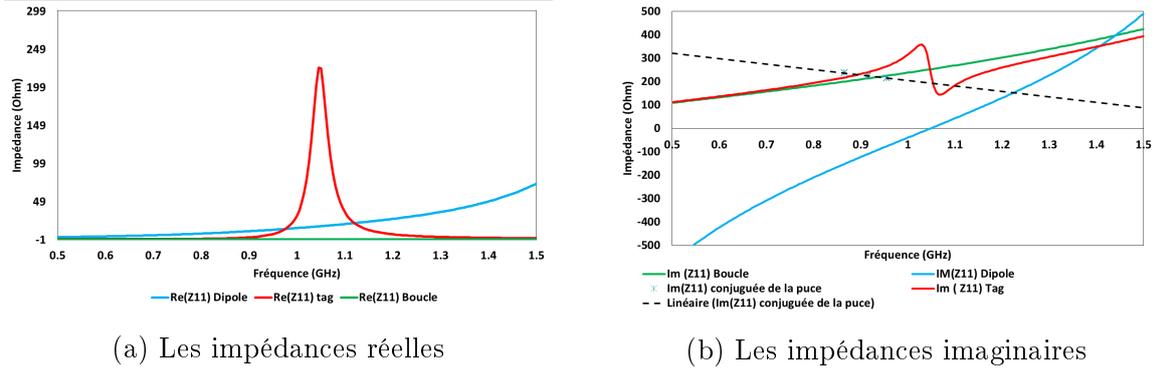


FIGURE 3.3 – Les impédances réelles et imaginaires de différents composants de l’antenne

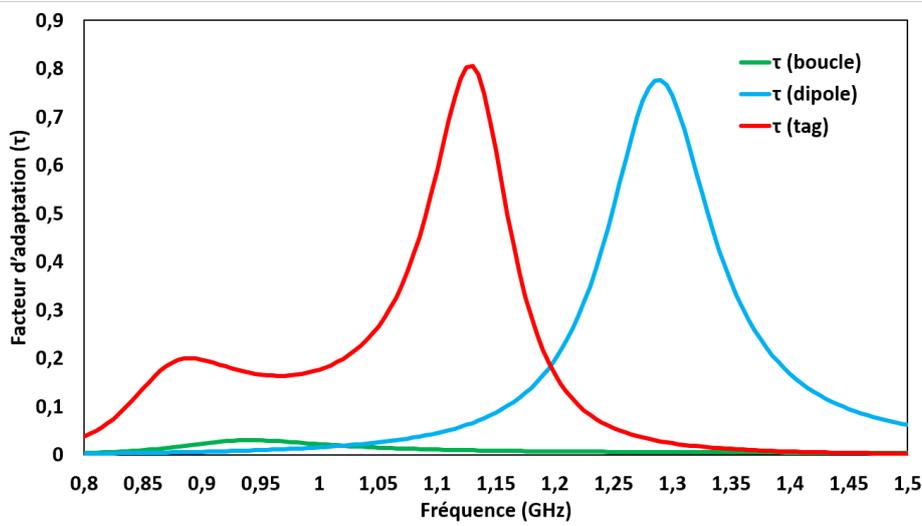


FIGURE 3.4 – L’adaptation entre la puce et les composants de l’antenne

inductive à partir de 1050 MHz. La boucle «*T-match*» se comporte comme une boucle inductive à une résistance faible inférieure à la résistance du dipôle quelle que soit la fréquence. Enfin, les courbes rouges qui représentent les impédances de l’antenne du tag, confirment le comportement inductif de l’antenne entière sur la totalité de la bande de fréquence. Un pic en résistance est notable à 1050 MHz, cette caractéristique est observée aussi en [146]. De plus, nous remarquons que la fréquence de ce pic correspond au point d’inflexion de la courbe d’impédance imaginaire de l’antenne du tag. De même c’est la fréquence à partir de laquelle, le comportement du dipôle replié devient inductif. Généralement, il est confirmé que dans la bande de fréquence d’intérêt, qui s’étend entre 840 et 960 MHz, la boucle «*T-match*» augmente l’inductance du dipôle tout en diminuant sa résistance.

Afin de mesurer l’impact de cette technique sur les performances finales du tag, la distance de lecture maximale est calculée à partir des résultats de la simulation. Cela est réalisé en injectant le facteur d’adaptation simulé dans l’équation de Friis. Pour extraire ce facteur depuis la simulation, deux méthodes de calcul sont possibles.

$$\tau = \frac{4R_a R_p}{(Z_a + Z_p)^2} \quad (3.3a)$$

$$\tau = 1 - |S_{11}|^2 \quad (3.3b)$$

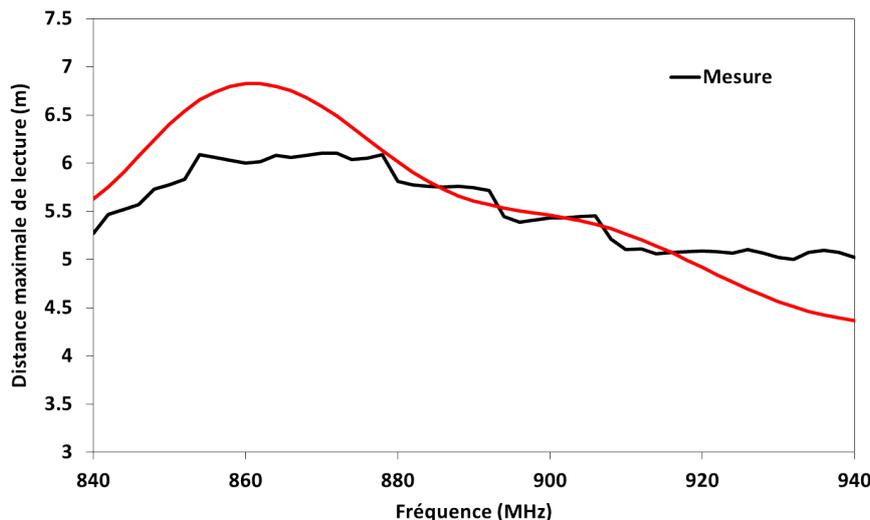


FIGURE 3.5 – La distance maximale d’activation

Dans l’équation 3.3a, le facteur d’adaptation (τ) est calculé à partir des impédances de la puce et de l’antenne du tag : R_a et R_p sont les résistances respectives de l’antenne et de la puce et Z_a et Z_p les impédances complexes correspondantes. Dans l’équation 3.3b, ce facteur est calculé directement à partir du coefficient de réflexion linéaire réadapté pour une impédance d’entrée égale à celle de la puce.

Les courbes de la figure 3.4 correspondent aux trois facteurs d’adaptation : entre dipôle puce, entre boucle et puce et entre antenne entière et puce. Ces résultats montrent que si le dipôle seul est considéré, le facteur d’adaptation est maximal à 1,3 GHz. Cette valeur correspond à la fréquence de résonance d’un dipôle demi-onde d’une longueur de 115 mm, presque égale à la longueur totale du dipôle du *Web G2iL* ($\approx 109mm$). Le facteur d’adaptation entre la boucle et la puce est très faible avec un maximum à 900 MHz, qui correspond à l’intersection de sa courbe d’impédance imaginaire avec la courbe de l’impédance imaginaire conjuguée de la puce. La faible adaptation est due à la résistance très faible de la boucle. En ce qui concerne l’adaptation globale entre l’antenne et la puce, deux pics se manifestent à 875 MHz et 1130 MHz. Le premier correspond à l’intersection des courbes d’impédances avant le point d’inflexion et le deuxième aux intersections après ce point. Il est important de noter que ce facteur d’adaptation est maximal lorsque les valeurs des résistances sont maximales ; ce qui explique le décalage entre les intersections des impédances imaginaires et les pics d’adaptation.

Finalement, le facteur d’adaptation correspondant à l’antenne du tag ($\tau(tag)$) est injecté dans la formule de Friis. La courbe de la distance maximale est alors calculée pour une puissance PAR maximale égale à 2 Watt et un alignement parfait entre l’antenne de l’émission et celle du tag. Afin de comparer aux mesures, la bande de fréquence est réduite. Les résultats dans la figure 3.5 montrent la cohérence entre la simulation et la mesure avec une distance maximale à 875 MHz. A cette fréquence, l’adaptation puce-antenne est maximale. En mesure, le tag est moins performant qu’en simulation. Ceci peut être dû à des erreurs de mesure, ou plus probablement aux pertes ohmiques subies lors de la fabrication de l’antenne. Ces pertes augmentent lorsque l’épaisseur de métallisation de l’antenne fabriquée est diminuée [150].

3.4.3 Effet de la désadaptation

Les simulations ci-dessus montrent l'importance de la boucle et de la maîtrise de son impédance pour réaliser une adaptation optimale entre le dipôle et la puce. Afin de garantir un transfert optimal d'énergie, l'impédance de l'antenne entière doit être proche ou égale de l'impédance conjuguée de la puce.

Lorsqu'il est possible de respecter cette condition en simulation et même d'anticiper les changements de fréquence dus à la fabrication avec une configuration précise d'une imprimante, d'autres facteurs sont imprévisibles et peuvent impacter cette impédance. En réalité, ces tags ne sont pas destinés à un usage en espace libre mais dans un milieu réel de type commercial, plus particulièrement pour des produits en textile. Le matériau du produit auquel le tag est attaché, sa forme ainsi que leurs agencements denses peuvent sévèrement affecter l'impédance de l'antenne. Suite à ce changement d'impédance, l'adaptation entre la puce et l'antenne est impactée et le transfert d'énergie n'est plus optimal à la fréquence visée lors de la conception. La sensibilité de la fréquence d'adaptation est principalement due à l'utilisation de la boucle «*T-match*» comme adaptateur, qui est caractérisée par sa bande très étroite.

La conséquence directe de la désadaptation est l'augmentation du coefficient de réflexion entre l'antenne et le tag. Ceci implique la dégradation de la sensibilité du tag qui impacte directement la distance de lecture maximale sur la liaison montante, selon l'équation de Friis.

3.5 Technique de caractérisation d'un tag

3.5.1 Pourquoi caractériser un tag ?

En vue de la diversité en forme et en matériau des produits et l'intensification de l'agencement afin de mieux exploiter les espaces disponibles, le comportement d'un tag n'est pas prévisible en se basant seulement sur sa sensibilité en espace libre (ou la distance maximale de lecture) fournie par sa fiche technique. Comme établi précédemment, ces facteurs affectent le transfert d'énergie entre l'antenne et la puce, et par conséquent, la distance de lecture maximale. Afin de trouver le tag le moins affecté par ces facteurs il est important de caractériser ses performances avant son déploiement.

Même si d'autres facteurs comme l'humidité, la température et d'autres liés à la fabrication de l'antenne du tag [151] [150], peuvent affecter ses performances, nous nous intéressons dans ce chapitre à la caractérisation des performances radio-fréquence du tag en fonction des facteurs liés uniquement au déploiement. Ces facteurs sont privilégiés dans notre étude à cause de leur impact direct et instantané et à la variation de leurs effets en fonction du type de tag caractérisé. Au contraire, les autres facteurs environnementaux (humidité et température) ont un impact qui n'est pas instantané et son effet reste du même ordre pour tous les tags composés du même matériau.

3.5.2 Plate-formes de caractérisation

Afin de caractériser les performances radio-fréquences du tag, un équipement de mesure est nécessaire. Dans le document rédigé par GS1 [152], qui définit les méthodes de test et les paramètres de performance d'un tag passif, un banc de test fonctionnel est proposé.

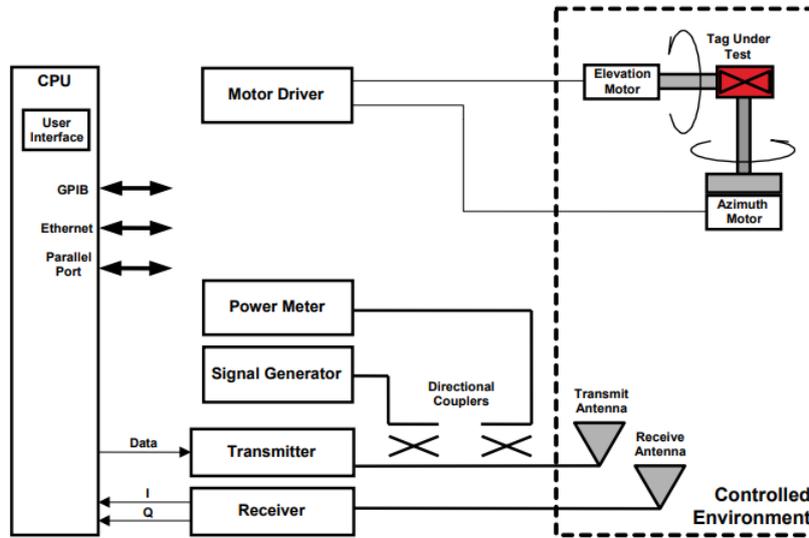


FIGURE 3.6 – Le schéma bloc du banc de test

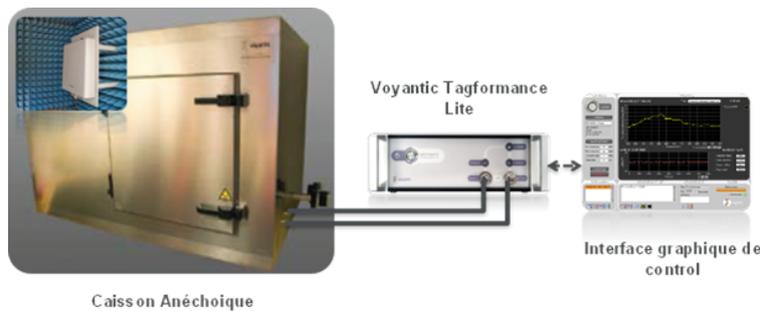


FIGURE 3.7 – Équipement certifié de caractérisation

Le schéma de ce banc est montré sur la figure 3.6. Il est important de préciser que les méthodes et les conditions de test respectent la norme "ISO/IEC TR 18046-3".

Le fonctionnement du banc de caractérisation est le suivant : les données d'émission sont générées par le «CPU» et transférées vers le transmetteur où elles sont codées pour former un signal RFID [152]. Ce signal (de la liaison descendante) est rayonné vers le tag à travers l'antenne d'émission.

L'étiquette est montée sur un support solide attaché à un plateau composé d'un matériau non réfléchissant et non conducteur. La constante diélectrique relative du matériau du mât doit être inférieure à 6,0. L'orientation par défaut du tag sur le plateau doit être à 0° en azimuth et en élévation. Il peut ensuite être pivoté indépendamment en azimuth (de gauche à droite par rapport à l'antenne émettrice) ou en élévation. Les axes de rotation azimuth et élévation sont respectivement verticaux et horizontaux.

Le signal rétro-modulé du tag (liaison montante) est collecté par l'antenne de réception et passe dans le récepteur. le récepteur doit être un démodulateur en quadrature. Ce signal est filtré puis transposé à la bande de base pour traitement. A partir des données I et Q, le «CPU» sera capable de calculer la phase et l'amplitude du signal. Un processeur rapide ou FPGA peut être nécessaire pour compléter ces opérations en temps réel.

Pour réaliser nos études, un équipement commercial conforme aux spécifications GS1 et conforme à la norme "ISO/IEC TR 18046-3" est utilisé. Comme il est illustré sur la figure

3.7, le banc de test est composé d'un environnement contrôlé (le caisson anéchoïque), un processeur/générateur de signaux (Tagformance Lite) et enfin, un interface graphique pour le pilotage. Il est important de préciser qu'au lieu d'utiliser deux antennes pour l'émission et la réception, un coupleur directionnel est utilisé pour gérer les deux opérations avec la même antenne. Une antenne planaire et à polarisation linéaire (Ref : Voyantic AN-FF-SR) d'une bande passante entre 800 et 1000 MHz et d'un gain de 8 dBi est utilisée.

L'évolution la puissance émise par le «*Voyantic*», permet de trouver la puissance PAR seuil, à partir de laquelle, le tag est activé. A partir de cette puissance, la sensibilité du tag pourrait-être déduite sachant que la distance de séparation entre le tag et l'antenne d'émission et les pertes des câbles sont connues. Enfin, la distance maximale de lecture peut être calculée pour une puissance PAR maximale de 2 Watt à partir de la sensibilité déduite (voir équation de Friis).

3.5.3 Performances des tags dans un milieu réel

3.5.3.1 Performances des tags en espace libre

Les facteurs affectant les performances d'un tag dans un milieu réel sont nombreux. L'indicateur de performance le plus important à surveiller est la sensibilité du tag et donc, sa distance de lecture maximale. Même s'il existe des cas où un tag est rendu complètement indétectable à cause de ces facteurs, dans la plupart des cas ils vont seulement diminuer la distance de lecture. Avant d'identifier ces facteurs et de mesurer leur impact, il est utile de caractériser le tag seul dans un environnement contrôlé afin d'établir un repère des distances maximales de lecture sans l'impact des facteurs extérieurs au tag.

Onze tags du marché, de tailles différentes, ont été sélectionnés. Un catalogue de tags indiquant leurs tailles et leurs formes est disponibles en annexe A. Chacun des tags est introduit seul dans le caisson anéchoïque à une distance de 50 centimètres de l'antenne de l'interrogateur. En utilisant l'équipement Voyantic, la distance maximale du tag à une puissance PAR maximale de 2 Watt est mesurée à deux fréquences différentes.

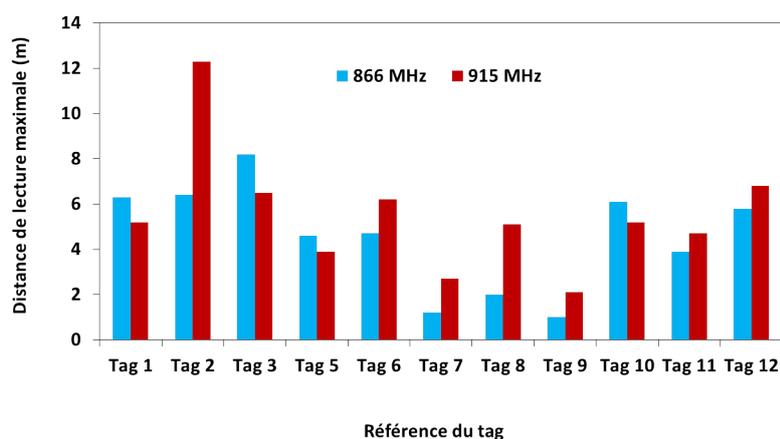


FIGURE 3.8 – Performances des tags en espace libre

En observant les résultats illustrés dans la figure 3.8, il est clair que les distances maximales peuvent changer considérablement entre les deux fréquences. Ceci est dû au fait qu'un tag est destiné pour un usage dans une zone géographique précise, d'où l'optimisation de ces performances à la fréquence correspondante. Au contraire, des tags comme

le Web G2iL, GB4 et GB1E (tags 1, tag 11 et tag 10 en annexeA) ont des distances de lecture très proches pour les deux fréquences ; ce qui indique une amélioration de la largeur de la bande de l'antenne. Cette amélioration se fait souvent au détriment de la distance de lecture maximale à une fréquence précise. Un autre paramètre qui impacte majoritairement les performances du tag est sa taille. En classant en ordre décroissant les tag montrés dans la figure 3.8, selon la distance maximale réalisée (parmi les deux fréquences), cette relation devient plus évidente : lorsque la dimension de l'antenne diminue (diminuant ainsi sa résistance et son gain), la distance maximale diminue.

3.5.3.2 Observations dans un milieu de type magasin

Malgré l'importance de la caractérisation d'un tag seul, cette information n'est pas suffisante pour déduire ses performances dans un milieu réel donné. Afin d'identifier les facteurs qui peuvent impacter les performances du tag dans un milieu réel, un examen du déploiement des tags dans un milieu de type magasin est nécessaire. Dans le contexte de cette étude, nous considérons un magasin d'articles de sport de la marque Decathlon.

La figure 3.9 montre huit sous-figures représentant huit configurations de produits. La figure 3.9a montre des paires de chaussures. Le tag est collé à la semelle à l'intérieur de l'une des deux chaussures. Dans la figure 3.9b, le tag est attaché à l'intérieur du sac à dos sur le côté, sans aucun contact direct avec le matériau d'un sac. Dans les figures 3.9c, 3.9d, et 3.9e, le tag est collé sur l'étiquette autour du produit. Dans de telles configurations, le tag peut être courbé pour l'adapter à la forme du produit. Enfin, les figures 3.9f, 3.9g, et 3.9h montrent des produits où les tags sont collés sur du papier cartonné sans aucune modification de leur forme. Cependant, les tags se trouvent à proximité l'un de l'autre.



FIGURE 3.9 – Configuration des produits tagués dans un magasin

En fonction de ces observations, nous identifions quatre facteurs qui peuvent affecter les performances des tags. Premièrement, lorsqu'un tag est collé directement sur le produit, le matériau de ce dernier peut changer les performances du tag à cause du changement de la permittivité relative ou de la connectivité du support de l'antenne ; nous citons par exemples les bouteilles en plastique montrés dans la figure 3.9c. Deuxièmement, la forme de produit peut affecter le tag lorsqu'il est courbé ou plié, modifiant ainsi la forme de l'antenne du tag ; comme montré sur les figures 3.9c, 3.9d, 3.9e. Troisièmement, lorsque les tags sont placés à proximité l'un de l'autre, la proximité de leurs antennes et

les interférences lors d'un cycle d'inventaire peut être un autre facteur d'impact. Finalement, l'agencement de produits dans des structures métalliques différentes. C'est le cas pour les broches, les plaques et les paniers. Ces agencements peuvent aussi impacter les performances à cause de la composition métallique des structures et les configurations imposées par leurs formes. Néanmoins, ce facteur n'est pas considéré à cet étape puisqu'il est spécifique à un magasin Décathlon.

3.5.3.3 Isolation des facteurs pertinents

Après l'examen du déploiement des tags dans un magasin, il est possible d'identifier trois facteurs : le matériau constituant le produit, sa forme et finalement l'agencement de plusieurs produits dans une configuration dense. Pour reproduire l'effet du matériau de produit, plusieurs plaques de permittivités relatives différentes et d'une épaisseur d'un centimètre sont utilisées. En caractérisant le tag dans le caisson anéchoïque au-dessous d'une plaque, il est possible de déduire les écarts causés par le matériau.

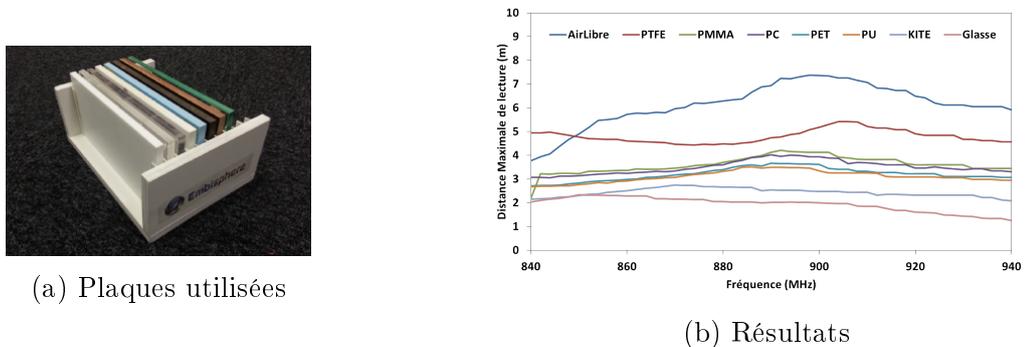


FIGURE 3.10 – Performances d'un tag attaché à plusieurs matériaux

Le tag 1020349E (tag 12 en annexe A) est considéré et sa distance maximale de lecture est mesurée dans la bande de fréquence entre 840 et 960 MHz. Le tag est caractérisé avec 7 matériaux différents constituant le support. La permittivité relative varie entre 2,1 (Polytétrafluoroéthylène ou PTFE) et 12,4 (Verre). Les résultats illustrés sur la figure 3.10, montrent que la meilleure distance de lecture est obtenue en espace libre. Autre que l'air, l'effet du matériau est d'autant plus négatif que sa permittivité est élevée. En effet, la permittivité du matériau modifie l'impédance de l'antenne, ce qui cause une désadaptation entre cette dernière et la puce, résultant en une dégradation de la sensibilité du tag. Les résultats montrent clairement que ces désadaptations ne sont pas anticipées lors de la conception de l'antenne de ce type particulier de tag.

Pour le reste des essais, seule la plaque en Polyuréthane (PU) d'une permittivité relative de 4 est considérée. Ce matériau est choisi pour sa permittivité relative capable d'émuler la matière des produits (sans impacter la forme) à base de textile. La valeur de la permittivité du textile peut varier entre 1 et 4 pour du Polyester et du Coton respectivement [153]. Sur la figure 3.11, la différence entre la distance de lecture du tag avec le matériau et sa distance de lecture en espace libre est affichée pour 7 tags de tailles différentes.

Les résultats montrent que la majorité des tags ont des écarts positifs dans la bande de fréquence considérée ; ceci signifie que leurs performances s'améliorent lorsqu'ils sont attachés aux produits. Cela implique que la désadaptation causée par la permittivité du textile est prévue lors des premières phases de conception pour les tags Web G2iL (tag 1),

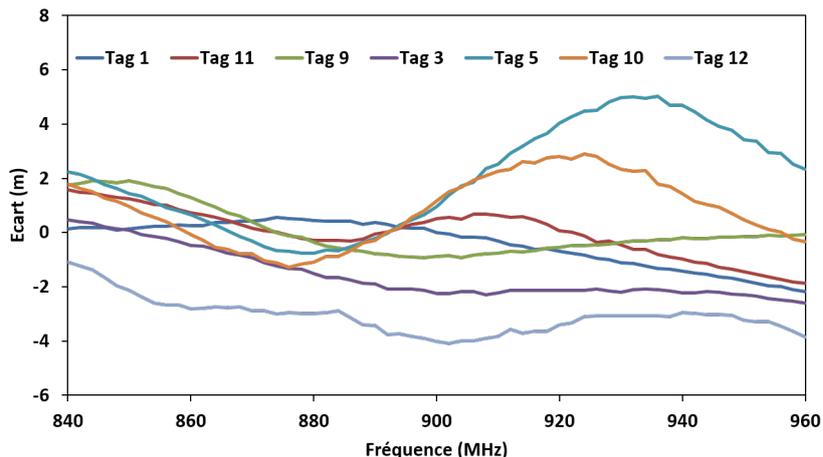


FIGURE 3.11 – Performances d’un tag attaché à un matériau en PU

GB4 (tag 11), AD171 (tag 9), GB1E (tag 10) et AD320 (tag 5). Plus particulièrement, les tags 1 et 10 sont optimisés pour un déploiement sur textile dans des régions hors l’Europe. Au contraire, les tags 3 (Zephyr 1) et 12 sont conçus sans tenir compte de ce facteur, ce qui explique les écarts de performances (différences négatives).

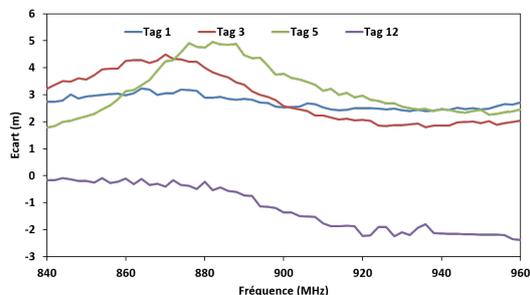
Un autre facteur d’impact causé par l’attachement d’un tag à un produit est la courbure. Comme il est montré dans la partie précédente, lorsque un tag est attaché à un produit, il est possible que sa forme soit modifiée. Pour cela, nous préparons deux mousses de formes différentes. La première constitue un demi-cercle et la deuxième un triangle équilatéral pour émuler une courbure plus aiguë. Les figures 3.12a et 3.12b montrent les deux formes.



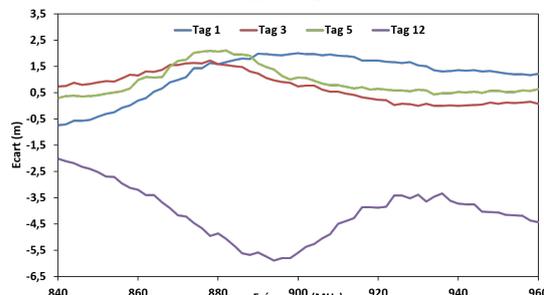
(a) Demi-cercle



(b) Triangle équilatéral



(c) Courbure de 180°



(d) Courbure de 60°

FIGURE 3.12 – Performances d’un tag courbé

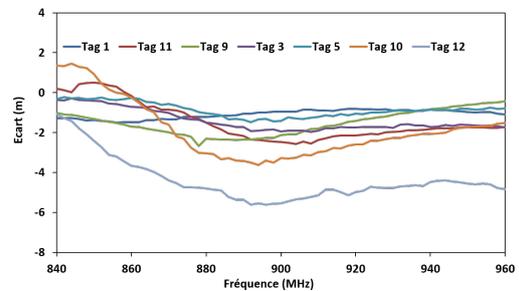
Les résultats montrent la différence entre la distance maximale de lecture lorsque le tag est courbé et la distance maximale mesurée en espace libre. Sur la figure 3.12c, les

résultats correspondants à une courbure légère des tags sont illustrés. Pour les trois tags, 1 (Web), 3 (Zephyr1) et 5 (AD320), une amélioration de la distance de lecture maximale est notée. Toutefois, pour le tag 12 (Belt), une perte en performance est observée. Ces pertes sont dues à la forme de l'antenne de ce dernier : puisque sa longueur est de 70 mm, supérieure à celles des autres tags, la courbure est plus impactante. Lorsque l'angle de courbure devient plus aigu, les résultats illustrés sur la figure 3.12d, montrent une amélioration plus faible relativement aux résultats de la figure 3.12c. De même, en ce qui concerne le tag 12, les pertes deviennent plus importantes. Lorsqu'au début du chapitre, des études autour de la courbure du tag sont présentées, la stabilisation des performances du tag pour ces cas n'est pas nécessaire puisque les formes de produits ne causent pas des courbures très aiguës. Pour pallier cette problématique le choix du tag correspondant à la forme du produit est suffisant.

Enfin, le dernier facteur identifié est la proximité. Plus spécifiquement, la présence de plusieurs tags très proches l'un de l'autre dans des configurations denses est étudiée. Afin de reproduire ce phénomène un tag est caractérisé dans le caisson anéchoïque lorsque quatre tags sont placés au dessus, séparés de 5 mm, l'un de l'autre. Une séparation de 5 mm est le pire cas possible trouvé lors des observations du déploiement dans un magasin. Des mousses non-réfléchissantes et non-conductrices d'une épaisseur de 5 mm sont utilisées comme séparateurs entre deux tags (figure 3.13a). Seul le tag du bas est caractérisé et les autres tags ne sont pas interrogés durant la totalité de l'opération. La figure 3.13b montre une diminution de la distance de lecture maximale d'un tag, contrairement aux facteurs d'impact analysés ci-dessus. Tous les tags considérés pour cette étude sont négativement impactés par la présence d'autres tags à proximité, quelle que soit leur taille, puce ou forme.



(a) Empilement de 5 tags



(b) Ecarts de performances pour un seul tag

FIGURE 3.13 – Performances d'un tag parmi un empilement de 5

Facteur d'impact	Dégradation
Matériau	-8%
Courbure 180°	+35%
Courbure 60°	-6%
Proximité	-49%

Tableau 3.1 – Comparaison de la dégradation de la distance maximale de lecture causée par chaque facteur d'impact

En résumé, le tableau 3.1 présente la dégradation de la distance maximale de lecture causée par chaque facteur d'impact séparément. Les valeurs présentées dans le tableau

sont les moyennes des dégradations de tous les tags entre 840 et 960 MHz par rapport à la distance maximale de lecture mesurée en espace libre. Ces résultats confirment l'impact négatif de ces facteurs et met en évidence la dégradation majeure des performances causée par la proximité des tags.

3.6 L'adaptation d'un tag à son environnement

3.6.1 Observation de l'effet de la proximité

Suite à l'isolation des facteurs d'impact et à la mesure de leurs effets sur les performances d'un tag, nous constatons que la proximité des tags, les uns des autres, est le facteur le plus dégradant. Ce facteur, au contraire des deux autres, a un impact négatif sur les performances d'un tag, quel que soit le tag et la fréquence de lecture utilisés. Cette dégradation est en plus remarquée sur le terrain. Lors d'un inventaire manuel (utilisation d'un lecteur de type "raquette"), il est observé qu'il est plus difficile de lire l'intégralité des tags dans une configuration où les tags sont très proches.

Afin de reproduire ces résultats, un lecteur portable (figure 3.14a) conçu spécifiquement pour l'inventaire manuel est choisi pour mesurer la distance maximale de lecture d'un tag à 23 dBm. L'emballage d'un jeu de fléchettes montré sur la figure 3.14b, est sélectionné comme le produit cible de cette expérience. Ce produit est choisi grâce à son emballage constitué d'un carton de faible épaisseur. Cela signifie que l'effet du matériau sur le produit et la séparation entre les deux tags sont minimales. Le tag est collé à l'arrière du produit. Comme montré dans la figure 3.14b, les fléchettes sont agencés sur une broche d'une manière que l'avant de l'article 'n' est collé à l'arrière du 'n-1'. Il en résulte une séparation de 5 mm entre deux articles consécutifs. Pour lire 100% des produits présents sur la broche, à une puissance égale à 23 dBm à 866 MHz, il est nécessaire d'être presque en contact.

Après ces premiers essais, il est confirmé que les dégradations mesurées dans le caisson anéchoïque sont observables dans le magasin. Par la suite, seuls cinq produits sont considérés. Le tag utilisé (initialement le tag 1) ainsi que l'agencement (broche) varient afin de mieux comprendre cette dégradation de performances. La distance de lecture maximale du tag du milieu est surveillée dans quatre configurations différentes en utilisant le même lecteur portable. Dans la première configuration, l'article est seul sur une plaque métallique, dans la deuxième, il est seul sur une broche. Dans la troisième et la quatrième configurations, ce tag est placé au milieu d'un groupe de 5 tags sur une plaque métallique et une broche, respectivement. Il est important de noter que lorsque 5 tags sont présents dans le milieu, la distance de séparation entre eux est de 10 mm. Les quatre tests sont répétés cinq fois avec cinq tags différents comportant chacun une boucle «*T-match*». Les résultats sont montrés dans la figure 3.14c.

A partir de ces résultats il est clair qu'à la même fréquence et pour le même tag, l'effet de la proximité peut changer pour deux agencements différents. De la même manière, dans un agencement similaire, l'effet de la dégradation peut varier entre deux tags. Ainsi, trois des observations sont constatées :

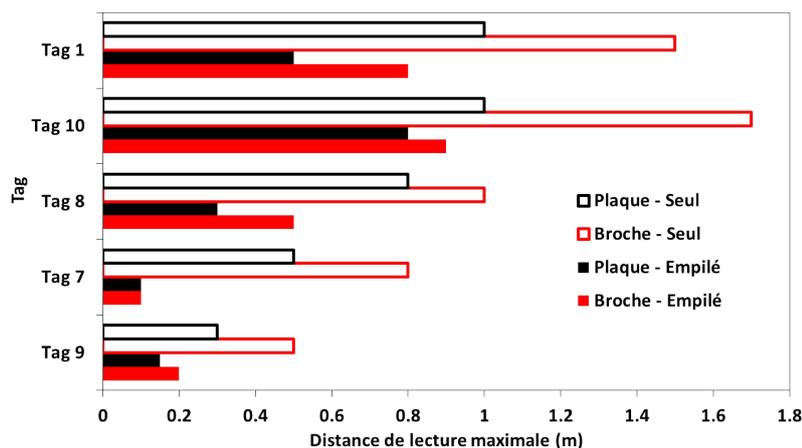
1. Les performances supérieures d'un tag seul, ne garantissent pas les meilleures performances lorsque ce tag est placé à proximité des autres tags. Comme c'est le cas pour les tags AD180 (tag 7 en annexe A) et AD171 (tag 9) par exemple.
2. Les tags sur broches ont de meilleures performances lorsqu'ils sont placés sur des plaques métalliques. Cependant, la dégradation de la lecture est plus sévère sur les



(a) Interrogateur RFID manuel



(b) Fléchettes agencés sur une broche



(c) Distance de lecture maximale à 23 dBm

FIGURE 3.14 – Performances d'un produit avec différents tags agencé en configuration dense

broches. En moyenne, la perte pour tous les tags est de 0,6 mètre sur les broches contre 0,35 mètres sur les plaques métalliques.

3. Les tags ayant les mêmes puces se comportent différemment. Cela signifie que la forme de l'antenne est l'élément qui affecte le plus les performances dans ce type de configuration.

En se basant sur ces observations, nous supposons que l'effet négatif de la proximité peut être diminué si elle est anticipée lors de la phase de la conception de l'antenne ; de la même manière que la dégradation causée par le matériau d'un produit est anticipée. La stabilisation du tag est alors proposée par la conception d'antenne spécifique pour des configurations denses. Ceci est nécessaire pour une multitude d'usages, mais surtout dans un environnement de type magasin, où la densification des agencements des produits est une pratique nécessaire afin d'optimiser l'espace disponible.

3.6.2 Étude expérimentale

Comme établi précédemment, la proximité est le facteur qui impacte le plus les performances du tag. Son impact est régulièrement négatif quel que soit le tag ou la configuration du produit. A la vue des observations terrain et des mesures dans le caisson anéchoïque, il s'avère nécessaire d'étudier plusieurs paramètres contribuant aux dégradations de performances. Malgré quelques études qui traitent de ce sujet [154] [155] et [156], l'effet de la proximité n'est pas exploré pour des distances de séparation inférieures à 2 cm entre

deux tags. Depuis nos observations, ce cas peut souvent se présenter dans un magasin pour différents types de produits et d'agencements. De plus, à part les publications citées ci-avant, il n'existe pas d'études qui explorent en profondeur les différents paramètres d'une configuration de proximité et la contribution de l'antenne à cet effet.

3.6.2.1 Matériels et méthodes

Dans l'objectif d'explorer les différents éléments et paramètres responsables de la dégradation des performances d'un tag à proximité d'autres tags, une étude en deux étapes est organisée.

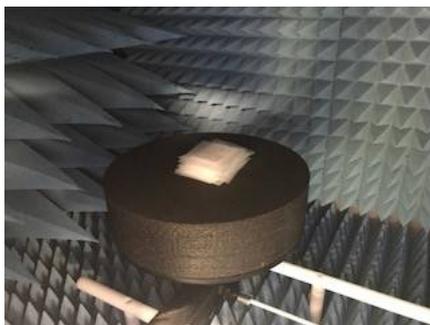
La première étape consiste à déterminer les différents paramètres d'un agencement dense de tags et à mesurer leur impact. En se basant sur les observations précédentes, il est possible d'identifier quatre paramètres :

1. La distance de séparation : ce paramètre est étudié lorsque les tags sont empilés les uns au-dessus des autres. La distance entre les tags dans ce cas est uniforme.
2. Nombre de tags dans une pile de tags.
3. L'ordre d'un tag dans une pile. L'ordre est relatif au lecteur, ce qui signifie que le premier tag de la pile sera le plus proche du lecteur.

Comme le montre la figure 3.15, les mesures de l'effet de ces paramètres sont effectuées dans un caisson anéchoïque à l'aide de l'équipement Voyantic. La configuration montrée sur la figure 3.15a est utilisée pour mesurer l'effet de la distance de séparation et de l'effet du nombre de tags dans une pile. La mesure de l'effet de la distance est réalisée en faisant varier, d'une façon uniforme, la distance de séparation entre les différents tags de la pile tout en surveillant la distance de lecture maximale du tag au bas de la pile. De la même manière, en surveillant toujours la distance maximale de lecture du tag du bas, le nombre de tags présents dans la pile est augmenté. Afin de mesurer l'effet de l'ordre d'un tag dans une pile face à l'antenne émettrice, la configuration de la figure 3.15b est utilisée. La distance de lecture maximale de chaque tag est mesurée séparément pour déduire l'effet de l'ordre. Pour l'ensemble des mesures, seulement un tag est interrogé à la fois par le lecteur.

Ensuite, après la mesure des différents effets et de leur contribution, la problématique de la proximité est décomposée en trois sous-problèmes. Pour cela, nous nous référons aux travaux de Zhang et al. [155], qui identifient trois facteurs principaux :

1. Le «*Shadowing*» : lorsqu'un tag se trouve dans une pile face à l'antenne (comme sur la figure 3.15b par exemple), il est possible que l'antenne du tag devant lui puisse



(a) Pile Horizontale



(b) Pile Verticale

FIGURE 3.15 – Configuration des tags dans le caisson anéchoïque

absorber ou bloquer (réflexions) l'énergie envoyée par l'antenne. Donc, plus des tags sont présents devant un tag, plus la puissance reçue par ce dernier diminue. Les auteurs ont identifié cet impact important pour une distance de séparation entre les tags supérieure à 2 cm. Cependant, pour une distance plus petite, la diffraction peut s'ajouter à la réflexion.

2. L'annulation du signal rétro-diffusé : ceci prend place lorsque les interférences sont destructrices entre le signal rétro-modulé par les tags et le signal du lecteur. Ce facteur est ignoré, car principalement, le lien d'activation est le seul concerné par l'étude. Deuxièmement, tous les lecteurs et tags utilisés sont conformes à la norme GS1 [36] qui suppose qu'un lecteur ne parle qu'à un seul tag à la fois. Les seules interférences dans le système sont alors causées par les chemins multiples de propagation.
3. Le troisième facteur est la désadaptation. Cela se reproduit lorsque l'impédance de l'antenne change, perturbant ainsi l'adaptation antenne-puce souhaitée lors de la conception. Dans ce cas, la désadaptation est causée par un autre tag placé à une distance très proche du tag interrogé.

Il convient de noter que nous nous concentrons sur la liaison d'activation, donc la liaison descendante du lecteur vers le tag. Tous les tests et les simulations effectués dans le cadre de cette étude utilisent le tag 1 comme tag de référence.

3.6.2.2 Mesure des effets de divers paramètres

Afin de mettre en évidence l'effet d'un tag additionnel dans le milieu de lecture à proximité d'un autre tag en communication, un montage qui ressemble à celui montré sur la figure 3.20a est reproduit dans le caisson anéchoïque. Premièrement, un seul tag est placé au milieu du plateau tournant dans le caisson et avec l'équipement Voyantic, la distance de lecture maximale est mesurée pour une puissance maximale de 33 dBm dans une bande de fréquence allant de 840 MHz jusqu'à 960 MHz. Ensuite, un deuxième tag est introduit à une distance de 5 mm au-dessus du premier tag. Seul le tag en-dessous est interrogé et la distance maximale de lecture est mesurée dans les mêmes conditions. Les résultats de ces mesures sont présentés dans la figure 3.16

Les résultats présentés sur la figure 3.16 montrent que la distance maximale de lecture est dégradée sur toute la largeur de la bande. A 866 MHz, la distance chute de 6 à 3,66 mètres. De plus, le maximum de la courbe est déplacé de 866 MHz à 845 MHz. Cela signifie qu'un décalage de 11 MHz a lieu. Ceci est probablement dû à la désadaptation de l'impédance du premier tag (en-dessous).

Ces premiers résultats montrent l'effet majeur de la proximité sur les performances d'un tag. Toutefois, cet effet est constaté à une distance très petite égale à 5 mm. Afin de mesurer l'effet lorsque cette distance initiale varie, deux tags sont considérés, dont seulement celui en-dessous est interrogé. La configuration illustrée sur la figure 3.15a est mise en place et la distance entre les deux tags est augmentée par pas de 1 mm en utilisant des intercalaires d'une épaisseur de 1 mm. La distance de séparation varie ainsi entre 1 et 40 mm.

La relation directe entre la dégradation des performances et la distance de séparation entre les deux tags est montrée sur la figure 3.17. Les deux courbes à deux fréquences différentes ont des comportements similaires. Il est possible de diviser la courbe en deux parties. Une partie transitoire de croissance qui s'étend de 1 à 15 mm et une partie quasi-constante qui s'étend de 15 à 40 mm. La partie transitoire représente les valeurs

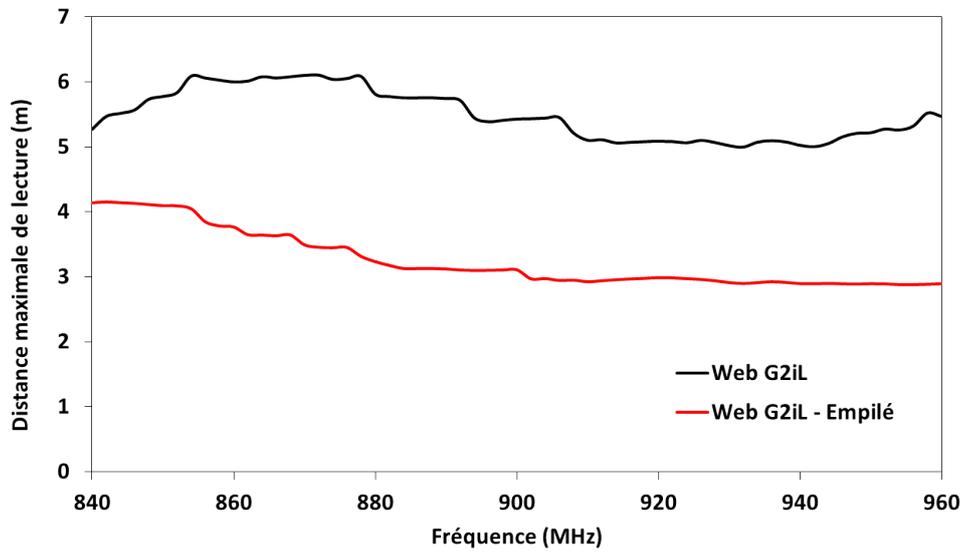


FIGURE 3.16 – La distance de lecture maximale en présence d’un deuxième tag à 5 mm de distance

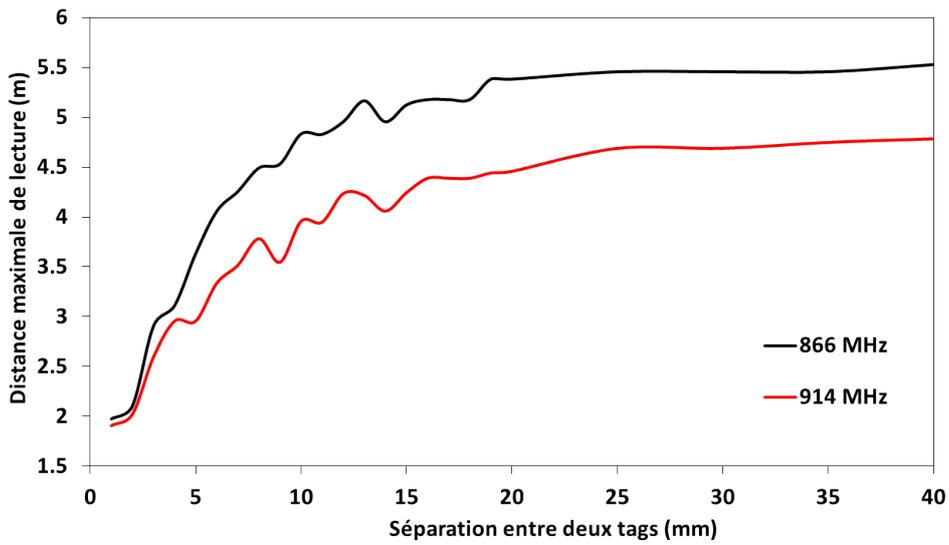


FIGURE 3.17 – L’effet de la distance entre deux tags

de distance entre deux tags où l'impédance du premier tag est fortement affectée par la présence du deuxième tag. A partir d'une distance de séparation seuil, la distance de lecture du premier tag ne varie plus en fonction de la distance de séparation, mais n'atteint toujours pas ces performances en espace libre (6 mètres).

En réexaminant la figure 3.17, les deux courbes récupèrent 85% des performances en espace libre à partir d'une distance de séparation égale à 18 mm. Au delà de ces distances, les pertes sont limitées à 15% et la courbe devient quasi-constante à partir d'une distance de séparation égale à 20 mm. Au contraire, pour une séparation très faible entre les deux tags, à 1 mm, le tag perd 64% de ses performances en espace libre à 866 MHz. A 5 mm, les pertes atteignent 50%. Ces résultats montrent que l'effet de la distance de séparation est très impactant sur les performances d'un tag, même s'il est le seul en communication avec le lecteur. De plus, il est démontré que l'ajout d'un tag supplémentaire est conséquent sur les performances lorsqu'il est placé dans la zone de séparation inférieure à 20 mm.

Ensuite, la même configuration que celle de la figure 3.15a est utilisée pour étudier l'effet du nombre de tags dans le milieu. Pour cela, une distance de séparation fixe de 15 mm est choisie. Ce choix est basé sur le fait qu'à cette distance, le deuxième tag reste toujours placé à une distance inférieure à 20 mm, mais son effet (dû à la distance de séparation) ne doit pas être dominant. En maintenant une distance de séparation entre les tags de 15 mm, un seul tag est ajouté à la fois.

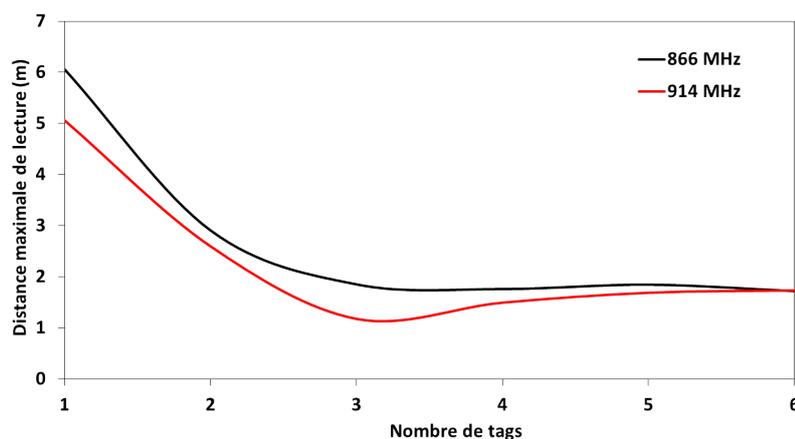


FIGURE 3.18 – L'effet du nombre de tags

Les résultats de la figure 3.18 montrent l'effet du nombre de tags. Pour un seul tag ajouté, les mêmes résultats obtenus que sur la figure 3.17 sont confirmés. En ajoutant un deuxième tag, un total de 3 tags est présent dans le milieu. Ce tag est présent à une distance de 15 mm au-dessus du premier tag additionnel et à 30 mm du tag initial. La distance de lecture maximale du tag initial diminue en fonction de nombre de tags ajoutés. Lorsque 3 tags sont ajoutés, l'effet est fortement réduit, et la distance maximale reste constante. Les deux courbes se stabilisent à partir du deuxième tag ajouté, à 30 mm du tag initial. Cela signifie que même si la présence de tags additionnels est impactante, la distance de séparation a un effet prépondérant sur la dégradation des performances.

Finalement, l'ordre des tags est étudié. Les tags sont configurés comme le montre le montage de la figure 3.15b. Les antennes des tags sont parfaitement alignées face à l'antenne du lecteur et ils sont placés de manière à ce qu'un tag soit toujours situé dans "l'ombre" du tag qui le précède. Ce montage est pensé afin de mesurer l'effet du «*shadowing*». En mesurant la distance de lecture maximale pour chaque tag, il serait possible

de déduire l'importance de leur ordre.

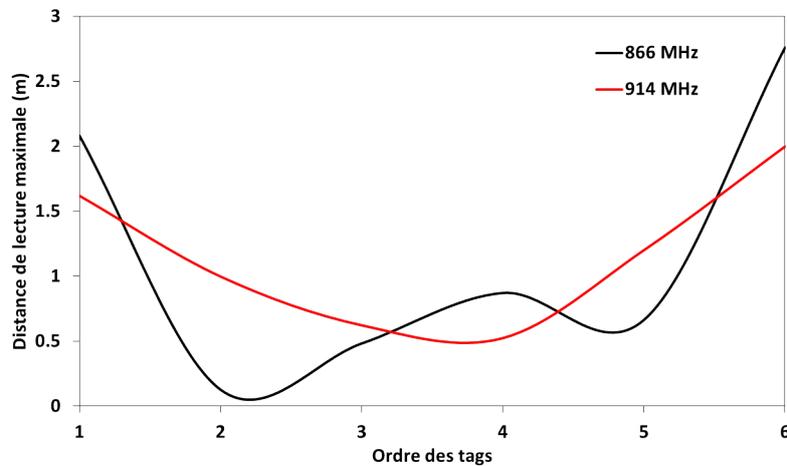


FIGURE 3.19 – L'effet de l'ordre d'un tag

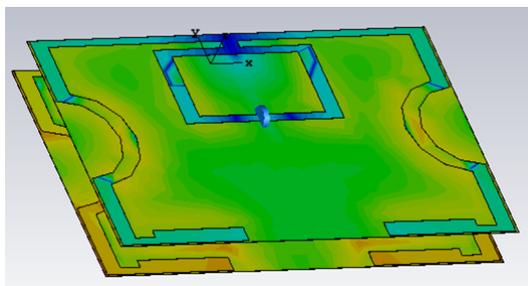
Les résultats de la figure 3.19 montrent que les courbes sont en forme "U" ; ce qui signifie que l'ordre n'est pas un facteur déterminant. Pour les deux courbes, les distances de lecture maximales mesurées pour le deuxième, troisième et quatrième tag, sont inférieures à celles du premier ; qui à son tour, a des performances inférieures à celles du sixième tag. Pour les tags situés au milieu, la distance de lecture maximale varie d'un tag à l'autre mais n'est pas proportionnelle à l'ordre. En considérant la taille de l'antenne, et le faible écart en fréquence (entre 866 et 914 MHz), ces résultats signifient que le facteur «*shadowing*» n'est pas le facteur prédominant dans ce cas, mais plutôt encore une fois, la désadaptation. Afin de vérifier ces conclusions, une étape de simulation est nécessaire pour mieux comprendre le comportement de chaque tag dans les différentes configurations.

3.6.2.3 Simulation de différents facteurs liés à la proximité

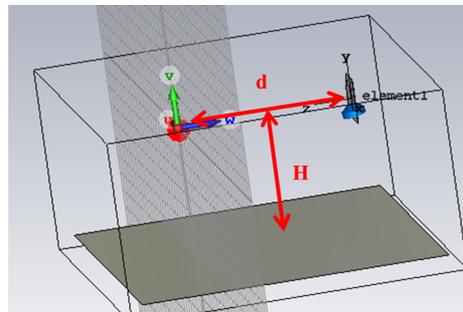
La mesure de l'effet de la distance et du nombre de tags sur les performances d'un tag à proximité d'autres tags du même type nous a amené à déduire que la désadaptation était le facteur le plus impactant. De plus, la visualisation de la distance maximale de lecture en fonction de la fréquence lorsque un deuxième tag est placé à proximité du premier permet de démontrer le décalage de fréquence causé par la désadaptation antenne-puce.

Lorsqu'il est possible de déduire la contribution de plusieurs facteurs cités ci-dessus en analysant les résultats des mesures de la première étape, une décomposition des résultats obtenus en fonctions de ces facteurs n'est pas possible. Pour cela, une deuxième étape de simulation en utilisant le logiciel «*CST Microwave studio*» est proposée. Pour réaliser cela, deux montages sont simulés : un premier, montré dans la figure 3.20a se compose de deux tags, le premier (en-dessous) alimenté directement par un port 1W d'une impédance 50 Ohm et le deuxième tag (en dessus) équipé d'un port 50 Ohm au bornes du dipôle sans aucune alimentation. Le deuxième montage proposé est illustré dans la figure 3.20b. Un environnement se composant d'une antenne émettrice (référence : S8658WPR), et une pile verticale de 6 tags chacun équipé d'un port d'impédance de 50 Ohm. L'antenne émettrice est la seule source de puissance dans l'environnement. Elle est séparée de tags d'une distance "d" et à une hauteur "H" du sol. Le sol est initialement constitué du vide afin de simuler un milieu en espace libre.

Afin d'isoler la désadaptation, le premier montage (figure 3.20a) est utilisé. Pour isoler le «*shadowing*», le deuxième montage figurant dans la figure 3.20b est considéré. Avec ce même montage l'effet des multi-chemins est étudié en substituant le vide au sol par du métal.



(a) Source d'activation interne

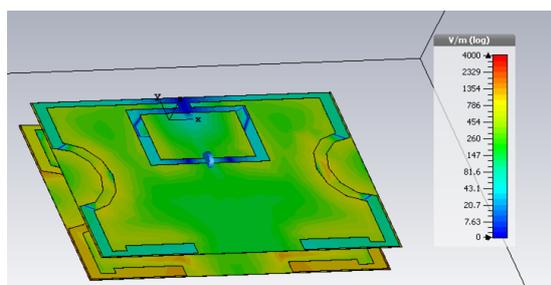


(b) Antenne comme source d'activation

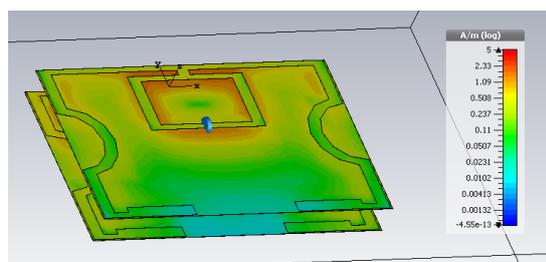
FIGURE 3.20 – Deux montages de simulation

Le champ électrique (figure 3.21a) et le courant de surface (figure 3.21b) sont simulés à 866 MHz. Une impédance de 50 Ohms est choisie pour les deux tags en raison de la limitation du logiciel de simulation, puisqu'une valeur imaginaire ne peut pas être assignée à un élément discret. Le port discret de 50 Ohms n'affecte pas l'antenne du tag situé en-dessous et ne sert qu'à normaliser les signaux.

Sur la figure 3.21, le champ électrique et le courant de surface simulés à 866 MHz sur le deuxième tag, non-excité, sont montrés. La figure 3.21a montre qu'à 5 mm du premier tag excité, le champ électrique n'est visible qu'autour du dipôle, capacitif à 866 MHz. Cependant, lorsque le courant de surface est considéré, une densité de courant de l'ordre de 5 A/m est constatée. Le courant induit sur le deuxième tag, non excité, est particulièrement fort autour de la boucle : le composant inductif de l'antenne. De plus, et contrairement au champ électrique, le courant simulé sur le deuxième tag est d'un ordre similaire à celui simulé sur le premier tag. Ceci est normal puisque selon les équations développées en [157], les pertes du champ magnétique subies à 866 MHz sont négligeables pour une distance de séparation égale à 5 mm. Ces résultats prouvent la présence d'un couplage magnétique entre les deux boucles. Ce couplage est plus important par rapport au couplage capacitif constaté dans la figure 3.21a. En fonction de ces conclusions, nous suspectons que le couplage magnétique entre les deux boucles est le phénomène responsable du changement de l'impédance de l'antenne et par conséquent, de la désadaptation



(a) Champ électrique



(b) Courant de surface

FIGURE 3.21 – Le champ électrique et le courant surfacique mesurés sur le deuxième tag, non-alimenté

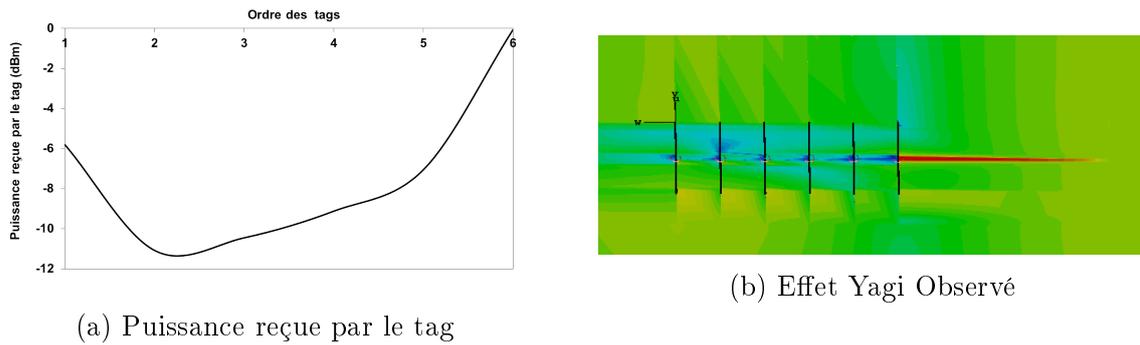


FIGURE 3.22 – L’effet de l’ordre sur les performances des tags placés à proximité

puce-antenne.

Suite aux mesures de l’effet de l’ordre du tag sur ses performances, il est déduit que sa contribution à la dégradation n’est pas importante par rapport à la désadaptation. En effet, la distance maximale de lecture est trouvée pour le 6^{ème} tag de la pile, placé le plus loin de l’antenne émettrice derrière 5 autres tags. Afin de comprendre ce phénomène, le montage montré sur la figure 3.15b est simulé dans un milieu comprenant une antenne émettrice. Six tags non-excités sont placés à une distance de 1 m de l’antenne émettrice avec une séparation de 15 mm entre deux tags consécutifs. L’antenne émettrice est une antenne Laird (référence : S8658WPR), modélisée dans le logiciel de simulation, les spécifications de cette antenne sont présentées en annexe B.

Entre les bornes de l’antenne de chaque tag, un port discret ayant une impédance de 50 Ohm est placé. La puissance reçue par chaque port (chaque tag) à 866 MHz, est tracée en fonction de l’ordre du tag et reportée sur la figure 3.22a. L’allure de la courbe simulée est similaire à celle de la courbe des valeurs mesurées de la figure 3.19. Lorsque le deuxième tag capte un minimum de puissance transmise par l’antenne Laird, le sixième tag en capte le plus. Sur la figure 3.22b, le champ électrique en 3D est illustré. Les résultats obtenus sur la figure 3.22a correspondent aux niveaux du champ électrique sur chaque port. Lorsque la couleur bleue indique une faible réception au niveau du port 2, la couleur rouge indique la présence d’un champ électrique supérieur ; cet effet de concentration du champ ressemble à l’effet Yagi. Deuxièmement, en comparant les deux graphes de la figure 3.22, il est évident que lorsque le champ entre deux tags est faible (bleu foncé entre le tag 5 et 6), la puissance reçue par le tag est meilleure. Afin de creuser ce phénomène d’avantage, le champ électrique est tracé au long de la distance (d) entre l’antenne émettrice et les tags (voir figure 3.20b. Les résultats de la figure 3.23 montrent le niveau du champ électrique disponible à la position de chaque tag (marqué en rouge sur le graphique), et non pas la puissance absorbée par chaque tag.

Les résultats représentés sur la figure 3.23 montrent l’impact de la présence d’un tag sur le chemin direct entre la source du champ électrique dans le milieu, et un autre tag. La diminution logique du champ disponible à la position de chaque tag dépend complètement de l’ordre du dernier et sa position dans l’espace. Ces résultats représentent donc, l’effet du «*shadowing*» isolé de tout autre phénomène. Evidemment, le niveau du champ électrique disponible à chaque position est différent et il ne correspond pas au niveau de puissance reçue par chaque tag, puisque ce dernier dépend de l’adaptation port-antenne. Ajouté à cela, la dépendance de la puissance reçue du champ disponible entre deux tags confirme le rôle majeur du couplage entre les deux tags. Ce couplage est à son tour lié à la désadaptation qui, en fonction de la position du tag et ses interactions

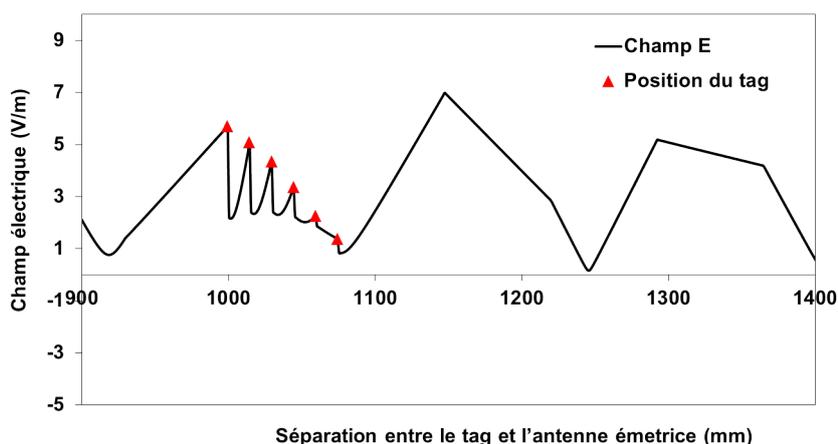
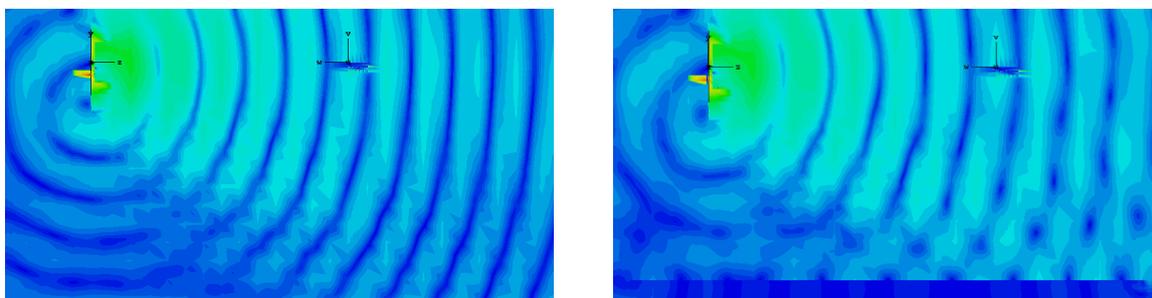


FIGURE 3.23 – La puissance émise par l'antenne Laird, disponible à la position de chaque tag



(a) Dans le vide

(b) En présence d'un plan métallique

FIGURE 3.24 – Visualisation du champ électrique dans la liaison descendante

avec les autres tags, impacte les performances ; dans ce cas, la puissance reçue.

D'autre part, hors environnement contrôlé, les multi-chemins posent des problématiques et peuvent causer la dégradation des performances. En simulant le montage dans la figure 3.20b, la puissance reçue par le tag est mesurée, sachant que l'antenne émettrice et les 6 tags se trouvent à une hauteur "h" d'une plaque parfaitement métallique. Tout d'abord, en introduisant une plaque métallique, les ondes émises par l'antenne Laird, seront réfléchies au niveau du sol, créant ainsi des interférences dues aux multi-chemins. En visualisant la propagation du champ électrique entre l'antenne émettrice et les tags, les figures 3.24a et 3.24b montrent la propagation sur la liaison descendante dans le vide et en présence du sol métallique avec $h = 750$ mm, respectivement. En comparant les deux figures, nous remarquons que des zones sombres (en bleu marine) sont causées par la présence des interférences destructives sur la figure 3.24b. Ces zones sont plus nombreuses à proximité du sol, mais leur présence est aussi observable au niveau des 6 tags.

Les interférences constructives peuvent également générer des zones de concentration du champ. Ceci est observable sur le front d'onde où les tags sont présents. Afin de confirmer cet effet positif des multi-chemins, le montage 3.20b est simulé en trois scénarios : dans le vide, avec une plaque métallique pour $h = 750$ mm et enfin pour $h = 1200$ mm. Ces deux cas sont choisis puisqu'ils illustrent les deux effets contraires des multi-chemins.

La figure 3.25a montre la puissance reçue pour chacun des tags dans les trois scénarios de simulation. Les allures des courbes restent similaires, indiquant que l'ordre des tags

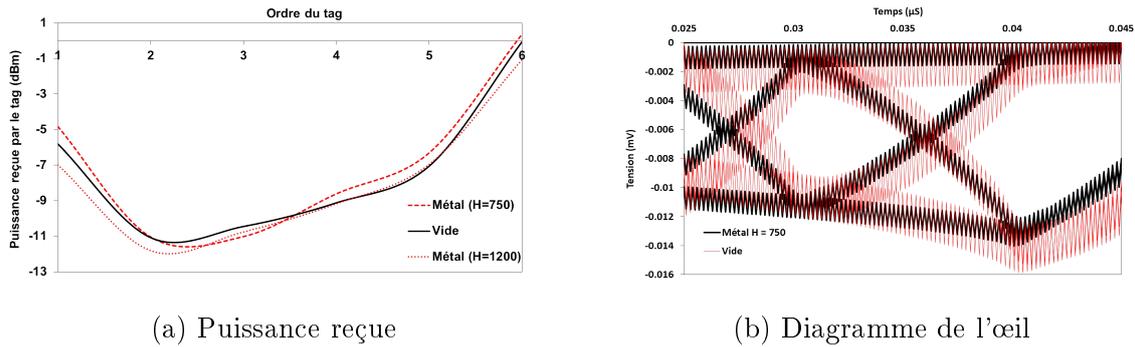


FIGURE 3.25 – Les performances des tags en présence des multi-chemins

n'est pas déterminant en présence des multi-chemins également. De plus, pour une hauteur égale à 1200 mm, l'effet des réflexions est plutôt négatif pour les 6 tags. A une hauteur de 750 mm, la puissance captée par les tags est meilleure sauf pour le tag 3. Pour cette hauteur, les performances globales du système sur la liaison descendante sont supérieures à celles dans le vide, prouvant ainsi l'effet positif que peuvent avoir les multi-chemins.

De plus, en simulant le diagramme de l'œil entre l'émetteur et le tag, dans le vide et en présence d'un plan métallique infini au sol, il est prouvé que même la transmission des données numériques est améliorée. Ceci est manifesté par l'ouverture de l'œil supérieure en présence du métal, indiquant un niveau de bruit plus faible.

3.6.3 Explication de l'effet de la proximité

Dans la partie précédente, les différents paramètres d'une configuration dense en tags sont identifiés et mesurés. Ensuite, les facteurs contribuant à la dégradation de performance d'un tag à proximité d'autres tags sont identifiés. En analysant les résultats des mesures et des simulations, nous avons lié les paramètres aux divers facteurs influents. De plus, la désadaptation s'est révélée être le facteur le plus impactant. La désadaptation puce-antenne d'un tag cible est due à la présence d'un autre tag. L'effet de l'ordre est lié à la distance de séparation entre ces deux tags, et comme montré par la simulation, nous supposons que le couplage magnétique, principalement causé par l'alignement des deux boucles «*T-match*», est le phénomène qui cause le changement de l'impédance totale de l'antenne prouvant une désadaptation. Cela est expliqué dans le paragraphe suivant à l'aide d'une étude analytique.

3.6.3.1 Étude analytique du couplage magnétique

Lorsque deux circuits RC ou RL sont placés à faible distance, les champ électrique et magnétique seront influencés par la présence des deux structures. Par conséquent, une capacité mutuelle (champ électrique) et une inductance mutuelle (champ magnétique) co-existent. L'effet de l'inductance mutuelle est beaucoup plus important que celui de la capacité mutuelle ; ce dernier peut être considéré comme négligeable lorsque les deux mutuelles se produisent. L'inductance mutuelle, peut être considérée comme une troisième inductance entre les deux circuits RL (antennes), et elle dépend directement des dimensions du composant inductif. Le couplage magnétique est un coefficient qui dépend de l'inductance mutuelle et de l'impédance du composant inductif, qui augmente lorsque la mutuelle augmente.

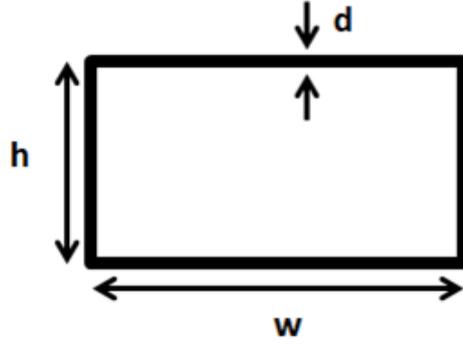


FIGURE 3.26 – Dimensions de la boucle rectangulaire

Nous considérerons le cas de deux tags placés en empilement, l'un au-dessus de l'autre, similairement au montage montré sur la figure 3.15a. Un seul tag est activé et interrogé tandis que l'autre n'est pas concerné par la communication. Par conséquent, un courant circule à travers l'antenne du premier tag créant un champ magnétique. Ce champ magnétique porte ce courant et le transfère à la boucle de l'autre antenne. Si la deuxième antenne est placée suffisamment proche de la première, cela entraîne un échange de courant entre les deux boucles et donc changement de l'impédance de la première ; ce phénomène s'appelle l'impédance réfléchie. Comme établi précédemment, la boucle est le composant qui contribue le plus au couplage magnétique, car il est le seul élément inductif de l'antenne du tag à 866 MHz.

Dans le contexte de cette étude, une boucle rectangulaire est considérée compte tenu de la forme de la boucle de l'antenne du tag cible (Web G2iL). De plus, la majorité des antennes des tags sur le marché sont conçues avec une boucle rectangulaire. Sur la figure 3.26, 'd' est l'épaisseur du fil, 'h' la longueur du fil dans le même plan orthogonal de l'excitation (insertion de la puce) et 'w', la dimension dans le même plan. Les formules 3.4 permettent de calculer l'inductance de la boucle. Ces formules ont été développées par F.W. Grover en 1946 [158].

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} [-2(w + h) + 2\sqrt{h^2 + w^2} + \chi] \quad (3.4a)$$

$$\chi = -h \cdot \ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 + w^2}}{w}\right) - w \cdot \ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 + w^2}}{h}\right) + h \cdot \ln\left(\frac{4h}{d}\right) + w \cdot \ln\left(\frac{4h}{d}\right) \quad (3.4b)$$

Afin d'estimer l'inductance mutuelle entre deux boucles rectangulaires, nous nous référons aux travaux en [159], où une nouvelle méthode de calcul de l'inductance mutuelle est proposée. Cet étude considère que chaque bobine multi-spires est composée de plusieurs bobines ou boucles simples (une seule spire). Ces calculs ignorent l'épaisseur du fil 'd', dont l'effet est considéré négligeable sur l'inductance mutuelle. La formule liant l'inductance mutuelle aux dimensions de la boucle (h et w) et à la distance de séparation entre deux boucles rectangulaires identiques (z) est donnée par l'équation 3.5.

$$M = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} [\sqrt{4h^2 + z^2 + 4w^2} - \sqrt{z^2 + 4w^2} - \sqrt{z^2 + 4h^2} - 2h \cdot \arctan\left(\frac{2h}{\sqrt{4h^2 + z^2 + 4w^2}}\right) + 2h \cdot \arctan\left(\frac{2h}{\sqrt{4h^2 + z^2}}\right) + z] \quad (3.5)$$

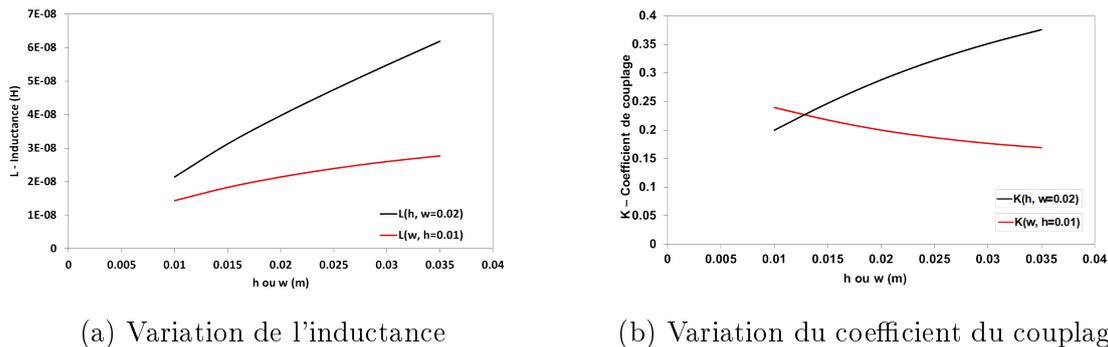


FIGURE 3.27 – Variation du couplage en fonction des dimensions de la boucle

$$K = \frac{M}{\sqrt{L1.L2}} = \frac{M}{L} \quad (3.6)$$

En utilisant les deux équations 3.4 et 3.5, il est possible de calculer la valeur de l'inductance de la boucle (L) et de l'inductance mutuelle (M) entre deux boucles identiques séparées d'une distance (z). Ensuite, en utilisant l'équation 3.6, le couplage magnétique entre les deux boucles peut être calculé. Les deux figures 3.27a et 3.27b montrent les variations de l'inductance et du couplage magnétique en fonction des dimensions de la boucle.

Afin d'analyser l'effet des dimensions sur le couplage magnétique, nous considérons une boucle rectangulaire dont les dimensions sont initialement fixées à $w = 20$ mm et $h = 10$ mm. Il convient de noter que ces valeurs correspondent aux dimensions de la boucle conçue pour le tag Web G2iL. Sur la figure 3.27a, une seule dimension varie à la fois. Logiquement, la valeur de l'inductance augmente en fonction des dimensions de la boucle. Il est remarqué que l'inductance augmente plus rapidement en fonction de la dimension 'h'. Sur la figure 3.27b, le coefficient de couplage magnétique entre deux boucles identiques à une distance $z = 5$ mm est calculé en fonction de 'w' et 'h' séparément. Nous remarquons que lorsque 'w' augmente, le coefficient de couplage augmente; ceci signifie que la mutuelle diminue en fonction de 'w'. En revanche, lorsque 'h' augmente, cette valeur augmente plus rapidement. La variation du coefficient de couplage en fonction des dimensions de la boucle montre que l'effet d'une boucle sur l'autre peut être minimisée soit en augmentant la valeur de l'inductance soit en diminuant la valeur de la mutuelle. En définitive, le but est de minimiser le coefficient de couplage magnétique (K); ceci est possible en optimisant les dimensions de la boucle. A la lumière de ces derniers résultats, l'anticipation de l'effet "proximité" en fonction des dimensions de la boucle «*T-match*» semble possible. Néanmoins, il n'est toujours pas possible de lier analytiquement le couplage magnétique au changement d'impédance.

3.6.3.2 Modélisation de la désadaptation

Le point de départ de la modélisation est la relation entre le couplage magnétique et le changement de l'impédance. Cette relation est explorée dans les travaux de Sharpshkar [160] dans le domaine de la bioélectronique où le phénomène de l'impédance réfléchie est expliqué. L'impédance réfléchie est décrite comme le résultat direct du couplage entre deux circuits passifs : un courant électrique supplémentaire, reflété par un deuxième circuit passif et dépendant de son impédance, vient circuler dans le premier circuit et modifier son

impédance primaire. Le changement d'impédance changera la fréquence d'adaptation du premier circuit ; ce phénomène est plus étudié par le couplage des tags fonctionnant dans les gammes HF. Dans le contexte de notre étude, les circuits passifs sont identiques puisque nous considérons deux tags passifs du même type. Pour la simplification du modèle, seul, le couplage magnétique entre les deux boucles est considéré. Les formules liant le couplage magnétique aux changements de l'impédance de l'antenne du premier tag [voir 160, p.494] sont exprimées en équations 3.7a et 3.7b.

$$Z^{reflechie} = \frac{K^2 \cdot \omega_0^2 \cdot L_1 L_2}{Z_2} \quad (3.7a)$$

$$Z'_1 = Z^{reflechie} + Z_1 \quad (3.7b)$$

Dans l'équation 3.7a, K est le coefficient de couplage, ω la pulsation associée à une fréquence déterminée, L_1 et L_2 les inductances respectives du premier et du deuxième tag, et Z_2 , l'impédance complexe du deuxième tag. Dans l'équation 3.7b, Z'_1 est la nouvelle impédance du premier tag.

Ce modèle est appliqué dans le paragraphe suivant (cf. 3.5.4.1) afin de calculer l'effet de la proximité sur un tag Web G2iL et ces résultats sont validés en les comparant aux mesures réalisées dans le paragraphe 3.5.2.2.

3.6.4 Validation du modèle et perspectives

3.6.4.1 Validation du modèle

Afin de valider le modèle proposé précédemment, les deux équations 3.7a et 3.7b sont appliqués pour calculer la nouvelle impédance du premier tag sous test. Par la suite, les impédances réelles et imaginaires de Z'_1 seront injectées dans l'équation 3.3a afin de calculer le taux de désadaptation puce-antenne. Avec le nouveau taux de désadaptation calculé, la distance maximale est calculée à partir de l'équation de Friis. La distance calculée est ensuite comparée à la distance mesurée. En premier lieu, la distance maximale de lecture du premier tag (en-dessous) est mesurée lorsqu'un deuxième tag est placé au-dessus à une distance de séparation de 5 mm. Pour la même distance de séparation, la distance maximale de lecture est calculée à partir du taux de désadaptation calculé à partir des dimensions de la boucle. Les résultats de cette comparaison sont illustrés sur la figure 3.28a sur une bande de fréquence allant de 840 à 960 MHz. En utilisant le modèle analytique proposée ci-avant, il est possible de prédire les performances d'un tag à proximité d'un autre tag (même type d'antenne) avec une précision de 0,5 mètre dans la bande de fréquence entre 840 et 960 MHz.

Deuxièmement, la distance maximale de lecture d'un tag est mesurée et calculée en fonction du nombre de tags ajoutés au-dessus du tag cible. La distance de séparation entre deux tags consécutifs est égale à 5 mm. Les résultats à 866 MHz sont illustrés sur la figure 3.28b. Cette figure montre que la précision de la méthode de calcul est relativement haute jusqu'à un nombre de tags égal à 4. Le 4^{ème} tag est situé à 20 mm au dessus du tag cible. Cette distance dépasse la valeur limite trouvée lors de la phase de la mesure. Selon les mesures précédentes, il est démontré que le tag est plus affecté lorsqu'il est placé dans à des distances égales ou inférieurs à 18 mm. Nous attribuons alors à cela, l'écart entre la mesure et le calcul à partir du 4^{ème} tag. Ceci est observable sur la figure 3.28b : la courbe de mesure se stabilise et la courbe de calcul diminue.

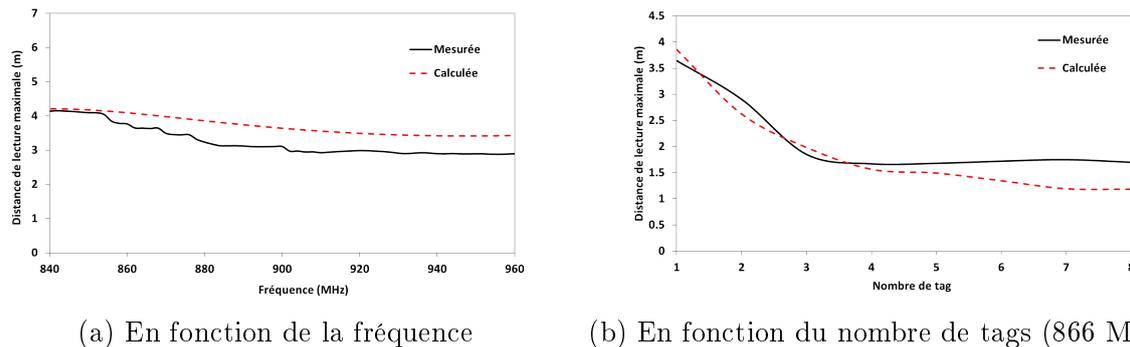


FIGURE 3.28 – Comparaison entre mesures et calcul

3.6.4.2 Proposition d'une nouvelle méthode de conception

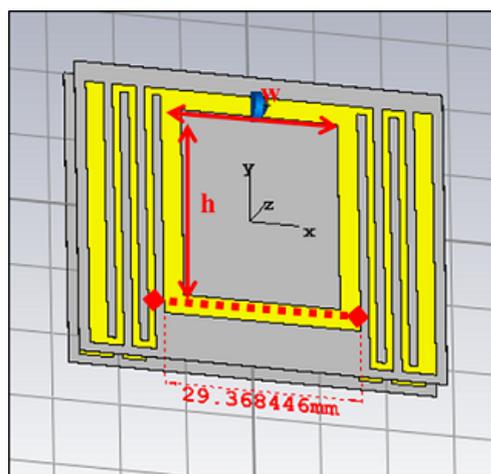
Après la validation du modèle proposé par comparaison des résultats de mesure et de calcul du tag Web G2iL, nous proposons une nouvelle méthode de conception. Cette nouvelle méthode se base sur le fait qu'il est désormais possible d'anticiper les performances des tags en situation de proximité avec d'autres. Lorsqu'il est possible de proposer d'autres solutions de conception, nous optons pour l'optimisation d'une boucle «*T-match*» pour améliorer ses performances en proximité. Ce choix sert principalement à préserver cette méthode d'adaptation vu sa simplicité et ses faibles coûts de fabrication et de production.

Selon les résultats obtenus dans les parties précédentes, il est démontré qu'il est possible de minimiser le couplage entre deux tags en ajustant les dimensions de la boucle. Plus précisément, pour minimiser le coefficient de couplage, il faut minimiser l'inductance mutuelle et augmenter l'inductance de la boucle. Ceci dit, comme montré sur la figure 3.3, il existe une contrainte sur le choix de l'inductance de la boucle afin d'assurer une adaptation acceptable à une fréquence précise. En utilisant le logiciel de simulation «*CST Microwave Studio*», nous modélisons une boucle de dimensions initiales $h = 28$ mm et $w = 30$ mm. En choisissant ces valeurs nous assurons que l'inductance de la boucle soit suffisamment importante et que le coefficient de couplage soit minimisé (voir figure 3.27). Par la suite, un dipôle méandré est conçu autour de la boucle pour des taux de réflexions minimaux à 866 MHz (avec une puce NXP G2iL [51]) et un deuxième tag identique est ajouté en-dessus du premier à une distance égale à 15 mm. Enfin, une optimisation des dimensions (w , h et d) est lancée pour atteindre un courant de surface minimale sur le deuxième tag tout en maintenant un coefficient de réflexion inférieur à -3 dB à 866 MHz. Le courant de surface est simulé le long de la ligne pointillée illustrée sur la figure 3.29a. En diminuant ce courant réfléchi sur le deuxième tag, l'inductance mutuelle et par conséquent le couplage magnétique entre les deux boucles diminue.

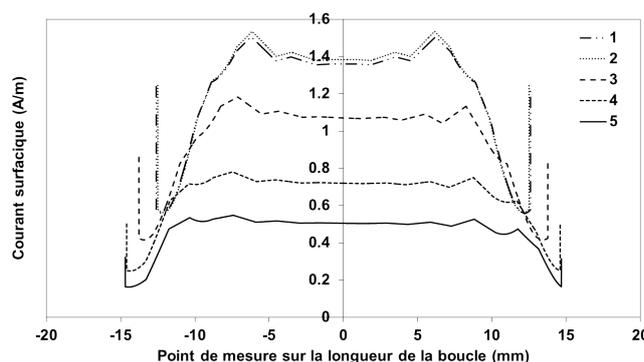
Id	h(mm)	w(mm)	d(mm)
1	34,4	25	1,2
2	34,4	27,7	2,9
3	29,2	29,1	2,5
4	27,8	29	2,9
5	31	29,4	2

Tableau 3.2 – Les meilleurs dimensions de l'optimisation

La nouvelle antenne conçue autour de la nouvelle boucle optimisée est illustrée sur la



(a) Nouveau tag



(b) Résultats de l'optimisation

FIGURE 3.29 – Stabilisation des performances d'un tag situé en proximité à un deuxième tag

figure 3.29a. Les résultats de l'optimisation sont présentés dans la figure 3.29b. Le numéro de chaque courbe correspond aux dimensions détaillées dans le tableau 3.2. Les résultats montrent que, comme indiqué en [159], l'effet de l'épaisseur (d) est faible par rapport à l'effet des autres dimensions. Le courant minimal est obtenu pour $h = 31$ mm et $w = 29,4$ mm, des valeurs plus élevées que celle choisies initialement ($h = 28$ mm et $w = 30$ mm).

3.6.4.3 Résultats et discussion

Dans les parties précédentes, la validation d'un nouveau modèle analytique permettant d'anticiper les dégradation de performances du tag a rendu possible la proposition d'une méthode de stabilisation des performances des tags à base de boucles «*T-match*» contre l'effet de la proximité. Cette optimisation est basée sur la diminution du couplage magnétique entre deux tags. Afin de mieux juger de l'efficacité de cette méthode, la distance maximale de lecture du nouveau tag est calculée pour une puce NXP G2iL. La distance est calculée depuis la simulation d'un tag seul, jusqu'à l'utilisation du modèle analytique lorsque le tag est en proximité d'autres tag. Pour cet exercice, nous considérons un cas extrême, d'une distance de séparation de 5 mm. La figure 3.30 montre les résultats de ces calcul en les comparant à ceux effectués pour le tag de référence de cette étude (Web G2iL).

Les résultats (3.30) montrent qu'en espace libre, lorsqu'un seul tag est présent dans le milieu, le gain (à partir de 875 MHz) et la bande passante du nouveau tag sont supérieurs à ceux du Web G2iL. Ceci est essentiellement dû aux dimensions supérieures du nouveau dipôle. Ce qui est plus intéressant ce sont les performances obtenues lorsque deux tags sont empilés, l'un au dessus de l'autre. Pour une distance de séparation de 5 mm, le nouveau tag maintient une distance maximale de lecture égale à celle atteinte en espace libre lorsqu'il est un seul dans le milieu. La distance de lecture reste stable entre 840 et 860 MHz. A 866 MHz, le nouveau tag perd 7% de ces performances en espace libre quand un deuxième tag est introduit, par comparaison avec une perte de 35% subie par le Web G2iL. Cependant, dans cette plage de fréquence, la distance de lecture du nouveau tag en espace libre est plus faible.

Néanmoins, la nouvelle méthode de conception n'a pas permis au tag d'éviter la désa-

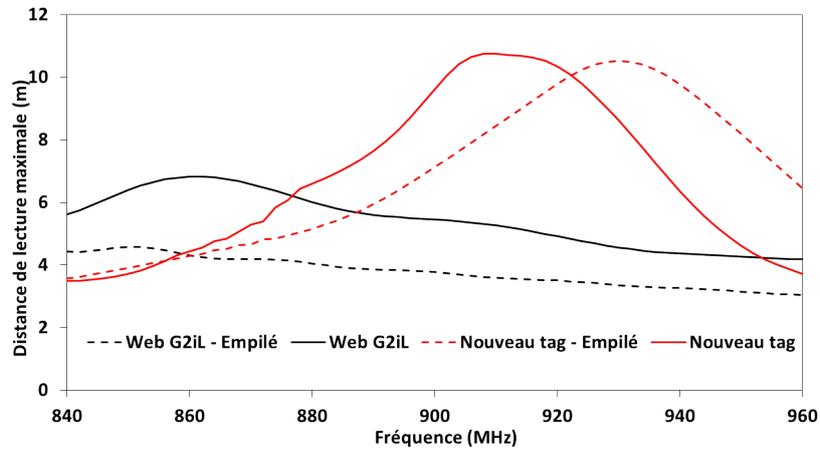


FIGURE 3.30 – Comparaison entre le Web G2iL et le Nouveau tag proposé

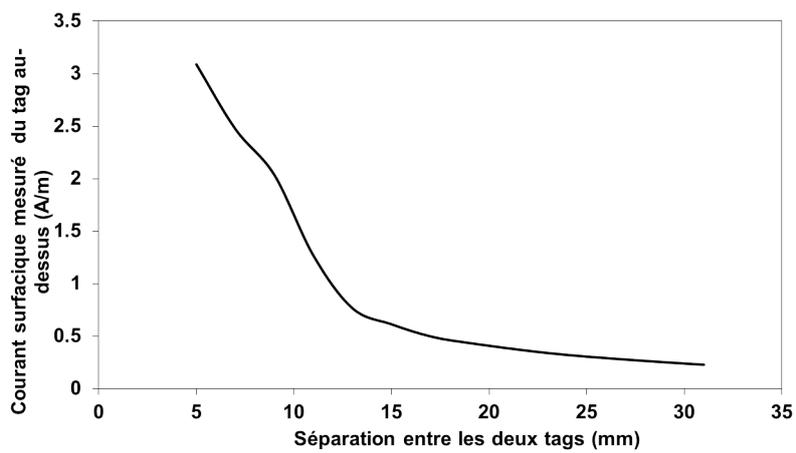


FIGURE 3.31 – Le courant mesuré sur le deuxième tag (simulation)

daptation, puisqu'un décalage fréquentiel de 20 MHz du maximum est observé. Cette méthode a permis de préserver les performances en espace libre à la fréquence d'intérêt (866 MHz). Nous attribuons cette amélioration de performances à la diminution du couplage magnétique et par conséquent du courant surfacique réfléchi sur le deuxième tag. Pour vérifier cette théorie, le courant surfacique simulé est tracé en fonction de la distance de séparation entre deux tags. En analysant les résultats de la figure 3.31, nous observons que lorsque la distance de séparation augmente, le courant mesuré sur le deuxième tag diminue. Ceci signifie un couplage magnétique et une inductance mutuelle réduits ; ce qui est vérifié lors de l'étape de la validation du modèle. D'autre part en regardant le courant mesuré à 5 mm, nous obtenons une valeur égale à 3 A/m approximativement. Celle obtenue avec le tag Web G2iL (voir figure 3.21b) à 866 MHz est égale à 5 A/m. Les différents tests menés, ainsi que l'isolation des divers phénomènes nous permet de conclure que la diminution de la densité du courant sur la surface de la boucle de 2 A/m, est responsable des meilleures performances du nouveau tag lorsqu'il est placé en proximité.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, les tags UHF passifs sont étudiés tout en se concentrant sur la conception de leur antenne et la mesure de leurs performances et les limitations principales sont identifiées. Ensuite, les tags du marché sont considérés et un intérêt particulier est porté à l'adaptation «*T-match*». Afin de comprendre le rôle de cette adaptation et sa contribution aux performances du tag, le «*Web G2iL*», un tag commercial, est décomposé et chaque élément de l'antenne est simulé. Ces travaux ont prouvé la vulnérabilité de l'adaptation puce-antenne et le rôle du concepteur d'antennes dans l'anticipation des facteurs qui peuvent l'impacter.

En deuxième lieu, la mesure de performance des tags dans un milieu contrôlé est discutée sur la liaison descendante (activation). Même si la mesure de la distance maximale de lecture en espace libre peut fournir un premier niveau de caractérisation, cette information reste insuffisante pour choisir un tag pour un ensemble de produits. Suite à des observations réalisées en magasin, trois facteurs d'impact sont identifiés : le matériau du produit, sa forme et sa proximité des autres produits équipés par des tags RFID. Pour mieux comprendre l'impact de facteurs, le changement des performances des tags causé par chacun des facteurs est quantifié. Il est démontré que la proximité est le facteur qui impacte le plus les performances des tags.

En se basant sur cette conclusion, l'effet de la proximité (à des distances très petites, inférieures à 5 cm) est étudié. A l'issue d'une étude expérimentale dans un milieu réel et en s'inspirant des recherches antérieures les divers paramètres lié directement au phénomène de la proximité, et les divers éléments qui le constituent sont identifiés. Après l'isolation de chaque élément par la mesure et la vérification des résultats par la simulation, nous avons démontré que la désadaptation causé par la proximité des autres tags est l'élément le plus impactant. En fonction de ces résultats, nous avons proposé un modèle analytique qui se base sur la théorie des impédances réfléchies afin d'estimer la dégradation de la distance maximale d'un tag placé à proximité d'autres tags en fonction des dimensions de l'antenne et de la distance de séparation entre tags. Ce modèle s'est démontré très utile et une estimation précise de la dégradation des performances à proximité est achevée. En se basant sur ce nouveau modèle, nous avons proposer ensuite une nouvelle méthode de conception d'antenne qui vise essentiellement l'optimisation des dimensions de la boucle «*T-match*» pour réduire le couplage magnétique entre deux tags.

Les résultats de cette méthode, obtenus par la simulation du nouveau tag, à une fréquence spécifique (866 MHz), sont prometteurs et aident à stabiliser les performances d'un tag passif lorsqu'il est placé en proximité. Néanmoins, d'autres facteurs d'impact peuvent faire obstacle à la répercussion de ces résultats dans un milieu réel. En effet, entre la conception du tag et son déploiement dans un magasin par exemple, plusieurs facteurs, autre que la proximité, peuvent impacter ces performances. De plus, vu la complexité de ces facteurs et la non maîtrise du bilan de liaison dans des environnements complexes et variables, il est difficile d'anticiper ces changements lors de la phase conception.

Chapitre 4

L'évaluation des performances d'un système RFID

4.1 L'influence du milieu réel dans la RFID

Comme établi dans le chapitre précédent, la mesure de la distance maximale de lecture d'un tag, ou d'autres indicateurs de performances dans un milieu contrôlé n'est pas suffisant. Malgré l'isolation des facteurs présents dans un milieu réel et la quantification de leur impact sur les performances d'un tag, il est difficile d'estimer les performances de ce tag lorsqu'il est déployé dans un magasin. La diversité des types de produits, de leurs facteurs de forme et des matériaux qui les composent, complique le choix d'un tag qui correspond à un produit. De plus, l'arrangement des produits tagués dans des structures de rangement (rayons métalliques dans un magasin Décathlon par exemple), et la présence de multi-chemins dans un milieu non-contrôlé, ajoutent une couche de complexité à la caractérisation d'un tag et à l'anticipation de ses performances dans un milieu réel.

Les études analysées dans le chapitre précédents concernent des facteurs isolés caractérisés ou modélisés. De même, nos efforts de caractérisation et de modélisation sont principalement menés autour de ces facteurs et l'anticipation de leur impact à partir des mesures dans un environnement contrôlé, le calcul ou la simulation. Tout bien considéré, ces études manquent de précision à cause de l'ignorance des facteurs clés du milieu réel tels que l'arrangement des tags et les phénomènes de multi-chemins. Parmi les études qui essaient de comprendre les performances de la technologie RFID UHF passive dans un milieu réel nous avons identifié deux approches différentes. La première consiste à dériver un modèle de propagation afin d'estimer les zones de couverture d'une antenne. En [161], un modèle qui prend en compte les contraintes d'un milieu 3D est proposé comme remplacement du modèle en espace libre. En [162], des paramètres clés d'un système RFID, telles que la sensibilité du lecteur, la sensibilité du tag, les multi-chemins et la polarisation d'antenne sont pris en compte pour générer un modèle statistique des pertes de propagation. En [163], un modèle plus générique, validé par l'expérimentation propose une nouvelle formule de Friis qui prend en compte les taux d'absorption du milieu, l'effet des multi-chemins et les liaisons montante et descendante. Malgré leur pertinences, ces modèles ne prennent pas en compte des paramètres comme les structures d'agencement. D'autre part, une deuxième approche consiste à utiliser des lecteurs RFID du commerce afin de mesurer les performances du tag dans un milieu non-contrôlé. En [164], des nouveaux indicateurs de performances sont proposés : les taux de lecture, la vitesse et la distance maximale de détection. Ces indicateurs sont distincts puisqu'ils sont directement liés à un système de

lecture dans un milieu réel. Une autre étude similaire en [165] utilise ce type d'indicateur afin de mettre en valeurs le changement de performances sous les contraintes d'un environnement réel. Souvent dans un montage en milieu réel, le RSSI seul est mesuré avec l'interrogateur RFID afin de conclure sur les réponses des tags lorsqu'ils sont détectés.

Lorsque ces études mettent en évidence l'impact du milieu réel et la différence majeure entre les performances par rapport à un milieu idéal, les conditions d'essai proposées ne sont pas tout à fait réaliste. En effet, ces conditions sont réellement caractérisées par trois éléments principaux, non reproductibles dans un milieu réel : le faible nombre de tags dans le milieu, leur agencement et le fait que les tags (EPC) présents dans le milieu sont tous connus. Pour cela, dans ce chapitre, nous proposons une méthode de caractérisation dans un milieu réel capable de prendre en compte tous les facteurs présents sans aucune connaissance préalable du milieu.

4.2 Étapes de caractérisation dans différents milieux

4.2.1 Contexte

Différentes contraintes font obstacles à l'anticipation des dégradations de performances dans un milieu réel et plusieurs défis sont à relever afin de gérer les performances du tag pendant son déploiement. L'inclusion des effets du produit, de l'agencement et du milieu est l'élément principal à considérer pour une caractérisation adéquate. Ces facteurs et leurs importance varient d'un cas d'usage à un autre. Par exemple, dans le cas d'un magasin de ville qui vend uniquement des vêtements, les effets du produit et de l'agencement sont plus facile à gérer que dans le cas d'un magasin de type grande surface qui propose une variété de produits de compositions différentes.

Le laboratoire de RFID de l'Université d'Auburn, propose un programme nommé «*ARC*» dont l'objectif est de garantir un niveau de performances pour chaque tag caractérisé. Vingt et un niveaux de performances sont proposés correspondants à vingt et une spécifications allant de A à U. Les tags sont caractérisés dans une chambre anéchoïque avec quatre antennes émettrices montées sur un support en forme d'arc vertical en face du tag afin d'émuler plusieurs orientations [166]. Le protocole de test est généralement divisé en un test standard et un test adapté pour chaque spécification. Le premier comprend une caractérisation du tag seul et une autre caractérisation avec d'autres tags dans le milieu. Le test adapté comprend les mêmes étapes de caractérisation mais avec différents matériaux ou produits [167]. Par exemple, pour la spécification A [168], un pantalon en jean est utilisé tandis que pour la spécifications B [169] le produit choisi est un sac (polybag). Par la suite, en fonction des résultats de ces tests, un tag sera recommandé pour usage selon différentes spécifications.

Dans le même esprit, l'association GS1 a mis en place des nouvelles méthodes de test des produit tagués ou «*Tagged-Item Performance Protocol*»(TIPP) [170]. Ces méthodes visent à intégrer l'effet de l'agencement et du produit sur la lecture selon des protocoles d'essai à l'intérieur d'un caisson anéchoïque. Pour cela, les méthodes proposent trois protocoles de tests différents pour trois grades (S, M et J). De plus, ce document fourni des éléments sur le placement du tag sur le produit, et l'agencement de plusieurs produits sous test dans l'environnement contrôlé.

Malgré le niveau d'information additionnel que fournissent ces méthodes, plusieurs éléments liés à l'agencement, tels que la forme de la structure de rangement, son matériau et le nombre de produits présents dans le milieu sont négligés. De plus, lorsque les familles

de produits proposées par une enseigne sont très nombreuses et diversifiées, ce type de caractérisation peut vite devenir inefficace.

4.2.2 Les différents milieux de lecture

Si nous considérons le cas d'un magasin Decathlon, les structures métalliques des rayons favorisant une forte densité d'agencement de tags. De plus, la complexité des produits et leur diversité (électroniques, liquide, métallique, textile, ..), produisent des effets très complexes. Afin de mieux comprendre tous ces effets et leurs contributions aux performances finales d'un produit tagué, nous proposons une méthode de caractérisation divisée en quatre étapes :

1. Caractérisation d'un tag seul.
2. Caractérisation d'un tag sur un produit.
3. Caractérisation d'un tag sur un produit, rangé dans un rayon (plusieurs types d'agencements dans une structure métallique) dans un milieu idéal.
4. Caractérisation d'un tag sur un produit, rangé dans un rayon dans un milieu réel.

Par la suite nous considérons un rayon Decathlon avec des produits tagués, agencés dans différentes structures de rangement et à différentes positions dans le rayon. En utilisant 5 tags commerciaux, plus de 600 produits appartenant à 20 familles sont tagués. L'équipement de test utilisé est le Voyantic Tagformance Lite, avec son caisson anéchoïque pour les étapes 1 et 2. Pour l'étape 3, le même équipement est utilisé mais avec une antenne externe placée à une hauteur de 1.55 mètres et à une distance moyenne de 1 mètres du rayon. Les tests pour l'étape 3 sont réalisés dans la chambre anéchoïque de la plateforme CEM de l'université de Lille, de dimensions égales à 7x7x3 mètres. Le même équipement est utilisé en étape 4, et seul le milieu de lecture change. En effet, étant donné le nombre important de variables, seules les familles de produits dont au moins 8 produits tagués ont répondu dans la bande de fréquence d'intérêt sont considérées par cette étude. Les familles de produits, leurs agencements et les tags utilisés sont affichés dans le tableau 4.1. Des informations complémentaires concernant les tags utilisés sont trouvables en annexe A.

4.2.2.1 Caractérisation d'un tag seul

Premièrement, chaque tag parmi les cinq utilisés pour identifier les produits du rayon est caractérisé seul dans le caisson anéchoïque. La figure 4.1 montre le tag sous test situé à une distance de 50 centimètre de l'antenne émettrice. Pour rappel, la sensibilité du tag est trouvée en faisant varier la puissance d'émission. Lorsque le tag répond, la puissance d'émission (PAR) est notée comme étant la puissance minimale d'activation et la sensibilité du tag est déduite en prenant compte les pertes des câbles, la distance de séparation (50 cm) et le gain de l'antenne du lecteur.

Afin de mieux illustrer l'effet de différents facteurs sur les performances du tag nous surveillons la puissance absorbée par la puce du tag, donnée par l'équation 4.1b. Puisque le tag est alignée en face de l'antenne émettrice linéaire dans un environnement contrôlé, les pertes de propagation en espace libre sont considérées et les divers pertes de polarisation et d'orientation peuvent être négligées ($p = 1$). Dans les équations 4.1a et 4.1b, nous notons $PAR^{tag\ seul}$ la puissance nécessaire pour réveiller un tag seul dans un milieu idéal,

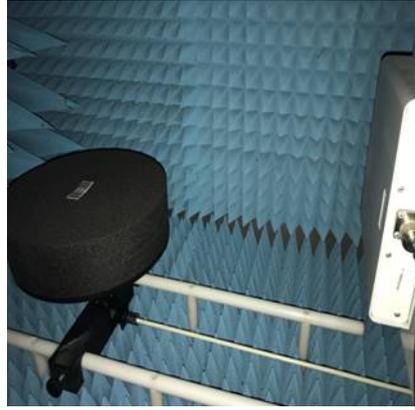


FIGURE 4.1 – Tag seul dans le caisson anéchoïque

$P_{puce}^{tagseul}$ est la puissance absorbée par la puce dans les mêmes conditions et P_{tag} est la puissance disponible à l'entrée de l'antenne du tag.

$$PAR^{tagseul} = \frac{P_{puce}^{tagseul}}{\alpha_{EspaceLibre}} \quad (4.1a)$$

$$P_{puce}^{tagseul} = \frac{P_{tag}}{G_{tag} \cdot \tau} \quad (4.1b)$$

4.2.2.2 Caractérisation d'un tag sur un produit

Deuxièmement, l'effet du produit est considéré. Lorsque l'introduction du tag seul dans le caisson anéchoïque permet de mettre en évidence les performances de l'antenne en espace libre, cet étape met en valeur les performances d'un produit tagué. Cela signifie, que la puissance minimale nécessaire pour activer le tag est mesuré lorsqu'il est attaché à un produit spécifique tout en prenant en compte les diverses variables telles que sa forme et les matériaux qui le constituent. Pour cela, un produit tagué de chaque famille est placé dans le caisson anéchoïque face à l'antenne émettrice comme le montre la figure 4.2.

L'équation 4.2a donne la relation entre la puissance minimale nécessaire pour activer le produit tagué et la puissance absorbée par la puce lorsque le tag est attaché à ce produit. Le facteur d'affaiblissement de la propagation en espace libre est toujours considéré puisque les tests prennent place dans le caisson anéchoïque. En équation 4.2b, la puissance



FIGURE 4.2 – Produit tagué dans le caisson anéchoïque

disponible à la position du tag ne change pas (P_{tag}), mais la puissance absorbée par la puce change en fonction du nouveau gain de l'antenne du tag et du nouveau facteur de désadaptation altérés par la présence du produit. L'effet du produit sur ces deux facteurs est discuté dans le chapitre précédent. Le tag est toujours aligné face à l'antenne émettrice ce qui explique l'estimation des pertes de polarisation à $p = 1$.

$$PAR^{Produit} = \frac{P_{puce}^{Produit}}{\alpha_{EspaceLibre}} \quad (4.2a)$$

$$P_{puce}^{Produit} = \frac{P_{tag}}{G'_{tag} \cdot \tau'} \quad (4.2b)$$

4.2.2.3 Caractérisation de l'effet de l'agencement

Dans une troisième étape, nous considérons le cas où les produits sont placés dans un rayon. Quelle que soit la structure de ce rayon, les produits tagués seront affectés soit par son matériau (du métal dans ce cas) soit par les différentes configurations de rangement. Par exemple, sur une broche, plusieurs produits sont groupés d'une manière dense afin d'exploiter le volume de rangement disponible. Dans ce cas là, le métal de la broche, ainsi que la proximité de tags entre-eux affecteront les performances du produit tagué. Comme expliqué ci-avant, une antenne émettrice linéaire d'un gain égal à 8 dBi (ref :AN-FF-SR) est placée à 1 mètre des produits du rayon.

Chaque produit de chaque famille est interrogé dans une bande de fréquence située entre 864 et 870 MHz afin de mesurer la puissance minimale d'activation (PAR^{CA}) dans la chambre anéchoïque. La moyenne de cette puissance mesurée sur chaque produit dans une famille est calculée. Afin d'assurer la fiabilité des résultats, seules les familles dont au moins huit produits ont répondu sur chaque fréquence dans la bande définie, sont considérées pour l'analyse des résultats. Les divers rangements sont montrés sur la figure 4.3 et les informations relatives aux familles considérées sont affichées dans le tableau 4.1.

Identifiant	Produit	Agencement	Tag
Produit A	Chaussures	Chaque paire est placée sur un support	Zephyr1
Produit B	Sacs à dos	Groupés sur des broches	Web G2iL
Produit C	Poignées Vélo	Groupées sur des broches	Zephyr2
Produit D	Bouteilles	Groupées sur une plaque métallique	AD383
Produit E	Hameçon	Groupés sur des broches (proximité)	AD383
Produit F	Cordes à sauter	Groupés sur des broches (proximité)	AD320
Produit G	Chaussettes	Roulées et agencées dans un panier métallique	Zephyr2
Produit H	Lampe (Boîtier)	Groupés sur une plaque métallique	Web G2iL
Produit I	Mousqueton	Groupés sur des broches (proximité)	Web G2iL
Produit J	Plomb de pêche	En sachets, groupés sur des broches	Web G2iL
Produit K	Hameçon (poisson)	Groupés sur des broches (proximité)	Web G2iL

Tableau 4.1 – L'agencement des 11 produits sélectionnés



FIGURE 4.3 – Rayon complet dans la chambre anéchoïque

Les equations 4.3a et 4.3b indiquent l'impact de l'agencement en rayon sur les variations des paramètres de l'équation de Friis. Puisque les tests sont toujours menés en chambre anéchoïque, le modèle des pertes adopté est toujours celui de l'espace libre détaillé en 3.2a. Le métal présent dans la zone de champ proche des tags affecte le gain de l'antenne et peut contribuer à la désadaptation puce-antenne. De même, un autre facteur qui affecte ces deux facteurs, est la présence d'autres tags dans le champs proche d'un tag en communication avec le lecteur. Comme montré dans le chapitre précédent, la désadaptation est le facteur le plus sensible à l'effet de la proximité. Ces changements sont représentés dans l'équation 4.3b par les symboles d'apostrophe sur le gain et le taux de désadaptation. A partir de ces changements, la puissance absorbée par la puce d'un tag attaché à un produit agencé dans une structure métallique P_{puce}^{CA} peut être calculée.

$$PAR^{CA} = \frac{P_{puce}^{CA}}{\alpha_{EspaceLibre}} \quad (4.3a)$$

$$P_{puce}^{CA} = \frac{P_{tag}}{G'_{tag} \cdot \tau'' \cdot p} \quad (4.3b)$$

4.2.2.4 Caractérisation en milieu réel

Finalement, l'effet du milieu réel est considéré. Ceci est réalisé en plaçant le rayon complet dans un milieu réel sans aucun changement comme montré sur la figure 4.4. Ainsi, seulement le modèle de propagation change ; il dépend de la présence du sol, du plafond et éventuellement de parois verticales à proximité du rayon.

Lorsque les mêmes tags, mêmes produits et mêmes structures de rangement sont utilisés, la puissance absorbée par le tag ne change pas par rapport à celle en chambre anéchoïque (étape 3). Le seul changement intervient sur le chemin de propagation. En absence des absorbeurs par terre (comme dans la chambre anéchoïque) et compte tenu de la localisation du rayon dans une salle d'exposition dont le plafond est suffisamment haut (5 mètres), et des parois verticales suffisamment éloignées, nous adoptons un modèle de propagation à deux chemins. Ce modèle est décrit dans le chapitre précédent par l'équa-



FIGURE 4.4 – Rayon complet dans un milieu magasin

tion 3.2b. Pour cela, le seul changement intervient sur le calcul de la puissance minimale d'activation où le facteur d'affaiblissement $\alpha_{EspaceLibre}$ est remplacé par $\alpha_{MilieuReel}$ afin de prendre en compte un deuxième chemin réfléchi par le sol. Pour rappel l'antenne est située à 1,55 mètre du sol. Nous notons P_{puce}^{MR} , la puissance absorbée par la puce du tag en milieu réel (MR). Cette puissance est en réalité considérée identique à P_{puce}^{CA} (équation 4.4b), car les éléments constituant le milieu (sol, plafond, parois verticales) sont situés dans le champ lointain des produits (tagués) étudiés. Nous notons PAR^{MR} la puissance nécessaire pour activer le tag en milieu réel. Les éléments de ce milieu réel sont responsables des phénomènes multi-chemins qui peuvent augmenter ou diminuer localement la valeur du champ électromagnétique présent à la position de l'antenne du tag.

$$PAR^{MR} = \frac{P_{puce}^{MR}}{\alpha_{MilieuReel}} \quad (4.4a)$$

$$P_{puce}^{MR} = P_{puce}^{CA} = \frac{P_{tag}}{G_{tag}'' \cdot \tau'' \cdot p} \quad (4.4b)$$

4.2.3 Mesure du changement des performances

Afin de comprendre l'impact positif ou négatif de chaque étape dans le déploiement d'un tag dans un espace de vente, il est nécessaire de suivre le changement de performances entre deux étapes. Dans cet objectif, nous définissons un nouveau indicateur de performance appelé le facteur de changement (Γ). Pour les 11 familles de produits sélectionnées (voir tableau 4.1), ce facteur est calculé pour l'effet du produit, l'effet de l'agencement et l'effet du milieu dans une bande de fréquence entre 864 et 870 MHz. Les résultats affichés représentent les moyennes de puissance d'activation nécessaire à l'ensemble des produits (d'une même famille) qui ont répondu. Chaque famille de produits est identifiée par une lettre alphabétique. La correspondance entre la lettre et la famille est affichée dans le tableau 4.1.

Tout d'abord le changement de performances causé par le produit est calculé. Comme le montre l'équation 4.5, ce facteur est obtenu en divisant la puissance (PAR) minimale nécessaire pour l'activer par la puissance nécessaire pour activer le produit tagué. Lorsque ce facteur est supérieur à 1, cela signifie que la puissance nécessaire pour activer le produit est inférieure à celle nécessaire pour activer le tag seul, signalant ainsi une amélioration des performances grâce au produit. Dans le cas opposé, le facteur de changement sera inférieur à 1. L'amélioration et la dégradation des performances peuvent être directement liées

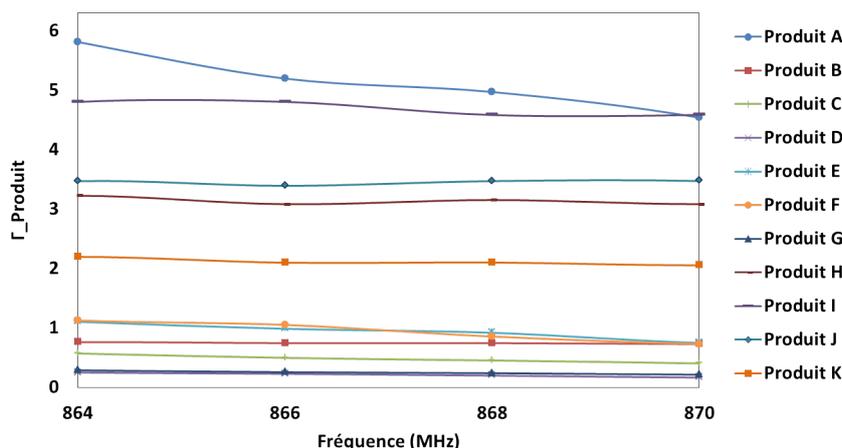


FIGURE 4.5 – Effet du produit

aux changement du gain et du facteur de désadaptation comme le montre l'équation 4.5.

$$\Gamma^{Produit} = \frac{PAR^{tagseul}}{PAR^{Produit}} = \frac{G'_{tag} \cdot \tau'}{G_{tag} \cdot \tau} \quad (4.5)$$

La figure 4.5, montre la variation de $\Gamma^{Produit}$ en fonction de la fréquence pour les 11 familles considérées. Une première observation, permet de regrouper les produits en trois catégories de performances. Pour mieux comprendre ce regroupement, nous analysons les résultats des produits dans chaque groupe.

1. Les produits E (hameçons), F (Corde à sauter) et B (Sacs à dos) ont un facteur de changement proche de 1. Cela signifie que la puissance nécessaire pour activer le tag n'a pas changé entre les deux étapes. Ceci est majoritairement dû au placement du tag. En effet, pour les trois produits E, F et B, le tag est attaché sur du carton, du papier et en espace libre dans le sac respectivement.
2. Les produits C (poignée vélo), D (bouteilles) et G (chaussettes), sont les produits impactés négativement pas la présence du produit avec un facteur $\Gamma^{Produit} < 1$. Le matériau des produits C et D, composés de carbone et de plastique, est le facteur d'impact le plus important. Dans le cas des chaussettes (produit C), la courbure du tag est le facteur d'impact qui entre en jeu.
3. Pour le reste des produits, le matériau du produit ou sa forme sont des facteurs d'impact positifs sur les performances des tags. Le produit A (chaussures) par exemple, atteint un facteur de changement entre 5 et 6 ; ce qui signifie que la puissance nécessaire pour activer le tag peut être divisée par 6 lorsque le tag est attaché à ce produit.

Nous remarquons à partir de ces observations que la plupart des tags atteignent de meilleures performances lorsqu'ils sont attachés à un produit. Ceci démontre un choix judicieux du tag pour la plupart des produits lors de la procédure de «tagging». En revanche, les trois produits qui ont entraîné une dégradation des performances ont une composition en matériau ou des formes plus complexes. Lorsque le choix du tag pour ces produits doit être révisé, il est important de noter que la plupart des tags utilisés sont destinés à un usage sur textile ou des accessoires divers.

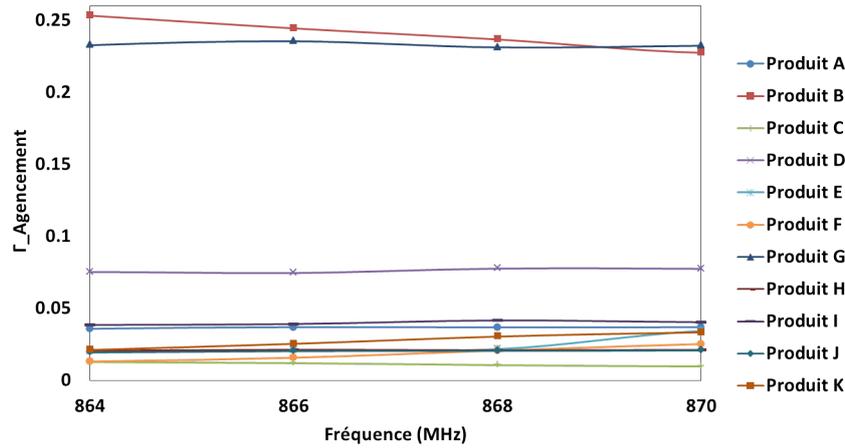


FIGURE 4.6 – Effet de l'agencement

En arrangeant les produits tagués dans des structures métalliques, l'orientation des produits par rapport à l'antenne émettrice n'est plus maîtrisée. Par conséquent, le changement des performances lorsque les tags sont agencés dans un rayon dans la chambre anéchoïque par rapport à une seul produit dépend beaucoup des pertes de polarisation. S'ajoutent à cela, le changement du gain de l'antenne dû aux structures présentes dans la zone de champs proche du tag et la désadaptation antenne-puce due à la proximité entre tags. L'équation 4.6, montre les facteurs déterminant le facteur de changement Γ^{CA} .

$$\Gamma^{CA} = \frac{PAR^{Produit}}{PAR^{CA}} = \frac{G''_{tag} \cdot \tau'' \cdot p}{G'_{tag} \cdot \tau'} \quad (4.6)$$

En analysant les résultats illustrés en figure 4.6, il est clair que l'impact de l'agencement est négatif dans tous les cas. Dans les meilleurs cas, un taux de changement de 0,25 est atteint. Dans ce cas, il serait nécessaire d'augmenter la puissance émise de 75% par rapport à l'activation d'un produit seul, afin de l'activer dans le rayon en chambre anéchoïque. Les deux produits les moins impactés par cette étape sont les produits B (sacs à dos) et G (chaussettes). En comparant ces deux produits aux autres, l'élément distinguant est que leur agencement est moins dense. Les produits les plus affectés par l'agencement sont les produits F (cordes à sauter) et C (poignée vélo). Les premiers sont agencés à proximité les uns des autres et les deuxièmes sont affectés par la présence du matériau en carbone sur le chemin de propagation entre les tags et l'antenne émettrice.

Finalement, le changement de performances entre un milieu réel et la chambre anéchoïque est calculé à partir des mesures de la puissance minimale d'activation. L'équation 4.7 montre que le facteur de changement par rapport à la chambre anéchoïque dépend des facteurs d'affaiblissement de propagation en espace libre et lorsque deux chemins sont considérés.

$$\Gamma^{MR} = \frac{PAR^{CA}}{PAR^{MR}} = \frac{\alpha_{MilieuReel}}{\alpha_{EspaceLibre}} \quad (4.7)$$

Les variations de ce facteur (Γ^{MR}) sont visualisées sur la figure 4.7, dans la bande de fréquence entre 864 et 870 MHz pour les 11 familles de produits sélectionnés. Les résultats mettent en évidence trois catégories de performances.

1. Les produits dont le facteur est inférieur à 1 et donc une dégradation des performances grâce à l'évanouissement multi-chemin est constatée. Les produits H

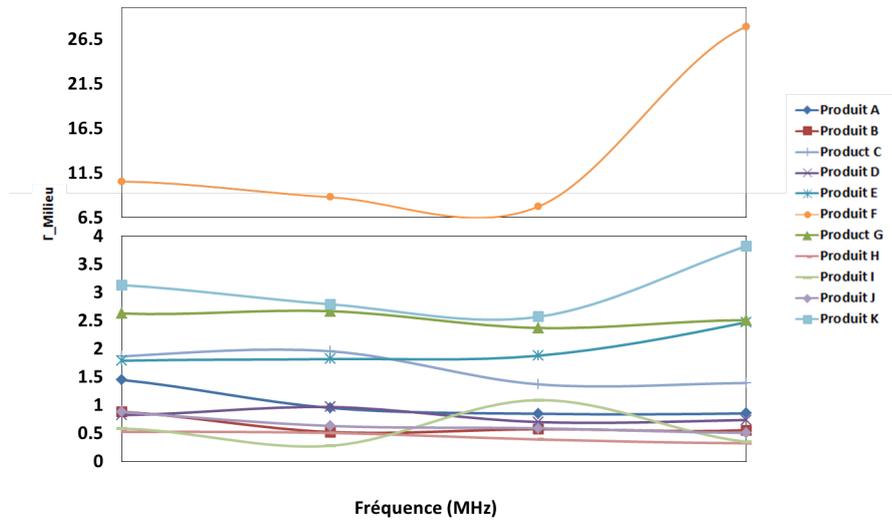


FIGURE 4.7 – Effet du milieu

(boîtier lampe), I (Mousqueton) et B (sacs à dos). La positions de ces produits– moins affecté par les multi-chemins– dans la partie haute du rayons (I et B) ou sur une plaque métallique (H) peuvent justifier ces résultats.

2. Les produits D (Bouteilles), J (Plomb de pêche), A (Chaussures) ont atteint un facteur Γ^{MR} proche de 1. De même, le produit J est placé dans la partie haute du rayon, tandis que les produits A et D sont placés sur des supports métalliques.
3. Les produits C (poignée vélo), E (hameçon), F (cordes à sauter), K (Hameçon (poisson) et G (Chaussettes) montrent une amélioration des performances. Il est important de noter que le produit F atteint un facteur de changement de 26.5 à 870 MHz.

Nous remarquons que le placement d’un rayon en milieu réel est bénéfique dans la plupart des cas. Plus précisément, en prenant en compte les 11 familles de produits, nous constatons que les produits qui ont profité le plus de l’effet des multi-chemins (réflexions sur le sol) sont les produits agencés sur des broches métalliques en une configuration dense.

4.2.4 Discussion

En comparant l’impact de différents facteurs, nous remarquons que l’agencement a un impact très négatif par rapport à l’effet du produit et du multi-chemin. Plus particulièrement, l’arrangement des produits sur les broches se montre le plus dégradant en chambre anéchoïque, tandis qu’en milieu réel, cette structure profite le plus de l’effet positif du multi-chemin. De plus, lorsque l’effet du produit montre l’importance de bien choisir le tag pour chaque produit, les deux autres effets montrent que les performances finales dans le milieu réel sont entièrement indépendantes du tag choisi. Par exemple, malgré que les produits B, H, I, J K utilisent le même tag (Web G2iL), et leurs performances sur produits sont distribuées sur les trois catégories de performances, en milieu réel, seul le produit K montre une amélioration de performances par rapport à une milieu idéal (Chambre

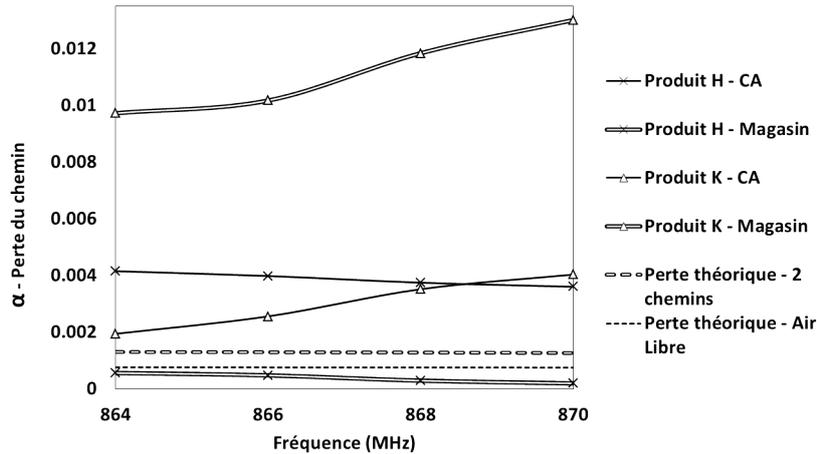


FIGURE 4.8 – Pertes du chemin

anéchoïque).

$$\alpha = \frac{PAR}{P_{puce}} \quad (4.8)$$

Afin de mieux comprendre l'effet positif des multi-chemins, deux produits H et K, qui utilisent le même tag et qui appartiennent à deux catégories de performances différentes sont considérés. Le produit H représente une lampe dans un boîtier en carton. le produit K est un hameçon en forme d'un poisson. La figure 4.8, montre les pertes du chemin mesurées pour chacun des deux produits en chambre anéchoïque et en milieu réel. Ces pertes sont déduites à partir des mesures, comme le montre l'équation 4.8. De plus, les courbes d'affaiblissement du chemin théorique en espace libre et avec deux chemins sont illustrées.

Les courbes théoriques montrent que pour une antenne placée à une hauteur de 1,55 m et à une distance de 1 mètre du rayon, l'effet des multi-chemins est positif, par le fait que les pertes de propagation seront réduites d'un facteur de 1,7 lorsque le modèle de deux chemins est considéré. Dans la bande d'intérêt, les produits H et K ont des pertes moyennes sur chemin dans la chambre anéchoïque de 0,0038 et de 0,003 respectivement. En milieu réel, le facteur des pertes est multiplié par 0,098, dégradant ainsi davantage les performances du produit H tagué. En ce qui concerne le produit K, le facteur des pertes est multiplié par un coefficient de 3,7. Cette valeur mesurée (3,7) est supérieure à la valeur théorique calculé (1,7). Ceci peut être dû à la présence des autres chemins. Autrement, le type d'arrangement peut être impactant. Le produit H est placé sur une plaque métallique alors que le produit K est situé sur des broches. Il est probable que la présence du métal en dessous du produit bloque les rayons réfléchis par le sol. Il est important de noter, que l'effet des multi-chemins dépend fortement de la fréquence, ce qui est visible sur le graphe de la figure 4.7, où les courbes varient dans la bande de fréquence, contrairement aux courbes des figures 4.5 et 4.6, qui sont plutôt constantes.

Ces résultats mettent en valeur l'importance du suivi du déploiement et des performances des tags. Lorsque le choix du tag pour un produit est important pour garantir un minimum d'efficacité, la projection sur les performances en milieu réel est également nécessaire. Malgré les avantages apparents de cette démarche consistant à caractériser le milieu réel, elle n'est pas applicable à grande échelle en raison du manque de répétabilité observé lors des essais réalisés sur plusieurs familles de produits. D'autre part, le besoin

en ressources nécessaire pour réaliser cet étude se s'accroît en fonction de la taille du magasin et le nombre de produits concernés.

4.3 Nouvelle méthode alternative aux méthodes de caractérisation classiques

4.3.1 Évaluation des performances en milieu réel

Comme établi ci-avant, l'impact de l'agencement et du milieu de lecture est plus important que celui du produit sur les performances d'un tag. Ceci signifie qu'afin de réaliser une caractérisation représentative du tag, son agencement et le milieu de déploiement doivent être connus à l'avance. De plus, la modélisation ou l'émulation de ces effets doit être réalisée si nous optons pour une caractérisation en caisson anéchoïque comme c'est le cas actuellement.

Tandis que la méthode proposée ci-avant peut être simplifiée en une seule étape (étape 4), plusieurs défis sont à relever. En premier lieu, la caractérisation de tous les produits tagués dans un magasin grand surface nécessite un temps considérable ; ce temps augmente proportionnellement aux produits dans le magasin et à sa surface. Deuxièmement, les tests sont prouvés irrépétables sur plusieurs familles de produits (seulement 11 familles considérées précédemment) à cause des faibles performances. Troisièmement, lorsque la caractérisation est effectuée avec un équipement Voyantic et une antenne planaire en face du rayon, la lecture en Temps Réel, s'effectuera éventuellement avec un système de lecture automatique. Puisque les performances des produits tagués dépendent du système de lecture (interrogateur et antennes), il est possible que les performances caractérisées ne soient pas représentatives. Ajouté à cela, les coûts élevées des équipement de caractérisation commerciaux.

En se basant sur ce qui précède, nous proposons une méthode d'évaluation des performances du tag dans un milieu réel au lieu d'une caractérisation classique d'un tag ou d'un produit tagué dans un milieu contrôlé. Afin de garantir une solution universelle, la méthode proposée doit prendre en compte le système de lecture utilisé, le milieu de lecture et l'application visée. Dans notre cas nous nous intéressons à l'inventaire automatique dans un magasin. Il est important de noter que la solution doit fournir une évaluation sans aucune connaissance des caractéristiques du milieu. Nous prétendons ainsi qu'avec une telle méthode, grâce au contrôle continu en Temps Réel, il est possible d'identifier les produits tagués ayant de faibles performances. Ceci permet à son tour de prendre des actions correctives et ciblées afin d'améliorer les taux de détection.

4.3.2 Mise en place et configuration des systèmes de caractérisation

L'usage d'un système de lecture pour la mesure des performances des produits tagués en milieu réel résulte en une évaluation plus fiable. Alors que le système de test pourrait prendre la forme d'un lecteur manuel, un robot ou d'étagères intelligentes, nous optons pour une solution de type lecteur fixe. Une solution fixe de lecture peut être installée au plafond ou montée en face d'une zone cible. Des solutions de ce types deviennent de plus en plus adaptés pour des applications d'inventaire automatique (détection) et de

localisation. Dans le contexte de cette étude, ces solutions sont choisies pour remplacer l'équipement de caractérisation dans un milieu réel.

Dans cette étude, un module RFID M6e de ThingMagic [171], deux câbles coaxiaux de 3 mètres de longueur et deux antennes planaires, polarisées circulairement (Laird S8658WPR) sont utilisées. L'antenne Laird utilisée a une ouverture de faisceau de 65° à -3dB (cf. annexe B). Ces composants sont assemblés pour émuler un système de lecture, où l'interrogateur (module M6e) est séparé des antennes (référence : S8658WPR). Cela laisse plus de liberté pour le montage des points de lecture. La récupération des données est réalisée par une application développée autour de l'API fournie par ThingMagic [172]. Le module est connecté à un ordinateur grâce à un connecteur GPIO-USB. Il est important de noter que les deux antennes sont connectées aux ports 1 et 2 du module respectivement et chacun émet 50% du temps total de la lecture. Le système est configuré pour émettre une puissance PAR maximale de 33 dBm, respectant ainsi les normes Européennes. Les paramètres Gen2, définissant la commande du lecteur et la réponse du tag sont configurés comme suivant : BLF = 250 KHz, TARI = $12,5\mu s$, Session = S1 et encodage = M4. Ces paramètres sont choisis afin d'obtenir un compromis entre des taux de détections élevés en milieu dense et l'assurance d'obtenir de multiples détections d'un même tag. Les définitions de ces paramètres, leurs effets et leurs contributions aux performances du systèmes sont détaillés dans le chapitre 5.

Puisque dans cette étude, un module RFID commercial qui transmet à une puissance fixe est utilisé pour monter une solution de lecture fixe, une variation de la distance permettant de déduire la sensibilité d'un tag n'est pas possible. Au contraire, la variation de la puissance émise est possible. Cependant, si nous visons à évaluer le produit tagué dans son milieu de lecture sous les mêmes conditions, la puissance choisie doit assurer la détection de la plupart des tags dans la zone de lecture ciblée. Alternativement, le module utilisé remonte des informations comme l'indication de la puissance du signal reçu par le lecteur ou «*Received Signal Strength Indicator*»(RSSI) et le nombre de lecture d'un seul tag ou «*Read Count*»(RC). De plus, lors de la lecture, l'information de la détection ou la non-détection d'un tag (lecture de son code EPC) peut être utilisée comme un indicateur de performances. Ceci par contre nécessite que le code EPC de chaque tag présent dans le milieu de lecture soit connu. Une situation peut probable dans le cas réel.



(a) Cas A antennes en face du rayon



(b) Cas B antennes au plafond

FIGURE 4.9 – L'installation des antennes dans le milieu réel

Comme montré sur les figures 4.9a et 4.9b, deux montages peuvent être utilisés : le premier placé en face du rayon cible et le deuxième installé au plafond. L'objectif étant

tout d'abord de comparer les performances dans les deux cas proposés pour mettre en avant l'influence du système de lecture, ou dans ce cas, le placement des points de lecture face à l'antenne. Dans le cas A (figure 4.9a), deux antennes sont placées à une hauteur de 1,5 m du sol et à une distance de 1,7 m du centre du rayon. Dans le cas B (figure 4.9b), les deux antennes sont montées au plafond à une hauteur de 2,5 m avec une inclinaison de 45° , et à une distance de 1,7 m du centre du rayon (1,2 m du haut du rayon). La distance de séparation entre les deux antennes dans les deux cas est de 1,2 m. Puisque les deux antennes fonctionnent d'une façon séquentielle, la distance de séparation est choisie afin d'assurer une couverture maximale de la zone de lecture ciblée.

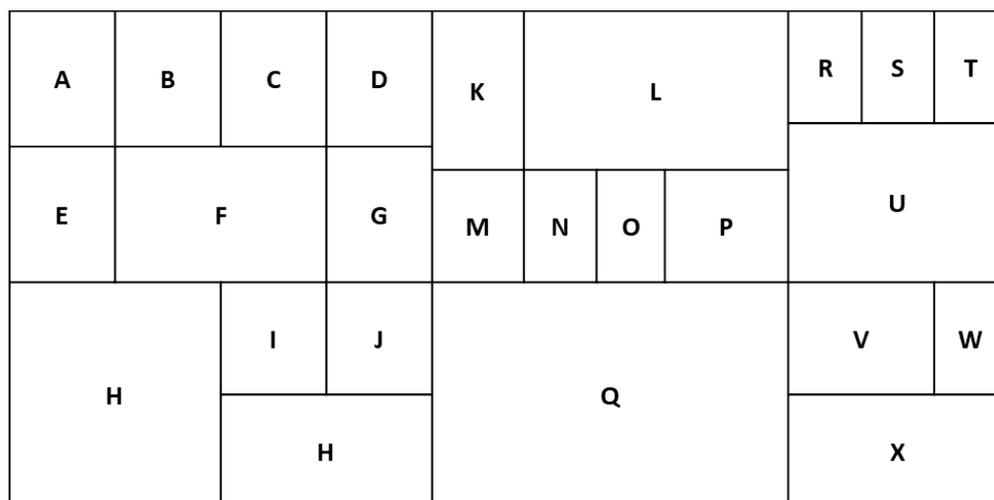


FIGURE 4.10 – Le gabarit du rayon, vue de face

La zone de lecture ciblée est un rayon de magasin qui comprend différentes structures d'agencement métalliques où différents articles de sport (Décathlon) sont agencés. 444 produits tagués appartenant à 24 familles sont choisis. Pour chaque famille le nombre de produit, le tag utilisé, ainsi que l'EPC de chaque produit sont enregistrés. L'objectif de cette étape est de mettre en place un milieu de test connu afin d'étudier les performances du système et de contrôler l'efficacité de la méthode d'évaluation proposée. Les produits sélectionnés peuvent être des produits simples, sans impact négatif sur le tag (un T-shirt par exemple) ou des produits plus complexes en forme et en composition en matériau (câbles de frein). La figure 4.10, montre un gabarit du rayon indiquant le placement de chaque produit de famille. Ce gabarit du rayon vue de face sera utilisé comme un outil pour visualiser les performances de chaque famille de produit. Les familles considérées dans cette étude, les tags utilisés ainsi que le nombre de produits dans chaque famille sont détaillés en annexe C. Les informations liées aux tags utilisées sont détaillés dans le catalogue des tags en annexe A. Ce rayon serait considéré pour mesurer les performances des systèmes proposés dans le chapitre 4 et 5.

4.3.3 Étude de la détection

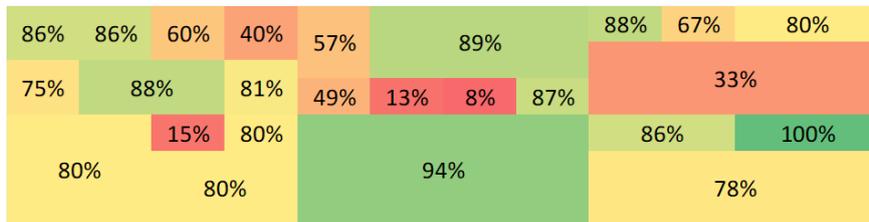
En premier lieu, la détection des deux systèmes proposés dans le cas A et B est évaluée. Sachant que chaque produit présent dans le milieu est connu, l'objectif de cette méthode est d'évaluer les performances d'un système RFID. Ceci est réalisé en comparant les performances des deux systèmes de lecture (cas A et cas B) et en étudiant la variations des performances entre les diverses familles définies en Annexe C. Puisque pour ce milieu

de lecture le calcul des pertes de propagation est réputé complexe, il ne serait pas possible de définir des seuils de performances attendues en terme d'indication de la puissance du signal reçu (RSSI) ou de nombre de lectures de chaque produit tagué (RC). Pour cela, au cours de cette étape, seule la détectabilité d'une famille de produit est considérée.

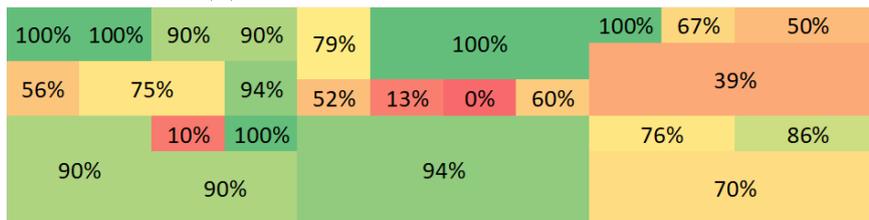
$$Detectabilite(Famille) = \frac{D(Famille)}{T(Famille)} \times 100 \quad (4.9)$$

L'équation 4.9 montre la formule utilisée pour calculer le pourcentage de détection ou la détectabilité de chaque famille de produits des 24 concernées (A à X). Le nombre de produits détectés par famille (D) est le nombre des codes EPC appartenant à une seule famille détectés lors de la lecture. Le nombre total de produits (T) est le nombre de produits par famille enregistré dans le tableau C.1 de l'annexe C.

Afin de comparer les performances des deux systèmes (en face du rayon et au plafond) tout en considérant les variations de performances entre les différentes familles et les positions dans le rayon, le pourcentage de détection pour chaque famille est représenté dans le gabarit en deux dimensions défini sur la figure 4.10. La figure 4.11a montre les résultats correspondant au système défini dans le cas A (figure 4.9a). La figure 4.11b, montre les résultats obtenus avec le système monté au plafond, défini dans le cas B (figure 4.9b). Il convient de noter que la période de lecture pour chaque système est de 5 minutes. Il est possible de personnaliser cette méthode en fonction de la taille de la zone de lecture et de l'application visée en modifiant le système ou la durée de lecture.



(a) Cas A : antennes en face du rayon



(b) Cas B : antennes au plafond

FIGURE 4.11 – Les taux de détection pour chaque famille de produits en milieu réel

A première vue, un pourcentage de détection total de 62% est atteint avec le système A contre un pourcentage total de 70% avec le système B pour l'ensemble des familles. Cette première observation montre l'importance du placement des points de lecture face à la zone d'intérêt et la dépendance des performances des produits tagués du système de lecture choisi. A l'issue de trois répétitions de ces mesures les mêmes pourcentages de détection sont obtenus. Deuxièmement, en observant les deux grilles de la figure 4.11, nous distinguons quatre codes couleur différents :

1. Vert : pourcentage de détection entre 90% et 100%. Ceci implique un placement optimal face aux antennes, dans un arrangement facile et un bon choix du tag par rapport à la forme et à la composition du produit.

2. Jaune : pourcentage de détection entre 75% et 90%. Les produits tagués sont généralement faciles à détecter mais leur placement n'est pas idéal face aux antennes.
3. Orange : pourcentage de détection entre 30% et 70%. Les produits de cette catégorie sont plus complexes en forme et en composition. Cependant, les performances de ces familles seraient améliorables en modifiant l'agencement.
4. Rouge : pourcentage de détection entre 0% et 20%. Nous remarquons que les trois mêmes familles sont en rouges quel que soit le système de lecture. Ces trois familles sont : I, N et O. Pour la famille I (Anti-vibration Tennis), les tags sont attachés sur du carton, mais l'agencement des produits sur des broches et la faible épaisseur du produit imposent que les tags soient en forte proximité l'un de l'autre. Dans le cas de la famille N (Sachets protéine), l'emballage en Aluminium impacte fortement les performances du tag. Enfin, pour les produits O (câbles frein), leur composition métallique proche du tag affecte les performances.

L'analyse des résultats de cette méthode montre clairement que la maîtrise de l'agencement des produits et le choix judicieux du tag en fonction de la composition du produit sont indispensables afin de garantir des taux de détection élevés pour un tel système RFID. Par contre, il est important de signaler que lorsque la composition du produit et sa forme sont simples, l'impact du tag utilisé n'est pas majeur. De plus, le bilan de liaison entre le lecteur et le tag est illustré par la disparité des performances des familles "faciles" en fonction de leur positionnement face aux points de lecture. Enfin, cette méthode a confirmé que les performances des familles de produit sont plutôt définies par l'agencement du produit et le milieu de lecture que par le type de tag choisi (cf. partie 4.2). Plus important, il est clair que différentes catégories de performances peuvent être distinguées quel que soit le système de lecture utilisé.

En résumé, l'utilisation d'un système de lecture dans l'environnement réel de déploiement plutôt qu'un équipement de caractérisation en environnement contrôlé pour réaliser l'évaluation des performances assure des résultats plus précises sur la base des indicateurs de performances plus adaptés à l'application visée (inventaire automatique dans notre cas). De plus, le temps des opérations et les ressources nécessaires sont considérablement réduits. En premier lieu, le temps d'évaluation est réduit de plusieurs journées (méthode proposée précédemment) à une opération de 5 minutes (qui peut augmenter en fonction de la taille du magasin). En deuxième lieu, l'utilisation des systèmes de lecture, évite l'investissement dans des équipements de métrologie et des ressources additionnelles.

En misant sur ces conclusions, nous procédons à la proposition et la validation d'une nouvelle méthode d'évaluation des performances dans un milieu réel, qui se base sur la classification automatique de différents produits tagués du milieu en différentes catégories de performances.

4.3.4 Classification des produits selon leur performances

4.3.4.1 Motivations et nouvelle approche

Afin de réussir à évaluer les performances sans aucune connaissance du milieu de lecture, ni de l'équipement utilisé, nous visons étudier les performances des produits tagués dans un milieu réel au-delà de la détectabilité de la famille à laquelle ils appartiennent. Cette étude poursuit l'analyse des performances en fonction de deux indicateurs : le RSSI (indicateur de la puissance du signal reçu) et le RC (le nombre de lecture d'un seul EPC).

La première approche, basée sur le pourcentage de détection, nécessite que les quantités de produits soient connues pour chaque famille. Toutefois, cette information n'est pas toujours disponible, et même lorsqu'elle est disponible n'est pas suffisamment précise : en [173], il est suggéré que par les méthodes conventionnelles (sans RFID), la précision de l'inventaire pourrait être aussi basse que 65%. D'autre part, la première méthode ne permet que d'évaluer une famille de produit tagués. Même si ce premier niveau d'information est intéressant, il n'est pas suffisant pour conclure sur les performances de chaque produit présent dans le milieu. Pour une même famille, il est possible que les produits aient des performances différentes. Par exemple, si nous considérons un groupe de produits tagués et agencés à proximité les uns des autres, les performances de chaque produit sont différentes en fonction de leur ordre par rapport à l'antenne (se référer à l'étude réalisée en chapitre 3 sur l'effet de la proximité).

Afin de proposer une méthode universelle d'évaluation des produits tagués basée sur l'utilisation de systèmes de lecture adaptés à l'application souhaitée, une nouvelle approche est proposée. La nouvelle approche ne nécessite pas une connaissance préalable des produits tagués présents dans le milieu car elle traite les données de lecture de chaque EPC séparément. De plus, cette méthode permet d'accéder à chaque EPC individuellement et indépendamment de sa famille. Ceci permet d'évaluer plus précisément les performances de chaque produits en fonction de son agencement et de son placement face aux points de lecture. Pour mieux comprendre le comportement de chaque produit tagués, sans aucune connaissance préalable du milieu, nous analysons d'autres indicateurs de performances tels que le RSSI et le RC. Puisque le milieu est inconnu et qu'il n'est pas possible de fixer des seuils de performances pour le RSSI et le RC, une méthode d'apprentissage statistique est proposée afin de contextualiser ces deux indicateurs et fournir une évaluation relative d'un produit tagué par rapport aux autres présents dans le milieu. Cela nous permet de classer les produits dans différents groupes de performances. Cette nouvelle méthode s'appuie sur nos travaux autour les mesures de changement de performances (cf. partie 4.2.3) et les mesures de la détectabilité (cf. partie 4.3.3) qui ont révélé une tendance des produits tagués à appartenir à différentes catégories de performances.

4.3.4.2 Classification non supervisée

Après la collecte des données, il est nécessaire de contextualiser les données du RSSI et du RC correspondants à chaque EPC (produit tagué) détecté par le lecteur, afin de les classer dans différents groupes de performances. En absence d'informations préalables sur ces données, nous nous tournons vers les méthodes d'apprentissage statistique non supervisées.

L'apprentissage non supervisé est une classe de techniques d'apprentissage automatique permettant la recherche de modèles prédictives se basant sur les données. Les données fournies à l'algorithme non supervisé ne sont pas étiquetées, ce qui signifie que seules les variables d'entrée sont données sans aucune variable de sortie correspondante. Dans l'apprentissage non supervisé, les algorithmes sont laissés à eux-mêmes pour découvrir des tendances intéressantes dans les données [voir 174, p.11-35]. Par exemple, dans ce cas, en fournissant les données du RSSI correspondant à chaque EPC en entrée, l'algorithme doit regrouper les EPC avec des performances similaires pour fournir plusieurs catégories de performances en sortie. Contrairement aux méthodes non supervisées, les méthodes supervisées, apprennent à partir des séries de données traitées. Dans ce cas, en fournissant à l'algorithme supervisé des valeurs de RSSI avec la catégorie à laquelle ils appartiennent, il serait capable de répartir de nouvelles valeurs de RSSI dans ces catégories. En absence

de ce type de données pour notre cas d'usage, et vu les grands volumes nécessaires, nous choisissons une méthode d'apprentissage non-supervisée.

La méthode choisie, appelée *k*-moyennes ou «*K-means*», nécessite la pré-définition du nombre de catégories souhaitées (*k*) et les données à grouper (tuples). L'algorithme proposé initialise simplement les catégories en sélectionnant "*k*" centroïdes (moyennes). Ensuite, les autres tuples sont assignés aux "*k*" catégories et les moyennes dans chaque catégories sont mises à jour jusqu'à ce que deux tours consécutifs génèrent les mêmes catégories. Le nombre de catégories est prédéfini par l'utilisateur. Guidé par les travaux en [voir 174, p.11-35], nous avons implémenté l'algorithme «*k-means*» décrit par le pseudocode 1, en langage C# dans l'environnement de développement Visual Studio.

4.3.4.3 Indicateurs de performances

Ce type d'algorithme peut être unidimensionnel ou multidimensionnel. En d'autres termes, il est possible de catégoriser les produits tagués à partir des valeurs d'un seul indicateur, ou de plusieurs. Les deux indicateurs considérés sont le RSSI et le RC. Pendant une lecture de 5 minutes, plusieurs opérations d'inventaires prennent place. Pour chaque opération, le tag peut répondre plusieurs fois dans différents cycles. Nous calculons la valeur RSSI finale en moyennant toutes les valeurs de RSSI pour toutes les lectures correspondants à un seul tag (un EPC unique). La valeur RC finale correspondant à chaque EPC est la somme des nombres de lecture pour toutes les lectures d'un tag unique.

Sur la figure 4.12, nous montrons trois graphes : les graphes des figures 4.12a et 4.12b montrent la distribution des tags selon leurs réponses en RSSI et RC respectivement. Sur la figure 4.12c, un troisième cas est représenté, où la distribution des tags est montré en deux dimensions en fonction du RSSI et du RC.

Sur la figure 4.12a, la dispersion des valeurs de RSSI sur une population d'approximativement 600 tags est montrée. Visuellement, un groupement des tags n'est pas évident. Par contre si nous traçons trois lignes pour des valeurs constantes de RSSI à -55, -65 et -75, il est possible de regrouper les tags dans une marge de +/- 5 dBm autour de cette ligne (centroïde) et de créer ainsi une catégorie. Les tags les plus proches de la ligne à -55 dBm sont les plus performants, les plus proches de -75 sont les moins performants. En visualisant les valeurs du RC sur la figure 4.12b, la distribution des valeurs est encore moins uniforme que celle pour les valeurs de RSSI. Cela signifie que le choix des centroïdes de chaque catégorie ainsi que les marges est assez complexe. Enfin, en examinant la distribution des tags sur la figure 4.12c en fonction du RSSI et du RC, nous distinguons visuellement trois groupes de tags :

1. RSSI élevé, RC bas : catégorie contenant les tags ayant des performances moyennes.
2. RSSI élevé, RC élevé : catégorie contenant les tags les plus performants.
3. RSSI bas, RC bas : catégorie contenant les tags les moins performants.

En utilisant un algorithme «*k-means*» multidimensionnel, une étape de normalisation des valeurs du RSSI et RC est nécessaire. Puisque les valeurs du RC varient entre 0 et 160 et les valeurs du RSSI varient entre -55 et -81 dBm, il est possible que l'algorithme affecte plus de poids aux variations du RC à cause de son ordre de grandeur supérieur à celui du RSSI. Plusieurs méthodes de normalisation existent. En [174] par exemple, une normalisation Gaussienne est utilisée afin de normaliser les valeurs autour d'une moyenne et un écart type. Dans notre étude, nous normalisons les données avec une mise à l'échelle entre 0 et 1 de toutes les valeurs. L'équation 4.10 donne la formule de normalisation où

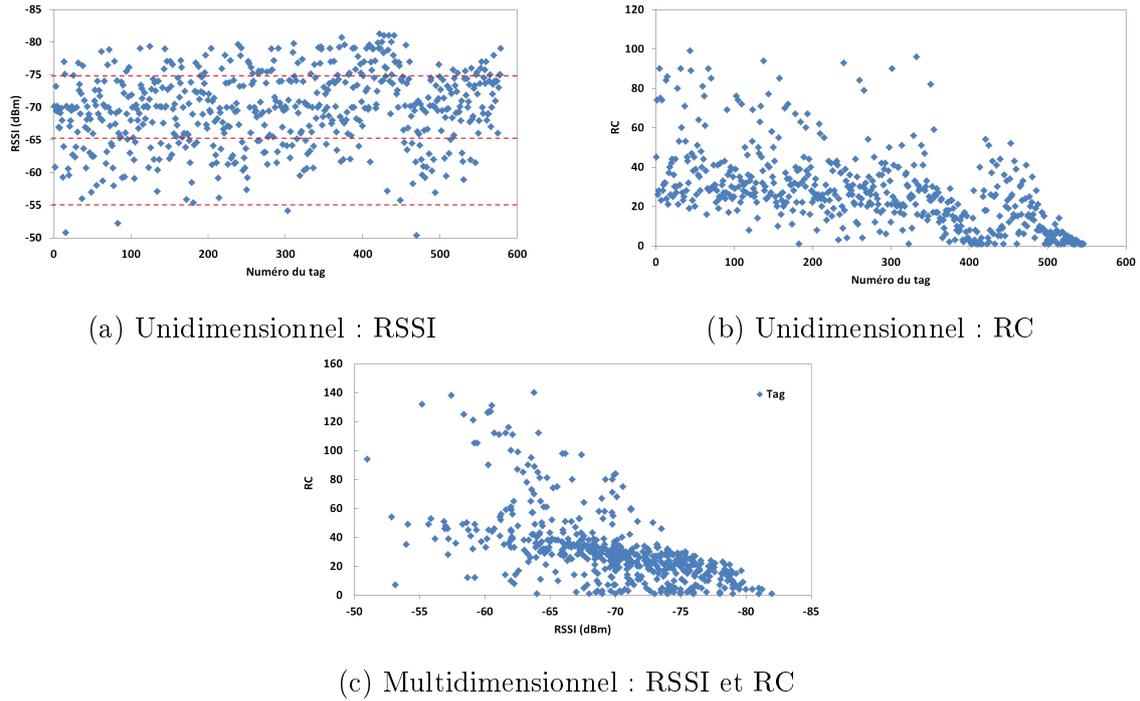


FIGURE 4.12 – Distribution des valeurs du RSSI et RC des tags

Pseudocode 1 Algorithme k-moyennes

entrée : $RSSI$; RC ; k

sortie : Liste d'EPC pour chaque catégories parmi k .

Collection des données pendant 5 minutes.

Groupement des données par EPC.

Pour chaque EPC calcul de la valeur RSSI moyenne et la somme des RC.

Normalisation des données.

Initialisation des catégories :

Distribution aléatoire des données sur les k catégories.

Sélection de k tuples (couples RSSI, RC) aléatoires comme centres des catégories.

Mise à jours des catégories et des moyennes :

faire

Calcul de la distance Euclidienne entre le centre de chaque catégorie et la moyenne.

Attribution de chaque tuple à la catégorie la plus proche.

Calcul de la nouvelle moyenne de chaque catégorie

tandis que Aucun changement de catégories entre deux itérations

Écrire Liste des tags dans chaque catégorie

$X = (x_1, \dots, x_n)$ est l'ensemble des données et z_i est la valeur normalisée de x_i .

$$z_i = \frac{x_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (4.10)$$

En se basant sur ce qui précède et sur les travaux présentés en [174], l'algorithme décrit par le pseudocode 1 est élaboré. Lorsque cet algorithme décrit seulement une classification non supervisée multidimensionnel, trois tests correspondants aux trois cas montrés dans la figure 4.12 sont menés. Chaque test est répété 3 fois afin de vérifier la répétabilité et la fiabilité de la classification dans les différents cas proposés.

4.3.5 Nouvelles capacités d'anticipation de performances

4.3.5.1 Validation des indicateurs

Les tests définis ci-avant retournent tout simplement des listes de tags et pour chacun d'entre-eux, la catégorie à laquelle il appartient. Le nombre de catégories est prédéfini à $k = 3$. Afin de comparer entre les différentes approches (3 cas) proposées à base de différents indicateurs (RSSI seul, RC seul et RSSI + RC), une évaluation de la classification en deux étapes est organisée. Premièrement afin de s'assurer de la répétabilité de la méthode, chacun des tests est répété trois fois. Suite à cette répétition, le nombre de tags qui ont changé de catégories dans les mêmes conditions à l'issue des trois répétitions est extrait. La deuxième étape vise à quantifier la qualité de la classification. Plusieurs méthodes existent pour cela, comme l'analyse de la séparation entre deux catégories, le rayon de chacune, ou sa densité. Une méthode couramment utilisée pour l'interprétation et la validation se base sur le calcul du coefficient de Silhouette. Ce coefficient analyse à la fois l'homogénéité des données dans une catégorie et la séparation entre deux catégories.

$$s(z_i) = \frac{b(z_i) - a(z_i)}{\max(a(z_i), b(z_i))} \quad (4.11)$$

L'équation 4.11 exprime le coefficient de silhouette d'un point z_i dans une série de données normalisée. $s(z_i)$ est calculé en fonction de la moyenne des distances Euclidiennes entre ce point et les autres points appartenant à la même catégorie (a) et la moyenne de celles entre ce point et les autres points appartenant aux autres catégories (b). Ce coefficient varie entre -1 et 1. Plus sa valeur est élevée plus la classification est précise [175].

Indicateur(s)	Changement	Coefficient
RSSI	17 tags	0,421
RC	19 tags	0,758
RSSI + RC	16 tags	-0,237

Tableau 4.2 – Comparaison entre les trois cas

Les résultats de ces deux étapes de vérification sont montrés dans le tableau 4.2. Parmi les 444 tags cibles dans le rayon, ces résultats concernent seulement les 310 tags détectés. Parmi ces 310 tags, 17 ont changé de catégorie lorsque seulement la valeur du RC est utilisée, 39 lorsque seulement la valeur de RSSI est utilisée et 16 lorsque les deux indicateurs sont utilisés ensemble. Ceci montre que lorsque l'indicateur RSSI est utilisé, la répétabilité de la méthode n'est pas garantie. Par contre, pour les deux autres méthodes, le fait que 16 ou 19 tags changent de catégorie n'est pas très impactant et c'est tout à fait attendu. Ceci est causé par les tags présents à l'extrémité d'une catégorie. En observant le coefficient de silhouette calculé pour chaque méthode, nous constatons que l'utilisation d'un seul indicateur génère une classification plus précise. Selon ces premières évaluations, la méthode basée sur les valeurs du RC est la méthode la plus robuste et la plus fiable pour une classification en 3 catégories de performances puisque le coefficient de silhouette est le plus proche de 1.

4.3.5.2 Résultats et discussion

Si nous retenons uniquement l'approche basée sur les mesures de RC («*Read Count*»), la répartition des produits dans chaque famille de produit sur les trois catégories de

performances (en terme de RC) est illustrée dans le tableau 4.3. Pour chaque famille la détectabilité calculé à partir de l'équation 4.9 est affichée. La catégorie 0 contient les produits tagués les moins performants (valeurs basses du RC) la catégorie 2 contient les produits tagués les plus performants (valeurs élevées du RC). La catégorie 1 contient les produits tagués ayant des performances moyennes.

Familles	Répartition des produits sur les trois catégories			Détectabilité)
	Cat 0	Cat 1	Cat 2	
A	67%	33%	0%	100%
B	50%	0%	50%	100%
C	57%	0%	43%	100%
D	0%	0%	100%	90%
E	0%	0%	100%	98%
F	43%	14%	43%	94%
G	0%	0%	100%	100%
H	11%	0%	89%	90%
I	80%	20%	0%	20%
J	40%	0%	60%	100%
K	9%	0%	91%	71%
L	0%	44%	56%	89%
M	23%	0%	77%	62%
N	100%	0%	0%	25%
O	100%	0%	0%	17%
P	0%	33%	67%	60%
Q	0%	8%	92%	94%
R	0%	33%	67%	100%
S	33%	0%	67%	56%
T	0%	25%	75%	90%
U	17%	33%	50%	53%
V	13%	7%	80%	81%
W	0%	44%	56%	79%
X	18%	9%	73%	70%

Tableau 4.3 – La répartition des produits en fonction des trois catégories prédéfinie, comparée à la détectabilité de chaque famille (cf. partie 4.3.3)

En observant la répartition des produits sur les trois catégories, nous remarquons que la majorité des produits sont classés dans la catégorie 2 ou la catégorie 0. Cependant, quelques produits sont classés dans la catégorie 1.

En se référant au tableau 4.3, nous remarquons que pour les familles de produits ayant un score de détectabilité très faible (Détectabilité \leq 25%), la majorité de leurs produits sont classés dans la catégorie 0. Cependant, les produits des familles fortement détectables (Détectabilité \geq 90%) sont plutôt classés dans la catégorie 2.

Les douze familles de produits se distinguent selon quatre cas de figure.

- **Premièrement**, nous explorons la répartition des produits sur les 3 catégories (cat0, cat1 et cat2) dans les familles ayant des score de détectabilité élevés (marqués en vert).
- les familles où tous les produits (100%) sont classés dans la catégorie des

meilleures performances (Cat 2) et aucun dans la catégorie 'Cat 0' sont considérées : 'D', 'G', 'Q'. Leurs performances s'expliquent en regardant le gabarit 2D illustré sur la figure 4.10 : ces trois familles de produits sont placées directement devant les antennes, et leur arrangement est peu contraignant.

- Ensuite, nous distinguons les familles pour lesquelles la majorité des produits se trouvent dans la catégorie 2, et les autres produits distribués sur les catégories 0 et 1. Les familles 'R' et 'T' sont réparties entre les catégories 2 et 1 ; Ceci est principalement dû à leurs positions dans la partie haute du rayon (au même niveau que la ligne de mire de l'antenne inclinée de 45°). Les produits des familles 'H' et 'J' sont répartis entre les groupes 2 et 0. Les difficultés de lecture sont causées par leur positionnement dans la partie basse du rayon (loin de l'antenne) et de leur agencement (proximité entre tags). L'effet de la proximité est évident dans le cas des produits 'J', où 40% des articles sont classés dans le groupe 0.
- Enfin, les familles 'A', 'B', et 'C' sont considérées. Pour ces familles, la majorité des produits tagués ($> 50\%$) sont classés dans la catégorie zéro malgré une détectabilité égale à 100%. Cela est dû à leur position dans la zone de faible gain au-dessus de l'antenne inclinée. Les produits 'A' sont pour la plupart placés dans le groupe 0 et présentent des performances inférieures en raison de leur présence à l'extrémité du rayon, loin de la zone de directivité des antennes.
- **Deuxièmement**, les familles 'E' et 'F' présentent également de bonnes performances avec des scores de détectabilité de 98% et 94% respectivement (marqué en gris). Cependant, la classification de leurs produits ne correspond pas malgré leur arrangement sur des broches dans la même position dans le rayon face aux points de lecture. Les produits 'E' sont tous présents dans la catégorie 2, alors que 43% des produits 'F' sont classés dans la catégorie 0. 'E' appartient à une intersection de deux catégories de performances : verticalement, les produits sont dans la ligne de mire des points de lecture mais horizontalement, ils se trouvent à l'extrémité du rayon. Les produits 'F' devraient, en fonction de leur position et de leur agencement, avoir des nombres de lecture (RC) compris entre ceux des produits 'E' et des produits 'G'. Par contre, ce n'est pas le cas. Nous supposons que la présence des points de mesures des produits 'E' et 'F' sur les intersections de deux catégories entraînent ces incohérences.
- **Troisièmement**, nous regardons les familles (K, L, M, P, S, U, V, W et X) ayant des scores de détectabilité entre 50% et 90% (en blanc). Les produits de ces familles sont répartis entre les trois catégories avec souvent une majorité dans la catégorie 2, indiquant des conditions de lecture (détection) faciles. La présence du reste dans les catégories 1 ou 0, signale des difficultés liés à l'emplacement vis-à-vis les antennes de lecture (voir figure 4.10).
- **Quatrièmement**, les produits des familles N et O (marqué en rouge), très faiblement détectables, sont agencés de manière très rapprochée, ce qui explique l'obtention de ces faibles taux de lecture même s'ils sont situés face aux antennes du lecteur. Les produits I, également faiblement détectables semblent néanmoins bénéficier un peu de leur localisation au voisinage du sol qui peut renforcer localement le niveau de champ reçu et 20% de ces tags appartiennent à la catégorie intermédiaire n°1.

La méthode proposée basée sur la classification «*k-means*», permet de réaliser une classification pertinente de chaque produit tagué dans un magasin sans aucune connaissance

du milieu, du système de lecture ou des produits tagués. En même temps, la classification est effectuée en fonction de toutes ces variables d'un milieu réel ; ceci nous permet d'améliorer le choix du tag, le placement des points de lecture, la configuration du lecteur et l'arrangement des produits tagués en Temps Réel. Lorsque dans cette étude la valeur 'k' est prédéfinie, il serait possible d'utiliser le coefficient de silhouette afin d'évaluer le nombre idéal de catégories ('k') de performances distinguables. Ceci pourrait améliorer la précision de la classification et résoudre les incohérences déduites ci-avant pour les familles 'E' et 'F'.

	Caractérisation en 4 étapes (cf. partie 4.2)	Détectabilité (cf. partie 4.3.3)	Classification (cf. partie 4.3.4)
Nécessite une connaissance de chaque EPC du milieu	✓	✓	✗
Donne une information de performance pour chaque tag	✓	✗	✓
Mesure les performances sur la bande UHF entière	✓	✗	✗
Prend en compte la solution de lecture	✗	✓	✓
Permet des actions correctives et ciblées en Temps Réel	✗	✗	✓
Nécessite un déploiement d'une solution de lecture	✗	✓	✓
Nécessite un investissement supplémentaire en équipement de caractérisation	✓	✗	✗

Tableau 4.4 – Comparaison de divers méthodes de caractérisation utilisées

La comparaison entre la répartition des produits d'une seule famille sur les trois catégories et la détectabilité de cette famille, montre que cette nouvelle méthode permet de remonter un niveau d'information plus précis concernant chaque tag dans le milieu. Ce niveau d'information permet de repérer les causes de faibles performances et les traiter directement. Le tableau 4.4, montrent les avantages et les inconvénient de cette méthode. Lorsqu'elle nécessite un déploiement d'une solution de lecture et n'est pas capable de fournir des mesures sur la bande UHF entière (entre 840 et 960 MHz), elle prend en compte tout les facteurs d'un environnement réel (solution de lecture, produits tagués, agencements, puissance et fréquences d'opération, ...) sans aucune connaissance du tag utilisé.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les facteurs influençant les performances des tags appliqués sur des produits présentés en magasins sur des étagères ont été étudiées en suivant une démarche progressive. Elle a consisté à utiliser successivement différentes conditions de mesure. Il a été ainsi possible de distinguer les effets du tag seul, du tag sur son produit seuls, du tag sur son produit dans son agencement seuls et enfin du tag sur son produit dans son agencement et dans le milieu réel. Ceci a permis de démontrer qu'il était absolument nécessaire de recourir à la caractérisation des performances dans l'environnement réel d'utilisation et

que, seule l'utilisation d'un système de métrologie en environnement contrôlé ne permet pas de représenter la réalité du fonctionnement du système

En fonction de ces résultats une méthode d'évaluation des produits en milieu réel est proposée. Le but de cette méthode est d'évaluer les performances des produits tagués avec les mêmes équipements que ceux utilisés pour réaliser un inventaire automatique. Cette approche rend l'évaluation plus adaptée à l'usage visé. Dans le cas d'un inventaire, le pourcentage de détection est calculé pour chaque famille de produit afin de comparer entre les différentes familles et de mettre en valeur l'impact du système de lecture choisi. Cette méthode a confirmé la tendances des produits tagués à appartenir à différentes catégories de performance.

Ensuite, en s'appuyant sur les résultats précédents, nous avons implémenté un algorithme de classification non supervisée (k-moyennes) afin de classer les tags automatiquement selon plusieurs catégories de performances en fonction du nombre de lecture. Le nombre de lectures s'est montrée comme l'indicateur le plus fiable et plus consistant pour réaliser la classification. En croisant les résultats de la classification avec la ceux de la détectabilité de chaque famille, la méthode proposée est validée malgré quelques incohérences. Cette nouvelle méthode fait l'objet d'une publication IEEE Access (DOI :10.1109/ACCESS.2018.2844739).

L'utilisation de cette méthode permet de réaliser une évaluation complète d'un milieu de lecture en Temps Réel et inconnu en prenant en compte l'impact de toutes ses composants. Ceci permet d'identifier et de corrigés les mauvais choix du tag, d'arrangement, ou même la configuration et emplacement des point de lecture. En se basant sur ces résultats, l'amélioration globale des performances est étudiée dans le chapitre suivant en tenant compte de tout les composants d'un système : les lecteurs, le milieu de lecture et le tag.

Chapitre 5

Optimisation de la détection dans un environnement dense

5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, les performances d'un système RFID sont étudiées et plusieurs facteurs affectant la détection des tags dans un environnement de type magasin sont mises en évidence. Dans le but de localiser les produits dans un magasin, il est impératif d'atteindre des taux élevés de détection malgré la présence de quantités importantes de produits sur les rayons ; ceci s'avère complexe à atteindre avec les systèmes de lectures disponibles sur le marché. Sans compter qu'avant tout, un système RFID a pour but de permettre aux objets étiquetés («*Tagués*») de communiquer leurs identifiants uniques. Cette promesse se base sur le fait qu'un tag à portée du lecteur soit détectable. Selon plusieurs sources [176] [177] [178] [179] [180] [181], le défi reste d'assurer l'activation des tags passifs. Cela est essentiellement dû à la haute sensibilité du lecteur par rapport à celle du tag et les différentes contraintes environnementales subies par ce dernier.

Comme cela a été évoqué précédemment, un tag passif a besoin d'être alimenté par une source d'énergie qui est le lecteur ; ce dernier contrôle la communication. Un tag passif ne peut envoyer des données sauf s'il est interrogé par le lecteur. Simplement dit, le lecteur transmet vers le tag une onde électromagnétique qui subit des variations subtiles (la modulation). Cette onde est reçue par le tag et sera par la suite réfléchi vers le lecteur ; ce phénomène est appelé la «*rétro-modulation*».

La liaison du lecteur vers le tag est la liaison montante, plus couramment connue comme «*forward-link*». La liaison descendante ou «*reverse-link*» est celle du tag vers le lecteur. Pour qu'un tag soit détecté par le lecteur, il faut assurer une communication établie sur les deux liaisons [voir 3, p.352-353].

Liaison montante : le tag doit recevoir une puissance suffisante de la part du lecteur pour qu'il soit activé. L'atténuation du signal, la faiblesse de la puissance émise et d'autres éléments relatifs au tag même peuvent-être des facteurs qui impactent cette liaison responsable de l'activation et l'interrogation du tag.

Liaison descendante : le lecteur reçoit le signal rétro-modulé du tag. Des facteurs comme la sensibilité du lecteur, les interférences ambiantes et l'efficacité de la rétro-modulation, déterminent la qualité de cette liaison responsable de la détection du tag.

5.2 Limites et contraintes

Cette partie se concentre sur les limites qui risquent de contrarier les performances du système RFID. Les facteurs qui contraignent la conception et la mise en place des systèmes sont cités en s'appuyant sur chacun des ses composants : le tag, le lecteur et le canal de la communication.

5.2.1 Aperçu des contraintes liées à la sensibilité du lecteur

La nature semi-duplex de la communication tag-lecteur implique qu'en réception le signal d'onde entretenue transmis pour énergiser le tag risque d'être mélangé avec le signal rétro-modulé par le tag. Ce phénomène néfaste décrémente considérablement la sensibilité du lecteur. La cause est la faible isolation entre les deux ports de réception de de transmission, qui devient beaucoup plus impactant lorsque les deux ports partagent la même antenne.

Dans ce cas, ce signal appelé «*Self-jammer*» est de l'ordre de 10 dBm, supérieur au signal portant la réponse du tag qui est de l'ordre de -80 dBm [182]. Donc, pour atténuer le «*Self-jammer*», un coupleur directionnel est généralement utilisé. Cette solution reste avantageuse malgré les pertes d'insertion de ce circuit qui peuvent atteindre 20 dB. Pour rejeter le signal atténué, la technique la plus utilisée est de le convertir par abaissement de fréquence en un signal à courant continu qui sera rejeté [182][183][184][185]. Le blocage de ce signal [182] dans la bande de réception ainsi que le masque de transmission requis par le protocole GS1 [voir 36, p.31], imposent de fortes contraintes sur la linéarité de l'interface analogique : un compromis entre la haute linéarité et la sensibilité doit être fait. Ajouté à cela, la fuite du bruit de phase de l'onde entretenue peut dégrader la sensibilité. Ce problème est généralement résolu par l'utilisation du même oscillateur local pour la transmission et la réception [182].

D'autre part, un aspect très important qui peut affecter la conception est la régulation. En Europe par exemple, les lecteurs peuvent opérer dans deux modes, soit selon l'ETSI (ETSI 302 208) [34], soit en mode LBT («*Listen-Before-Talk*» [186]). En LBT, le lecteur écoute sur son canal d'émission et les canaux adjacents : si une émission est en cours, il continue à écouter, sinon, il passe en mode transmission et réception. Pour cela, pendant l'écoute, une haute sensibilité est exigée ; elle peut dépasser -96 dBm [187]. Pendant la réception, cette sensibilité est atténuée pour maintenir la linéarité du système [188]. En France, l'opération en mode ETSI est imposée.

5.2.2 Contraintes liées à la conception du tag

Le déploiement à grande échelle des tags passifs est dû essentiellement à leur faible coût. Ce coût est largement dépendant du coût de la puce qui est à son tour directement lié à la surface de la puce, la procédure de fabrication et le rendement de la production. Le rendement de la production est déterminé par la stabilité de la tension de référence. Pour la fabrication, souvent des circuits de référence à intervalle de bande dont la tension est indépendante de la température sont utilisés, mais cela exige des résistances de l'ordre des mégaOhms pour produire des faibles courants. La fabrication de telles résistances est instable et nécessite une grande surface [189]. Le coût de la fabrication peut-être réduit par l'utilisation des diodes Shottky [189] mais l'inconsistance de la qualité entre plusieurs productions rend leur intégration incompatible avec les circuits CMOS standards résultant en l'utilisation de divers type de diodes à jonctions [190].

Selon[191], le multiplicateur avec les capacités de stockage occupent 25% de la surface de la puce. Cet étage est responsable de convertir le signal RF en un signal continu et le régulateur doit assurer un signal continu et stable avec une tension indépendante de la puissance absorbée par l'antenne. Le multiplieur est composé de plusieurs étages comportant une diode et une capacité de couplage avec une large capacité de stockage pour récupérer l'énergie. Le nombre d'étages détermine directement la tension du sortie : plus le nombre d'étages est élevé, plus la tension continue à la sortie est importante. Cela n'est pas le cas pour le rendement du multiplieur, qui diminue proportionnellement au nombre d'étages[190][189][192] [86]. Les diodes ou transistors utilisés, ainsi que le nombre d'étages déterminent l'impédance d'entrée de la puce. Cette impédance est capacitive et la partie réelle est fortement inférieure à la partie imaginaire [192] [193]. Cela veut dire que le facteur de qualité est très élevé. Ceci implique que les pertes énergétiques doivent être minimisée [192] et que la bande passante est étroite; ce qui pose des contraintes supplémentaires à la conception de l'antenne. Notamment, l'adaptation de son impédance à celle de la puce[86]. En résumé, pour optimiser la télé-alimentation, un compromis doit-être fait entre le facteur de qualité, le rendement du multiplieur, la tension de sortie et l'impédance d'entrée en jouant sur le nombre d'étages, la taille des diodes ou transistors et les capacités.

Ensuite, le signal continu est envoyé au démodulateur et converti en un signal numérique pour être traité par le bloc logique. De manière générale[189][192][194], ce démodulateur consiste en un détecteur d'enveloppe et un comparateur à hystérésis pour compléter la conversion en numérique. Les performances sont limitées par la fréquence des données qui doit respecter un intervalle court (du signal envoyé par le lecteur) pour supporter l'alimentation continue de la puce tout en étant conforme à la régulation de la bande passante en Europe. D'autres limitations sont liées à l'indice de modulation qui doit être supérieur à 80% pour garantir le bon fonctionnement de la démodulation[195].

Concernant la rétro-modulation, le circuit module la réponse du tag en variant son impédance d'entrée. Cette variation d'impédance impacte la télé-alimentation. Lorsque la modulation d'amplitude (ASK) est la plus simple à réaliser en variant la partie réelle entre deux états, elle peut causer des pertes significative de la puissance relativement à une modulation de phase (PSK) qui consiste à faire varier la partie imaginaire. Cette dernière garantit un meilleur rendement ainsi qu'une plus haute puissance du signal rétro-modulé[192]. De plus, les concepteurs d'antennes jouent un rôle très important puisque c'est à eux d'assurer une impédance adaptée à celle de la puce. Nikitin et Rao[193] montrent que la puissance re-rayonnée est une fonction de l'impédance de la puce et ratio (Reactance/Resistance)de l'antenne : lorsque qu'une adaptation puce-antenne parfaite implique un maximum de transfert d'énergie, l'antenne doit être suffisamment résistive pour assurer une puissance re-rayonnée plus élevée. La rétro-modulation a été étudiée davantage pour obtenir une solution optimale tout en réduisant son impact sur la télé-alimentation en étudiant le lien entre l'impédance, la sensibilité et la rétro-modulation[voir 91, p.103-125]. Dans ce contexte, plusieurs architectures de rétro-modulation ont été étudiées; Cependant, une solution innovante qui consiste à intégrer la rétro-modulation au multiplieur pour éviter la détérioration de son rendement se démarque. Cette solution consiste soit à modifier la largeur des transistors du multiplieur, soit la variation des potentiels de grille. Selon l'auteur, pour optimiser cette solution, des transistors plus larges sont nécessaires. Pourtant en se référant à[190], cela peut générer un courant inverse important qui détériore le rendement malgré l'augmentation de la tension continue.

5.2.3 Contraintes liées à la propagation

Les chapitres 3 et 4 explorent les performances des tags et des produits tagués dans un environnement contraignant. La puissance nécessaire pour activer le tag ainsi que la puissance retournée par ce tag au niveau du lecteur sont choisies comme indicateurs de performances pour les étapes de l'étude. L'étude se concentre essentiellement sur les tags et les facteurs affectant leurs performances tels que : le facteur de forme du produit (courbure ou pliure du tag), le matériel du produit, son rangement et l'environnement de propagation. Par la suite, d'autres facteurs comme les paramètres $gen2$, la capacité du canal de communication et les divers types d'interférences seront pris en compte.

Tout d'abord, il serait utile de discuter les contraintes des liaisons descendantes et montantes. En espace libre, il est clair que lorsque le lecteur est suffisamment sensible, la seule liaison contraignante est la liaison descendante [176] [196]. Cette dernière ne dépend à son tour que de la puissance disponible à la position du tag. Par contre, dans un milieu réel où des difficultés provoquées par l'évanouissement multi-chemin sélectif en fréquence prennent place, la relation devient plus complexe. Kuester et al. [176] déduisent que l'évanouissement est plus important lorsque la distance entre le lecteur et le tag est plus grande. D'un autre côté, ils ne sont pas capables de déduire une relation entre ces deux liens sous ces conditions. Cette relation est malgré tout, indépendante de des propriétés des antennes (supposant que le système est mono-statique) et des pertes de chemin qui sont toujours symétriques quelque soit la complexité du milieu de propagation [32].

Deuxièmement, les collisions posent une vraie problématique largement abordée [197] [198] [199] [200] [178] [201]. Ces collisions sont généralement divisées en trois types : les collisions entre deux lecteurs, entre deux tags et les collisions entre lecteur et tag. Les collisions lecteur-tag se produisent lorsque le signal du premier lecteur portant une commande pour le tag est influencé par le signal d'un autre lecteur rendant le signal reçu par le tag indécodable. Il est prouvé que lorsque le signal du deuxième lecteur est modulé, son impact est plus important sur la réponse du tag qu'un signal qui n'est pas modulé (par ex. le signal d'énergisation). Les collisions entre tags se produisent lorsque deux tags répondent à un lecteur dans le même créneau temporel empêchant le lecteur de démoduler le signal réfléchi. Enfin, les collisions entre deux lecteurs prennent place quand deux ou plusieurs lecteurs sont déployés et configurés à transmettre sur les mêmes canaux de fréquences ou des canaux adjacents ; cela résulte en une difficulté du lecteur à recevoir le signal du tag. La distance entre les deux lecteurs, la puissance émise ainsi que l'orientation des antennes sont des paramètres indispensables à maîtriser pour minimiser l'effet de ce phénomène. Ajouté à cela, les contraintes imposées par les réglementations Européennes et la technique ETSI [34, voir, p.13], nécessitent l'écoute sur un canal pour s'assurer qu'il n'est pas occupé avant d'interroger un tag. Lorsque plusieurs lecteurs sont déployés, les hautes exigences en terme de seuils de puissance définies en [34], peuvent faire en sorte qu'un canal reste bloqué tandis qu'une interrogation lecteur-tag aurait été possible autrement. Néanmoins, d'autres facteurs peuvent perturber la propagation comme les signaux GSM se propageant sur des fréquences très proches [202], et les harmoniques réfléchies ainsi que les produits d'inter-modulation causés par le tag [203].

Au vu des facteurs perturbant du canal de propagation cités ci-dessus, plusieurs études sont menées [204] [205] [206] [207] afin de déterminer la capacité du canal et la probabilité de détection des tags. De manière globale, pour simuler un milieu réel de propagation où les signaux prennent plusieurs chemins entre le lecteur et les tags, un canal de Rayleigh est adopté si plusieurs chemins de réflexion existent ; Un canal de Rice est adopté lorsque le chemin direct entre le lecteur et le tag est le chemin dominant. Le premier montre une

atténuation de signal plus importante et le deuxième montre une capacité plus importante et une meilleure probabilité de détection. Ces résultats sont dépendants du nombre de tags et lecteurs présents dans le milieu, ainsi que la sensibilité du tag, et la distance entre le tag et le lecteur. En dehors de cela, la probabilité de détection diminue lorsque l'évanouissement sélectif en fréquence est important et les fluctuations de puissance sont plus aléatoires. Ceci incrémente la probabilité que le signal du tag vers le lecteur soit impacté et donc indétectable. De même, il est prouvé par la simulation en [206], qu'en présence du multi-chemin, la probabilité de détection d'un tag peut-être incrémente lorsque la puissance reçue en espace libre est déjà marginale. Cet effet est démontré expérimentalement dans les chapitres deux et trois.

5.3 Premiers essais

5.3.1 Contexte

Le déploiement de la technologie RFID UHF passive apporte de la valeur à l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Plus la technologie est adoptée tôt dans les divers processus, plus les bénéfices sont importants. Dans le magasin, parmi d'autres environnements de déploiement, les besoins d'une haute précision de l'inventaire et l'automatisation de ce processus sont fondamentales. D'une part, la maîtrise de l'inventaire est indispensable pour permettre d'autres applications telles que la localisation, l'auto-encaissement, etc.. D'autre part, l'automatisation de l'inventaire est crucial pour la rapidité et la remontée de l'information en Temps Réel.

Le cas Décathlon est considéré, où la majorité des produits sont tagués pendant les premières phases de production et sont enfin agencés dans du rayonnage métallique en magasin. Les tags utilisés sont des tags passifs disponibles sur le marché et conformes à la norme ISO 18000-6C. La commercialisation des puces de ces tags et les faibles coûts associés sont des éléments de différenciation dans le cas d'un déploiement massif.

Un système de lecture idéal est donc un système capable de détecter 100% de ces produits tagués. En terme d'occupation d'espace dans le magasin, une installation au plafond est préférable puisque celle-là libère plus d'espace. Ce système de lecture ou d'inventaire devrait être compatible avec le protocole de lecture [36] pour pouvoir communiquer avec les tags déployés.

Dans le chapitre 2, plusieurs types de systèmes de lecture sont évalués en fonction de plusieurs facteurs tels que : la facilité d'implémentation, le coût et leurs performances. La solution de lecteurs fixes installés à une certaine distance des rayons, et plus particulièrement ceux montés au plafond, semble la plus intéressante.

Une des limitations clés du système RFID passive dans la bande UHF est l'évanouissement par trajets multiples. Ce phénomène se reproduit lorsque la distance de communication est supérieure à la longueur d'onde et est particulièrement impactant lorsque la bande de fréquence est étroite comme c'est le cas pour la RFID passive en Europe. Cela résulte en zones sombres où le tag ne reçoit pas suffisamment de puissance. Pour pallier ces conséquences, des éléments liés à la propagation doivent-être optimisés.

D'autres contraintes comme l'agencement, la présence des éléments disperseurs en champs proche du tag, et l'orientation du tag parmi d'autres étudiées aux chapitres 3 et 4 limitent les performances du tag même. Donc, pour la même localisation d'un produit tagué dans le milieu réel, le besoin en puissance pourrait changer en fonction de ces contraintes. Cela pourrait-être résolu en livrant plus de puissance au tag pour améliorer

et assurer son activation.

L'objectif final étant d'améliorer la détection avec des solutions de lecture fixes (au plafond, ou à une distance fixe du lecteur), la propagation, le signal d'activation et les collisions entre lecteurs sont examinés par la suite et des éléments de résolution sont proposés.

5.3.2 Optimisation de la propagation

Premièrement, il serait intéressant d'étudier l'influence des facteurs liés à la propagation, et plus spécifiquement les antennes pour éliminer les zones sombres dans un milieu réel, en l'occurrence, dans un magasin. Pour réaliser cela, il faudrait répondre à deux questions substantielles : Comment couvrir une surface aussi large que possible ? et comment assurer la disponibilité d'une puissance suffisante pour activer le tag ?

Selon [208], [209] et [210], la réduction des zones sombres est prouvée possible en employant plusieurs types de diversité. Cette technique est traditionnellement utilisée pour diminuer l'impact de l'évanouissement. Le principe de la diversité consiste à envoyer des répliques du signal sur plusieurs canaux ayant des évanouissements indépendants afin d'augmenter la probabilité d'une bonne transmission [211].

La diversité d'antennes (dite spatiale) pourrait être réalisée en installant plusieurs antennes pour couvrir une zone de lecture. La distance entre les deux antennes et leur distribution dans la zone de lecture étant deux éléments cruciaux, en [212], un modèle en fonction de l'ouverture du lobe principal de l'antenne, le rapport signal-bruit et son inclinaison est développé pour faciliter la sélection et la distribution des antennes. D'autres types de diversité comme la diversité de polarisation [208][209], la diversité angulaire [209], temporelle et fréquentielle [213] sont étudiés. Dans le cadre de notre étude, il est possible de réaliser une diversité spatiale et partiellement temporelle en réalisant un inventaire décalé dans le temps sur deux antennes. La diversité fréquentielle est possible mais son impact est à vérifier puisque la bande RFID UHF est très étroite en Europe. Enfin, la diversité de polarisation est partiellement possible puisque tous les tags déployés disposent d'une antenne linéaire. Pour cela, seule l'adoption d'une antenne à polarisation circulaire pour le lecteur est réalisable. Les études citées ci-dessus, proposent l'utilisation d'un déphaseur lorsque plusieurs antennes sont utilisées. En [209], cette méthode a permis une amélioration des taux de lecture de 17%. En [213] et [214], en appliquant du déphasage avec des sauts de fréquences et une diversité spatiale, un gain de 8 dB en puissance est constaté pour une détection de tags à 100%. D'autre part, l'utilisation d'un déphaseur avec l'interrogateur permet de fournir une phase différente pour chaque zone de lecture pour réduire l'effet des interférences [215].

D'un autre côté, d'autres solutions comme la réalisation de la transmission entre le lecteur et l'antenne via des fibres optiques pour éliminer les pertes dans les câbles [216] et le déploiement des répéteurs sans-fil [217] sont signalés. Pourtant les améliorations apportées par rapport à la complexité et au coût restent peu convaincantes.

Finalement, comme vu dans les diverses solutions commerciales citées ou évaluées précédemment l'utilisation des réseaux d'antennes est populaire. Cela est dû à l'amélioration du bilan de liaison entre le lecteur et le tag dans la direction du lobe principal grâce au «*beamforming*». Une proposition «*low-cost*» en [218] consiste à utiliser une matrice de Butler pour réaliser un déphasage multiple pour la génération de trois faisceaux. Néanmoins, l'efficacité de telles solutions contre les évanouissement en liaison descendante est remise en question en [210].

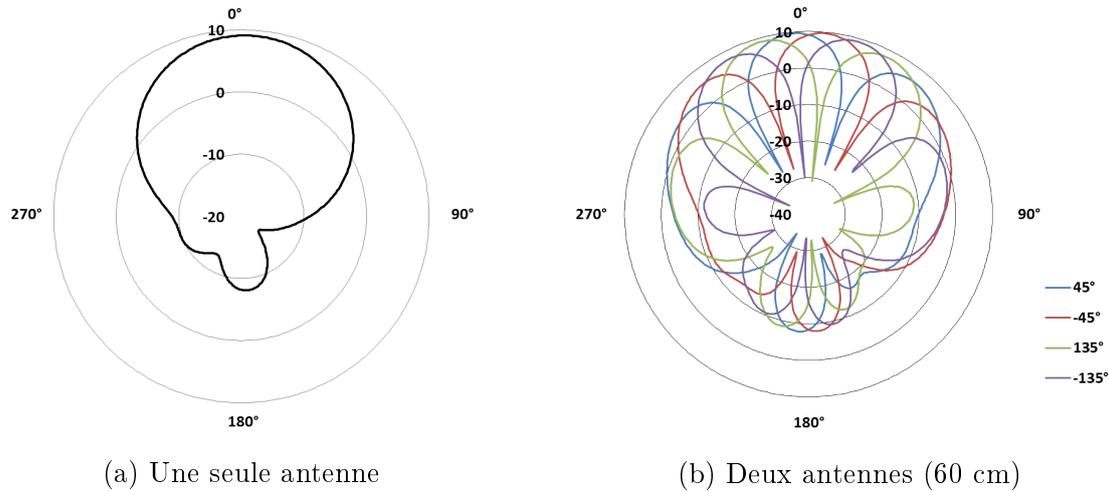


FIGURE 5.1 – Les diagramme de rayonnement, Directivité (dB)

Par la suite, nous nous servons des études précédentes pour proposer un montage basique. Ce dernier a pour objectif d'isoler la problématique de l'évanouissement et de quantifier l'amélioration que pourrait apporter la diversité spatiale avec déphasage entre antennes. Tout d'abord, une étape de simulation est nécessaire pour mesurer l'apport du déphasage entre deux antennes. L'antenne Laird (cf. annexe B) simulée en chapitre 3 (cf. paragraphe 3.6.2.3) est utilisée pour ces travaux. La figure 5.1 montre le diagramme de rayonnement d'une antenne seule, et de deux antennes séparées d'une distance de 60 cm l'une de l'autre. La figure 5.1b illustre la superposition de quatre diagrammes de rayonnement pour quatre angles de déphasages (45° , -45° , 135° , -135°).

Le but de placer deux antennes en déphasage est de faire varier les zones sombres devant l'antenne. Pour cela, au lieu de concevoir un réseau d'antennes et d'optimiser le lobe principal au détriment des lobes secondaires, nous proposons d'élargir l'ouverture de l'antenne tout en maintenant sa directivité. Une distance de séparation entre antennes supérieure à λ est nécessaire pour éviter le couplage en champs proche. Pour illustrer les avantages de cette technique les maximums de directivité—parmi les diagrammes de rayonnement pour les quatre angles de déphasage— sont tracés en fonction de l'angle azimutal dans la figure 5.2. Suite aux résultats de la simulation, en comparant l'utilisation de deux antennes déphasées à l'utilisation d'une antenne seule, nous constatons qu'il est possible de réaliser une ouverture du lobe plus large de 16° (à -3 dB) et un gain moyen en directivité de 0,6 dB.

Nous procédons ensuite à l'évaluation de cette technique dans une chambre anéchoïque. Deux antennes (référence : S8658WPR) circulaires sont montées à une distance de 2.5 mètres de deux cents tags et une distance de séparation entre elles de 1.2 mètres. Les tags sont attachés par des fils (comme le montre la figure 5.3) pour imiter un environnement air libre sans aucune dégradation de leurs performances. Un déphaseur bi-directionnel AdvanPhaser-2 :4, permettant quatre angles de déphasage (45° , -45° , 135° , -135°), et un lecteur RFID UHF du marché (Impinj Speedway R420) sont utilisés pour piloter les antennes. La superposition des quatre diagrammes de rayonnement est réalisée en performant une lecture d'une minute pour chaque angle de déphasage.

L'évaluation des performances est proposée pour deux configurations : une première dans une chambre anéchoïque et une deuxième dans une chambre semi-anéchoïque comme c'est le cas dans la figure 5.3. La deuxième configuration permet d'introduire le phénomène

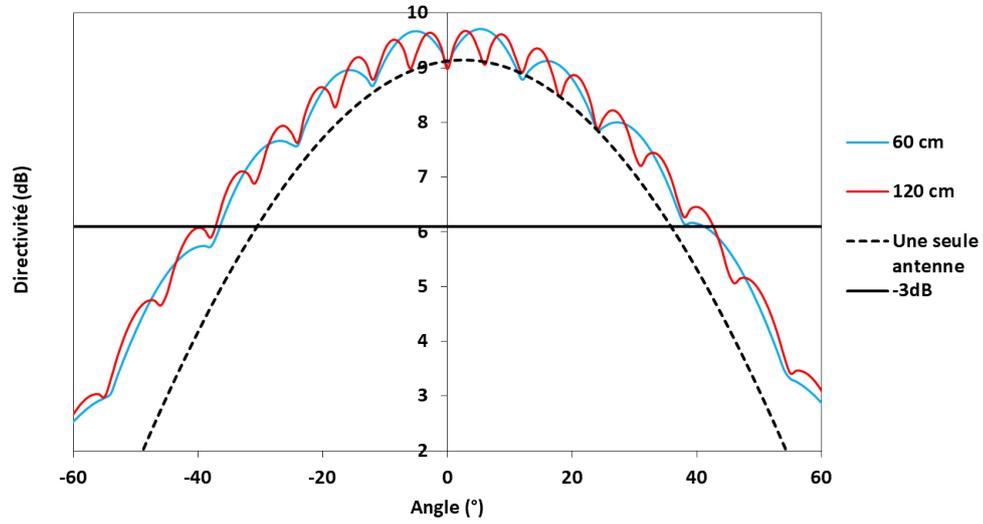


FIGURE 5.2 – Le gain en directivité entre deux antennes en déphasage et l’antenne Laird seule



FIGURE 5.3 – Le système de lecture dans la chambre anéchoïque

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0%	50%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	100%	100%	50%	0%	0%
2	50%	50%	100%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	50%	50%	0%
3	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	50%	50%	50%	0%
4	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
5	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

FIGURE 5.4 – Les pourcentages de détection avec une seule antenne Laird (configuration 1.a) et $P_{\text{rayonnée}} = 24$ dBm

de l'évanouissement par multi-chemin dans le milieu d'essai. Il est convenable de noter que les tags sont placés en polarisation optimale face à l'antenne sans aucun facteur perturbant (configuration dense, matière du produit, pliure, présence du métal, etc ..). Pour chacune des deux configurations, une lecture de quatre minutes est lancée avec une seule antenne (a) et avec deux antennes (b).

Les tags utilisés dans ce montage sont tous les mêmes. Leur sensibilité mesurée avec le Voyantic Tagformance (compte tenu de la désadaptation puce antenne et autres variables de production) est de -11.5 dBm pour les fréquences dans la bande européenne. Les pertes du milieu pour la configuration 1 (air libre) et la configuration 2 (présence d'un deuxième chemin) sont calculées à -39,1 et -46,5 dB respectivement ; ce qui veut dire que 16,6 et 23,5 dBm sont nécessaires pour l'activation des tags. En réalisant une lecture avec une antenne seule à 24 dBm dans un milieu idéal (configuration 1.a), il est évident que l'ouverture de l'antenne affecte les pourcentages de lecture, comme illustré dans la figure 5.4.

Avec une puissance de 30 dBm et compte tenu de l'agencement régulier et simple des tags, un taux de détection de 100% est atteint pour les deux configurations quel que soit le nombre d'antennes. Lorsque la puissance émise est diminuée de 3 dB, seule la configuration (1.b) maintient des taux de détections à 100% contre 98% pour la configuration 1.a. A 24 dBm, l'écart entre ces deux configurations augmente à 13.5%, lorsque les taux de détection restent à 100% pour la configuration 1.b contre une chute à 86.5% pour la configuration 1.a. Ce premier résultat montre l'avantage d'un montage à deux antennes pour maintenir des hauts taux de détection même dans un milieu idéal.

Puissance rayonnée (dBm)	Configuration 1.a	Configuration 2.a	Configuration 1.b	Configuration 2.b
30	100%	100%	100%	100%
27	98%	96%	100%	98%
24	86.5%	82%	100%	94%

Tableau 5.1 – Les pourcentages de détection dans deux configurations avec une seule (a) et deux antennes (b)

En comparant les résultats obtenus avec la configuration 2.a à ceux obtenus avec la configuration 2.b, il est clair que l'utilisation de cette technique dans un milieu avec des évanouissements est bénéfique. Pour une puissance de 24 dBm, nous obtenons des résultats avec deux antennes comparables aux résultats obtenus avec une seule antenne mais à 27 dBm. A 24 dBm une amélioration de 12% est notée pour une seule antenne. Cela signifie que cette technique assure une couverture plus large de la zone de lecture tout en réduisant la puissance nécessaire pour activer quelques tags.

5.3.3 Amélioration de l'activation

En prenant en considération les autres facteurs qui peuvent dégrader les performances d'un système RFID, notamment ceux liés à la sensibilité du tag, le besoin en puissance devient plus important pour assurer l'activation du tag. Les résultats de détection obtenus jusqu'ici, ainsi que l'investigation des facteurs impactant confirment la nécessité d'une activation plus efficace des tags dans des configurations contraignantes. Dans cette partie, nous examinons plus en détail le signal d'activation en rappelant ses caractéristiques selon le protocole de communication GS1 Gen2 [36] et comment il serait possible de monter en efficacité pour améliorer les taux de détection dans un système RFID passive.

Comme nous le savons, le tag récupère son énergie de l'interrogateur. En transmission, il récupère la puissance de la commande du lecteur et en réception, une onde entretenue (la porteuse) est envoyée par le lecteur pour assurer l'activation du tag lorsqu'il re-réfléchit sa réponse. Selon la norme [36] ce signal est une sinusoïde ou autre forme d'onde ayant une fréquence fixe et capable d'activer un tag passif sans aucune modulation de phase ou d'amplitude. Le protocole impose que l'interrogateur transmette ce signal pendant une durée minimale de 8 RTcal (durée 0 + durée 1). Il est nécessaire de rappeler que l'ARCEP [24] impose une limite de 33 dBm PAR pour les fréquences situées entre 865,7 et 867,5 MHz.

Toujours dans le contexte de l'amélioration de la détection de tags du marché sans modification de leur circuiterie interne, plusieurs ont imaginé de renforcer le signal d'activation. Vu les limitations sur la puissance d'émission imposée par les réglementations en fonction de différentes régions, au lieu d'augmenter la puissance du signal d'activation, des solutions qui consistent à placer des émetteurs d'ondes entretenues externes sont proposées, créant ainsi un système RFID passive à multiple porteuses. Cette solution peut étendre la distance de lecture d'un tag passif et combattre les phénomènes d'évanouissement grâce à la diversité fréquentielle (différentes fréquences pour les émetteurs CW et les interrogateurs) et spatiale (placement de plusieurs émetteurs CW dans plusieurs endroits). Un premier brevet déposé en 2006 [219] décrit généralement le fonctionnement de cette solution dans un environnement contrôlé. En 2013, un deuxième brevet déposé par la société Mojix [220] décrit un réseau d'excitateurs (ou émetteur) contrôlés par un interrogateur central. La société Mojix propose le Star RFID, un système supposé être capable de détecter les tags à une distance de 300 mètres à l'aide de ces excitateurs. Il est précisé que les excitateurs reçoivent un signal de contrôle de la part de l'interrogateur central et par la suite, ils sont responsables d'«illuminer» ou d'activer une certaine zone dans le milieu de lecture. Même si nous n'avons pas pu trouver plus de détails, l'étude sur des émetteurs d'onde entretenue externes menée en [221], propose de réaliser une extension de la distance de lecture en distribuant des émetteurs équipés d'une boucle à verrouillage de phase pour suivre les sauts de phase et de fréquence subis par le signal envoyé par l'interrogateur. Une amélioration de 200% de la distance de lecture est constatée pour une PIRE de 36 dBm pour le lecteur et une PIRE de 34 dBm pour l'émetteur. Cela est réalisé en synchronisant les deux signaux (lecteur et émetteur), créant ainsi une réplique du signal du lecteur à la position du tag passif.

Liu et al. [222] [223] [224] explorent en détail le concept d'un système à multiples porteuse : des émetteurs d'onde entretenue sont distribués dans l'espace et fonctionnant à une fréquence différente du lecteur. Vu la simplicité de cette proposition, une contrainte principale est constatée qui est l'interférence avec la communication RFID. En effet, l'émission continue non synchronisée d'une onde entretenue pourrait noyer le signal envoyé par le lecteur et celui rétro-réfléchi par le tag. Pour cela deux questions principales sont à prendre

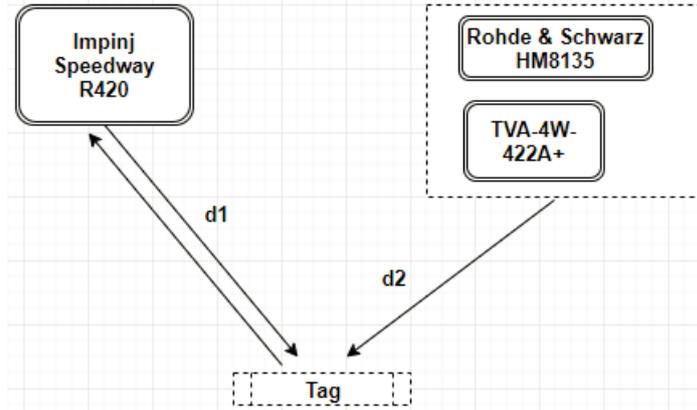


FIGURE 5.5 – Le schéma du système de lecture à multiple porteuses

compte lors de l'évaluation de cette solution : quelles fréquences faudrait-il utiliser pour le lecteur et l'émetteur et comment choisir les puissances de rayonnement ?

Pour répondre à ces questions, un montage similaire à celui réalisé par Liu et al. est mis en place. La figure 5.5 montre le schéma du montage comprenant un lecteur RFID Gen2 Impinj Speedway420 avec un générateur de signal (Rohde & Schwarz HM8135) et un amplificateur (TVA-4W-422A+) utilisé pour émuler un émetteur d'onde entretenue. De l'autre côté du système un tag passif est placé à une distance (d_1) de l'antenne du lecteur RFID et une distance (d_2) de l'antenne émettrice de l'onde entretenue.

Tout d'abord, pour déterminer l'écart de fréquence nécessaire pour éviter l'interférence entre les deux signaux, la puissance du lecteur est fixée à 20 dBm et le tag est placé dans le champs du lecteur. Ensuite, une onde entretenue sinusoïdale est émise avec le générateur du signaux. Pour 20 dBm la distance maximale de lecture est de 3 mètres. Selon [223], plus l'émetteur CW est proche du tag (d_2), plus l'activation est efficace et la distance de lecture devient importante. Nous plaçons alors l'antenne du lecteur à 3 mètres du tag et l'antenne de l'émetteur à 1 mètre. Pour cette configuration la puissance de l'onde entretenue (P_{CW}) est variée en cinq pas entre -25 et 25 dBm et pour chaque valeur de puissance, la fréquence du signal entretenue est balayée autour de la bande RFID (de 700 MHz à 1 GHz). L'objectif de cette expérience est de déterminer la plage de fréquence ($f_B - f_H$) à éviter pour l'onde entretenue afin de ne pas noyer la communication entre le lecteur et le tag. L'expérience est répétée pour deux tags (Zephyr 1 et Zephyr2) ayant la même antenne mais deux puces différentes (G2iL et Ucode 7). Les caractéristiques de ces tags sont affichés dans le catalogue de tags en annexe A.

P_{CW} (dBm)	Zephyr 1		Zephyr 2	
	f_B (MHz)	f_H (MHz)	f_B (MHz)	f_H (MHz)
25	800	935	800	935
10	810	935	810	935
0	830	910	830	910
-10	860	880	855	885
-25	865	870	865	870

Tableau 5.2 – Comparaison des puces du marché

Le tableau 5.2 montre les résultats de cette expérience. Quelle que soit la puissance émise, la bande dédiée à la RFID UHF dans la région Européenne est toujours bloquée.

Cela signifie que pour livrer une énergie suffisante à alimenter le tag avec un émetteur externe, il faudrait choisir une fréquence inférieure à f_B et supérieure à f_H pour ne pas interrompre la communication entre le lecteur et le tag. Bien évidemment cette solution n'est pas utile puisqu'elle ne respecte pas les réglementations de l'Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes [24]. Deuxièmement, en observant les limites basses et hautes de la fréquence, nous constatons qu'elles varient en fonction du tag utilisé. Par exemple pour une puissance émise de -10 dBm, une différence de 5 MHz est enregistrée sur les deux limites entre les deux puces. Puisque la même configuration géométrique est gardée entre les deux essais, nous supposons que la puce G2iL n'as pas réussi à décoder la commande du lecteur à cause du faible rapport signal-bruit. Lorsque la puissance émise est de -25 dBm, le niveau de l'onde est très faible par rapport au signal émis par le lecteur et les deux limites de fréquence redeviennent égales pour les deux tags. Cette hypothèse est soutenue par l'étude menée en [222] qui conclue que cette solution ne peut pas fonctionner avec un lecteur Gen2 parce que le tag serait incapable détecter le premier front descendant et le dernier front montant de la commande du lecteur. Pour vérifier cette conclusion, le tag Zephyr2 est placé de nouveau à une distance du lecteur (d_1) de 3 mètres et une distance (d_2) de l'émetteur de 1 mètre et une onde entretenue d'une fréquence égale à 857 MHz est émise avec une puissance de -10 dBm. Ensuite la puissance émise par le lecteur, initialement de 22 dBm, est décrétementé par pas de 0,5 dBm pour voir si la présence de cette onde pourrait améliorer la sensibilité du tag et par conséquence, sa capacité à communiquer à une distance plus élevée du lecteur. A 21,5 dBm le tag n'a pas pu être détecté, affirmant ainsi l'impact neutre de l'onde dans ces conditions (à -10 dBm) et bruyant autrement (lorsque la puissance émise est plus élevée).

Les résultats ont confirmé que pour activer un tag avec un émetteur d'onde entretenue externe, il faut que cet émetteur émette sur des fréquences hors bande RFID. Autrement, une synchronisation avec l'interrogateur ou une nouvelle requête de lecture non-conforme au protocole de lecture [36] est nécessaire. A la lumière de cette conclusion, d'autres solutions sont envisagées. Une approche différente à cette dernière serait d'améliorer le signal d'activation émis par le lecteur. Des efforts postérieurs [225] ont proposé d'activer le tag par un signal intermittent constitué d'une onde entretenue multipliée par un signal carré d'un rapport cyclique bien déterminé. Cette technique permet de réduire la puissance moyenne rayonnée par le lecteur, décrétementant ainsi la PIRE. Cela permet l'émission d'une puissance plus élevée pour étendre la portée du lecteur. Les résultats montrent un rendement similaire du rectifieur de la puce avec un rapport cyclique de 75% (intermittent) et 100% (continu). Néanmoins, utiliser une onde entretenue n'est pas le seul, ni le meilleur moyen pour activer le tag sans augmenter la puissance moyenne du signal. Si, la puissance est rayonnée sur deux fréquences différentes qui se superposent éventuellement dans le temps à l'entrée du rectifieur, il est possible de réaliser des pics de tension plus élevés sans modifier la puissance moyenne rayonnée [226]. L'utilisation de plusieurs fréquences est une solution classique pour combattre les évanouissements, par nature sélectif en fréquence. Trotter et al. [227] [228] proposent d'alimenter le tag passif avec des formes d'ondes optimisées en puissance «*Power-optimized Waveforms*». Ces formes d'ondes sont formées à partir de plusieurs porteuses à fréquences différentes pour améliorer le rendement du rectifieur du tag. Toutefois, cela pose des contraintes additionnelles sur la conception de la puce, puisque une capacité élevée est nécessaire pour le rectifieur considérant que l'alimentation n'est pas stable dans le temps, contrairement à l'onde entretenue. En outre, en simulant un bilan de liaison réaliste, l'utilisation des formes d'ondes optimisées n'est bénéfique que si la puissance émise est inférieure à

-2 dBm [229]. En [230], l'utilisation des signaux variant dans le temps, où la fréquence varie d'une façon linéaire, sinusoïdale ou quadratique avec le temps, est proposée. Il est démontré que ce type de signaux est plus résistant à l'évanouissement que l'onde entretenue qui peut, sous les mêmes conditions, subir des pertes de l'ordre de 40%. L'utilisation de plusieurs fréquences implique une occupation spectrale plus large qui pourrait causer une infraction des régulations en Europe. En considérant de plus la non-conformité avec le protocole Gen2 [36], ces solutions sont pratiquement inutilisables avec les lecteurs du marché malgré les avantages démontrés par divers publications.

5.3.4 Exploitation des interférences constructives

Cette solution fait l'objet d'une investigation est plus proche d'une utilisation réaliste. Nous considérons deux lecteurs RFID Gen2 installés relativement proches l'un de l'autre. En considérant la bande de fréquence allouée à la technologie RFID UHF en France, ces lecteurs émettent dans le même canal ou dans des canaux adjacents. Les interférences dans ce cas sont inévitables et selon plusieurs études [200] [197] [231] [199] deux types peuvent se reproduire : les interférences lecteur-tag et les interférences lecteur-lecteur. Les interférences lecteur-tag se reproduisent lorsqu'un des deux signaux émis par deux lecteurs s'interfèrent et le tag ne réussit pas à décoder la commande. Les interférences lecteur-lecteur se reproduisent lorsque un lecteur en mode émission bloque le signal rétro-modulé du tag, ainsi interférant sa communication avec un autre lecteur en mode réception. Vu les natures constructives et destructives des interférences, les chercheurs sont incités à imaginer que si des interférences constructives prennent lieu, cela pourrait être exploité pour améliorer la puissance d'alimentation disponible à la position du tag. Malheureusement, les résultats en [200] et [197] prouvent que ce n'est pas possible et la synchronisation entre lecteur est indispensable pour atteindre une meilleure alimentation. En [231], la synchronisation entre lecteurs se montre efficace en offrant une portée plus importante de lecteur et moins d'interférences entre lecteurs. En réalité, ce n'est pas tout à fait correct. En effet, dans les magasins, plus particulièrement dans les zones d'encaissement, il est souvent signalé qu'un tag passé à un lecteur RFID de la caisse A, est lu sur un lecteur RFID de la caisse B. Il est important de noter que les lecteurs de caisse sont configurés à de très faibles puissances pour confiner la zones de lecture à quelques centimètres de l'antenne du lecteur. Lorsque ce phénomène est considéré néfaste à cause des fausses lectures pour un cas d'usage lié à l'encaissement, il n'est pas irréfléchi de supposer que sous les régulations européennes, sans synchronisation il est possible d'exploiter ce phénomène pour améliorer quelques zones de lecture en inventaire automatique.

Avant de développer davantage cette hypothèse, il est nécessaire de revisiter le standard EN 302 208 [34] régulant les communications entre 865 et 868 MHz. Pour mieux comprendre le mode opératoire lorsque plusieurs lecteurs sont présents dans le milieu. Deux environnements de lecture existent : un environnement dit multiple qui désigne un environnement où le nombre de lecteurs est inférieur à celui des canaux disponibles et un environnement dense qui désigne un environnement où le nombre de lecteurs est supérieur ou égal à celui des canaux. Ceci dit, en Europe, quel que soit le nombre de lecteurs dans un milieu, seul le mode «*Dense Reader*» doit être utilisé. Ce mode permet aux lecteurs d'émettre sur le même canal de fréquence qui permet une puissance maximale de PAR égale à 2W, et les tags doivent répondre préférentiellement sur les canaux adjacents faibles puissances. D'une manière générale, il est indiqué que les canaux aux numéros pairs sont réservés pour les lecteurs, et ceux aux numéros impairs pour les tags.

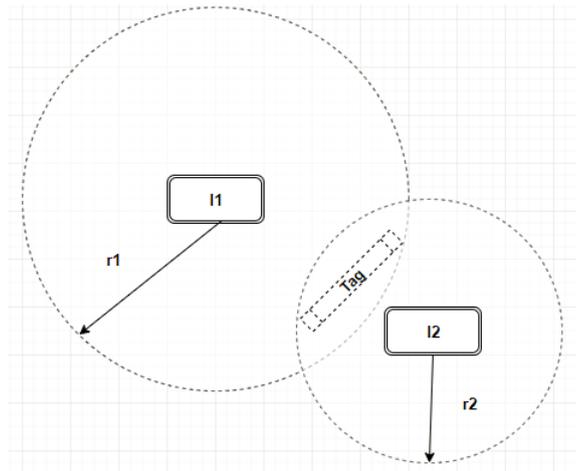


FIGURE 5.6 – Un schéma montrant un tag qui se trouve dans la zone d’interférence de deux interrogateurs

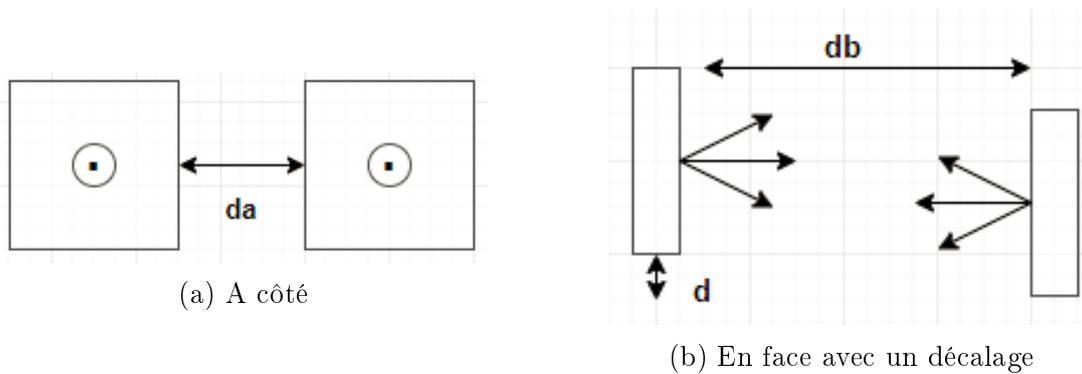


FIGURE 5.7 – Le placement des deux antennes correspondants aux deux lecteurs

Dans le but de reproduire l’effet de l’interférence observé dans les zones d’encaissement, un montage à deux lecteurs Impinj Speedway R420, chacun connecté à une antenne Laird à polarisation circulaire (référence : S8658WPR) est proposé. Il est considéré qu’une antenne est toujours plus proche du tag cible que l’autre antenne comme le montre la figure 5.6.

Vu l’importance du placement des antennes [199], l’une par rapport à l’autre, deux configurations sont proposées dans la figure 5.7. La figure 5.7a illustre la première configuration qui consiste en deux antennes placées l’une à côté de l’autre à une distance « d_a » supérieure à λ pour éviter le couplage champs proche. La figure 5.7b, montre la deuxième configuration qui consiste en deux antennes placées l’une en face de l’autre à une distance « d_b », et un décalage « d » dans le plan horizontal. Les distances de séparation des tags de l’antenne du lecteur initial et secondaire sont r_1 et r_2 respectivement. Il convient de souligner que cette expérience est inspirée des travaux publiés en [232]. Nous allons plus loin en surveillant le RSSI au niveau de l’interrogateur I1 en plus des taux de lecture et selon deux configurations d’antennes comme illustré par la figure 5.7. Cette expérience est répétée pour deux types tags, le Zephyr 1 et le Zephyr 2 ayant une sensibilité mesurée de -5.5 et -11.5 dBm respectivement à 866 MHz. Les premières expériences sont menées dans un chambre, puis selon les résultats expériences sont adaptées et refaites dans un milieu réel.

Les lecteurs Speedway R420 sont choisis puisqu’ils donnent la possibilité de configurer le mode du lecteur (Multiple ou Dense) quelle que soit la fréquence de transmission. Une

première antenne est placée dans la chambre anéchoïque et une puissance rayonnée de 13 dBm est fixée. Pour cette puissance fixe, le tag est éloigné petit à petit de l'antenne du lecteur jusqu'à ce qu'il ne soit plus lu. Cette distance est notée d_{init} . Ensuite, la deuxième antenne connectée au deuxième lecteur est introduite à une distance d_a et d_b pour les configurations (a) et (b) respectivement. Dans la configuration (a), le tag est placé devant les deux antennes, alors que dans la configuration (b), le tag est placé entre les deux antennes dans le plan de symétrie vertical de l'ensemble du dispositif. Les premiers résultats (tableau 5.3a) montrent que les meilleures distances de lecture (d_{max}) sont obtenues lorsque les deux lecteurs fonctionnent ensemble à une fréquence fixe égale à 865,7 MHz. Les résultats montrés dans le tableau 5.3a correspond à $d_a = 1$ mètre et $d_b = 2.6$ mètres pour une puissance PAR du deuxième interrogateur égale à 24 dBm.

	Configuration a		Configuration b	
	Zephyr 1	Zephyr 2	Zephyr 1	Zephyr 2
d_{init} (cm)	67	168	67	168
dd_{max} (cm)	108	191	153	207
Taux de lecture (%)	80	80	71	74
Rssi (dBm)	-73			

(a) Dans la chambre anéchoïque avec les configurations a et b des antennes

	Zephyr 1	Zephyr 2	5 x Zephyr 1	5 x Zephyr 2
d_{init} (cm)	53	101	47	92
dd_{max} (cm)	334	1054	312	517
Taux de lecture (%)	31	30	20	22
Rssi (dBm)	-70	-69	-74	-74

(b) Dans un milieu de réel avec la configuration b des antennes

Tableau 5.3 – L'amélioration de la distance maximale de lecture avec un deuxième lecteur

Les résultats montrent que le tag le moins sensible (Zephyr 1) profite plus de cette solution avec une amélioration de 62% contre 53% pour le Zephyr 2 dans la configuration (a) (voir tableau 5.3a). Cette tendance est la même dans la configuration (b). Avec la configuration (b), la distance de lecture est augmenté en moyenne de 4% de plus pour les deux tags par rapport à la configuration (a). Par contre, les taux de lecture ont baissé de 7.5% en moyenne avec la configuration (b). Cela signifie que la présence des interférences est plus importante dans le cas de la configuration (b) : lorsque les lecteurs sont en face l'un de l'autre, la distance de lecture est incrémentée. Par contre une baisse est constatée sur les taux de lecture par rapport à la configuration (a), où les interférences sont moins importants. Ces résultats sont obtenus quand le mode environnement dense («*DRM*») est activé pour les deux lecteurs. Si, ce mode est changé au mode multiple, les interférences n'auront plus aucun effet positif et $d_{\text{max}} = d_{\text{init}}$; ceci confirme la déduction des auteurs du [232] qui affirment que le «*DRM*» est le facteur responsable de cette amélioration des performances.

Dans le milieu réel, seule la configuration (b) est considérée (figure 5.7b). Pour un tag placé entre le lecteur et le tag, la même procédure de test décrite précédemment est effectuée. Pour une configuration (b), les tests sont menés pour 1 seul tag puis pour 5 tags pour mesurer l'effet de la population sur les performances. Pour la même puissance PAR

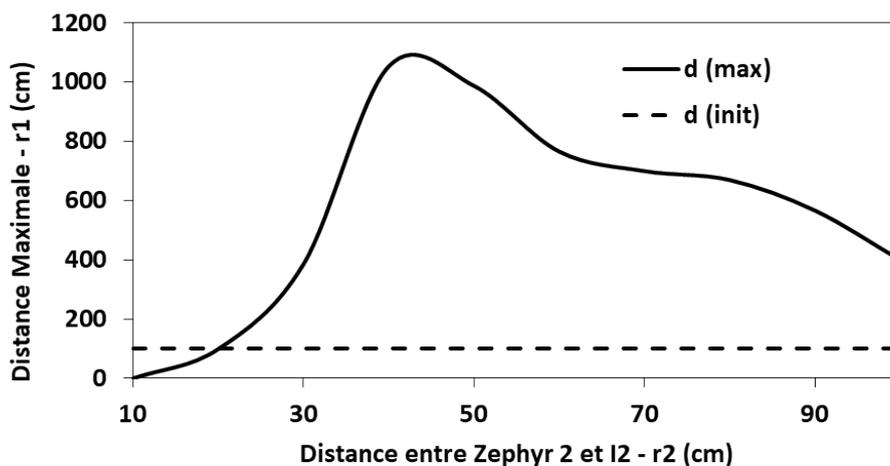


FIGURE 5.8 – La distance maximale en fonction de la distance de séparation entre le tag et I2

de I1 égale à 13 dBm, les distances de lecture dans le milieu réel ont légèrement baissé (tableau 5.3b). Lorsque 4 tags additionnels sont ajoutés dans un empilement vertical avec une séparation de 5 cm entre eux, les distances initiales d_{init} diminuent encore plus. Dans cette expérience la distance qui sépare les deux antennes en face d_b est variable ($d_b = r_1 + r_2$). La distance qui sépare l'antenne de I2 du tag (r_2) est fixée à 0.4 mètre, et la distance le séparant de l'antenne de I1 (r_1) dépend de la distance maximale réalisée lorsque le tag reste détecté en présence d'un deuxième lecteur. Puisque les tests sont menés dans un milieu réel où des réflexions et des diffractions de l'onde prennent place, la distance de lecture maximale est fortement augmentée par rapport à la distance initiale et par rapport à l'expérience menée en chambre anéchoïque (voir tableau 5.3a). La sensibilité de la puce devient plus impactante dans ce milieu : le Zephyr 2 étant un tag plus sensible que le Zephyr 1 avec un écart de 6 dBm, est lu sur le premier interrogateur (I1) avec une PAR de 13 dBm. Un deuxième interrogateur I2, qui transmet en même temps sur le même canal avec une puissance égale à 24 dBm atteint une distance de lecture maximale de 10 mètres approximativement, soit une amélioration de 91% par rapport à la distance initiale. Ces distances diminuent encore lorsque d'autres tags sont ajoutés, mais l'amélioration des performances reste valable. Il est noté que la distance maximale reportée dans la configuration avec 5 tags correspond à la distance maximale à laquelle tous les tags sont détectés. Ceci dit, les taux de lecture décroissent drastiquement dans le milieu réel ce qui implique un temps de lecture relativement long. Lorsque 4 tags additionnels sont ajoutés, les taux de lecture diminuent davantage. Les résultats obtenus sont tout à fait cohérents avec les résultats annoncés en [232]. De plus, il est visible que la sensibilité du premier lecteur est limitée à -74 dBm dans les tableaux 5.3a et 5.3b tant que normalement un tag peut être détecté avec un RSSI de -79 dBm dans un environnement réel. Nous suspectons que c'est dû aux rayonnements du deuxième interrogateur qui limite la sensibilité du premier interrogateur. Pour illustrer l'impact de l'interrogateur I2 sur l'alimentation, la distance maximale (entre le tag et I1) d'un seul tag Zephyr 2 est mesurée en fonction de la distance de séparation entre le tag et I2 (r_2).

Le graphe sur la figure 5.8 montre que si r_2 diminue, l'impact de l'interférence constructive est diminué jusqu'à ce que le tag ne soit plus visible ; ceci est dû à la différence d'amplitude entre les signaux des deux interrogateurs au niveau tag, qui rend le signal du

premier impossible à décoder par le tag. Lorsque r_2 augmente, la puissance d'activation livrée à la position du tag diminue, diminuant ainsi la distance de lecture maximale. Les travaux réalisés montrent la possibilité d'améliorer la détection d'un tag, en livrant plus de puissance par le biais d'un deuxième lecteur asynchrone par rapport au premier, à condition que les deux lecteurs soient configurés en «*DRM*». A part cela, les résultats confirment que les performances d'un système RFID UHF passif sont majoritairement limitées par la liaison descendante.

5.4 Un nouveau système RFID intelligent

Dans les parties précédentes de ce chapitre, plusieurs contraintes limitant les performances des systèmes RFID UHF passive, ainsi que les propositions les plus pertinentes pour les améliorer sont détaillées. Vu que les facteurs liés au milieu de lecture sont les plus impactants, la plupart des solutions visent une amélioration de la probabilité de détection soit avec une meilleure redistribution de l'énergie, soit, en exploitant des phénomènes comme l'interférence constructive, ou en transmettant des répliques du signal. Le brevet [233] déposé par Impinj décrit un système capable de changer sa configuration en fonction du nombre de tags dans le milieu, le nombre total des lecteurs et le nombre de lecteurs par canal. En réalité [234], un mode de lecture dénoté «*Auto-set Dense Reader*» réalise une lecture du milieu et en fonction des paramètres cités ci-avant, et ensuite un type d'encodage (FM0, Miller 2, 4, 8) est choisi. Après une étude approfondie du milieu en Chapitre 4, il est confirmé que plusieurs catégories de performance existent et de notre point de vue, il n'est pas congru d'essayer d'améliorer la détection des tags appartenant à ces différentes catégories de la même manière. A cet égard, nous proposons de rendre le système RFID intelligent en lui donnant la capacité de négocier la ou les configurations optimales pour améliorer la détection dans chacune des catégories de performances identifiées dans un rayon. Nous prétendons que cette proposition augmenterait le potentiel d'un système d'inventaire RFID passive sans augmenter les coûts tout en respectant les réglementations Européennes et le protocole de communication EPC Gen2.

5.4.1 Mise en place du nouveau système

Dans le but de réaliser un système RFID intelligent en se basant uniquement sur la technologie RFID passive dans la bande UHF tout en respectant les réglementations et en restant conforme au protocole, il est nécessaire d'évaluer les divers paramètres ayant un impact sur la détection. Par la suite l'évaluation de l'impact des paramètres est effectuée dans un milieu réel avec des lecteurs RFID du marché conformes à la norme Gen2.

5.4.1.1 Matériels

L'évaluation des performances du système RFID passive comprend plusieurs étapes. La première étape est bien évidemment de monter un système de lecture de base permettant la lecture dans un milieu réel. Le milieu choisi est celui étudié précédemment. La composition du rayon et l'agencement des articles sont illustrées en annexe C. Pour la lecture, deux modules ThingMagic M6e, deux antennes Laird (référence : S8658WPR) et deux câbles coaxiaux (perte de 0.5dB/m) sont utilisés pour établir le système de lecture de base. Deux modules RFID passive sont considérés pour constituer le système de lecture afin d'étudier l'effet de variation de plusieurs paramètres sur la détection et sur l'interopérabilité dans

un environnement dense simultanément. Le montage, où chaque module est connecté à une antenne, est montré dans la figure 5.9. Les antennes sont placées en face du rayon à une hauteur de 1.5 mètres et une séparation de 2.5 mètres. Les deux antennes sont séparées de 2 mètres l'une de l'autre.



FIGURE 5.9 – Le système de lecture basé sur deux modules ThingMagic M6e

5.4.1.2 Les paramètres étudiées

Les paramètres concernés par cette étude se divisent en quatre parties :

- La puissance émise : la maîtrise de la puissance émise dans un milieu contenant plusieurs lecteurs est indispensable considérant son rôle dans la reproduction des interférences constructives et destructives. En plus, il est démontré qu'une puissance maximale n'est pas toujours suffisante pour activer l'ensemble des tags dans le milieu [235] [236] et que la variation de la puissance peut améliorer les performances du système.
- La fréquence d'émission : puisque les canaux de fréquences en Europe sont limités, il est nécessaire de comprendre l'effet du choix du canal lorsque deux lecteurs sont en opération simultanément.
- La temporisation de l'émission : lorsque deux lecteurs sont en émission, il est préférable de privilégier une émission intermittente pour chacun. Cela pourrait diminuer les interférences dans le milieu.
- Les paramètres du protocole Gen2 : l'effet de ces paramètres est souvent négligé dans la littérature. Cela pourrait-être dû aux études [237] [238] qui ont constaté un effet négligeable de leurs variations sur les performances. Néanmoins, lorsque les populations sont importantes, il est cruciale de bien configurer ces paramètres pour assurer les bonnes performances du système. Ces paramètres en plus de la puissance et la fréquence sont normalement les seuls accessibles par les interfaces de programmation d'applications partagées par les fournisseurs des lecteurs.

5.4.1.3 Indicateurs de performance

Idéalement, pour quantifier l'effet de chaque paramètre, il faut varier un seul paramètre en fixant tous les autres à une seule valeur. Une estimation rapide du nombre de combinaisons de jeux de paramètres possibles pour les deux lecteurs nous donne approximativement 150 millions combinaisons ; sachant que pour une analyse plus précise, il faut augmenter le nombre de pas de variation de la puissance et les paramètres de

temporisation par exemple. Puisque cela n'est pas réaliste ni réalisable, nous proposons de générer aléatoirement des combinaisons de paramètres et puis d'évaluer l'importance de leurs contributions aux résultats d'une part et leurs effets sur les performances d'une autre part. Les indicateurs évalués pour juger les performances du système sont :

1. Le UR ou «*Unique Reads*» : le nombre d'EPCs uniques lus est le premier indicateur. Cet indicateur serait par la suite nécessaire pour calculer les taux de détection et conclure sur les performances globales du système d'inventaire.
2. Le RSSI ou «*Received signal strength indication*» : la puissance reçue par le lecteur est nécessaire pour conclure sur la sensibilité du lecteur et le niveau de puissance retournée par le tag. La moyenne des valeurs du RSSI pour tous les EPCs détectés avec un jeu de paramètres est considérée comme un deuxième indicateur.
3. Le RC ou «*Read Count*» : le nombre de fois qu'un tag a été lu, nécessaire pour conclure sur la fiabilité de la lecture. La somme des réponses reçues pour tous les EPCs détectés avec un jeu de paramètre est considérée comme un troisième indicateur.

5.4.1.4 Méthodologie

Dans cet objectif, nous avons développé un logiciel dans l'environnement Visual Studio en langage C#. la figure 5.10 montre l'interface graphique de ce logiciel. Le logiciel, à ce stade, a quatre fonctions principales : se connecter aux deux lecteurs, générer les jeux de paramètres aléatoires, lancer la lecture et enfin enregistrer les résultats. Le pseudocode 2 décrit la logique de cette application. Puisque la génération des configurations est aléatoire, il est nécessaire de limiter la plage de valeurs possibles. Les valeurs considérées pour chaque paramètre sont détaillées dans les parties suivantes. Un jeu de paramètres désigne un couple de configurations pour le premier et le deuxième lecteur. Dans un seul jeu de paramètres chaque lecteur a une configuration différente de l'autre.

En ce qui concerne la communication avec les deux modules ThingMagic M6e, nous nous référons à la documentation de l'API [172] et au guide spécifique pour le matériel M6e [171] fourni par ThingMagic. Le premier contient les différentes méthodes et fonctions permettant de réaliser des opérations de lecture, d'écriture et de configuration avec les produits ThingMagic. Le deuxième est un guide spécifique à l'opération du M6e détaillant les caractéristiques du lecteur. Nous nous servons de ces deux guides pour déterminer les paramètres accessibles et les valeurs possibles pour chaque paramètre. Pour cette expérience, le temps de lecture est fixé à 20 secondes par jeu de paramètres et 300 itérations de lecture. Il en résulte 300 jeux de paramètres et un temps total de 100 minutes. Cependant, pour assurer le bon fonctionnement, des délais doivent être introduits entre les

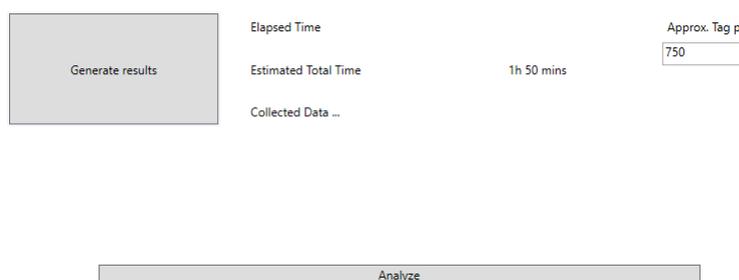


FIGURE 5.10 – Interface graphique du logiciel développé

Pseudocode 2 Algorithme de la génération aléatoire

entrée : *Estimationdestagsdanslemilieu* ; *Nombredelectures* ; *Tempsdelecture* ;
sortie : Jeux de paramètres utilisés ; Les EPCs collectés pour chaque jeu de paramètres ;
le RSSI et le RC pour chaque EPC
Nblectures \leftarrow 0
faire
Générer des configurations aléatoires en fonction de
l'*Estimationdestagsdanslemilieu* et le *Nombredelectures*
Appliquer les configurations aux lecteurs
Lancer une lecture avec le premier lecteur
Lancer une lecture avec le deuxième lecteur
Attendre pour une durée \leftarrow *Tempsdelecture*
Arrêter le lecteur 1
Arrêter le lecteur 2
écrire les configurations utilisées pour chaque lecteur
écrire le nombre des EPCs collectés pendant ce jeu de paramètres
écrire la moyenne des valeurs du RSSI pour les EPCs détectés
écrire la somme des réponses (RC) pour les EPCs détectés
Nblectures \leftarrow *Nblectures* + 1
tandis que *Nblectures* < *Nombredelectures*

itérations pour fournir un temps suffisant pour la gestion de la connexion et le traitement des données. En réalité, avec ces conditions, cette opération dure en moyenne 3 heures.

La variation de chaque indicateur est illustré par la suite en fonction de la variation de chaque paramètre identifié sur deux lecteurs. Afin de mieux illustrer les variations des indicateurs de performances en fonction de la variation d'un paramètre sur les deux lecteurs, les résultats sont représentés sous forme de tracé de contours. Néanmoins, il est important de préciser que les valeurs de paramètres utilisés sont discrètes.

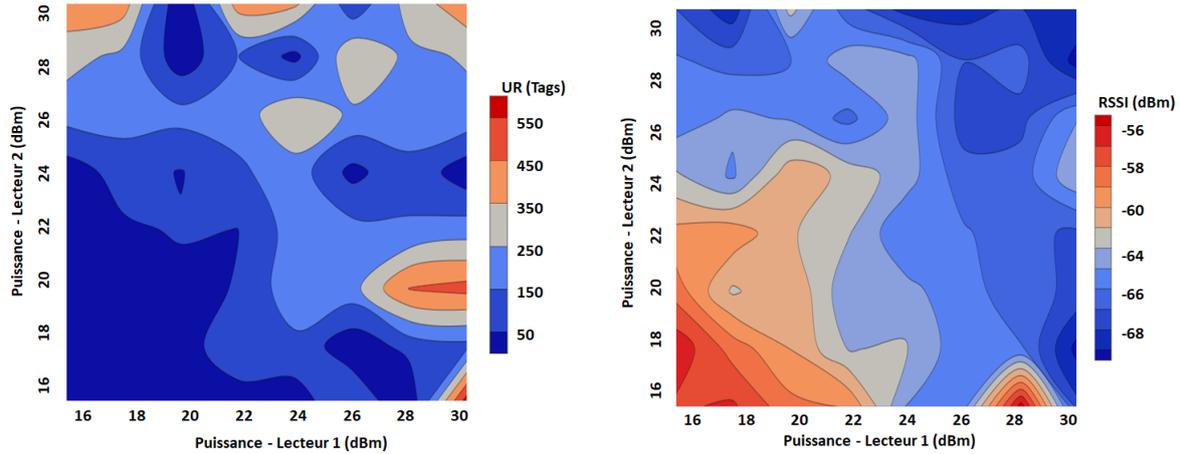
5.4.2 Analyse de divers effets

5.4.2.1 Effet de la puissance

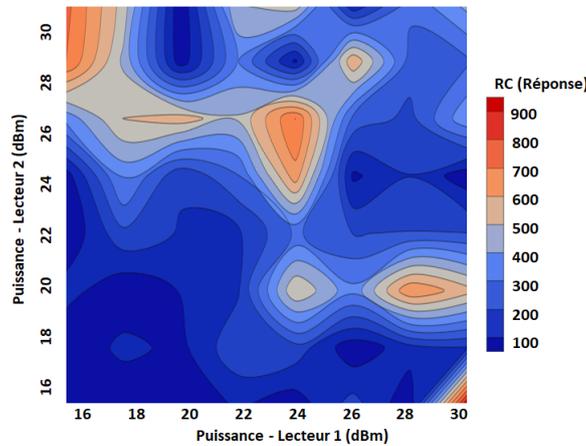
Afin de mieux comprendre l'impact de la puissance émise par deux interrogateurs sur l'environnement de lecture, ce paramètre est isolé pour visualiser son effet. Tout d'abord, pour déterminer la plage dans laquelle la puissance des deux interrogateurs varierait, nous nous référons au guide du M6e. Il est précisé que ce module est capable d'émettre une puissance entre 5 et 31.5 dBm. Une puissance de 5 dBm est très faible pour avoir un impact dans la configuration présentée dans la figure 5.9. Pour assurer que la puissance émise aurait un impact, et pour maximiser le nombre des configurations aléatoires utiles, une puissance cible de 16 dBm est visée pour la limite basse. Pour calculer la puissance émise nécessaire, l'équation 5.1 est utilisée.

$$P_{emise}(dBm) = P_{Cible}(dBm) - [Gain_{S8658WPR}(dBiC) - 3dB] + PertedesCables(dB) \quad (5.1)$$

Pour un gain circulaire d'antenne de 8.5 dBiC, une perte des câbles coaxiaux de 0.5 dB et une puissance cible minimale de 16 dBm, une puissance émise de 11 dBm est nécessaire. Pour une puissance maximale de 30 dBm, une puissance émise de 25 dBm



(a) La variation des UR en fonction de la puissance (b) La variation du RSSI moyen en fonction de la puissance



(c) La variation du RC en fonction de la puissance

FIGURE 5.11 – L'impact de la puissance sur les performances du système

est nécessaire. Une puissance maximale de 30 dBm est choisie pour éviter les collisions éventuelles entre deux antennes placées en proximité émettent à une puissance très haute. En effet, fixer les limites de la plage de variation, augmentera la probabilité de générer des configurations utiles sans augmenter le nombre de jeu de paramètres, ce qui nécessite un temps considérable.

La figure 5.11 montre l'effet de la puissance sur les performances du système. Il est évident que cette variation n'est pas la même pour les trois indicateurs.

- Sur la figure 5.11a, le nombre de tags uniques détectés croît pour une puissance émise supérieure à 24 dBm sur les deux lecteurs, ce qui est visible au niveau des contours en gris et bleu. Des pics de détection se trouvent à (16;30), (30;20), (30;16), (30;19). Cela prouve qu'un lecteur est capable de réaliser des taux de détection élevés lorsqu'il émet à une puissance maximale dans le milieu, à condition que l'autre lecteur émette à une puissance relativement faible. Les pics à (30;30) et (23;30) sont explorés davantage par la suite.
- Sur la figure 5.11b, les valeurs optimales du RSSI (en rouge) sont obtenues lorsque les deux lecteurs émettent à une puissance proche de la puissance minimale. Cela confirme que l'augmentation de la puissance, étant bénéfique pour améliorer les

taux de détection, peut incrémenter le nombre des collisions dans le milieu, affectant ainsi la qualité de la réponse du tag ou la sensibilité du lecteur.

- Sur la figure 5.11c, le nombre de réponses reçues par lecteur, manifeste un comportement similaire à celui du nombre de tags unique (figure 5.11a) sauf à (30 ;30) et (23 ;30) où les pics n’existent plus. Cela montre que même si une portion du rayon est illuminée avec les puissance maximale, la communication n’est pas fiable entre le lecteur et les tags du milieu et une majorité des réponses sont interrompues à cause des collisions.

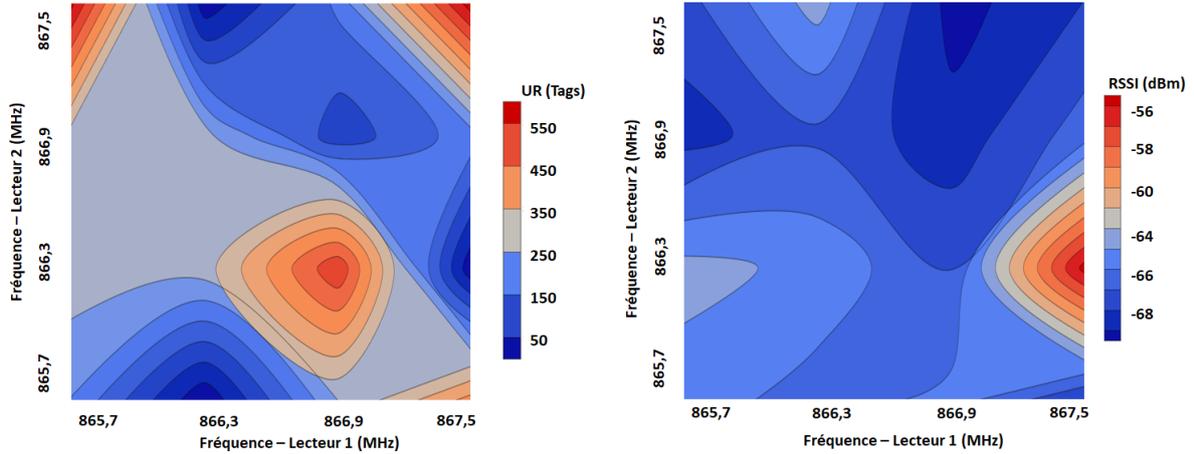
Le choix des puissances lorsque plusieurs lecteurs sont dans le milieu doit être un compromis entre la portée et la réduction des collisions. Cette conclusion n’est pas nécessairement révolutionnaire, pourtant l’étude de ce premier paramètre montre l’importance d’inclure plusieurs couples de puissance pour satisfaire cette condition.

5.4.2.2 Effet de la fréquence

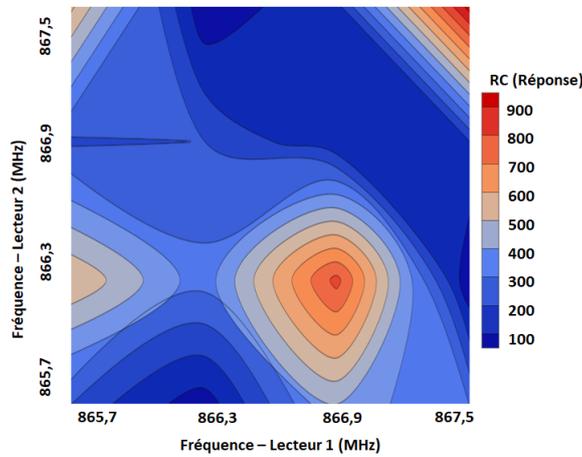
Concernant le choix de la fréquence, nous choisissons les canaux 4 (865,7 MHz) , 7 (866,3 MHz), 10 (866,9 MHz) et 13 (867,5 MHz) pour constituer la plage de variation. Il s’agit des canaux haute puissance définis par les régulations ETSI [34] dans la bande UHF.

La figure 5.12, montre les variations des performances suivant la variations de fréquences sur les deux lecteurs. Nous distinguons deux cas :

- Les deux fréquences sont égales : la figure 5.12a montre que ce n’est pas le pire cas pour les taux de détection. En effet, une zone grise se manifeste sur la diagonale où les deux lecteurs émettent sur le même canal. Ajouté à cela, un pic de performance apparaît lorsque les deux lecteurs utilisent le canal 13. En se référant à la figure 5.12c, un comportement similaire est constaté, mais seul le pic à (867,5 ; 867,5) subsiste. Nous supposons que cela est dû aux interférences constructives. Il est important de noter que dans ce cas les valeurs de RSSI sont tous faibles à cause des collisions dans le même canal (figure 5.12b).
- Les deux fréquences sont différentes : lorsque les deux fréquences d’émissions sont différentes des pics de détection unique sont observés à (865,7 ; 867,5) et (867,5 ; 865,7). Il est évident que cette amélioration en détection ne prend place que lorsqu’une séparation maximale entre les canaux a lieu. Cela est dû à la bande étroite allouée pour la RFID en Europe. Pour les réponses reçues (figure 5.12c), cette amélioration n’est pas maintenue, ce qui confirme nos doutes concernant le rôle des interférences constructives dans le cas précédent. De même, aucune amélioration n’est observée sur les valeurs du RSSI, ce qui signale un fort nombre de collisions quelle que soit la fréquence dans la bande entre 865,7 et 867,5 MHz.



(a) La variation du UR en fonction de la fréquence (b) La variation du RSSI moyen en fonction de la fréquence



(c) La variation du RC en fonction de la fréquence

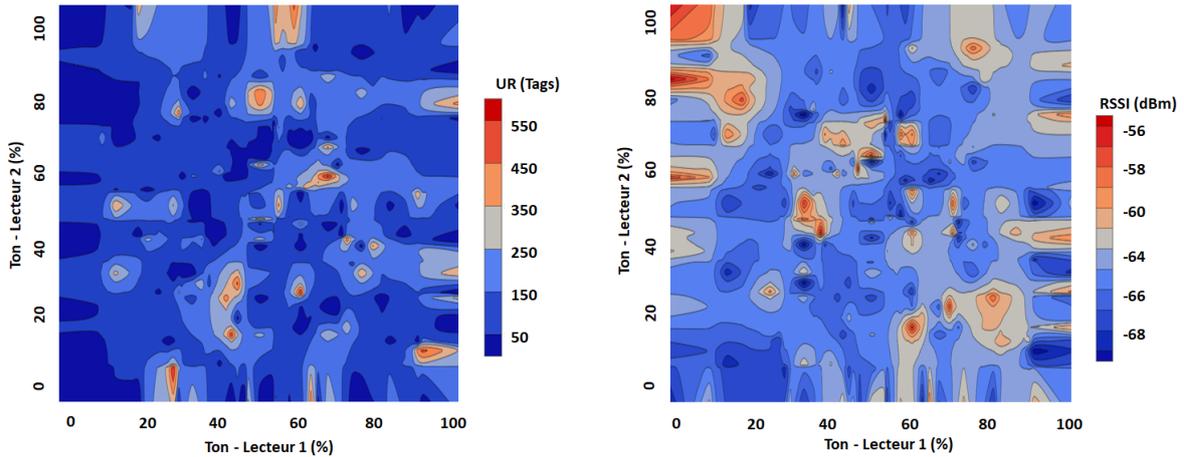
FIGURE 5.12 – L'impact de la fréquence sur les performances du système

5.4.2.3 Effet de la temporisation de l'émission

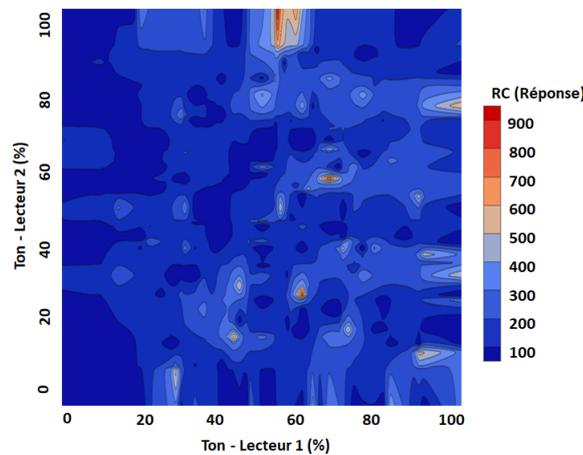
Lorsque un module M6e est en lecture continue, cela signifie que plusieurs séquences de lecture sont enchaînées l'une après l'autre jusqu'à ce que le lecteur soit arrêté par une commande extérieure. Selon l'API, [172] il est possible de définir ce comportement avec deux paramètres. Un paramètre qui définit le temps de lecture active pour chaque séquence (L_{ON}) et le temps d'attente entre deux séquences consécutives (L_{OFF}). Le taux de temps de lecture active est défini dans l'équation 5.2.

$$T_{ON}(\%) = \frac{L_{ON}}{L_{ON} + L_{OFF}} \cdot 100 \quad (5.2)$$

La figure 5.13 montre la variation des performances du système en fonction de la variation des taux du temps de lecture active. La figure 5.13a montre que la détection n'est maximale que pour des valeurs très spécifiques de T_{ON} . Ces taux se trouvent principalement dans les zones où l'un des deux lecteurs émet avec un T_{ON} faible ou moyen et l'autre avec un T_{ON} moyen ou élevé. Concernant le RSSI 5.13b, le niveau de la puissance reçue par jeu de paramètres est maximal lorsqu'un des deux n'émet pas ($T_{ON} = 0$). C'est tout à fait normal puisque cette configuration réduit considérablement les collisions. Même dans



(a) La variation du nombre de UR en fonction du T_{ON} (b) La variation du RSSI moyen en fonction du T_{ON}



(c) La variation du RC en fonction du temps du T_{ON}

FIGURE 5.13 – L'impact des taux du temps de lecture active sur les performances du système

une configuration de puissance où les taux de lecture sont faibles, il est possible d'augmenter le nombre de réponse (RC) collectées (voir figure 5.13c) en variant le pourcentage du temps de lecture T_{ON} .

Même si ce n'est pas crucial pour le cas d'inventaire avec des lecteurs fixes et une alimentation électrique, cette configuration permet aux lecteurs de réduire leur consommation tout en optimisant leurs taux de détection. Cette amélioration des taux de détection est essentiellement due à la réduction des émissions simultanées. Ceci permet de réduire les collisions, de réserver un temps de lecture pour chaque lecteur seul pour étendre sa portée et de gérer la redistribution de la puissance lorsque deux lecteurs émettent simultanément (interférences constructives).

5.4.2.4 Effet des paramètres Gen2

Les paramètres du protocole de lecture GS1 Gen2 [36] sont les paramètres responsables de définir la commande du lecteur et du lien entre le tag et le lecteur. Les API ne donnent par toujours accès à tous ces paramètres. Pour le module M6e, en sélectionnant le protocole

Gen2, les paramètres les plus cruciaux pour gérer un inventaire sont : la fréquence de la liaison montante ou «*BLF*», la session, la cible, le facteur Q, l'encodage du signal rétro-modulé et le TARI.

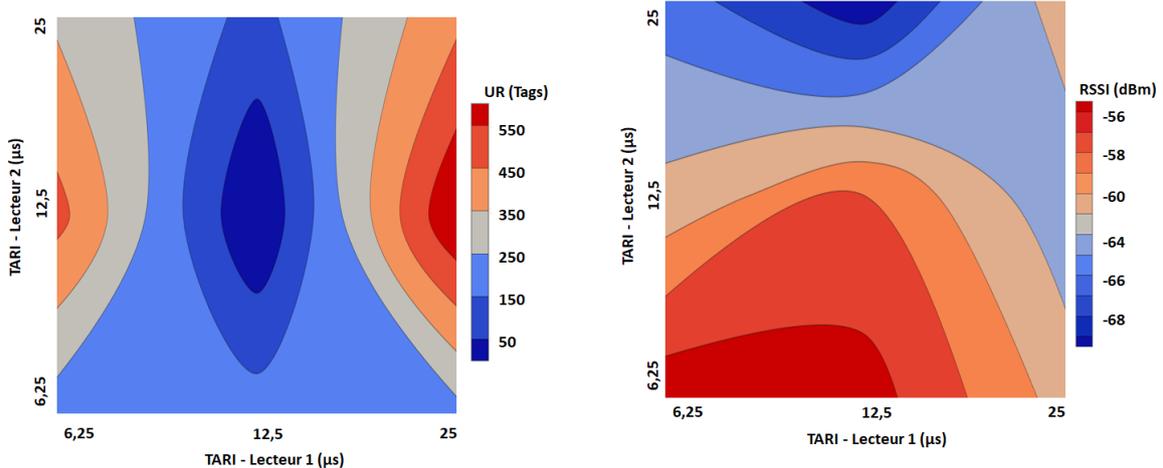
La fréquence de la liaison montante est définie en fonction de plusieurs périodes temporelles [voir 36, p.28-29]. Cette valeur dépend aussi de la production de la puce du tag, et plus particulièrement de l'oscillateur local puisqu'une variation en production peut faire varier l'horloge qui ensuite affecte la fréquence du signal rétro-modulé [239]. Selon le guide du M6e [171], deux valeurs sont possibles à affecter au «*BLF*» : 250 KHz et 640 KHz. Ce paramètre n'est pas inclus dans notre étude et sa fréquence est fixée à 250 KHz puisqu'elle permet plus de choix pour l'encodage du signal.

La session et la cible sont deux paramètres liés au mode d'opération du lecteur. Pendant une séquence de lecture, un ou plusieurs cycles d'inventaire (opération d'inventaire, figure 2.4) prennent place selon le temps de lecture active (L_{ON}) défini. Pendant ce cycle d'inventaire le lecteur doit opérer en une seule session. Pour éviter que le lecteur confonde entre les tags détectés et les tags non-détectés, une cible (ou drapeau, côté tag) est attribuée à chaque tag lu. Deux valeurs de la cible sont possibles : A et B. Quatre sessions sont disponibles selon le protocole Gen2 (S0, S1, S2, S3), et pour chaque session le tag maintient son drapeau pour une durée définie [voir 36, tableau 6.20, p.54]. Cela signifie qu'un tag détecté (ou inventorié) ne répond plus pendant un temps de persistance qui correspond à la session choisie. Ce paramètre n'est pas inclus dans l'étude puisque un choix de session 0 a un temps de persistance très faible ce qui impacte négativement les taux de détections, lorsqu'une session 2 ou 3 a un temps de persistance très élevé, bénéfique pour les taux de détection mais nécessite un temps d'attente très important (5 minutes) après un jeu de paramètres pour que tous les tags puissent participer au prochain. Pour cela, la session 1 est considérée comme compromis entre les différentes possibilités.

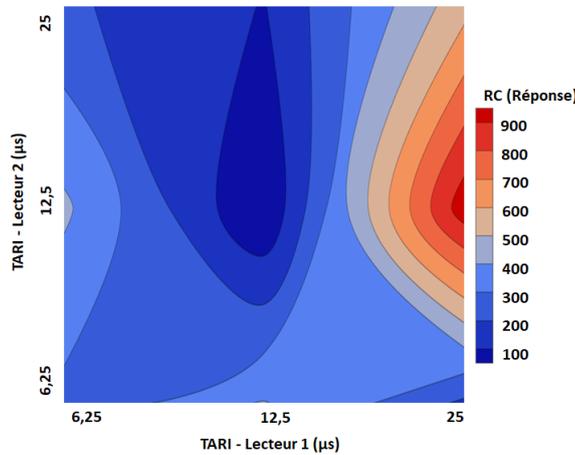
Dans le protocole de lecture Gen2, les données sont encodées sur deux niveaux : 0 et 1. Le TARI est l'intervalle de temps correspondant à une donnée-0. En [237], il est constaté que la largeur de l'impulsion, qui est une fraction du TARI, a un impact minimal sur la sensibilité des tags : plus le TARI est petit plus la sensibilité du tag est meilleure. Plus important, le TARI fait varier le débit de la liaison descendante du lecteur vers le tag [238]. Pour cela, le TARI est surveillé. Selon le guide du M6e, pour une fréquence de 250 KHz de la liaison montante, trois valeurs de TARI sont possibles : 6,25 μ s, 12,5 μ s et 25 μ s.

La figure 5.14 montre la variation des indicateurs de performance du système en fonction des trois valeurs du TARI. La détection est notablement faible lorsque les deux valeurs du TARI sont égales à 12,5 μ s. Lorsque les valeurs du TARI augmentent ou baissent sur l'un des deux lecteurs la détection s'améliore significativement. Cette même tendance est observée sur l'ensemble des réponses des tags dans la figure 5.14c. En examinant les valeurs du RSSI en figure 5.14b, les valeurs maximales ne sont atteintes que pour un TARI inférieur ou égal à 12,5 μ s. Ce résultat montre que plus la valeur du TARI est petite, plus le débit de la liaison descendante est faible et les collisions sont réduites.

En ce qui concerne l'encodage de la réponse du tag, deux possibilités existent [240] [238]. L'encodage le plus simple est celui avec FM0. Pour ce type d'encodage, chaque donnée-0 subit une transition d'état mi-symbole. Avec ce type d'encodage le débit du signal dans la liaison descendante correspond à la fréquence du «*BLF*». La deuxième possibilité est l'encodage Miller-N, qui consiste en plusieurs transitions d'état par bit pour rendre le symbole plus facile à décoder en présence d'interférences. Le «N» représente le nombre de période du «*BLF*» par symbole et pourrait prendre trois valeurs : 2, 4, 8. Plus la valeur de N est élevée, plus le système est résistant aux interférences et le débit de la



(a) La variation du UR en fonction du TARI (b) La variation du RSSI moyen en fonction du TARI



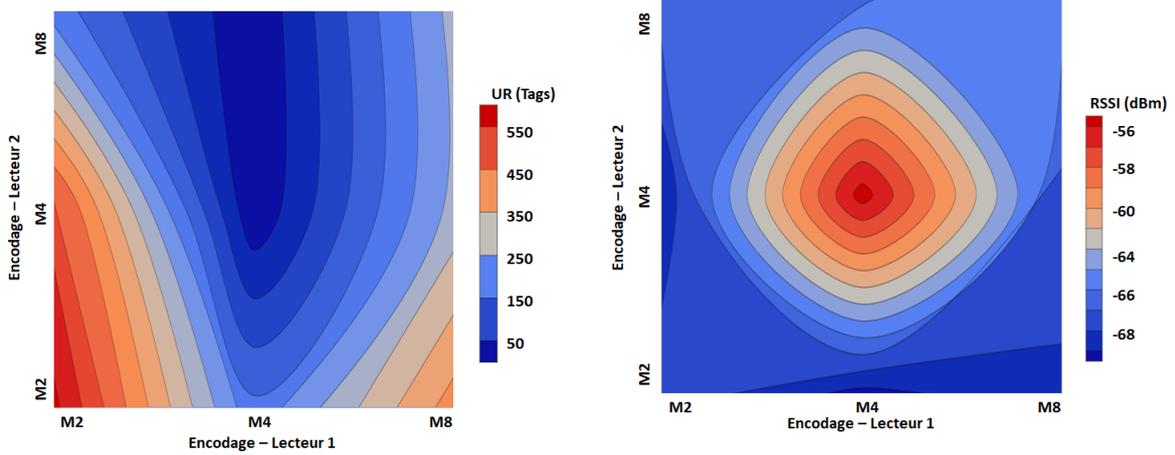
(c) La variation du RC en fonction du TARI

FIGURE 5.14 – L’impact du TARI sur les performances du système

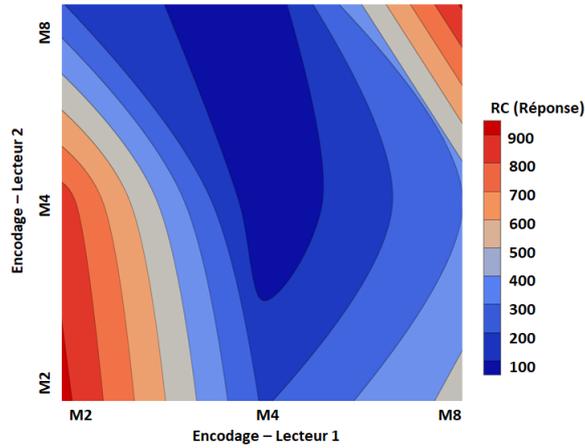
liaison descendante est faible. Pour rappel le débit est égal à la fréquence BLF divisé par N . L’encodage FM0 est exclu de cette étude après la considération de ses faibles performances dans le milieu réel et de l’inutilité d’un débit élevé pour notre cas d’étude. Les valeurs de l’encodage varient donc entre M-2, M-4 et M-8.

La figure 5.15 montre la variation des performances du système en fonction de l’encodage. Contrairement à l’idée préconçue, il est démontré que c’est en utilisant un Miller-2 et non pas un Miller-4 que nous atteignons des meilleurs taux de détections (figure 5.15a). L’utilisation du Miller-8 n’a pas un impact plus positif que le Miller-2 non plus sur la détection. Néanmoins, il est observé en figure 5.15c que l’utilisation d’un Miller-8 assure plus de réponses et donc, une communication plus fiable entre le lecteur et tag. Ceci est logique puisque le Miller-8 a pour objectif de rendre le système plus résistant aux collisions. L’utilisation du Miller-4 se prouve avantageuse en analysant les valeurs du RSSI dans la figure 5.15b. Pour cette valeur, le lecteur arrive à traiter plus facilement le signal, ce qui implique que ce type d’encodage est le meilleur à choisir pour améliorer les performances dans la liaison montante.

Finalement, nous considérons le facteur Q . Ce facteur est tout simplement responsable de déterminer le nombre de créneaux temporels pour contenir les réponses des tags. Théoriquement chaque tag doit répondre dans un créneau, évitant ainsi les collisions et



(a) La variation du UR en fonction de l'encodage, (b) La variation du RSSI moyen en fonction de l'encodage



(c) La variation RC en fonction de l'encodage

FIGURE 5.15 – L'impact de l'encodage sur les performances du système

assurant des performances optimales pour le système. Malheureusement, ce n'est pas le cas en réalité, et les performances du système sont sévèrement impactées. Cela rend le facteur Q , de loin, le facteur le plus étudié lorsque l'amélioration des performances du protocole Gen2 est considérée [241] [242] [243]. De plus, plusieurs lecteurs, proposent un algorithme, propre à eux, capable de trouver dynamiquement la valeur optimale de Q [244].

Généralement, trois types de créneaux pourraient exister :

1. Vide (V) : aucun tag ne répond dans le créneau.
2. Réussi (R) : un tag répond dans un créneau spécifique et sa réponse est détecté avec succès.
3. Collision (C) : plusieurs tags répondent dans le même créneau.

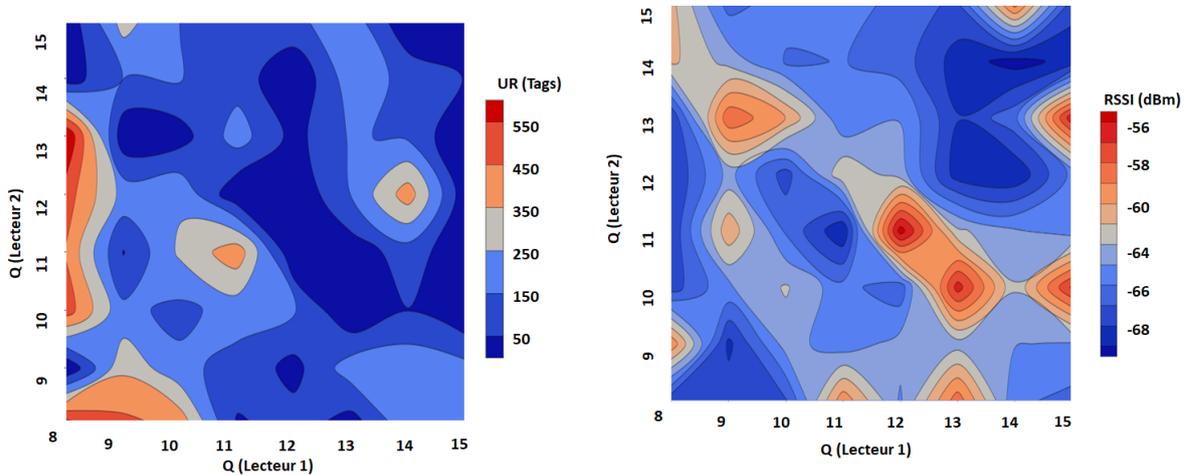
En [236] il est précisé que la distribution des créneaux en fonction des types V, R et C suit une distribution binomiale. Sachant que le nombre de tag participant (N) est connu, et le nombre total de créneaux créés (T) est égale à 2^Q , le nombre de créneau dans chaque type peut alors être calculé par l'équation 5.3.

$$V = T \cdot \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (5.3a)$$

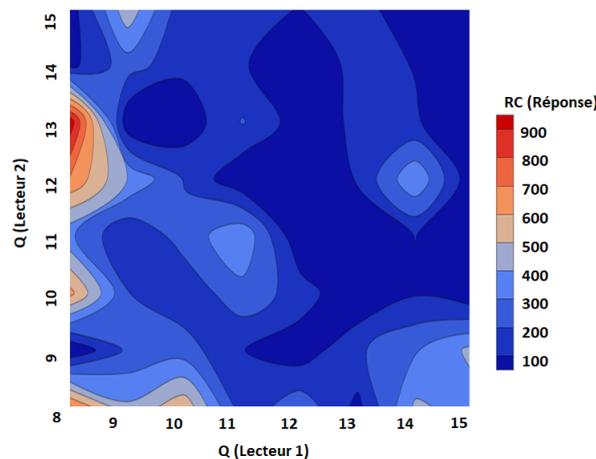
$$R = N \cdot \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{N-1} \quad (5.3b)$$

$$C = T - V - R \quad (5.3c)$$

Pour un nombre de tags total égal à 444 et un Q égal à 9, nous obtenons 215 créneaux vides, 187 créneaux réussis et 110 créneaux de collision. Si, pour le même nombre de tags participants (444 tags) nous choisissons un facteur Q égal à 8, nous obtenons 45 créneaux vides, 79 créneaux réussis et 132 créneau de collision. Ce calcul simple montre en premier lieu l'impact du facteur Q choisi sur le nombre de tags détectés. Deuxièmement, il est clair que lorsque le facteur Q augmente, le nombre de créneaux vides augmente et lorsqu'il diminue, le nombre de créneaux de collisions augmente. Pour notre population, tout en considérant le nombre important des tags parasites (qui n'appartient pas au rayon cible) dans le milieu nous faisons varier le facteur Q entre 8 et 15.



(a) La variation du UR en fonction du Q (b) La variation du RSSI moyen en fonction du Q



(c) La variation RC en fonction du Q

FIGURE 5.16 – L'impact du facteur Q sur les performances du système

La figure 5.16 montre la variation des performances du système en fonction de la valeur attribuée au facteur Q. En analysant le nombre de tags uniques détectés en figure

5.16a et les réponses collectées en figure 5.16c, il est clair que le nombre de détection est maximal lorsque le facteur Q est minimal. Cela n'est pas tout à fait cohérent avec la théorie détaillée ci-avant. Ceci est dû à la limitation dans le temps pour chaque jeu de paramètres (20 secondes par jeu de paramètres). Toutefois, en examinant les valeurs du RSSI dans la figure 5.16b, les pics du RSSI sont obtenues pour des valeurs élevées du facteur Q ; ceci indique que les collisions décrémentent fortement relativement aux valeurs faibles du facteur Q , où les pics du RSSI sont moins abondants. Ce résultat est cohérent avec la théorie puisque en présence des créneaux vides supplémentaires, la diminution du nombre de collisions est logique.

5.4.3 La randomisation comme solution

Dans l'étude précédente, les variations de trois indicateurs de performances ont été analysées en fonction des paramètres liés au protocole Gen2 et d'autres liées à la puissance et la fréquence du signal. Les résultats montrent en premier lieu, que chaque paramètre a un impact sur ces indicateurs. Cependant, la contribution à la variation des performance n'a pas le même poids pour tous les paramètres. Selon l'analyse des variations réalisées ci-avant nous constatons que des paramètres comme la puissance et la fréquence ont plus d'impact sur les performances du système. Pour mieux comprendre l'ordre d'importance de la variation de chaque paramètre nous utilisons le logiciel Weka¹. Pour évaluer la contribution de chaque paramètre (attribut) à la variation des indicateurs (classes), nous utilisons une famille de méthode appelée "évaluateur d'attributs uniques". Nous choisissons la méthode «*ReliefFAttributeEval*» parce qu'elle fonctionne avec des données numériques de classes continues qui est le cas pour le RSSI, l'UR et le RC. Simplement dit, pour chaque attribut, cette méthode choisi des échantillons aléatoires et compare la valeur de cette échantillon avec d'autre valeurs voisines et évalue leur impact sur la classe [245]. Cette méthode est utilisée avec une méthode de recherche appelée «*Ranker*» qui sert à trier les attributs l'un par rapport à l'autre en fonction de leur évaluation unique calculée avec «*ReliefFAttributeEval*» [245].

Ordre	UR	RSSI	RC
1	Puissance	Puissance	Q
2	Q	T_{ON}	Puissance
3	Fréquence	Q	Encodage
4	Encodage	Encodage	T_{ON}
5	T_{ON}	Fréquence	Fréquence
6	TARI	TARI	TARI

Tableau 5.4 – L'ordre d'impact de chaque paramètre sur chaque indicateur

Les ordres d'importance de chaque paramètre pour chacun des indicateurs sont affichés dans le tableau 5.4. En ce qui concerne la variation du nombre de tags uniques détectés (UR), la puissance, le facteur Q et la fréquence sont les trois paramètres les plus impactants. Le groupement des pics de performances dans les figures 5.11a, 5.16a et 5.12a confirme ce résultat. A l'égard des collisions, la puissance, le temps de lecture active (T_{ON}) et le facteur Q sont les paramètres qui impactent le plus les valeurs moyennes des

1. Weka est une suite de logiciels d'apprentissage automatique écrite en Java et développée à l'université de Waikato en Nouvelle-Zélande. Ce logiciel libre et gratuit contient une collection d'outils de visualisation et d'algorithmes pour l'analyse des données et la modélisation prédictive [245]

RSSIs collectés par jeu de paramètres. Enfin, à propos de la fiabilité de la communication entre tag et lecteur, le nombre de réponses est essentiellement une fonction du facteur Q , de la puissance et de l'encodage. Il est clair que la puissance et le facteur Q sont les deux paramètres les plus critiques pour configurer un système de lecture. Ceci dit, nous ne pouvons pas exclure des paramètres comme la fréquence et l'encodage pour raison de l'amélioration des taux de détection. Par ailleurs, le temps de lecture active et l'encodage sont nécessaires pour contrôler les collisions et rendre plus fiable la communication dans le système.

L'étude précédente nous mène à conclure que pour améliorer plusieurs indicateurs de performance, il est nécessaire de considérer différents jeux de paramètres dont le nombre serait à définir en fonction de l'environnement de lecture. A première vue, l'indicateur le plus important pour réaliser un inventaire est le nombre de détections uniques ; cependant, baisser les collisions permettrait la détection des tags supplémentaires qui ont des signaux affaiblis par leur agencement, les réponses d'autres tags ou les collisions avec des signaux venant d'un autre lecteur. Par conséquent, nous proposons une première solution d'amélioration de l'inventaire, qui se base sur la randomisation des différents paramètres étudiés afin d'atteindre des meilleurs taux de détection.

5.4.3.1 Architecture du système

Dans le but d'améliorer les taux de détection, la randomisation des paramètres étudiés dans la partie précédente est considérée. A propos du système nous adoptons le même montage de lecture proposé précédemment à l'aide de deux modules ThingMagic M6e. En se servant des études menées autour de l'amélioration de la détection dans ce chapitre, nous utilisons deux antennes (référence : S8658WPR) par module (quatre au total), deux déphaseurs (Keonn AdvanPhaser) et deux diviseurs de puissance pour étendre les capacités du système, notamment, en implémentant la diversité temporelle ou spatiale. L'utilisation de ces équipements est expliquée par la suite. Les quatre antennes peuvent être placées en face du rayon comme sur la figure 5.9 ou montées au plafond avec une inclinaison de 45° vers le rayon, comme sur la figure 5.17. Pour cette configuration des câbles coaxiaux de 3 mètres ayant des pertes de 0,5 dB/m sont utilisés.

Une fois que l'architecture du système et les composants nécessaires sont mis en place, nous organisons un plan de test divisé en six phases afin d'étudier l'impact de la configu-



FIGURE 5.17 – Montage des antennes au plafond

ration du système. Les plages de variations des paramètres identifiés précédemment sont rappelées dans le tableau 5.5.

Paramètre	Plage de variation
Puissance	entre 16 et 30 dBm
Q	entre 8 et 15
Fréquence	Valeurs discrètes : 865,7, 866,3, 866,9 et 867,5 MHz
Encodage	Valeurs discrètes : M2, M4, M8
T_{ON}	entre 0 et 100%
TARI	Valeurs discrètes : 25, 12,5 et 6,25 microsecondes

Tableau 5.5 – Plages de variations

5.4.3.2 Optimisation des temps de lecture

Premièrement, l'impact des temps de lecture pour chaque jeu de paramètres (T_J) et le nombre total de jeux de paramètres (générations aléatoires) (N_J) sont variés. Initialement fixés à 20 secondes et 300 itérations dans l'étude précédente, la variation de ces paramètres vise à trouver la configuration optimale qui génère les meilleurs taux de détection dans un délai raisonnable. Il est convenable de rappeler que le temps de génération dans l'étude de randomisation est mesuré à 3 heures. Les diverses configurations pour cette phase sont notées dans le tableau 5.6. Ces paramètres sont variés dans le but de diminuer le temps total de lecture et de trouver le meilleur compromis entre le temps de lecture, le nombre d'itérations et les taux de lecture.

Configuration	T_J (s)	N_J	d_R (cm)	d_I (cm)
1	6	100	250	150
2	5	100	250	150
3	2	100	250	150
4	8	100	250	150
5	10	100	250	150
6	6	150	250	150
7	6	200	250	150

Tableau 5.6 – Phase 1

Afin d'analyser les résultats, le nombre total de tags uniques détectés est observé. Pour mieux mettre en évidence l'effet de la randomisation comme une solution d'inventaire, nous représentons l'accumulation des détections uniques en fonction de chaque nouvelle génération aléatoire.

Les résultats sur la figure 5.18 montre que le temps de lecture alloué pour chaque itération est plus impactant que le nombre d'itérations défini. En effet, le meilleur nombre de tags uniques détecté est obtenu avec la configuration 5, lorsque T_J est égal à 10 secondes et N_J à 100 itérations. Lorsque T_J est fixé à 6 secondes, le nombre de tags détectés diminue. L'augmentation de N_J à 200 itérations n'a pas réussi à diminuer l'écart. Néanmoins, pour le reste des essais, T_J est fixé à 6 secondes et N_J à 150 itérations afin de respecter un temps d'analyse globale raisonnable.

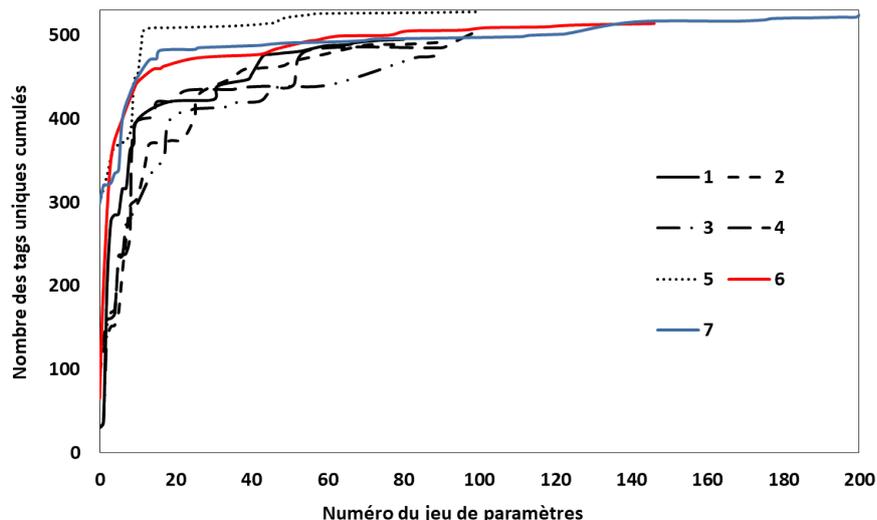


FIGURE 5.18 – Phase 1

5.4.3.3 Sélection des paramètres à varier

Deuxièmement, avec un temps de lecture et un nombre d'itérations (jeux de paramètres) fixes, la sélection des paramètres à faire varier est examinée. La détermination de ces paramètres aide à réaliser une randomisation plus efficace pendant une durée limitée. Les diverses configurations pour cette phase sont notées dans le tableau 5.7. Le but de cette phase est de sélectionner les paramètres les plus utiles à varier afin de rendre plus efficace la génération aléatoire des jeux de paramètres. Dans la configuration 9, seule le jeu de paramètre optimale est utilisé pendant le temps de lecture afin d'évaluer l'utilité de la randomisation.

Configuration	T_J (S)	N_J	Paramètres variés
6	6	150	Puissance, Fréquence, T_{ON} , Q
8	6	150	Puissance, Fréquence, T_{ON} , Q , Encodage, TARI
9	6	150	Aucune variation
10	6	150	Configuration Initiale et variation de tous les paramètres

Tableau 5.7 – Phase 2

Sur la figure 5.19, la valeur ajoutée de la randomisation est mise en évidence. Il est prouvé qu'en utilisant la randomisation (6, 8, 10), le nombre de détections uniques augmente de 23% par rapport à la configuration 9, où le même jeu de paramètres optimaux est considéré pour chaque lecteur pour les 150 itérations. Les résultats de la phase 1 montrent de différentes vitesses de remontée de la courbe. Ceci est majoritairement dû aux configuration générées dans les premières itération. Pour cela, et dans l'objectif de ne pas manquer la génération d'une configuration optimale, nous avons proposé la configuration 10, dans laquelle la configuration optimale est utilisée pour la première itération et le reste des configurations est généré aléatoirement. Les résultats de la figure 5.19 montrent que la courbe débute à 300 tags mais ralentie éventuellement et devient comparable aux courbes des configuration 6 et 8. Entre 6 et 8, seule le TARI et l'encodage ne sont variés.

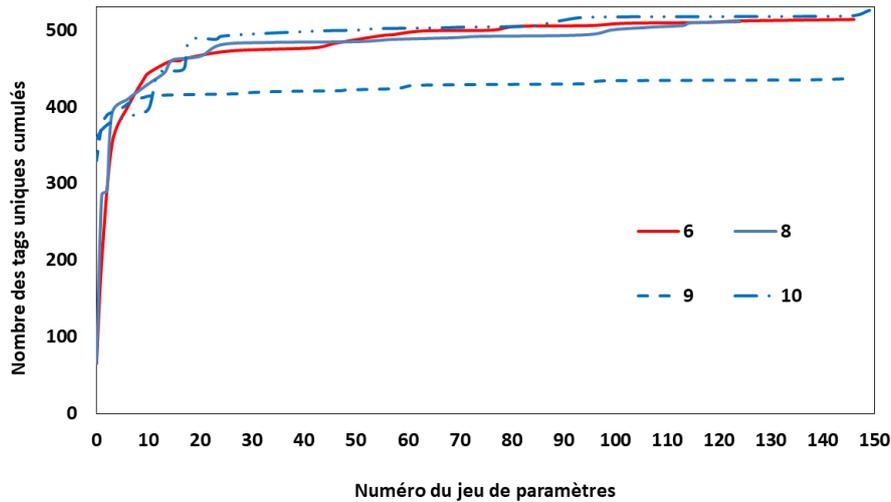


FIGURE 5.19 – Phase 2

La courbe 6 montre que l’algorithme met un peu plus du temps pour rattraper la courbe 8 (où seulement 4 paramètres sont randomisés) mais les performances restent comparables. Pour la suite des essais, la configuration 10 est adoptée : l’algorithme commence par un jeu de paramètre optimal est utilisé et génère le reste aléatoirement.

5.4.3.4 Effet des pertes des câbles

Par la suite, la configuration 10 est adoptée afin d’évaluer l’effet des pertes des câbles. Des câbles de 3 mètres (1.5 dB de perte en total au lieu de 0.5 dB) sont utilisés pour connecter une antenne à chaque module M6e. Toujours en configuration physique face du rayon, cette analyse nous permet d’évaluer les pertes en performance causées par les pertes des câbles coaxiaux. En plus, puisque la distance impose l’utilisation de longs câbles pour l’installation au plafond, cette configuration constitue une référence pour comparer les deux installations : en face et au plafond. Les deux configurations pour cette phase sont notées dans le tableau 5.8.

Configuration	Paramètres variés	Longueur des câbles (m)
10	Configuration Initiale et variation de tous les paramètres	1
11	Configuration Initiale et variation de tous les paramètres	3

Tableau 5.8 – Phase 3

Le fait d’utiliser des câbles plus longs a augmenté les pertes de 1 dB pour chaque lecteur (x2 aller-retour). L’impact négatif de ces pertes est clairement reflété dans l’écart entre les deux configurations 10 et 11 observé sur la figure 5.20.

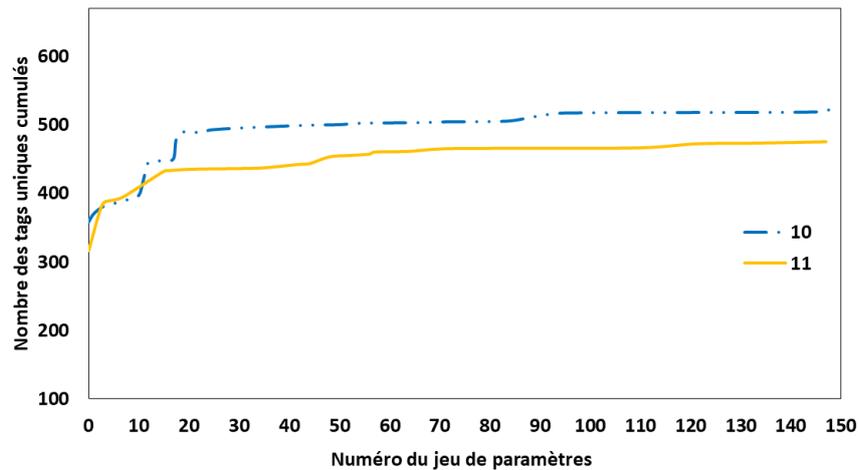


FIGURE 5.20 – Phase 3

5.4.3.5 Optimisation du montage : en face vs. au plafond

Pour la phase 4, les deux installations (deux antennes en face et deux antennes au plafond) sont comparées. Les installations au plafond seront toujours privilégiées dans un magasin, grâce au désencombrement au niveau sol, d'où l'importance de cette phase. Les variations sont citées dans le tableau 5.9. La configuration de départ est la configuration 11 puisque des câbles plus longues sont nécessaires pour installer les antennes au plafond.

Configuration	Paramètres variés	Installation
11	Configuration Initiale et variation de tous les paramètres	en face
12	Configuration Initiale et variation de tous les paramètres	au plafond

Tableau 5.9 – Phase 4

En comparant les performances des deux lecteurs avec des antennes placées face au rayon (configuration 11) ou montées au plafond (configuration 12), nous constatons en observant les résultats de la figure 5.21, qu'avec la première, la vitesse de détection des tags uniques est plus élevée. Ceci est illustré par la remontée plus rapide de la courbe jaune (configuration 11). Néanmoins, au bout des 150 itérations le système du plafond réussit à réaliser des taux de détections très proches de ceux de la configuration 11. Pour la suite, seules les configurations où les antennes sont placées au plafond sont considérées.

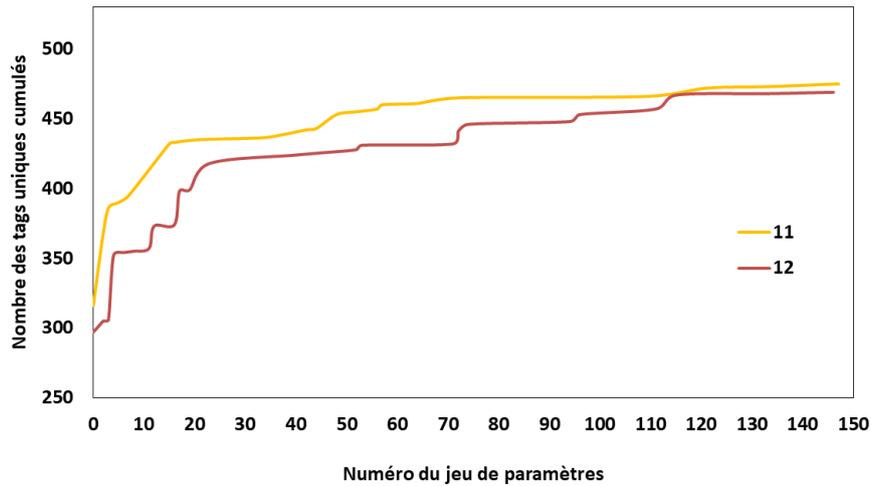


FIGURE 5.21 – Phase 4

5.4.3.6 Optimisation des paramètres physiques de l'installation

En phase 5, l'optimisation de l'installation est visée. Cette optimisation serait en fonction de la distance séparant les deux antennes et la distance séparant les deux antennes du rayon. Le tableau 5.10 contient les plusieurs distances considérées. En partant d'une installation où les antennes sont montées au plafond (configuration 12), les paramètres physique de cette installation sont variés afin d'optimiser la détection des tag.

Configuration	d_R (cm)	d_I (cm)
12	250	150
13	250	120
14	150	120
15	150	150

Tableau 5.10 – Phase 5

Sur la figure 5.22, la variation des performances en fonction des paramètres physiques de l'installation est illustrée. En terme de séparation des antennes, nous observons que lorsque la distance de séparation entre les deux antennes diminue de 150 cm (configuration 12) à 120 cm (configuration 13), les performances du système en terme de détection des tags uniques s'améliore. Cela est probablement dû aux interférences constructives.

En diminuant la distance de séparation entre les antennes et le rayon de 250 cm (configuration 14) à 150 cm (configuration 15), pour une séparation ente les antennes de 120 cm, la détection des tags uniques est sévèrement impactée et une diminution de 17% est constatée.

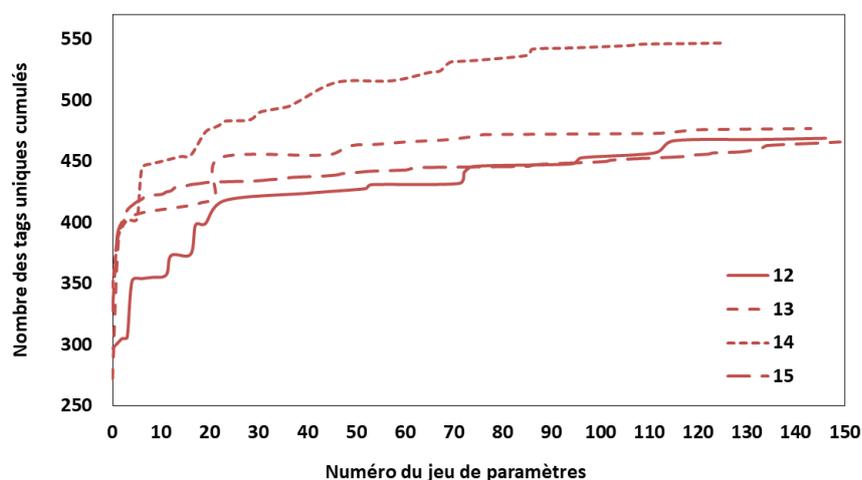


FIGURE 5.22 – Phase 5

5.4.3.7 Optimisation de la propagation

La phase 6 est la dernière phase de test. Elle concerne principalement les dernières optimisations du système en installation plafond. L'optimisation porte sur le nombre d'antennes par lecteur (1 vs 2), et la gestion de l'émission. L'utilisation du déphasage, des interrupteurs, ou de la division de puissance est mise en question. Les détails de cette configuration sont fournis dans le tableau 5.11.

Enfin, le nombre d'antennes par lecteur est augmenté à deux. Nous considérons trois possibilités d'émission. La première consiste à utiliser un seul port de chaque module M6e et en ajoutant un diviseur de puissance entre les deux antennes (configuration 18). La deuxième (configuration 17) consiste à remplacer les diviseurs de puissance par des déphaseurs (4 angles de déphasage possibles). La troisième (configuration 16), consiste à connecter les antennes 1 et 2 aux ports 1 et 2 du premier module M6e et les antennes 3 et 4 aux ports 1 et 2 du deuxième module M6e. Selon les résultats de la figure 5.23, nous constatons que l'utilisation des diviseurs de puissance est une mauvaise idée, puisque le nombre de détections uniques décremente fortement par rapport à la configuration 14, où seulement une antenne par module est utilisée. Cela est probablement dû à la diminution du niveau de puissance disponible par antenne. L'utilisation d'un déphaseur (configuration 17) se présente comme solution à ce problème. En effet, même si les déphaseurs se comporte comme des diviseurs de puissance, le fait de varier l'angle de déphasage se prouve utile pour améliorer les taux de détection. Toutefois, l'introduction d'un décalage tempo-

Configuration	Nombre d'antennes par module	Émission
14	1	Non applicable
16	2	Décalage temporel
17	2	Déphasage
18	2	Division de puissance

Tableau 5.11 – Phase 6

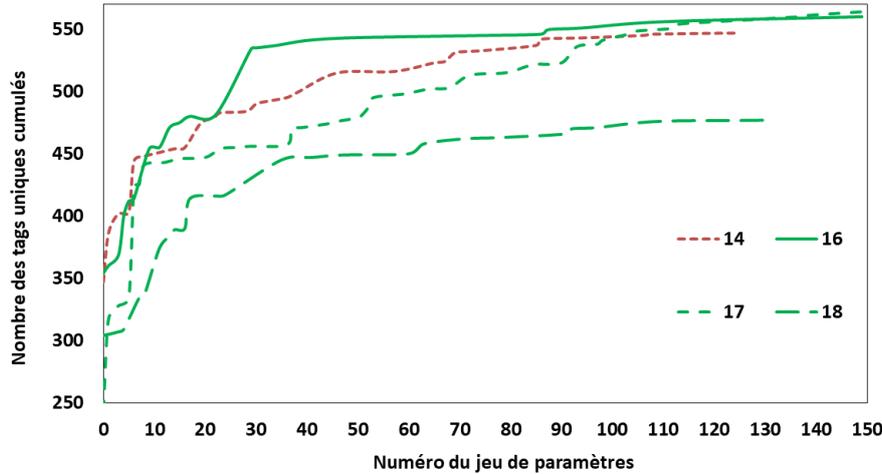


FIGURE 5.23 – Phase 6

rel (configuration 16) pour l'émission sur les deux antennes de chaque module réussit à détecter des tags uniques plus rapidement que la configuration 17.

5.4.3.8 Discussion

Les résultats présentés dans la figure 5.24 montrent un nombre de détections uniques de 530 tags environ. Ce nombre est largement supérieur à 444 tags présents dans le rayon cible. Cela est dû à la présence des tag parasites dans le milieu. Pour mieux évaluer les performances de notre système, nous présentons dans la figure 5.24, la distribution des pourcentages de détection entre les tags cibles et les tags parasites.

Les résultats concernent les dernières configurations évaluées pendant la phase 6 (configuration 14, 16, 17, 18). Nous constatons que le déphasage est la solution optimale pour concentrer le champs de lecture dans la direction du rayon. En effet un taux de détection de 85% est calculé avec la configuration 17, contre un taux de détection de 80% pour la configuration 18.

Les résultats montrent que l'utilisation de plusieurs jeu de paramètres, quelle que soit le système utilisé améliore ses performances en terme de taux de détection. Néanmoins, cette solution ne nous dispense pas de l'adaptation d'autres paramètres liés au milieu

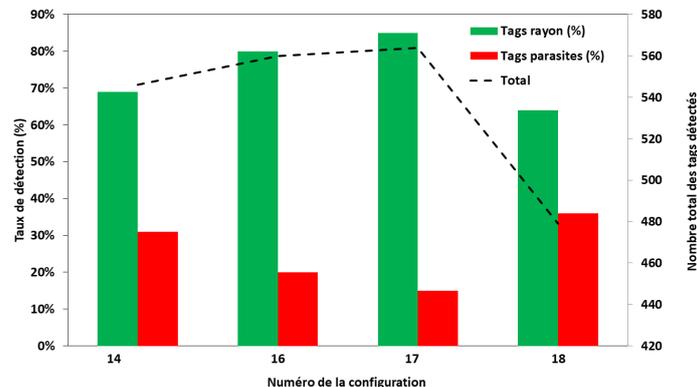


FIGURE 5.24 – Taux de détection des tags du rayon

de lecture et les contraintes d'installations et d'opération afin d'améliorer davantage les performances.

5.4.4 Optimisation génétique et auto-configuration

La solution de randomisation pour l'inventaire a démontré une vraie amélioration sur les taux de détection. En effet, avec un système basique, nous avons pu atteindre des meilleurs taux de détection que les solutions commerciales proposées. De plus, l'algorithme proposé est universel, dans le sens où il pourrait être appliqué à n'importe quel système vu l'impact positif démontré de la randomisation. Cependant, la solution de la randomisation reste limitée. En effet, dans la plupart des cas, la majorité des tags sont détectés pendant les 20 premières itérations. Autrement, des pics de détection ont eu lieu avec des configurations bien précises. Ajouté à cela, la consommation du système en puissance reste élevée et le temps nécessaire reste considérable pour rendre cette solution acceptable. Pour toutes ces raisons, la solution malgré ses avantages, est rigide.

Dans l'objectif de pallier les lacunes, nous avons imaginé une solution où le lecteur serait capable de s'adapter à son environnement. Idéalement, en écoutant l'environnement de lecture, le lecteur serait capable de choisir la variation de ses paramètres d'une manière prudente, limitant ainsi la génération des configurations inutiles. Cela implique une réduction du temps et de la consommation, ainsi qu'une détection plus efficace.

Suivant l'idée précédente nous avons considéré trois approches. La première considère que tous les tags cibles dans le rayon appartiennent à une seule catégorie et essaie de trouver les configurations nécessaires pour améliorer les performances. La deuxième méthode, plus précise, considère que chaque tag appartient à une catégorie unique et une configuration optimale serait recherchée pour chaque tag. Troisièmement, en s'inspirant des travaux précédents, les tags du rayon sont divisés en plusieurs catégories et l'algorithme essaie de trouver les jeux de paramètres optimaux pour chaque catégorie. Sachant que les tags ont tendances à se regrouper dans des catégories de performances (voir chapitre 4), la première approche semble mal adaptée. La deuxième, malgré la précision qu'elle peut apporter à la configuration du lecteur, n'est pas efficace puisque le temps nécessaire d'analyse de la réponse de chaque tag et d'adaptation de la configuration du lecteur augmente en fonction du nombre des tags; ceci rend cette solution difficile à implémenter dans un magasin. Finalement, la troisième approche semble la plus réalisable et la plus prometteuse. La possibilité de catégoriser les tags du rayon dans des catégories de performance est confirmée et la précision de la méthode de catégorisation utilisée est prouvée. En se basant sur cette méthode, il serait donc possible d'auto-configurer le lecteur.

Après le choix de la troisième approche, la problématique réside dans la méthode à utiliser pour auto-configurer le lecteur. En structurant cette problématique, nous identifions un besoin de trouver une méthode capable de réduire le nombre de jeux de paramètres à évaluer, sachant qu'un modèle théorique liant les différentes variables (paramètres) aux performances du système n'existe pas. De plus, cette méthode doit être auto-adaptable quel que soit l'environnement de lecture. Les algorithmes génétiques ou évolutionnistes correspondent parfaitement à cette description. En effet, ils sont principalement appliqués à des problématiques où il est nécessaire de trouver une solution parmi une large possibilité de solutions [voir 246, p.4].

5.4.4.1 Les algorithmes génétiques

Dans son livre [246], Melanie Mitchell identifie les algorithmes génétiques comme des méthodes de recherche de solutions. Ces méthodes sont décrites comme des méthodes «faibles» parce qu'elles pourraient être appliquées à une large variété de problèmes. Toutes ces méthodes commencent par la génération de plusieurs solutions candidates, puis en évaluant chacune de ces solutions selon un critère bien connu, il est décidé quelles candidates sont à garder. A l'issue de cet étape, des nouvelles solutions candidates sont reproduites. Plus spécifiquement, Les algorithmes génétiques (GA) ont été inventés par John Holland dans les années 1960 et ont été développés par Holland et ses étudiants et collègues à l'Université du Michigan dans les années 1960 et 1970. En contraste avec les stratégies d'évolution et la programmation évolutive, l'objectif initial de Holland n'était pas de concevoir des algorithmes pour résoudre des problèmes spécifiques, mais plutôt d'étudier formellement le phénomène de l'adaptation tel qu'il se produit dans la nature et développer des moyens d'importer les mécanismes d'adaptation naturelle dans les systèmes informatiques [246]. Selon Holland, à un niveau très général de description, les GA travaillent en découvrant et en recombinaut de bons «blocs de construction» de solutions dans un mode parallèle. L'idée est que les bonnes solutions sont composées de bons «blocs de construction». Les algorithmes génétiques sont essentiellement utilisés pour l'évolution des programmes informatiques, l'analyse des données et la prédiction. John Newcombe [247] affirme que les algorithmes génétiques sont applicables lorsque nous n'avons aucune idée de comment résoudre un problème, mais nous reconnaitrons une bonne solution quand nous en voyons une.

5.4.4.2 Éléments d'un algorithme génétique

Un algorithme génétique contient principalement quatre éléments très importants : la variation, l'hérédité, la sélection et la reproduction.

La variation est liée directement aux chromosomes. En biologie, un chromosome peut-être divisé en plusieurs gènes et chaque gène (ou trait) peut avoir plusieurs valeurs, ces valeurs sont appelés les allèles. Dans notre cas, le chromosome est un jeu de paramètres, les gènes sont les paramètres (la puissance par exemple) et les allèles sont les valeurs possibles pour chaque paramètre (valeurs entre 16 et 30 dBm pour la puissance par exemple). Une population est composée de plusieurs jeux de paramètres ou chromosomes.

L'hérédité est le processus de création d'enfants (chromosomes) pour la nouvelle génération. Ces enfants sont souvent créés à partir des parents de la génération précédente.

La sélection, qui est plutôt analogue à la sélection naturelle ou la «survie du plus fort», est le procédure de sélection des parents les plus aptes à créer un enfant pour la nouvelle génération. L'objectif de la sélection est de générer une population de chromosomes aux performances supérieures à la population de la génération précédente.

Enfin, la reproduction est réalisée à partir de trois opérateurs. Soit par le croisement de deux parents, soit par la mutation qui consiste à générer aléatoirement un enfant non issu des parents. Le troisième opérateur est l'élitisme, qui consiste à faire passer le parent le plus fort (le plus apte), sans aucune modification, de son chromosome vers la nouvelle génération.

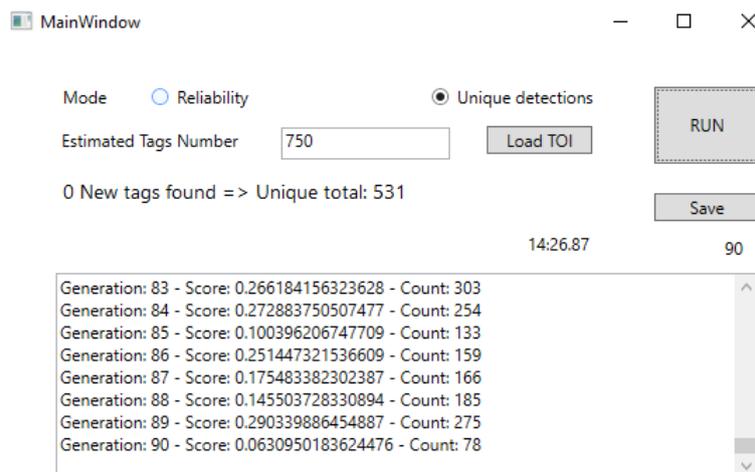


FIGURE 5.25 – Interface graphique de l’application pour l’auto-configuration

5.4.4.3 Cibles d’optimisation

Afin de trouver les meilleures solutions d’une génération, ou en d’autres termes, les chromosomes les plus forts, il est nécessaire d’avoir une fonction qui permet d’évaluer les allèles d’un chromosome par rapport à un critère bien déterminé. Cette fonction s’appelle la fonction d’aptitude ou «*fitness*».

Pour définir le bon critère et construire la fonction de «*fitness*», il est nécessaire de maîtriser la problématique et sa solution. Puisque dans notre cas le but est d’augmenter le nombre de tags uniques détectés, il semble logique que le critère soit basé sur le nombre de tags uniques, mais deux difficultés se présentent :

1. La difficulté d’avoir un nombre de tags uniques cible en présence des tags parasites.
2. La difficulté de lier le nombre de tags uniques aux différentes catégories de performance. Par exemple, pour la plus mauvaise catégorie de performances, il n’est pas possible de déterminer un nombre cible fixe de tags uniques à détecter.

Pour cela, nous considérons les valeurs de RSSI moyen par catégorie de performances comme critère. Nous utilisons l’algorithme développé en chapitre 4 pour la classification des tags en trois groupes de performance selon les valeurs du RSSI et du RC. Comme le montre la figure 5.25, nous considérons deux cas. Pour le premier, la cible est l’augmentation des détections uniques et pour le deuxième elle est de rendre la lecture des tags plus fiable. L’algorithme, comme décrit dans le pseudocode 3, est le même dans les deux cas, sauf pour les poids et les cibles de la fonction «*fitness*» qui changent.

Le pseudocode 3, décrit les plusieurs fonctions nécessaires pour réaliser l’auto-configuration d’un lecteur. Avant de lancer l’algorithme génétique², il est nécessaire de réaliser deux étapes. La première est de lancer une lecture initiale de cinq minutes avec un paramétrage optimal pour réaliser la catégorisation, indispensable pour calculer l’aptitude d’un jeu de paramètre. La deuxième étape consiste à générer une population initiale aléatoire qui constitue la première génération. Pour la gestion de la sélection et de la reproduction, nous utilisons principalement le croisement ; ce qui favorise la génération de nouveaux jeux de paramètres à partir de la population initiale (générée par randomisation). De plus nous

2. Pour cette étude la programmation est réalisée en C# dans l’environnement Visual Studio. La librairie publique GAF [247], qui contient des fonctions des algorithmes génétiques, est utilisée et personnalisée pour notre utilisation.

Pseudocode 3 Algorithme de l'auto-configuration**entrée** : *TaillePopulationInitiale* ; *NombreGenerationsMax* ;**sortie** : Les EPCs collectés ; *I0* ; *I1* ; *I2* ;

Configuration des deux lecteurs avec un jeu de paramètres optimal.

Lancer une lecture pendant 5 minutes

Écrire les RSSIs et RCs des EPCs collectés

Grouper les EPCs en trois groupes 0, 1 et 2 selon les valeurs du RSSI et RC.

Écrire les moyennes des RSSI (*I0*, *I1*, *I2*) des EPCs de chaque groupe.Générer des configurations aléatoires des jeux de paramètres. Nombre de jeux de paramètres \leftarrow *TaillePopulationInitiale*

Définir les opérateurs de sélection.

generation \leftarrow 0**faire**

Évaluer l'aptitude des jeux de paramètres (pseudocode 4)

Sélectionner les parents (les jeux de paramètres les plus aptes)

Générer les enfants

Validation de la génération des enfants.

Évaluer l'aptitude des enfants (pseudocode 4)

Pour la génération *i*+1, remplacer quelques parents de la génération *i*, par des enfants plus aptes de la génération *i* + 1*generation* \leftarrow *generation* + 1**tandis que** *generation* < *NombreGenerationsMax*

ajoutons un autre opérateur qui est la mutation à faible probabilité, pour introduire de nouvelles valeurs de jeux de paramètres manqués pendant la randomisation. Finalement, un troisième opérateur d'élitisme à probabilité basse est ajouté pour réaliser une autre lecture avec un jeu de paramètre évalué supérieur aux autres, puisque un temps de lecture de 4 secondes par lecture est relativement faible. Grâce à ces trois types d'opérateurs, la probabilité de générer des configurations inutiles après la première génération doit baisser fortement. Néanmoins la mutation, pourrait causer la génération des valeurs pour les paramètres non compatibles avec le protocole ou non supportées par le module M6e. Pour cela, une étape de vérification des enfants générés est nécessaire.

Généralement la taille de la population et le nombre de générations est très important et impactant pour les performances de l'algorithme génétique et la recherche de solutions. Dans note cas, cela est moins important puisque nous ne cherchons pas une solution unique, mais une multitude de solution optimisées tout le long du parcours de l'algorithme. Alors, nous avons moins besoin de précision puisque nous cherchons plusieurs solutions performantes au lieu d'une seule solution idéale. Comme le montre l'étude de la randomisation, une seule solution idéale n'existe pas. Le temps de calcul étant un élément principal, le nombre de générations est fixé à 6. Un autre paramètre important à prendre en compte est la taille de population. Nous choisissons une variation de la taille entre 10, 20 et 30 pour la population initiale afin d'observer son effet. Cette étude a été réalisée avec l'architecture du système en configuration 17 qui utilise deux modules M6e, 4 antennes, deux déphaseurs et un montage au plafond à une distance de 2,5 mètres du rayon.

En ce qui concerne le calcul de l'aptitude ou la fonction «*fitness*» décrite dans le pseudocode 4, nous nous intéressons à deux types de variables pour personnaliser le calcul de cette fonction aux deux cas considérés tout en s'appuyant sur les valeurs du RSSI. Nous

Pseudocode 4 Algorithme d'évaluation de l'aptitude

entrée : $poids0$; $poids1$; $poids2$; jeu de paramètre (parent ou enfant); $Cible0$; $Cible1$; $Cible2$; $I0$; $I1$; $I2$;

sortie : $fitness$;

Initialiser $AM0 \leftarrow 0$; $AM1 \leftarrow 0$; $AM2 \leftarrow 0$;

Configurer les deux lecteurs avec le jeu de paramètres à évaluer

Lancer une lecture de 4 secondes avec ce jeu de paramètres.

Écrire les valeurs du RSSI et RC pour tous les EPCs collectés

Catégorisation des EPCs en trois groupes de performance (0, 1 et 2) selon les valeurs du RSSI et RC

$M0 \leftarrow$ Moyenne des RSSIs pour tous les EPCs du groupe 0

$M1 \leftarrow$ Moyenne des RSSIs pour tous les EPCs du groupe 1

$M2 \leftarrow$ Moyenne des RSSIs pour tous les EPCs du groupe 2

Écrire $M0$, $M1$ et $M2$

pour tous les trois valeurs de moyenne **faire**

si $Mx - Ix < 0$ **alors**

$AMx \leftarrow 1$

sinon si $Mx - Ix > ciblex$ **alors**

$AMx \leftarrow 1$

sinon

$AMx \leftarrow \frac{|Mx - Ix|}{Ciblex}$

fin si

fin pour

$fitness \leftarrow AM0.poids0 + AM0.poids2 + AM2.poids2$

Écrire $fitness$

supposons que le groupe 0 contient les tags les moins performants, le groupe 1 contient les tags ayant des performances moyennes, et le groupe 2 contient les tags ayant les meilleures performances.

1. Pour améliorer le nombre de détections uniques, il est important d'améliorer les performances des groupes 0 et 1, puisque ce sont les groupes les plus suspects de contenir des tags non détectés. Notre stratégie pour ce cas est de pousser l'algorithme à générer des jeux de paramètres qui contribuent à l'amélioration des valeurs de RSSIs dans chaque groupe de performances. Comme il est établi dans le chapitre 4, l'agencement impacte le plus les performances des produits tagués. Pour cela, nous considérons que lorsque la valeur du RSSI d'un tag est améliorée, celles des tags non-détectés autour de lui seront par conséquent améliorées. Afin de donner la priorité aux catégories 0 et 1, nous initialisons la $Cible0$ à 5 dB, la $Cible1$ à 3 dB et la $Cible2$ à 2 dB. Pour le calcul de la fonction nous distribuons les poids en $2/5$, $2/5$ et $1/5$ respectivement pour le $poids0$, le $poids1$ et le $poids2$.
2. Pour améliorer la fiabilité de lecture, nous visons logiquement les tags les plus performants puisque ce sont les tags qui seront, dans la plupart des cas, capables de répondre au lecteur. Afin de donner la priorité aux tags du groupe 2, nous initialisons la $Cible0$ à 3 dB, la $Cible1$ à 3 dB et la $Cible2$ à 3 dB. Pour le calcul de la fonction nous distribuons les poids en $1/5$, $1/5$ et $3/5$ respectivement pour $poids0$, $poids1$ et $poids2$. La logique derrière cette configuration est toujours basée sur le fait que l'agencement est le facteur le plus impactant.

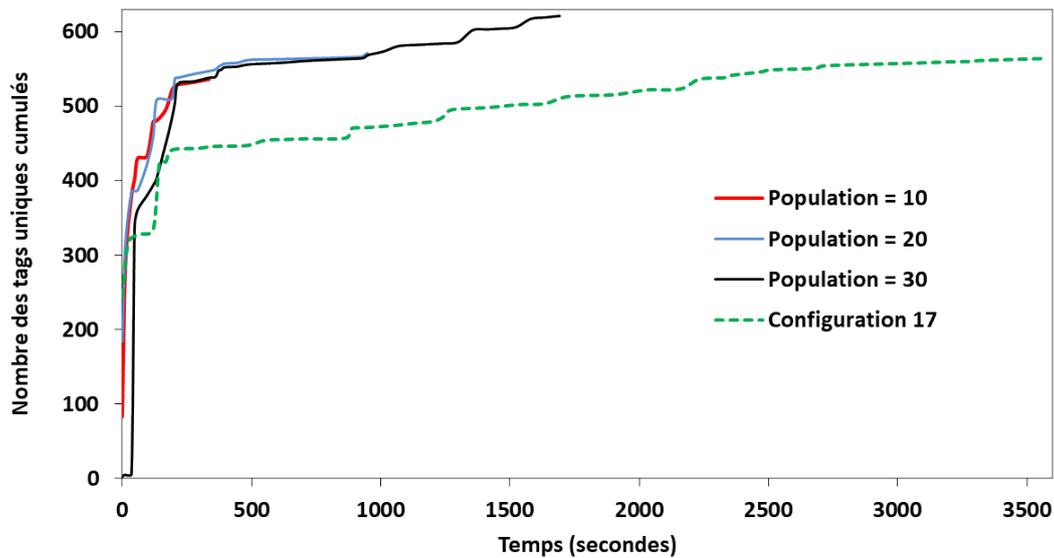


FIGURE 5.26 – L'évolution de la détection des tags uniques

5.4.5 Résultats et discussion

Chacun des deux cas définis précédemment vise à réaliser un objectif différent : le premier sert à améliorer les taux de détection lors d'un inventaire par exemple, et le deuxième sert à assurer une lecture continue des tags les plus performants du milieu. L'indicateur de performance retenu pour le premier cas est le nombre de tags uniques détectés. Cependant, le temps étant un élément important de cette solution, les détections sont représentées en fonction du temps (sur une durée d'une heure) au lieu des jeux de paramètres. L'indicateur du deuxième cas, est le gain en RSSI (meilleur RSSI correspondant au tag pendant toutes les générations) par rapport au RSSI initial reporté.

Sur la figure 5.26, les courbes représentent l'accumulation du nombre des tags uniques collectés avec l'algorithme génétique optimisé pour le premier cas. Les résultats obtenus sont comparés à la meilleure configuration de randomisation (configuration 17), utilisée comme point de départ. Les courbes rouge, bleue et noire représentent trois tests avec l'algorithme génétique pour des tailles de population initiales de 10, 20 et 30 respectivement. Le démarrage des courbes de l'optimisation génétique est complètement aléatoire vu qu'il dépend du premier jeu de paramètre aléatoire de la population initiale. Dans les trois cas, la première lecture fournit un nombre de tags uniques détectés différent (83, 184 et 3 tags). Nous observons que les trois courbes se rattrapent au bout de 200 secondes. La courbe rouge s'arrête au bout de 336 secondes (6 minutes) signalant la fin de la sixième génération. Le temps de l'auto-configuration dépend fortement de la taille de la population. Pour une population initiale d'une taille égale à de 20 jeux de paramètres, une durée d'environ 15 minutes est mesurée. Pour une population de 30, une durée de 30 minutes est mesurée au bout des six générations. En comparant les courbes de l'optimisation génétique à la courbe de la randomisation, nous constatons que malgré l'optimisation de son jeu de paramètres initial (configuration 17), au bout d'environ 160 secondes ses performances deviennent inférieures à celles de l'algorithme génétique. Une population initiale de 20 jeux de paramètres nous permet de réaliser les mêmes taux de détection que la randomisation en 15 minutes au lieu d'une heure. Une population de 30 nous permet de dépasser les performances de randomisation avec une détection totale de 621 tags et un pourcentage de détection des tags du rayon de 87% par rapport à 562 tags et 84% pour

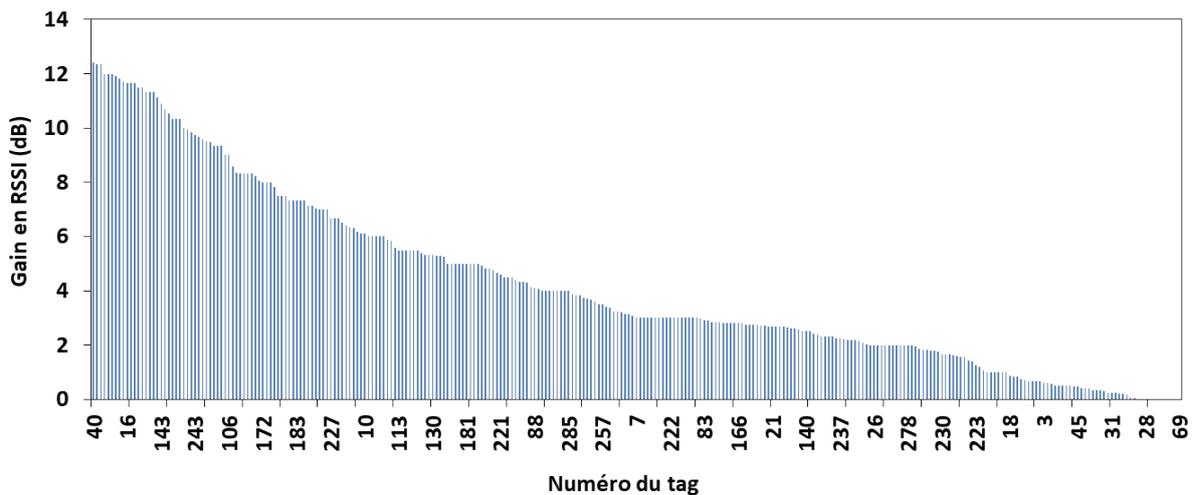


FIGURE 5.27 – Les gains en RSSI pour les 298 tags cibles détectés

la randomisation.

Pour le deuxième cas (fiabilité de lecture), une population de 20 est considérée. Le gain en RSSI est calculé en considérant le RSSI maximum détecté pendant les six générations et en le soustrayant de la valeur initial du RSSI détecté lors de la première catégorisation. Au total 438 tags sont détectés dont 298 tags du rayon. Les résultats du gain reportés sur la figure 5.27, montrent les gains en RSSI pour chacun des 298 tags du rayon. Un gain moyen de 4.28 dB est calculé pour cet ensemble. Nous observons que les valeurs du gain varient entre 0 et 12, avec une minorité de tags n’ayant pas bénéficié de l’algorithme. Pour mieux comprendre ce résultat, les cinq tags qui ont les pires gains ainsi que les cinq qui ont les meilleurs sont identifiés dans le tableau 5.12.

Tag	Famille	Groupe	Gain (dB)
60	Chaussures (partie haute)	2	0
65	Sac à dos - Gris/Orange	2	0
66	Sac à dos - Gris/Bleu	2	0
67	Sac à dos - Gris/Bleu	2	0
70	T-Shirt (cintre)	2	0
40	Sachet proteïne	0	12.4
207	Sachet proteïne	0	12.3
210	Bouteille	1	12.3
129	Lampes frontales 100	2	12
175	T-shirt enroulé	0	12

Tableau 5.12 – Les pires et meilleurs gain en RSSI

Le tableau 5.12 montre que les tags qui ont un gain de zéro, appartiennent tous au groupe 2, malgré la priorité donnée à ce groupe dans le cas de fiabilisation de la lecture. Ce groupe contient les tags ayant les meilleures performances. En regardant les familles auxquelles ces tags appartiennent, il est évident qu’il sont tous dans des agencements faciles, proche d’une configuration en air libre. Ceci explique la difficulté d’amélioration de leurs performances. Pour la deuxième partie du tableau, contenant les tags qui ont obtenus les meilleurs gains en RSSI, il existe plus de diversité de groupe et de famille. Les

deux premiers tags appartiennent au groupe 0, confirmant ainsi la conclusion du Chapitre 4 : une minorité des tags dans un agencement difficile peut être détectée à une portée très élevée. Pour les autres tags appartenant aux autres groupes, le gain élevé en RSSI est probablement dû à une meilleure configuration en puissance ou en phase entre les antennes.

Cas	Gain (dB)			Détection totale	% Tags Cibles
	Groupe 0	Groupe 1	Groupe 2		
Détection Unique	3.52	3.02	1.51	621	87%
Lecture Fiable	3.62	6.11	3.12	438	66%

Tableau 5.13 – Comparaison des deux cas

Enfin, considérant la dépendance de l’algorithme vis à vis la catégorisation, nous affichons dans le tableau 5.13 le gain en RSSI, pour chaque groupe dans les deux cas définis au début de la partie. Pour le premier cas (détection unique), la moyenne des gains en RSSI est de 2,68 dB, inférieure à 4,28 dB, la moyenne des gains en RSSI calculée pour le deuxième cas (lecture fiable). Dans le premier cas, le groupe 0 est celui qui a profité le plus de l’algorithme, c’est dû à sa priorisation dans la fonction de «*fitness*». Dans le deuxième cas, c’est le groupe 1 qui a rapporté le gain le plus élevé. Cela est dû aux agencements facile et moyen qui permet une marge plus importante d’amélioration lorsque ces tags sont initialement classés en groupe 1.

Ces résultats confirment l’efficacité de la pondération de la fonction d’aptitude «*fitness*» par rapport à l’objectif défini pour chaque cas. Un nombre de détection très élevé est rapporté pour le cas 1 par rapport à un nombre inférieur de détection pour le cas 2 contre un meilleur gain en RSSI pour le dernier.

Finalement, notre proposition d’optimisation génétique nous a permis de trouver une solution très efficace pour réaliser un inventaire précis et rapide. Avec cette solution, nous avons réalisé un taux de détection des tags cibles de 87%, supérieur à celui des systèmes (commerciaux ou expérimentaux) testés sur le même rayon. De plus, l’inventaire est réalisé dans une période, considérablement inférieure à celle nécessaire pour la randomisation. L’implémentation de cet algorithme ne nécessite aucun investissement additionnel sur le matériel, ce qui le rend universel et applicable à n’importe quel système s’il est possible d’accéder aux paramètres de configuration.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l’amélioration de la détection des tags RFID UHF passive est étudiée dans l’objectif d’améliorer les performances d’un système d’inventaire massif dans un milieu de lecture complexe. Une fois les contraintes identifiées et le cas d’étude décrit, nous avons procédé à l’exploration des solutions d’amélioration des performances du système. En cohérence avec les contraintes trouvées, un état de l’art sur les solutions possibles est réalisé. Premièrement, les solutions autour du tag sont citées et une étape expérimentale de l’auto-adaptation est mise en place pour confirmer son apport aux performances d’un tag passif. Deuxièmement, les solutions autour des systèmes de lecture, notamment celles conçus pour réaliser des opérations d’inventaire dans les milieux du «*Retail*», sont

détaillées et évaluées expérimentalement. En plus de l'évaluation de ces systèmes, des éléments signalés importants pour l'amélioration des performances dans la littérature sont isolés et évalués dans une chambre anéchoïque et dans un milieu réel.

Grâce à l'analyse de l'état de l'art et de l'évaluation des solutions disponibles sur le marché et dans la littérature, nous avons identifié les éléments pertinents pour notre proposition. La solution proposée consiste à équiper le lecteur d'une certaine intelligence pour le rendre capable de négocier son paramétrage d'après l'environnement, identifié comme le composant le plus contraignant du système. La conception de cette solution a nécessité une étude approfondie de l'impact de la puissance, la fréquence, la temporisation et les paramètres du protocole de communication Gen2 [36], les seuls à pouvoir être configurés différemment en fonction de l'environnement. A l'issue de l'étude, une première solution de randomisation des paramètres des lecteurs est proposée. L'idée est de faire varier les configurations des lecteurs aléatoirement afin d'augmenter la probabilité de détection. Cette solution a démontré une amélioration par rapport aux évaluations précédentes. La deuxième solution consiste à utiliser un algorithme génétique pour réduire le temps et la consommation de puissance de la randomisation. Ceci est réalisé en générant de nouvelles configurations en fonction des configurations utiles, ainsi réduisant la probabilité de reproduction d'une configuration inutile. Les résultats pour la deuxième solutions montre un pourcentage de détection de 87% des tags cibles du rayon, supérieur à celui de tous les autres systèmes. Avant l'utilisation de l'algorithme, ce même système atteint un pourcentage de détection de 70%. L'utilisation d'un système de lecture commercial (voir chapitre 2) garantit d'autre part un pourcentage de détection de 82%, inférieur de 5% à celui atteint grâce à la solution proposée. Il est convient de préciser, que grâce à l'universalité de l'algorithme, il est possible de l'implémenter sur le système commercial pour améliorer ces performances.

L'application des algorithmes génétiques dans la RFID UHF pour améliorer les taux de détection d'un système est tout a fait nouvelle. Le développement de cet algorithme qui permet l'auto-configuration des lecteurs en fonction de leur environnement ne nécessite aucun investissement additionnel pour rendre un lecteur intelligent. De plus, cette solution, est adaptable à tous les milieux pour couvrir une diversité d'application et de cas d'usage. Ceci est particulièrement utile en ce moment puisque la technologie RFID UHF passive arrive à maturité et l'innovation se concentre de plus en plus sur les cas d'usages.

Chapitre 6

La localisation des produits dans un magasin

6.1 Localisation des produits dans un magasin

6.1.1 Quel intérêt

Si un système de détection automatique remonte aux commerçants la disponibilité des biens sans aucune intervention humaine, un système de localisation Temps Réel leur indique leurs positions. Il est important de bien distinguer la localisation de la traçabilité. Cette dernière pourrait être réalisée tout simplement avec une détection des biens sur différents points de lecture placés le long du chemin parcouru par les biens, entre le site de production et le magasin. Quant à la localisation, l'objectif est de trouver la position d'un bien dans un espace déterminé. La précision ainsi que la rapidité de la localisation sont définies par l'application visée.

Plusieurs applications de localisation sont utiles à déployer dans les différents espaces de la chaîne d'approvisionnement : La localisation des matières premières nécessaires à la fabrication d'un produit sur un site de production, et la localisation des biens dans un entrepôt pour faciliter la réception d'inventaire et la préparation des commandes. En magasin, la localisation des produits est particulièrement intéressante compte tenu de l'impact direct qu'elle a sur la satisfaction du client. Il est possible d'identifier 6 bénéfices très importants :

1. Pour les magasins de type grande surface dont l'agencement change fréquemment, il serait possible de réaliser une carte dynamique.
2. La connaissance des positions des produits permettrait de créer des applications afin de faciliter la navigation du client dans le magasin [248].
3. Le chemin parcouru par les employés pourrait-être optimisé lors de la préparation des commandes.
4. En surveillant les différentes positions d'un produit dans le magasin, il serait possible d'analyser le comportement des clients.
5. L'évaluation de l'efficacité du placement des produits et l'analyse de sa performance en plusieurs endroits ou selon plusieurs agencements dans le magasin.
6. La localisation des produits mal placés ou «perdus» afin de les replacer dans le rayon correspondant. Ceci pourrait permettre d'éviter des pertes ainsi que des fausses demandes de réapprovisionnement.

Considérant tous ces bénéfices, le magasin devrait être capable de minimiser la charge de travail du personnel et d'améliorer sa visibilité de l'inventaire des produits disponibles et de leur placement afin de mieux satisfaire ses clients et augmenter son revenu. Pour ce type d'usages, afin de profiter de l'ensemble des bénéfices, nous visons un niveau de précision de localisation qui permet d'identifier l'endroit dans lequel le produit est placé. Cela signifie qu'au moins le rayon où le tag est placé doit être identifié (2 mètres). Concernant la contrainte Temps Réel, une rapidité de localisation de l'ordre de quelques secondes est exigée.

Avant de procéder à l'identification des solutions possibles à cette problématique, il est important de préciser que nous visons, dans un premier temps, à localiser uniquement les produits dans le magasin et non pas les clients ou autres types de biens (matériel,...). Deuxièmement, étant donné le nombre important d'articles scientifiques concernant les solutions existantes, nous nous limitons aux études traitant le positionnement intérieur des objets stationnaires, qui correspond à notre cas d'étude.

L'analyse des solutions existantes sera divisée en deux parties : Une première partie autour des technologies utilisées dans les systèmes de positionnement intérieur, des solutions sur le marché et des brevets autour de ces technologies, et une deuxième partie sur les techniques utilisées pour les technologies les plus adaptées à notre cas d'usage.

6.1.2 Systèmes de positionnement intérieur

Le positionnement intérieur est une problématique très complexe puisque les technologies de positionnement extérieur classiques ne fonctionnent pas à l'intérieur des bâtiments. Les ondes GPS sont incapables d'atteindre correctement les récepteurs en raison des murs et des toits, ce qui entraîne une perte de précision importante. D'autres facteurs contribuent également à ces pertes tels que les multis-chemins, le mouvement des clients dans le magasin, les structures métalliques des rayons et la densité de l'agencement. Dans cette partie nous citons les différentes technologies utilisées pour résoudre cette problématique, soit en identifiant les solutions sur le marché soit en analysant les brevets déposés.

Premièrement nous considérons quatre revues de littérature autour de ces systèmes pour identifier et regrouper les technologies les plus utilisées pour ce type de systèmes. Selon les revues de la littérature en [249] [250] [251] et [252], cinq technologies sont identifiées : Les signaux radio-fréquence, la lumière, la vision, le son et le champ magnétique. Nous complétons ces revues en identifiant les solutions sur le marché et les brevets qui correspondent à chaque technologie.

6.1.2.1 Les technologies radio-fréquence

Nous distinguons dans cette étude deux types de signaux situés dans le spectre électromagnétique : les signaux radio-fréquence, et les signaux optiques qui seront considérés par la suite. Dans ce type de système, les objets (équipés de dispositifs radio-fréquence) s'identifient en envoyant un signal électromagnétique vers le récepteur ou le lecteur. Quatre standards sont considérés pour cette analyse : la Wi-Fi, le Bluetooth Low-Energy, la RFID et l'Ultra Large Bande (UWB).

La Wi-Fi est un réseau local qui permet la transmission de données entre deux dispositifs sans fil. L'utilisation de cette technologie pour réaliser du positionnement à l'intérieur s'est démocratisée grâce à la croissance du nombre de smart-phones et à la forte disponibilité de signaux Wi-Fi, qui implique la présence de points d'accès partout. Un magasin offrant à ses clients la possibilité de se connecter à un réseau Wi-Fi, par exemple, pourrait

s'en servir pour réaliser du positionnement de ses clients. Généralement, une carte des signaux envoyés par les téléphones mobiles et reçus par les points d'accès est construite, et la position d'un utilisateur est trouvée en comparant le signal reçu par son téléphone à la carte des signaux WiFi dans le magasin. Un exemple de cette application est détaillé dans le brevet [253]. D'autres techniques comme la triangulation pourraient-être également appliquées. Cette technologie devient de plus en plus populaire grâce à sa capacité à analyser le comportement des clients, comme décrit en [254], et sans aucun investissement additionnel. Pour localiser ou déterminer la position d'un objet ou d'un produit dans un magasin, il est nécessaire de lui attacher des balises ou des dispositifs pour lui permettre de communiquer avec les points d'accès. Ekahau par exemple n'utilise que la Wi-Fi dans son système de positionnement. Ceci est possible en ajoutant un tag Wi-Fi, à la personne ou au bien à localiser, qui communique avec les points d'accès lorsque le tag bouge ou lorsqu'un bouton est appuyé [255].

Un concurrent du Wi-Fi dans le domaine de la localisation à l'intérieur est le Bluetooth. Malgré la ressemblance entre les deux technologies, l'émergence du Bluetooth Low-Energy a fait pencher la balance en faveur du Bluetooth grâce à la basse consommation et aux coûts plus faibles. Cela signifie qu'il est dorénavant possible de placer des émetteurs BLE équipés de batteries pouvant durer des années pour localiser les Smart-phones avec plus de précision. De plus, des développements sont en cours pour rendre les balises BLE énergétiquement indépendantes en les équipant de circuits de récupération d'énergie [256]. Ajouté à cela, la société Wiliot a annoncé que les coûts et la taille des balises Bluetooth sont en voie de réduction afin de les intégrer dans les produits. Une telle réalisation peut impliquer le remplacement de la RFID passive comme solution pour l'inventaire et éventuellement la localisation en offrant une meilleure précision et des coûts de déploiement des systèmes de lecture plus faibles.

Actuellement, les systèmes RFID passifs offrent en même temps la capacité de localiser les produits. Nous citons le système de PervasId, le xArray par Impinj et le STAR par Mojix. D'autres solutions basées sur la RFID active, comme le système de localisation Temps Réel par Ela innovation existent également sur le marché. Néanmoins, les solutions basées sur la RFID passive sont particulièrement intéressantes vu la facilité d'implémentation et les très faibles coûts des étiquettes.

Toutes ces technologies sont principalement limitées par les contraintes classiques de la propagation à l'intérieur des bâtiments : la présence d'obstacles, les multis-chemins et les limitations en puissance dans une bande de fréquence relativement étroite. Pour toutes ces raisons, la technologie Ultra large bande (ULB) est une solution alternative pour la localisation à l'intérieur. L'émission d'impulsions très courtes dans le temps dans une bande de fréquence ultra large rend la propagation de ces signaux immune aux multis-chemins. Le système uRTLS par Tracktio est une solution de localisation basée sur cette technologie pour répondre à une pluralité de besoins dans plusieurs domaines dont la chaîne d'approvisionnement. Pourtant, la courte portée, les coûts élevés et l'absence de standardisation de cette technologie représentent de vrais freins pour la démocratisation de son usage.

6.1.2.2 La lumière

Quelle soit visible ou invisible, la lumière peut servir à localiser les produits dans un magasin. Dans le passé, des systèmes basés sur la technologie Infrarouge (invisible) sont proposés. Des éclats de lumière sont transmis vers une photodiode qui à son tour décode l'information. Plus récemment, l'utilisation de la lumière visible est devenue plus

populaire puisque le spectre de la lumière visible ne nécessite aucune licence et offre une bande passante beaucoup plus large. De plus, l'économie d'énergie est énorme puisque la lumière visible peut être utilisée à des fins d'éclairage et de communication, en plus de son utilisation pour le positionnement à l'intérieur. L'encodage du signal est réalisé en faisant clignoter rapidement la lumière d'une manière indétectable à l'œil nu. Pour la détermination de la position d'un objet, ce dernier doit être équipé d'un DEL qui servirait comme balise ou «*Beacon*» et transmettrait sa position à un capteur [257] [258]. Néanmoins, ceci n'est pas le cas d'usage le plus populaire. Les systèmes du marché proposés par Philips et Acuity, utilisent les lampes d'éclairage pour localiser les clients ayant des téléphones portables équipés de caméras. Lorsque cette application est plus pratique, elle ne correspond pas à notre cas d'usage. L'utilisation de cette technologie pour la localisation de produits dans le magasin nécessite le développement de balises à base de DEL qui sont intégrées ou attachées aux produits pour leur permettre de communiquer leurs positions au capteur. E.Leclerc Langon et Carrefour Lille sont deux magasins grande surface qui ont adapté leurs structures d'éclairage pour adopter cette technologie afin de faciliter la localisation des clients. En plus de toutes les difficultés de propagation que subit un signal RF, l'application de cette technologie fait resurgir une problématique résolue par la RFID : la nécessité de la présence du produit dans la ligne de mire du récepteur. Cela est tout simplement impossible, vu le nombre de produits présents dans un magasin et la complexité de l'agencement dans le cas étudié.

6.1.2.3 La vision

Dans ce contexte, la vision désigne la vision artificielle ou par ordinateur. Cette technologie, négligée dans les revues les plus récentes, se base sur l'utilisation de caméras fixes ou mobiles. Il existe plusieurs méthodes pour localiser avec des caméras : par exemple, en [259], le système est composé d'une station mobile équipée d'une caméra qui prend des photos et d'un équipement radio-fréquence pour indiquer sa position et transmettre les photos de chaque position à l'unité centrale, responsable de consolider et traiter ces images. En [260] et [261], cette technologie est utilisée pour qu'un robot ou une station mobile équipée d'une caméra s'auto-localise dans l'espace intérieur d'un bâtiment. Dans le premier brevet, une caméra fixée au plafond prend des photos au niveau du sol pour consolider une carte et la diviser en cellules afin d'aider le robot à trouver sa localisation. Dans le deuxième, la position est trouvée à l'aide du traitement d'images : des éléments de l'endroit dans lequel se trouve la station mobile sont extraits puis une topologie est construite et comparée à une topologie pré-requise du milieu. Finalement, en [262], un système hybride est utilisé pour localiser des objets et tracer leurs positions lorsqu'ils sont en mouvement. Le système est composé de plusieurs caméras et grâce au traitement de différentes photos, la position d'un objet est déterminée. Puis, à l'aide d'un dispositif radio-fréquence, le signal envoyé par chaque objet est enregistré et couplé à la position déterminée grâce aux caméras. En surveillant le changement du signal reçu d'un objet, le système pourrait détecter un mouvement et déclencher les caméras afin de déterminer la nouvelle position de l'objet en question. «*Amazon Go*», est un magasin partiellement automatisé mis en place par le géant du «*retail*», Amazon, afin d'offrir aux clients un magasin sans caissiers. En effet, les produits choisis par les clients dans les rayons sont automatiquement suivis par les caméras et ajoutés à son panier. En analysant ces deux brevets déposés par Amazon [263] [264] en 2014 et 2015, il est possible de comprendre le fonctionnement général du système. A son entrée en magasin, l'utilisateur est identifié et un ID lui est affecté. Les caméras vont ensuite suivre les mouvements de cet utilisateur

et ses interactions avec les produits dans le magasin. Les deux brevets et des articles de presse ([264], [265]) discutent de la possibilité d'utiliser des capteurs, de la RFID ou d'autres technologies pour s'assurer de l'identification des produits. Cependant, pour le moment, dans le magasin lancé en Janvier 2018, seul un réseau de caméras qui utilise la vision artificielle est déployé. Il est mentionné en [266], que des employés travaillent toujours dans les coulisses pour confirmer la bonne identification des produits et assister à l'apprentissage des machines.

6.1.2.4 Autres technologies

D'autres technologies moins répandues comme le son et le champ magnétique sont utilisées pour la localisation à l'intérieur. L'utilisation d'ondes sonores audibles ou d'ondes ultrasoniques (> 20 KHz) est préférable vu la lenteur de propagation des ondes acoustiques par rapport aux ondes électromagnétiques. L'inconvénient étant évidemment le bruit pour les signaux audibles, l'atténuation de la puissance de ces signaux est nécessaire ; ceci implique un traitement de signal, et du matériel plus complexe. Ce problème pourrait-être évité si des ondes ultrasoniques étaient utilisées. Pourtant, cela implique une dégradation de la précision de la localisation par rapport aux ondes audibles, et une plus faible résistance au bruit de l'environnement. L'usage le plus populaire de cette technologie est la localisation des personnes ayant un téléphone portable équipé d'un microphone, comme c'est le cas avec le système «*Sensing Network Appliance*» de Zebra. Dans le cas où des objets doivent être localisés, il faudrait les équiper de balises pour communiquer avec un récepteur sonore [267].

Le principe de la localisation avec la technologie du champ magnétique se base sur la variation de ce dernier à l'intérieur d'un magasin par exemple. Cette variation est provoquée par les différentes structures dans un espace intérieur. En réalisant une carte du champ magnétique dans le magasin, il est nécessaire de le mesurer à chaque point de l'espace. Une fois la carte du champ magnétique obtenue, la position des structures pourrait-être estimée. Même si cette méthode présente des coûts faibles et aucun matériel attaché aux structures ou aux produits n'est nécessaire, il est impossible d'identifier les produit liés à chaque structure. Cette technologie est plutôt utilisée pour trouver la position exacte d'une personne se déplaçant dans un espace intérieur (le système «*IndoorAtlas*» par exemple).

6.1.3 Techniques de localisation

Selon les références analysées précédemment, il est possible d'identifier plusieurs techniques utilisées pour la localisation à l'intérieur. Avant de les citer, il est important de distinguer entre les mesures physiques et les techniques qui les exploitent pour déterminer la position d'un objet. Une mesure physique peut, par exemple, désigner la distance calculée à partir d'une puissance reçue mesurée.

En ce qui concerne les techniques de localisation, trois techniques sont utilisées pour localiser les objets stationnaires dans un espace intérieur.

1. La multi-latération : Cette méthode dépend des distances calculées entre plusieurs émetteurs (lecteurs) et un récepteur (tag par exemple) pour déterminer la position de ce dernier. Les distances sont déterminées grâce aux mesures du «*RSSI*» ou «*ToF*» (temps de propagation). Le calcul de la distance à partir des valeurs du RSSI est plus simple mais peu précis, tandis que son calcul à partir du temps de

propagation aller-retour est plus précis mais aussi plus complexe. Une version plus simple et plus connue de la multi-latération est la trilatération, qui exige la présence de trois émetteurs pour calculer la position d'un récepteur en résolvant un système d'équations. Il est également possible de déterminer la position d'un dispositif à partir des angles calculés au lieu des distances. Cette méthode est connue comme la triangulation.

2. Analyse de scène ou «*Fingerprinting*» : cette technique se base sur l'hypothèse que les dispositifs placés dans un même endroit possèdent une empreinte similaire. Ainsi, en connaissant la position d'un dispositif, il est possible d'estimer les positions approximatives des autres dispositifs voisins. Une phase d'apprentissage est nécessaire pour enregistrer les valeurs des mesures physiques des positions connues. Dans une deuxième phase, la valeur de la mesure physique d'un dispositif, dont la position est inconnue, est comparée à celles des positions connues pour estimer sa position.
3. Proximité : cette technique est la plus simple des trois et consiste à déterminer la zone dans laquelle se trouve le dispositif à localiser. Dans le cas des systèmes à longue portée, ceci est réalisé en déterminant le lecteur ou le point d'accès le plus proche de ce dispositif. Pour plus de précision, il est possible de déterminer les lecteurs les plus proches pour déterminer la zone d'intersection.

Comme précisé en [251], plusieurs challenges sont communs à ces techniques. Les contraintes liées à la propagation du signal à l'intérieur, les multis-chemins, l'absence d'une ligne de visibilité directe et la synchronisation sont les contraintes clés à considérer avant de déterminer la technique. Le choix de la technique dépend aussi de la technologie utilisée. Pour cela, avant de concevoir l'algorithme de localisation, il est essentiel de choisir la technologie la plus adaptée pour notre cas d'usage.

6.1.4 Choix de la technologie

Dans le cadre de cette étude de localisation des produits dans un magasin, 6 critères sont identifiés pour trouver la technologie la plus adaptée. Parmi les différentes technologies identifiées précédemment, seuls le son, la RFID passive, la Wi-Fi, le BLE et la vision sont considérés puisque des solutions basées sur ces technologies existent déjà pour des problématiques semblables à celles de cette étude. La figure 6.1 illustre les points forts et faibles de chacune des technologies retenues. Premièrement, la possibilité d'identifier les produits est considérée, et bien évidemment la RFID passive est la solution la plus adaptée dans ce cas. Pourtant, l'utilisation des caméras est possible mais devient vite limitée lorsque le nombre de produits augmente et la ligne de mire entre chaque produit et la caméra disparaît. Il est même possible de projeter l'utilisation des balises BLE pour réaliser la localisation des produits, mais vu l'absence d'un dispositif concret qui pourrait être attaché ou intégré au produit, cette solution reste inopportune. Deuxièmement, la précision est considérée, même si un haut niveau de précision n'est pas nécessaire. Le son est capable de réaliser une précision de l'ordre de quelques centimètres. La vision est aussi capable de réaliser une haute précision, mais il faut assurer des conditions idéales de vision de chaque produit. La précision est complètement proportionnelle à la complexité du système. Le son et la vision sont très complexes à implémenter vu la nécessité de synchronisation pour le système basé sur le son et la complexité du traitement des images et l'agencement des produits pour la vision. La RFID est la technologie la moins

Candidats Critères	Son 	RFID 	Wi-Fi 	BLE 	Vision 
Identification des produits	--	++	-	+	+
Précision	++	--	-	-	+
Complexité	--	++	+	+	--
Portée	--	-	++	++	--
Extension	-	++	++	++	++
Coût	--	++	--	-	-

FIGURE 6.1 – Les points forts et faibles des technologies

complexe vu la facilité d'implémentation des systèmes de lecture et le «tagging» des produits. La Wi-Fi et le BLE sont plus complexes que la RFID à cause de l'absence des tags facilement attachables aux produits. D'autre part, la portée d'un système est également importante et pourrait affecter le nombre de lecteurs ou de points d'accès à installer par zone ou par rayon. Des technologies, comme le son à des fréquences très basses, ont une portée très limitée. Dans le cas des caméras, la portée est aussi limitée par des obstacles et par les exigences de clarté pour le traitement de l'image. Comme établi, dans un milieu réel, la RFID passive pourrait avoir une portée de 8 mètres pour la majorité des produits. Néanmoins, les autres technologies radio-fréquence représentées dans la figure 6.1 peuvent avoir une meilleure portée, supérieure à 100 mètres. L'extension du système pour couvrir d'autres zones ou d'autres produits dans le magasin est aussi considérée. La seule technologie exclue par ce critère est le son, vu le besoin de synchronisation et de matériel supplémentaire pour la garantir. Finalement, le choix serait évidemment affecté par le coût vu le nombre important de produits à localiser et les surfaces des magasins. La technologie RFID pour la localisation est la solution la moins chère vu le faible prix des tags passifs et la portée moyenne qui pourrait limiter le nombre de lecteurs déployés. De plus, le système peut être déjà implémenté pour la réalisation de l'inventaire dans le magasin. Lorsque la vision peut-être avantageuse, puisqu'elle n'exige aucun marquage des objets ou produits, la complexité du traitement de l'image, le prix des caméras et la densité du déploiement nécessaire pour couvrir le magasin contre-balance cet avantage.

Malgré les recommandations des différentes études, citées précédemment, de combiner l'usage de plusieurs technologies pour construire la solution optimale, nous choisissons uniquement la technologie RFID passive pour concevoir notre solution à cause de ses points forts sur l'identification des produits, la complexité, l'extension et le coût. Cela s'inscrit dans le même esprit de booster les performances de la technologie UHF RFID passive dans le magasin sans augmenter les coûts.

6.2 Localisation par la RFID UHF passive

6.2.1 Défis

La RFID passive est la seule technologie disponible aujourd’hui capable d’identifier un nombre massif d’objets. De plus, son vaste déploiement dans le *«retail»* permet son utilisation pour la localisation des produits dans un magasin sans coûts additionnels. Ajouté à cela, et au vu du nouveau Règlement Général sur la Protection des Données (Adopté par l’Union Européenne en 2016 et applicable depuis le 25 mai 2018) [268], cette technologie non-intrusive permet d’analyser le comportement des clients dans le magasin sans avoir recours au profilage (utilisation des caméras) ou accès aux données personnelles (utilisation de la Wi-Fi ou BLE via Smart-phone).

Néanmoins, les systèmes capables de réaliser la localisation Temps Réel avec la RFID passive sur le marché sont beaucoup moins nombreux que les autres solutions de lecture RFID. De plus, à l’exception des systèmes cités précédemment, la majorité des solutions de localisation fournit une information approximative sur la position d’un tag. Les lecteurs sont généralement distribués stratégiquement pour former plusieurs zones et la zone dans laquelle le tag se trouve est déclarée en fonction du lecteur sur lequel le tag est détecté [269]. Cela peut-être principalement dû aux points faibles de la technologie liés à la précision et à la portée de la technologie.

En se référant à plusieurs articles scientifiques [269] [270] [271] [272] [273] [274] [275] [276] [277] [278] autour de l’implémentation d’un système de localisation à l’intérieur avec la technologie RFID passive et les techniques utilisées, il est possible d’identifier deux familles de défis : ceux qui sont plus liés à la nature de la technologie et d’autres causés par la technique de localisation utilisée.

Premièrement, il est important de noter que, comme toute localisation basée sur les technologies radio-fréquence, un interrogateur RFID pourrait déterminer la position d’un tag en analysant sa réponse ; ceci n’est évidemment possible que dans le cas où le tag est détectable par l’interrogateur. La problématique d’amélioration de la détection étant traitée dans le chapitre précédent, le défi qui demeure est la variation de la réponse du tag. Cette réponse varie en fonction de plusieurs paramètres tels que, les affaiblissements de propagation, les pertes multi-chemin, les collisions entre lecteurs, les collisions entre tags et bien évidemment les autres contraintes liées à l’agencement comme l’orientation des tags, le matériau du produit attaché, la densité de la configuration, et d’autres facteurs incontrôlables qui pourraient modifier la réponse du tag.

Deuxièmement, une couche de complexité se rajoute à la phase du choix de la technique. Pour les méthodes de multilatération, il est indispensable de maîtriser les modèles de propagation afin de pouvoir calculer la distance à laquelle se trouve le tag à partir de sa réponse. Pour l’analyse de scène, en plus de la maîtrise des modèles de propagation, une première phase d’apprentissage est nécessaire pour pouvoir réaliser une deuxième phase de localisation. Lors de cette première phase, des tags de référence sont souvent placés à des positions connues dans l’espace. Le placement et le nombre de tags de référence nécessaires sont deux variables nécessaires à étudier afin d’optimiser les performances du système. Finalement, pour la technique de proximité, il est nécessaire de maîtriser le déploiement des systèmes RFID pour créer des zones confinées de lecture dans l’objectif de déterminer la zone unique dans laquelle le tag est lu.

6.2.2 Tendances

Afin de reconstituer les tendances dans le domaine de la localisation avec la RFID UHF passive, il est important de mesurer l'activité de la recherche dans le domaine suscité. Dans la figure 6.2, le nombre de publications ainsi que le nombre de citations pendant les 12 dernières années sont illustr s¹. Le nombre de publications est un indicateur de l'activité de la recherche. La figure 6.2a montre que celle-ci s'accroît à partir de l'année 2006 jusqu'à 2010 mais n'accélère pas avant 2011. Depuis 2011, l'activité continue à se développer et un pic du nombre de publications est constaté en 2014.   partir de 2015 le nombre publications diminue faiblement jusqu'à 2018, où une activité comparable à celle de 2010 est observée. Normalement cela pourrait signaler l'arrivée à maturité de la technologie, mais une telle conclusion ne peut pas être confirmée vu le manque de données pour le reste de l'année 2018 et l'absence de prédictions pour le futur. D'autre part, le nombre de citations sert à deux choses : refléter la qualité de la production scientifique pendant une année et signaler une activité ou un intérêt dans un partie particulière du domaine. Premièrement, en analysant la figure 6.2b, l'importance de la production en 2011, à l'égard du développement en 2011, est confirmée. Il est important de noter que le nombre de citations faible dans les dernières années est normal et n'est que le résultat de la récence des publications.

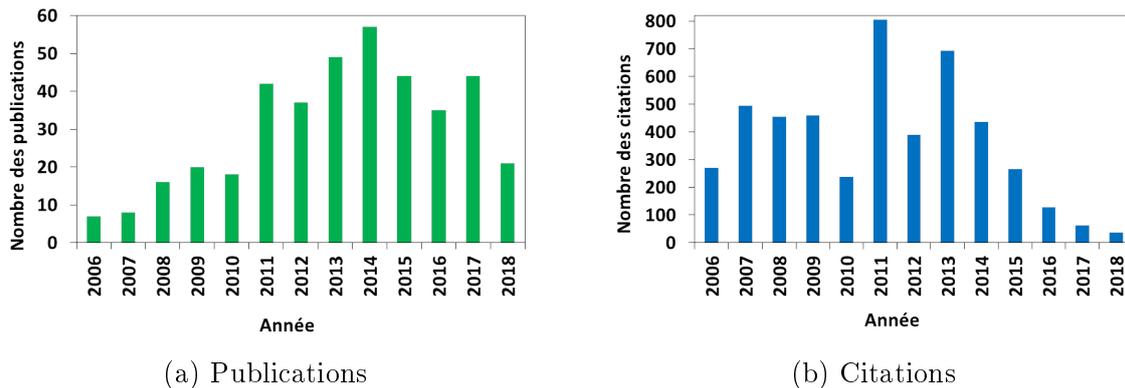


FIGURE 6.2 – La variation du nombre des publications et des citations pendant les douze dernières années

Afin de mieux comprendre les tendances, les publications les plus citées depuis 2006 sont parcourues pour déterminer les publications les plus influentes et les secteurs du domaine les plus actifs. En 2006, le focus est presque exclusivement limité à la localisation approximative des objets équipés de tags RFID avec des solutions mobiles. Un intérêt plus particulier est porté aux robots. Cette tendance est maintenue en 2007 et 2009, mais ce qui est plus important, ce sont les études de performances de la technologie RFID passive et la production de revues de littérature autour de ce sujet. L'influence de ces productions devient claire en 2009 et 2010, où des algorithmes de localisation des objets se basant sur l'analyse de la réponse du tag sont proposés, tout en considérant les systèmes de lecture utilisés. De plus, la combinaison de la RFID avec d'autres technologies comme l'infrarouge et l'ultra large bande font l'objet de différentes études. En 2011, le focus est tourné vers la capacité de localisation d'un système RFID et les facteurs qui affectent ses performances. De plus, des algorithmes basés sur l'angle d'arrivée du signal, le temps

1. Les publications correspondants à chaque année et les citations sont collectés depuis <https://scholar.google.fr> pour les mots clés "RFID", "UHF" et "localisation"

de propagation et d'autres techniques sont sujets d'expériences. A partir de 2012, la recherche se concentre de plus en plus sur la précision de la localisation, l'implémentation et la conception des systèmes Temps Réel, la localisation en 3 dimensions et finalement les solutions hybrides de localisation dans le but de pousser l'utilisation la technologie RFID passive avec d'autres technologies comme la vision. A partir de 2015, les termes "Temps Réel" et "précision" sont plus occurrents et il est observable que les concepteurs des algorithmes de localisation deviennent de plus en plus conscients de l'environnement RFID, des contraintes du système dans le milieu et de la dépendance des performances de l'application.

6.2.3 Les éléments d'un système de localisation RFID

En se basant sur l'analyse précédente, l'état de l'art est divisé en trois parties : La collecte des données, les mesures physiques et le traitement de ces mesures. Il est important de noter que tous les travaux qui ne sont pas liés à la localisation des objets stationnaires à l'aide des systèmes fixes sont exclus. En effet, nous nous concentrons uniquement sur le cas d'usage où les produits tagués sont agencés dans des étagères et la lecture se fait par le biais d'un lecteur fixe placés à une certaine distance des étagères.

6.2.3.1 Collecte des données

Dans un système RFID passif, la collecte des données se fait par un ou plusieurs interrogateurs placés dans un espace bien déterminé pour mieux répondre à un cas d'usage bien précis. Les données sont les réponses des tags passifs qui modulent le signal rétro-réfléchi. En considérant l'importance du rôle de l'interrogateur, il est inévitable d'étudier l'influence du type de systèmes de lecture utilisé et surtout les antennes déployées.

Concernant les systèmes de lecture, il existe plusieurs solutions pour la localisation des objets stationnaires. Le système choisi est un système fixe, préférablement au plafond. Des solutions basées sur l'utilisation de robots ou de lecteurs mobiles [279] et de *«smart-shelves»* [280] sont exclues pour les mêmes raisons détaillées dans le chapitre précédent. Il est important de rappeler que nous visons la localisation des produits tagués stationnaires, à l'aide d'un système de lecture fixe.

Au sujet des antennes et de la propagation, leur influence est étudiée en fonction de quatre paramètres : le type d'antenne, la polarisation, la position, et la fréquence d'émission. Trois types d'antennes sont généralement évalués [281] [282] [283]. La formation des faisceaux avec des réseaux d'antennes est plus appréciée parce qu'elle rend la liaison sur le chemin direct entre le lecteur et le tag plus robuste. Néanmoins, la présence de lobes secondaires pourrait engendrer des erreurs dans le calcul de la phase de la porteuse [283]. D'autres études privilégient l'utilisation d'antennes omnidirectionnelles, comme les dipôles, pour augmenter la détection des tags qui ne sont pas à la portée du lobe principal. Par contre, ce type d'antennes possède une faible résistance aux multis-chemins. L'utilisation de patchs pourrait être un compromis entre les deux propositions. La position des antennes est aussi importante. En effet, en [284], l'erreur de l'estimation de la position de 60 tags est mesurée pour une antenne fixée à 150 cm des tags. La position de l'antenne varie entre quatre hauteurs et quatre angles différents. Il est prouvé dans cette étude que les erreurs d'estimation dépendent de la position des antennes et augmentent lorsqu'elles sont placées à proximité du sol. Deuxièmement, la dépendance de la localisation vis-à-vis de la fréquence de propagation est confirmée. En effet, pour un écart de 1 MHz en fréquence, un écart de 6 cm en distance est constaté pour la première position. En plus

de ces variables, la polarisation de l'antenne est étudiée en [281] et en [285] et l'amélioration de la précision d'un système de localisation RFID passive grâce à l'utilisation des antennes circulaires est développée. Les résultats confirment une erreur en estimation de 4.1° pour des antennes linéaires pour le tag et le lecteur, de 2.8° pour une antenne linéaire pour le tag et circulaire pour le lecteur et de 2.5° pour des antennes circulaires pour le tag et le lecteur. Cela est principalement dû à l'amélioration de l'activation sur la liaison descendante et l'amélioration du rapport signal bruit sur la liaison montante. Finalement, un dernier élément à considérer est l'utilisation de plusieurs antennes pour améliorer les performances du système de la localisation. La fusion des données de plusieurs antennes en [286] a été prouvée utile pour améliorer la précision de la localisation en fonction du nombre de tags présents dans le milieu. Cet élément permet de plus d'implémenter la diversité spatiale qui pourrait diminuer l'effet des multi-chemins.

6.2.3.2 Mesures physiques

L'exploitation des données collectées est la première étape pour rendre un système de lecture capable de localiser. Avant d'aborder cette étape et explorer les techniques de localisation possibles, la compréhension des réponses des tags et leurs caractéristiques est fondamentale. Selon les études précédentes menées dans le cadre de cette thèse, le lecteur est capable de caractériser la réponse d'un seul tag à travers trois indicateurs : le RSSI («*Received Signal Strength Indicator*»), la phase et le nombre de réponses pendant la période de lecture ou RC («*Read Count*»). Malgré l'importance de cette dernière valeur comme indicateur de performance—comme démontré dans les chapitres 4 et 5—elle est clairement négligée dans la littérature.

Le RSSI est par définition l'indicateur de la puissance reçue et peut être calculé théoriquement à l'aide de l'équation de Friis. Cette valeur théorique est inversement proportionnelle au carré de la distance. Pourtant, dans un milieu réel, et en présence de plusieurs facteurs affectant les performances, la relation précédente n'est plus applicable. La mesure de cette valeur est possible grâce à la démodulation synchrone de la réponse du tag par le lecteur. En effet, après l'extraction des composantes en phase (I) et en quadrature (Q), il est possible de calculer la valeur de l'amplitude du signal rétro-modulé comme le montre l'équation 6.1 [287]. Dans cette équation, Z_0 est l'impédance d'entrée du récepteur (typiquement égale à 50Ω).

$$RSSI = \frac{I^2 + Q^2}{Z_0} \quad (6.1)$$

En [288], un modèle est étudié pour prédire les affaiblissements de propagation dans un milieu réel à une fréquence de 914 MHz. Ce modèle confirme la relation exponentielle entre les affaiblissements et la distance et introduit le facteur n . Ce facteur est égal à 2 dans un espace air libre et augmente lorsque la complexité du milieu augmente. A partir de ce modèle il est possible déduire l'équation 6.2 [289].

$$RSSI \propto distance^{-n} \quad (6.2)$$

Les travaux en [289] [290] utilisent une formule de calcul du RSSI basée sur ce modèle. Ainsi, l'équation 6.3 lie la valeur de la distance estimée à la valeur du RSSI ; $RSSI_0$ est la valeur référence lorsque la distance entre le tag et le lecteur est de 1 mètre.

$$d_{estime} = 10^{\frac{RSSI_0 - RSSI_{mesur}}{10.n}} \quad (6.3)$$

Dans un cycle d'inventaire, un tag pourrait retourner plusieurs valeurs de $RSSI_{\text{mesuré}}$ qui fluctuent fortement selon l'étude en [289] autour de la fiabilité du RSSI pour la localisation à l'intérieur. Les résultats de cette étude montrent que malgré le manque de fiabilité, l'utilisation de la moyenne pondérée ou glissante au lieu des valeurs instantanées pourrait améliorer la précision de l'estimation de la distance. En [291] les facteurs du milieu réel, négligés en [289], sont étudiés. En premier lieu, l'étude montre que lorsque la distance est fixe entre le lecteur et le tag, les valeurs du RSSI varient faiblement quelle que soit la puissance émise par le lecteur (sachant que la puissance émise est suffisante pour l'activation du tag). Par contre, l'effet de la variation de la distance est plus évident sur les valeurs du RSSI et a un impact plus important lorsque la distance de séparation est petite. Cela confirme la relation exponentielle entre la distance et les affaiblissement de propagation. De plus, l'étude montre qu'à partir du moment où un réflecteur, ou un absorbeur, est introduit dans le milieu, la relation entre les valeurs du RSSI et la variation de la distance devient ambiguë. Finalement, l'étude note l'impact négatif du désalignement des deux antennes (tag et lecteur). Les résultats de cette étude confirment l'impact majeur de l'environnement du lecteur. Néanmoins, il n'est pas précisé si les valeurs du RSSI sont traitées ou si ce sont les valeurs instantanées.

Grâce à la démodulation synchrone, il est aussi possible d'extraire la phase du signal rétro-modulé. Cette grandeur peut être calculée en suivant l'équation 6.4[287]. Selon la même publication, il est possible de mesurer cette grandeur dans le domaine temporel (pour tracer le mouvement d'un tag), le domaine fréquentiel (pour estimer la distance entre le tag en position fixe et le lecteur), et le domaine spatial (pour déterminer la direction d'arrivée ou l'angle d'arrivée du tag). Pour le cas étudié dans ce chapitre, seule l'exploitation de la mesure de la phase dans le domaine fréquentiel est intéressante.

$$\phi = \arctan \frac{Q}{I} \quad (6.4)$$

Selon Nikitin et al. [287], cette valeur pourrait être décomposée en trois phases :

$$\phi = \phi_{\text{propagation}} + \phi_0 + \phi_{\text{retromodulation}} \quad (6.5)$$

Dans l'équation 6.5, $\phi_{\text{propagation}}$ est le déphasage dû à la propagation, ϕ_0 est le déphasage causé par les câbles, les antennes et d'autres composants, et $\phi_{\text{retromodulation}}$, est la phase du signal rétro-modulé par le tag. Lorsque $\phi_{\text{propagation}}$ est la seule valeur liée à la distance de propagation entre le lecteur et le tag, la présence des autres valeurs de phase peut introduire du bruit dans le calcul de la distance à partir de la phase. Plus important, la phase est une valeur limitée entre 0 et 2π , et il est nécessaire de déterminer le nombre de cycles (nombre de $\lambda/2$ entre le tag et le lecteur) pour calculer la distance, mais ceci n'est pas possible. Cette problématique est connue comme l'ambiguïté de phase. Dans le système où le tag et le lecteur sont fixes, il est possible de réduire l'ambiguïté en réalisant une lecture de la phase à deux fréquences différentes [292]. Sachant que la distance entre le lecteur et le tag est fixe, en soustrayant les deux valeurs de phases de l'équation 6.6a, il est possible de calculer cette distance comme exprimé dans l'équation 6.6b.

$$\phi = \left(\text{distance} - N \frac{\lambda}{2} \right) \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \quad (6.6a)$$

$$\text{distance} = \frac{c \cdot \Delta\phi}{4\pi \cdot \Delta \text{frequency}} \quad (6.6b)$$

$$distance_{ambiguite} = \frac{c}{2\Delta frequency} \quad (6.6c)$$

Même si l’ambiguïté pourrait être réduite en utilisant cette technique, elle n’est pas tout à fait évitée. Comme il est clair dans l’équation 6.6c, la distance d’ambiguïté est inversement proportionnelle à l’écart entre les deux fréquences de lecture. En utilisant cette équation, la distance d’ambiguïté est calculée en [293]; il est déductible que pour réduire la distance d’ambiguïté à l’ordre de 10 mètres un écart de 25 MHz entre les fréquences est nécessaire. Ceci n’est pas possible avec un système RFID UHF passive en Europe vu que la bande allouée est limitée entre 865,7 et 867,5 MHz.

En ce qui concerne la fiabilité de la phase pour estimer la distance de séparation entre le tag et le lecteur, il est démontré en [287] et en [292] que les mesures de la phase dans le domaine fréquentiel sont fortement sensibles à l’environnement, notamment au multi-chemin. En [292] l’erreur moyenne d’estimation de la distance augmente de 0.44 mètres dans un bureau vide à 1.18 mètres dans un bureau meublé. La problématique du calcul de la distance à partir de la phase ambiguë est actuellement limitée par la bande de fréquence allouée en Europe.

Le temps de propagation est un autre paramètre qu’il est possible d’exploiter pour estimer la distance de séparation entre un tag et un lecteur. Cependant, lorsque les lecteurs du marché sont capables d’afficher l’horodatage, cette valeur n’est pas exploitable à cause de la faible résolution (de l’ordre des millisecondes) comparée à une résolution de l’ordre des nanosecondes [293] exigée pour les signaux à une fréquence de 866 MHz.

6.2.3.3 Traitement et techniques

Comme établi précédemment, plusieurs techniques existent pour localiser un tag et sont généralement divisées en trois familles : la multi-latération, l’analyse de scène et la proximité. Les techniques de proximité sont négligées par la suite puisqu’elles ne sont pas bénéfiques pour ce cas d’étude. Les techniques des deux autres familles dépendent de calculs basés sur des mesures extraites par les lecteurs RFID UHF. Dans l’objectif de respecter les contraintes de coût et de complexité, seules les techniques basées sur la RFID passive et ne nécessitant pas de matériel additionnel aux lecteurs du marché sont considérées.

Multi-latération Premièrement, la mutli-latération nécessite la présence de N antennes et le calcul de la position d’un tag se fait en trouvant la solution d’intersection de N cercles, où chaque cercle a un rayon correspondant à la distance entre l’antenne du lecteur (centre du cercle) et le tag. En [294], trois antennes sont utilisées et la position d’un seul tag est déterminée par la trilatération à base du RSSI. Dans cette étude, la sélection des tags passifs à utiliser, ainsi que leur calibration (position, orientation, ..) face à l’antenne est prise en considération et une précision de 16.5cm est réalisée. En [295], une amélioration de la trilatération (avec le RSSI) est proposée en considérant l’intersection des ellipses au lieu des cercles. Avec 8 antennes pour localiser 4 tags, une précision de 16cm est réalisée. Néanmoins, ces deux études sont limitées du fait de la localisation d’un faible nombre de tags (1 dans la première et 2 dans la deuxième). De plus, en [295], les tags non lus au bout d’un certain temps sont déconsidérés de la localisation. En [296], la trilatération avec des ellipses est considérée. La première estimation des positions est calculée à partir de deux modèles linéaires liant la position du tag à la valeur du RSSI d’une part, des taux de

lecture d'autre part, et plusieurs niveaux de la puissance d'émission. Il est important de noter que les mesures sont réalisées pour chaque tag avec une seule antenne de référence ; cette antenne est celle qui a détecté la puissance maximale du tag. Avec ces améliorations par rapport à la trilatération classique, une précision de 120cm est calculée pour 144 tags avec 16 antennes.

Phase et angle d'arrivée Dans les études de trilatération, les valeurs de RSSI sont les plus utilisées à cause de la faible résistance de la phase aux évanouissements multi-chemin. Un autre type de techniques qui ne s'inscrit ni dans la famille de la multi-latération, ni dans celle de l'analyse de scène, propose des systèmes à faible coût et entièrement basés sur la RFID passive. Ces techniques, comme la trilatération, basée sur l'estimation de la distance, se basent sur la combinaison de l'angle d'arrivée et de la phase d'arrivée. Simplement dit, ces méthodes supposent qu'en trouvant le meilleur chemin de propagation entre le tag et le lecteur à l'aide de l'angle d'arrivée, il est possible d'estimer la distance plus correctement en mesurant la phase d'arrivée sur ce chemin de propagation. En [276], une antenne à rotation mécanique est utilisée pour déterminer l'angle d'arrivée du tag. L'angle d'arrivée est défini comme l'angle pour lequel la valeur du RSSI est maximale. Ensuite avec le calcul de la distance à partir de la phase (différence de phase à deux fréquences) pour cet angle d'arrivée, une erreur de 23cm est mesurée pour un seul tag et une seule antenne patch. En [297], un réseau d'antennes pour générer des faisceaux directifs est utilisé pour déterminer deux chemins vers le tag. Pour le chemin direct, le calcul de la distance est réalisé avec les mesures de la phase sur deux fréquences. Pour le chemin dû à la réflexion, des stations virtuelles (positions intermédiaires entre le tag et le lecteur) sont créées. La distance entre le tag et le lecteur devient la somme de la distance entre le tag et la station virtuelle et de la distance entre le lecteur et la station virtuelle. La simulation montre que cette méthode est plus efficace que les autres algorithmes de localisation basés sur l'angle d'arrivée du tag. Le système est plus précis pour un réseau d'antennes composé de 16 éléments qui génère des faisceaux très directifs d'une largeur égale à 7° . Pour calculer la distance à partir de la différence de phase, un écart de 15 MHz entre les deux fréquences est nécessaire.

Analyse de scène Cette technique se base sur des méthodes de reconnaissance automatique des caractéristiques d'une scène. En RFID, une scène peut être caractérisée par les phases des signaux, les RSSIs ou les deux ensemble par exemple. Les méthodes d'analyse de scène statiques exigent le déploiement des tags de référence placés dans des positions connues pour constituer une base de données. Ensuite les caractéristiques des tags non connus sont comparées aux caractéristiques des tags dans la base de données pour déduire leurs positions. Une des premières propositions basée sur les tags de référence est l'algorithme LANDMARC qui utilise des tags RFID actifs [298]. D'autres méthodes n'exigent pas le déploiement de tags de référence mais nécessitent la calibration du système. En [299], un système aux entrées et sorties multiples est utilisé pour estimer la position d'un tag. Le tag est interrogé par une antenne et la réponse est collectée sur le reste des antennes du système. Ensuite, la probabilité de la présence d'un tag dans une certaine position est calculée en analysant les valeurs du RSSI. Ensuite, cette étape est répétée avec les valeurs de la phase. La probabilité que le tag soit présent dans une certaine position est calculée à l'aide d'un estimateur du maximum de vraisemblance utilisé pour interférer les deux probabilités calculées à base du RSSI et de la phase. Cette méthode se montre plus précise pour la localisation d'un tag grâce à l'utilisation des valeurs du

RSSI pour compenser les ambiguïtés de phase. Lorsqu'une erreur moyenne de 2 cm est enregistrée pour cette étude, les coûts de traitement des signaux ainsi que la nécessité de la calibration pour l'approximation de la phase augmente la complexité de son implémentation. En revenant aux techniques statiques, plusieurs études basées entièrement sur la technologie RFID UHF passive existent. En [300], l'utilisation des valeurs du RSSI des tags de référence pour estimer la localisation des tags non connus est réalisée à l'aide de la méthode *k* plus proches voisins ou «*K-NN*». L'efficacité de la localisation dans ce type de solution dépend fortement du choix des tags de référence. Cela est démontré en [300], puisque l'erreur d'estimation diminue lorsque un algorithme de sélection des tags de référence est implémenté. Une erreur de 21 cm sur l'estimation de la position d'un seul tag est obtenue pour cette étude. En [292], la phase, au lieu du RSSI, est utilisée avec la méthode «*K-NN*» afin d'estimer la position d'un seul tag. Neufs tags de référence et deux lecteurs sont nécessaires pour réaliser une précision d'estimation de 50 cm. En [275], la méthode «*K-NN*» est appliquée avec la phase, le RSSI puis les deux mesures ensemble. L'algorithme proposé est validé sur 128 tags cibles, 68 tags de référence et une seule antenne pour le lecteur. Les mesures montrent que l'erreur est la plus élevée lorsque seules les valeurs de la phase sont considérées (une moyenne de 1.1 mètres). En utilisant les valeurs du RSSI et les valeurs de la phase, l'erreur moyenne diminue jusqu'à 0.9 mètres. Ces techniques de localisation gagnent en popularité à cause de la simplicité de l'implémentation, des faibles coûts et de l'inutilité des mesures précises du signal pour déduire une position. Néanmoins, la nécessité de tags de référence et la maîtrise du nombre "*k*", ou le nombre de tags de référence à déployer ajoute une couche de complexité et limite l'extensibilité du système.

$$d_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \quad (6.7a)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad (6.7b)$$

$$EQM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (6.7c)$$

Quelle que soit la technique utilisée pour calculer la distance ou la position d'un tag, le calcul de l'erreur sur la précision est l'outil le plus utilisé dans les études citées pour évaluer la localisation. Lorsque la distance entre le tag et le lecteur est estimée, l'erreur absolue est la valeur absolue de la différence entre la distance réelle et la distance estimée. Dans le cas où les coordonnées sont estimées, l'erreur absolue est la distance euclidienne entre les coordonnées réelles et les coordonnées estimées, comme le montre l'équation 6.7a. Afin de représenter l'erreur sur l'ensemble des tags à localiser, l'erreur absolue moyenne (EAM) est trouvée en moyennant les distances calculées (voir équation 6.7b). Un autre calcul d'erreur peut être plus représentatif dans le cas où les erreurs conséquentes sont importantes à détecter, c'est l'erreur quadratique moyenne (EQM). Comme le montre l'équation 6.7c, en élevant au carré les erreurs absolues, plus de poids est donné aux plus grandes valeurs.

En guise de conclusion, il est important de souligner que malgré l'avancement sur les techniques de localisation avec la technologie RFID passive, une étude de ces techniques dans un milieu représentatif de notre cas n'a pas été réalisée. Dans le cas de la localisation des objets stationnaires, le nombre de tags sous test est très faible et la plupart des

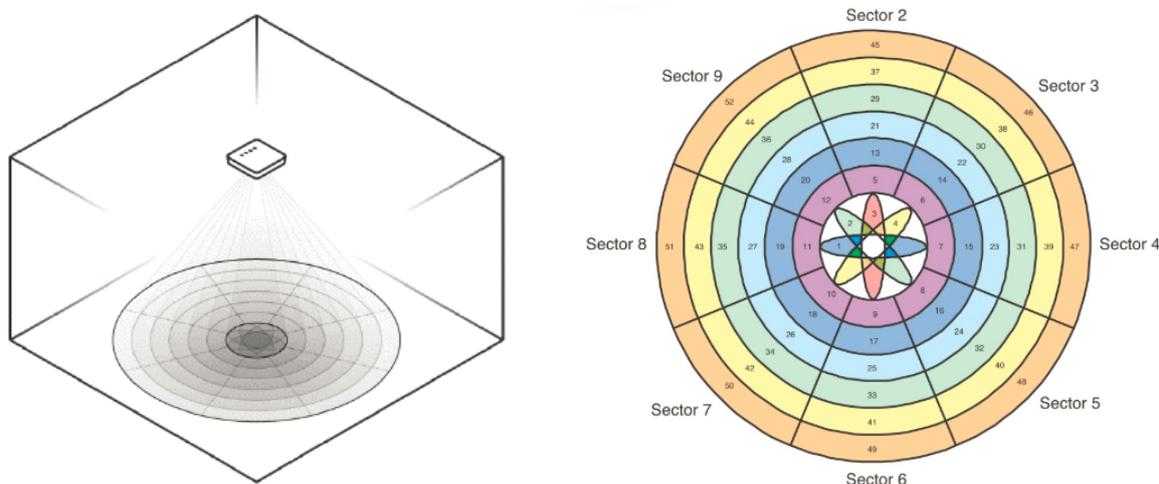
études se limitent à un seul tag. De plus, lorsque l'effet des réflecteurs est bien pris en considération comme l'élément clé qui définit un milieu réel, d'autres facteurs comme la densité et l'agencement sont complètement négligés.

6.3 Évaluation d'une solution du marché

6.3.1 Évaluation de la localisation 2D

6.3.1.1 Système sous test

Étant donné le manque d'études autour de la localisation larges populations de tags, nous nous intéressons à des solutions du marché. La solution cherchée devrait être capable de localiser dans des environnements denses contenant un très grand nombre de tags passifs. Le système choisi est le xArray, proposé par la société Impinj pour des solutions d'inventaire, de localisation et de traçabilité des biens dans des environnements magasin. Le système est construit à base du lecteur «*SpeedWay Revolution*» avec un réseau actif composé d'antennes à polarisation circulaires. Le réseau est capable de générer 52 faisceaux. Lorsque les 52 faisceaux sont balayés, ce système a une ouverture circulaire (à -3 dB) de 120deg.



(a) La zone de couverture de chaque faisceau sous le xArray (b) La division des faisceaux en secteurs et anneaux

FIGURE 6.3 – La position et division des faisceaux générés

Il est convenable de noter que chacun des 52 faisceaux correspond à une zone de lecture sous le xArray comme le montre la figure 6.3a. Ces faisceaux sont regroupés en anneaux -ce qui pourrait servir pour étendre ou rétrécir la couverture circulaire du système- ou en secteurs. L'activation et la désactivation d'un secteur permet de sélectionner la direction de détection. Ce système est capable de déterminer la position d'un tag en deux dimensions (x, y) avec une précision de 1.5 mètres. Pour une configuration qui favorise la précision des calculs au détriment des taux de détection, il est possible de localiser jusqu'à 4096 tags [301].

6.3.1.2 Technique de localisation

Lorsque le manuel d'utilisation décrit le fonctionnement du système lors d'une opération de localisation, il est référé à la technique comme unique et propre à Impinj sans détails supplémentaires. Lors d'une première analyse du fonctionnement, il est possible de déduire que ce système se base sur les petites zones de couverture de chaque faisceau pour déterminer la position du tag.

Après une recherche de brevets, un brevet déposé par Impinj qui décrit une méthode de localisation à base d'un système de formation de faisceaux à commande de phase [302] est trouvé. La description du système correspond à celle de l'xArray. Dans ce brevet (voir Annexe D), la technique de localisation utilisée est divisée en quatre étapes. Premièrement, le tag est détecté. Dans un second temps, une lecture séquentielle sur tous les faisceaux activés et les fréquences est réalisée. Ensuite, les taux de lecture pour chaque tag sont enregistrés. Dans le brevet, deux types de taux de lecture sont considérés. Le premier consiste à calculer les taux de lecture correspondants à chaque faisceau. Dans ce cas, les taux de lecture désignent, soit un rapport entre le nombre de réponses d'un tag et le nombre d'interrogations total, soit le rapport entre le nombre de réponses d'un tag et le temps total de la lecture sur le faisceau choisi. D'autre part, le taux de lecture par fréquence désigne le pourcentage de détection d'un tag sur les fréquences sélectionnées. Par exemple, si le tag ne répond que sur 2 fréquences parmi 4 choisies, le taux de lecture est 50%. Finalement, la position du tag est dérivée à partir de ces taux de lecture. Lorsque la méthode d'extraction des dimensions (x, y) n'est pas détaillée, il est spécifié que si un tag a un taux de lecture (fréquence et faisceau) plus élevé pour le faisceau 1 que pour le faisceau 2, le tag est plus proche au centre du faisceau 1. Lorsque cette technique est unique par rapport aux études réalisées, il est possible de la classer dans la famille des techniques de proximité.

En ce qui concerne le fonctionnement du système en mode localisation, les coordonnées sont calculées à condition que la hauteur de l'installation du xArray par rapport au sol soit précisée. Lors de la première lecture d'un tag, le système génère un rapport d'entrée pour ce tag contenant sa position calculée. Puis, en fonction d'une valeur de mise à jour de la position «*UpdateInterval*» en secondes, les rapports de position seront générés toutes les «*UpdateInterval*» secondes. Enfin, si le tag n'est plus lu pendant un temps supérieur à «*TagAgeInterval*», le système ne génère plus de rapports de mise à jour et envoie un rapport de sortie pour ce tag. Avec le logiciel de test «*ItemTest*», il sera possible de spécifier tous ces paramètres.

6.3.2 Environnement de test

6.3.2.1 Rayon cible

La solution de localisation devrait-être performante dans un environnement magasin où de grands nombres de produits sont agencés en plusieurs configurations dans des rayons métalliques. Pour émuler cette présentation, le rayon représenté dans la figure 6.4 est mis en place.

Le rayon est divisé en deux parties : droite et gauche. La partie droite contient 937 cartes taguées avec le même type de tag (voir le tag 13 dans le catalogue de tags en annexe A). Ces cartes ont une épaisseur de 1 mm et constituent un support fictif pour les tag. Les cartes sont agencées sur des broches, qui d'après le chapitre 4, sont censés avoir un impact plus ou moins nul sur les performances. L'objectif de cette partie droite est d'isoler



FIGURE 6.4 – Le rayon cible pour évaluer le système de localisation

l'effet d'une large population sur les performances d'un système de localisation. La partie gauche est composée de plusieurs agencements et produits dans le but de déterminer l'impact de chacun sur les performances de la localisation. Cette partie comporte des agencements faciles, proches des antennes du lecteur (8 chaussures), des agencements de difficulté moyenne (16 chaussettes dans le panier en haut du rayon et barres de céréales) et des agencements plus difficiles (51 chaussures, serviettes et sous-vêtements dans le panier). Finalement, des bouteilles sont placées sur les plaques métalliques. L'intérêt de les distribuer sur deux plaques est de mesurer la dégradation des performances des bouteilles sur la plaque du bas à cause de l'obstacle métallique au dessus. Pour les produits, les tags utilisés sont : AD383 U7, Zephyr2 U7 et Web G2iL (voir annexe A). Ce rayon cible est un outil pour tester les performances d'un système de localisation quels que soient les tags utilisés, leurs orientations, la population de produits, leurs agencements et le facteur de forme des produits.

6.3.2.2 Installation du système

Pour effectuer les tests, deux lecteurs xArrays sont sélectionnés pour constituer le système de localisation. Le choix d'installer deux xArray se base sur deux raisons principales :

1. L'amélioration de la détection : pour détecter le plus grand nombre possible de tags dans un tel rayon, l'utilisation de deux lecteurs est indispensable. De plus, l'avantage qu'apporte un deuxième lecteur à la détection d'un tag situé entre deux lecteurs est précisé en [302]. Ce même phénomène, dû aux interférences constructives, a été vérifié dans le chapitre précédent.
2. Deuxièmement, ce système est capable de déterminer la position d'un tag en deux dimensions. Ceci signifie que lorsque des tags sont placés à des hauteurs différentes, la précision de l'estimation des coordonnées x et y pourrait être perturbée par les différences sur l'axe "z" non considéré. Dans la plupart des cas, le calcul de la moyenne pondérée des mesures sur les deux lecteurs pourrait pallier ces erreurs [301]. Toutefois, lorsqu'un tag est placé directement en dessous d'un des deux lecteurs, cette technique n'est pas efficace.

La figure 6.5 illustre le montage du système dans son environnement de lecture. Les deux lecteurs sont séparés d'une distance de 1.5 mètres malgré les résultats de l'évaluation de ce système qui montrent de meilleurs taux de détection pour une séparation de 2 mètres (voir chapitre 5). Les deux lecteurs sont en effet rapprochés pour augmenter la probabilité

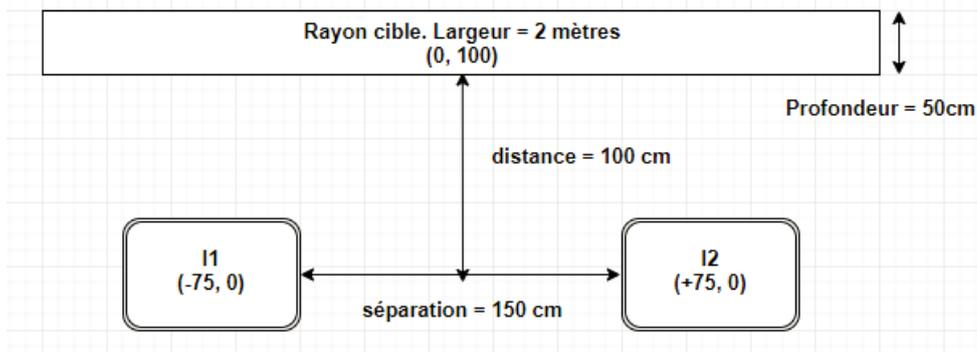


FIGURE 6.5 – Installation des deux xArray à une hauteur de 265 cm

qu'un tag soit lu sur les deux. De même, lorsqu'une distance entre le rayon et les antennes de 1.5 mètres est prouvée la meilleure solution pour augmenter la couverture du système, une distance de 1 mètre est fixée, puisque le manuel de déploiement [301] implique que la précision de la localisation est meilleure lorsque les antennes sont plus proches du haut du rayon. Dernièrement, il est important de préciser que malgré le placement des antennes à 1 mètre du rayon, la profondeur du rayon mesure 50 cm, ce qui voudrait dire que sur l'axe "y", les tags sont en réalité placés entre $y=100$ cm et $y = 150$ cm. De plus, les tags sont aussi distribués sur l'axe z à des hauteurs différentes, qui varient entre 30 et 200 cm du sol.

6.3.3 Procédure de test

La procédure de test est conçue autour de quatre éléments principaux pour comprendre le fonctionnement du système et évaluer ses performances dans un milieu réaliste. Ces quatre éléments sont :

1. Les paramètres Gen2 : pour la localisation avec les lecteurs xArrays, il faut prendre en compte deux paramètres essentiels pour le bon fonctionnement du système, la session et les modes radio-fréquence. En ce qui concerne les sessions, selon le guide de déploiement, seules les sessions 2 et 3 sont possibles pour effectuer une opération de localisation. Ceci est imposé pour limiter les réponses, dans le milieu, des tags déjà lus. Il est de plus recommandé de configurer deux xArrays adjacents avec deux sessions différentes. En effet, l'utilisation de la même session sur les deux lecteurs pourrait créer une condition pour laquelle un xArray est en train de changer la cible d'un tag en état B tandis que l'autre essaie de la changer en état A. Puisque les cibles sont propres aux sessions, l'utilisation de deux sessions différentes aide à éviter ce problème. En ce qui concerne les modes radio-fréquence, un mode est composé de plusieurs configurations de l'encodage. Pour rappel, l'encodage de la réponse du tag est un paramètre Gen2 ayant un impact direct sur la réduction ou l'augmentation de la sensibilité du système aux interférences. Logiquement, pour réduire les interférences, la meilleure configuration est d'opter pour un encodage Miller8. Pourtant, en [234], pour de larges populations (supérieures à des centaines de tags), il est recommandé d'utiliser le mode «1002 : Autopilot Static» pour ses taux de lecture plus élevés. L'effet de l'utilisation de ce mode au lieu du mode Miller 8 est évalué dans cette partie. Finalement, même si la puissance n'est pas un paramètre Gen2, sa configuration est très importante lorsque plusieurs lecteurs

sont à proximité les uns des autres. En faisant varier les puissances sur les deux lecteurs, des valeurs optimales pour améliorer la détection sont déterminées.

2. Les variables de mise à jour : il est possible de faire varier trois paramètres de calcul et de mises à jour. Ces paramètres sont : le temps d'acquisition et de calcul, dénoté «*ComputeWindow*», le temps de mise à jour de la position, dénoté «*UpdateInterval*» et le temps de vie d'un tag, dénoté «*TagAgeInterval*». Toutes ces variables peuvent être affectées des valeurs entre 0 et 65535. Pour «*TagAgeInterval*», une valeur très élevée est choisie puisque l'objectif de l'étude est la localisation des tags statiques ou stationnaires, et il est important de garder la dernière position connue d'un tag. Le choix du temps nécessaire pour le calcul, («*ComputeWindow*», est très important : plus le nombre de lecture d'un tag est élevé plus la position estimée est précise. Finalement, il est important de bien choisir le temps de mise à jour de la position. Lorsque dans le guide de déploiement il est recommandé de choisir un «*UpdateInterval*» inférieur ou égal au temps de calcul comme compromis entre le traçage du mouvement rapide et la précision de la localisation, cela n'est pas la préoccupation dans notre cas. Le temps de mise à jour est toujours choisi supérieur au temps de lecture pour afficher une position du tag statique plus précise. La variation de ces deux variables et son impact sur les résultats sont discutés dans la partie suivante.
3. La sélection des secteurs : les secteurs sont composés de plusieurs faisceaux qui définissent une direction de propagation ou un angle de décalage. Sachant que la position du rayon devant l'xArray est connue, la variation de la sélection des secteurs est étudiée comme paramètre pour améliorer les performances du système. Le choix d'un nombre inférieur de secteurs limite la zone de couverture (ainsi limitant les erreurs) et augmente le temps de lecture alloué à chaque faisceau, résultant en un nombre de lectures supérieur sur chacun.
4. Les facteurs de l'environnement : en plus de l'évaluation des performances globales, la variation des performances du système en fonction de plusieurs facteurs de l'environnement de lecture est considérée. Lorsque l'environnement de lecture est stable et unique pour ce cas d'étude, à l'aide des différents agencements, produits, positions et densités, il est possible d'estimer l'impact des facteurs de l'environnement sur les performances.

Finalement, afin de juger les performances du système, deux formules de calcul des erreurs sont adoptées : l'erreur absolue moyenne et l'erreur quadratique moyenne. La première fournit une information globale sur les performances du système, et le deuxième indique la présence ou l'absence de larges erreurs. L'utilisation de ces deux formules rend possible la mesure des variations des erreurs. Par conséquent, si la différence entre l'erreur quadratique et l'erreur absolue est petite, cela signifie que les erreurs ne varient pas beaucoup entre les tags considérés. Si la différence entre l'erreur quadratique et l'erreur absolue est large, cela indique une large variation des erreurs entre les tags considérés, indiquant une instabilité des performances.

6.3.4 Résultats et discussion

Le tableau 6.1 montre les différentes configurations pour l'évaluation du système de localisation décrit précédemment. Les paramètres varient dans ce plan de test de façon à ce que les éléments principaux identifiés dans la procédure du test soient mis en évidence.

Numéro du test	Sessions	Mode	<i>Compute Window</i> (s)	<i>Update Interval</i> (Durée totale) (minutes)	Secteurs désactivés	Min (cm)	Max (cm)
Test 1	2 et 3	1002	40	2	4,5,6,7,8	15.50	611.21
Test 2	2 et 3	1002	40	2	Aucun	17.99	764.46
Test 3	2 et 2	1002	40	2	5,6,7	9.49	678.58
Test 4	2 et 3	M=8	40	2	5,6,7	1.68	721.00
Test 5	2 et 3	1002	100	10,2	5,6,7	8.29	807.48
Test 6	2 et 3	1002	200	16,8	5,6,7	10.63	734.77
Test 7	2 et 3	1002	200	33,5	5,6,7	3.73	770.75
Test 8	2 et 3	M = 8	200	33,5	5,6,7	3.03	770.75
Test 9	2 et 3	1002	50	33,5	5,6,7	4.19	698.20
Test 10	2 et 3	1002	400	33,5	5,6,7	7.39	780.64

Tableau 6.1 – Les configurations correspondants à chaque numéro de test

A chaque numéro de test correspond un résultat indicatif montrant les erreurs minimales et maximales trouvées. Il est important de préciser que la localisation pour chaque test est arrêtée lorsque le temps de la mise à jour (*UpdateInterval*) est écoulé. Une analyse globale des premiers résultats montre que la variation des valeurs minimales se situe dans un intervalle allant de 1,86 à 15,50 cm. Les valeurs maximales varient entre 611 cm et 807 cm, entre l'erreur minimale et maximales détectées avec les différentes configurations. Quel que soit le paramétrage du système, les erreurs de localisation des tags varient dans un intervalle supérieur à 5.9 mètres. En observant davantage les erreurs minimales, nous observons que la meilleure précision d'un tag est trouvée avec le mode Miller8 (test 4 et 8). Cependant, cela ne reflète pas les performances globales du système. Afin de mieux évaluer la solution, les erreurs absolues moyennes, les erreurs quadratiques moyennes et les taux de détection sont calculés pour chaque test et illustré dans la figure 6.6.

Tout d'abord, l'impact du mode RF [234] peut être extrait en comparant les tests 3 (mode = 1002) et 4 (mode = M8). L'erreur absolue moyenne calculée pour le test 4 est inférieure à celle calculée pour le test 3. Ceci signifie que lorsque les deux lecteurs sont paramétrés prioritairement pour résister aux interférences, la précision moyenne de la localisation est meilleure. Néanmoins, les erreurs quadratiques sont équivalentes pour les deux tests, indiquant une tendance du mode M8 à causer des erreurs plus larges. Pour une fenêtre de calcul égale à cinq fois la taille de la précédente (augmentation de 40 à 200 secondes), les résultats des tests 7 (mode = 1002) et 8 (mode = M8) permettent de confirmer cette conclusion. L'amélioration qu'apporte l'utilisation du mode M8 à la précision est plus importante : le test 4 est plus précis de 13 cm par rapport au test 3 et le test 8 est plus précis de 33 cm par rapport au test 7. Il est important de noter que l'instabilité du système (proportionnelle à l'écart entre EAM et EQM) augmente lorsque le temps de calcul augmente, ceci est constaté en comparant les erreurs du test 10 à ceux du test 3. Ce constat est valide pour le reste des cas et il est observable pour la variation de la taille de la fenêtre de calcul dans les tests 3, 5, 6 et 10. En observant plus attentivement l'impact de ces variations, il est déductible que lorsque la taille de fenêtre augmente, l'erreur absolue moyenne s'accroît. Ceci n'est par contre pas le cas pour les tests 3 (40

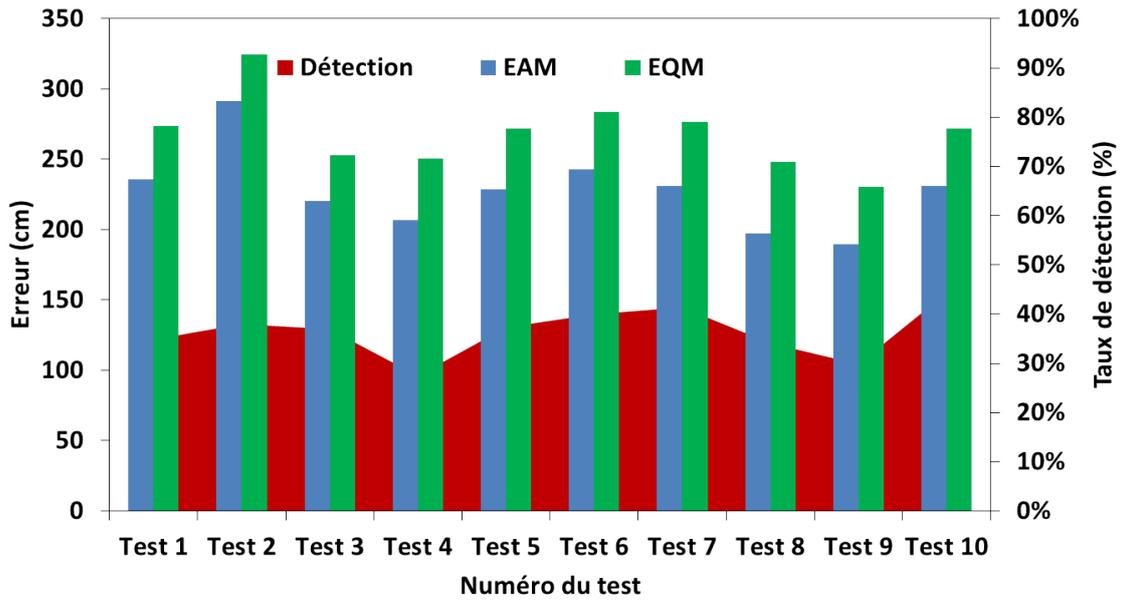


FIGURE 6.6 – Les erreurs absolues moyennes (EAM), les erreurs quadratiques moyennes (EQM) et les taux de détection en fonction du paramétrage des deux *xArrays*

secondes) et 9 (50 secondes), où une faible augmentation de la taille de cette fenêtre a entraîné une diminution de l'EAM. Pour comprendre ce résultat, il est indispensable de prendre en compte l'intervalle de mise à jour. Nous constatons qu'en augmentant le nombre de fenêtres de calcul (au détriment des taux de détection) dans un intervalle de mise à jour, tout en respectant une taille minimale de la fenêtre, la précision de la localisation est améliorée. Cela est dû d'un côté au nombre des échantillons considérés pour calculer la position d'un tag et de l'autre côté au moyennement des positions correspondants aux différentes fenêtres de calcul.

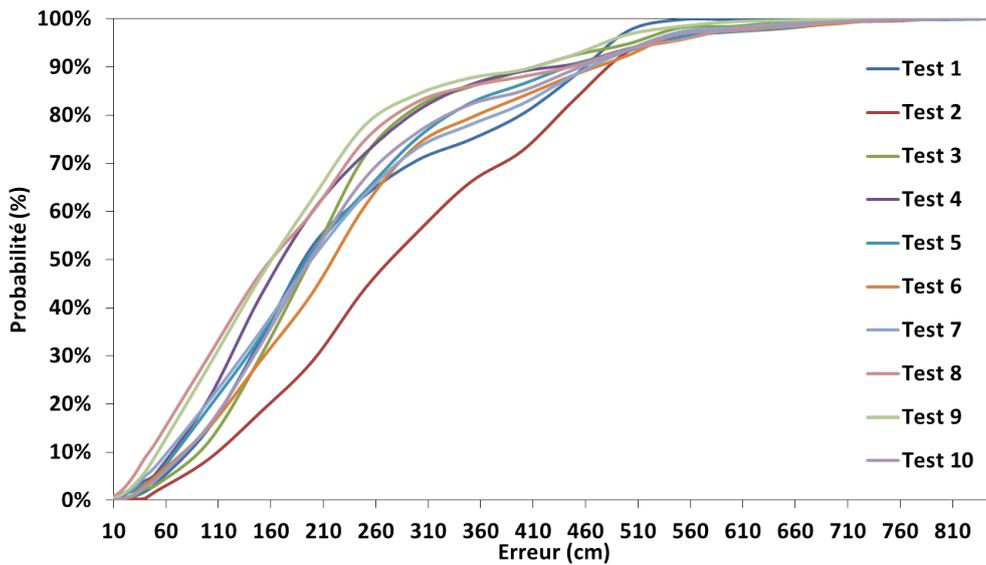


FIGURE 6.7 – La fonction de répartition des erreurs absolues moyennes

Par la suite, l'erreur due à la sélection des faisceaux de transmission de l'antenne est considérée. Pour cela, les résultats des tests 1, 2 et 3 sont isolés. Pour le test 1, la plupart

des secteurs sont désactivés, limitant la propagation des antennes à une ouverture de 135° dans la direction du rayon. Pour le test 2, tous les faisceaux sont activés, permettant une ouverture globale de 360° autour du centre des lecteurs. Enfin, pour le test 3, seuls les secteurs 5, 6, 7 sont désactivés, permettant ainsi une ouverture de 225° dans la direction du rayon cible. Pour mieux visualiser les secteurs en question, il est utile de se référer à la figure 6.3b. Les résultats montrent que la meilleure solution est de sélectionner la plupart des secteurs en désactivant les secteurs dans le côté opposé du rayon. Les erreurs du test 2 sont les plus larges ; ceci est dû à la propagation dans toutes les directions, augmentant ainsi les réflexions et les affaiblissements par multi-chemin. La sélection de 3 secteurs (test 1) en face du rayon est meilleure que l'activation de tous les faisceaux, mais moins précise que lorsque les secteurs sur le côté sont activés. En considérant la technique de localisation détaillée ci-avant, il est possible de déduire que la mesure des taux de lecture sur des secteurs sur les côtés pourrait améliorer la détermination du faisceau le plus proche du tag (voir figure D.1b de l'annexe D).

La fluctuation des erreurs moyennes en fonction des différents paramétrages des lecteurs montre l'intérêt de la procédure du test. Il convient de noter les faibles taux de détection quasi-uniformes pour tous les tests ce qui est dû essentiellement à l'optimisation du paramétrage pour la localisation au détriment de l'inventaire (ou la détection). En analysant l'écart global entre les EAM et les EQM sur la figure 6.6, des valeurs entre 37 et 50 cm sont trouvées par rapport à des erreurs absolues moyennes de l'ordre de 2-3 mètres. Cela indique la présence de larges erreurs (par rapport à la grandeur de la moyenne), mais aussi la prédominance des erreurs autour la moyenne. En calculant l'écart type, il est constaté que la plupart des erreurs se distribuent à 1,5 mètres autour de la moyenne. Pour mieux visualiser la répartition des erreurs, la fonction de distribution cumulative est tracée sur la figure 6.7.

Les tendances déduites de la figure 6.6 sont retrouvables sur la figure 6.7. Les tests 9 et 2 rapportent la meilleure et la pire précision respectivement. Le premier a 75% des erreurs en dessous de 240 cm, contre 75% des erreurs au delà de 200 cm pour le deuxième. En regardant la distribution des erreurs, il est possible de comparer les performances du système avec les spécifications fournies dans le guide (précision de 1.5 mètres). Lorsque les spécifications ne prennent pas forcément les différentes variables de l'environnement en compte, il est intéressant de noter que 18% des tags (test 2) ont une erreur de précision inférieure à 150 cm contre une probabilité de 46% reportée pour le test 9.

Finalement, pour mieux comprendre l'interaction du système avec le milieu et sa réaction face aux facteurs environnementaux dûs à la présence du rayon cible, les EAM et les taux de détection de chaque configuration sont illustrés sur la figure 6.8. Premièrement, le graphique montre une corrélation entre les taux de détection et les erreurs. Les taux de détection sont élevés et les erreurs mesurées sont plus importantes dans la plupart des cas quel que soit le nombre de produits dans un agencement. En observant les configurations composées des cartes taguées (populations denses), il est clair que, plus les positions des cartes sont éloignées des lecteurs (plus proches du bas du rayon), plus les taux de détection et les erreurs diminuent. Deuxièmement, un autre facteur contribuant à la diminution de la précision est l'agencement des vrais produits (facteur de forme et matériau) tagués dans des configurations contraignantes (Serviettes, chaussettes et sous-vêtements dans un panier en métal). Troisièmement, deux configurations se montrent particulièrement intéressantes : les bouteilles B (en bas) et les chaussures. Pour les bouteilles en bas, nous avons prédit que leur présence entre deux plaques métalliques pourrait avoir un impact négatif à cause des réflexions additionnelles. Curieusement, comme le montre la figure 6.8,

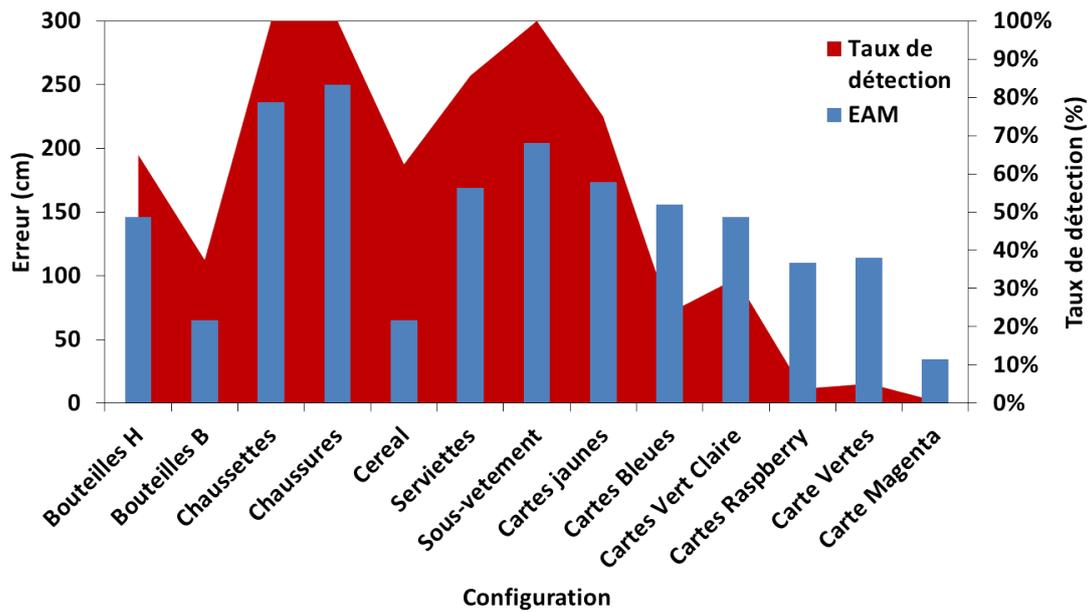


FIGURE 6.8 – Les erreurs absolues moyennes (EAM) et les taux de détection en fonction de la configuration et l’agencement du tag pour le test numéro 9

ceci n’est pas le cas, malgré un taux de détection comparable à celui des bouteilles H (en haut). Grâce à l’ouverture de chaque faisceau de 45° , seuls les tags ayant un chemin direct prédominant avec les lecteurs ont été détectés, améliorant ainsi la qualité de précision pour cette configuration. Pour les chaussures -prédites comme cibles faciles après l’étude de leurs performances dans les chapitres précédents- leur proximité des antennes est la cause principale des larges erreurs. Selon la technique de localisation, le faisceaux le plus proche est déterminé en comparant ces taux de réponse sur tous les faisceaux. La simplicité de cette configuration, ainsi que la proximité de ces produits des lecteurs ont facilité sa détection par la plupart des faisceaux ; ce qui est probablement cause de confusion lors de la comparaison des taux de réponse, comme expliqué précédemment. En observant les figures D.1a et D.1b de l’annexe D, il est possible de visualiser la confusion portée à la détermination de la position d’un tag pas sa détection par beaucoup de faisceaux.

Selon les résultats, cette solution de localisation basée sur deux lecteurs *xArray* produit des résultats instables. Pour le meilleur cas (test 9), pour 46% des tags, la position estimée varie dans un cercle d’un rayon de 150 cm autour du centre du tag cible. Lorsque ce résultat est utile pour gérer la localisation des produits, l’augmentation de cette erreur et la présence des larges erreurs pour la majorité des tags localisés (allant jusqu’à 8 mètres) pourrait indiquer des fausses positions des tags, loin de leurs rayons dans des endroits différents du magasin. Cette instabilité est principalement due à la négligence des différents facteurs du milieu magasin, mais surtout les agencements et le multi-chemin. Malgré l’utilisation d’un algorithme pour déterminer le faisceau le plus proche, trouvant ainsi la liaison la plus fiable et la plus résistante aux affaiblissements multi-chemin, l’estimation de la position est souvent perturbée. Une autre problématique de ce système est la localisation des tags qui peut augmenter les erreurs sans apporter de vrais bénéfices aux résultats. Si seulement les 46% tags (erreur < 150 cm) sont considérés, il est possible de reconstruire une carte du rayon cible à faible résolution.

6.4 Nouvelle solution de localisation

6.4.1 Caractéristiques de la solution

6.4.1.1 Localisabilité et localisation

L'analyse de la littérature et l'évaluation d'une des solutions les plus présentes sur le marché montre le besoin d'un nouvel algorithme de localisation. Ce besoin est né du constat que la plupart des algorithmes négligent les larges populations de tags et les autres facteurs d'un milieu réel lors de la phase de conception.

En considérant de larges populations de tags dans des milieux de déploiement très complexes, il est important de définir la localisabilité de chaque tag dans le milieu. La localisation précise d'un large pourcentage de tags est actuellement limitée par l'état actuel de la technologie RFID UHF. Cela signifie que parmi une population de N tags, seule une partie des tags a des réponses suffisamment fiables pour en dériver des positions précises. Suivant les résultats d'une telle évaluation, il serait possible d'éliminer des tags en amont ou en aval de l'opération de localisation. L'élimination de tags non-localisables limite la largeur des erreurs. Nous prétendons qu'en considérant uniquement les tags localisables, il est possible de reconstruire la carte du rayon dans la zone géométrique dans laquelle il est présent avec un minimum de bruit. Le but des travaux suivants est d'améliorer les capacités de la technologie RFID passive pour profiter des bénéfices de la localisation, énumérés au début de ce chapitre.

Deuxièmement, une fois la question de la localisabilité traitée, il serait possible de procéder à la localisation des tags. L'optimisation de la localisation doit se baser sur deux facteurs principaux : la précision et l'inclusion. La précision est définie par l'erreur maximale acceptable ; en considérant que le centre du rayon est l'origine d'un repère cartésien en deux dimensions, il est possible de définir des marges d'acceptabilité sur les axes des abscisses et des ordonnées. Elles dépendent de la largeur du rayon, de sa profondeur et de la distance de séparation entre deux rayons. L'inclusion, correspond au nombre de tags qui seront inclus dans l'opération de la localisation. Il est important d'inclure le plus de tags possible dans la localisation pour améliorer sa résolution. En fonction de ces deux facteurs principaux, l'algorithme sera construit et optimisé.

Finalement, il est important de considérer une localisation en deux dimensions (2D). Cela est essentiellement dû à l'installation au plafond des antennes dans un plan (x,y) . Le placement des autres antennes dans les plans (x,z) ou (y,z) n'est pas possible à cause des contraintes d'encombrement. Comme expliqué dans la partie précédente, la localisation des tags à différentes hauteurs dans un plan (x,y) entraîne des erreurs. De plus, la localisation en 2D est suffisante pour les cas d'usage cités au début du chapitre, notamment, la reconstruction de la carte dynamique des produits dans le magasin et la recherche de la position d'un produit.

6.4.1.2 Mode de fonctionnement envisagé

La nécessité d'utiliser plusieurs lecteurs pour détecter et localiser de larges populations de tags dans un milieu réel est établie à travers ce chapitre et le chapitre précédent. Lorsque plusieurs lecteurs opèrent à proximité les uns des autres, il est important de gérer leur fonctionnement pour minimiser les interférences du milieu. De plus, il est avantageux de réfléchir au problème de localisation de deux étapes : la première en considérant les données collectées par un seul interrogateur et la deuxième en considérant les informa-

tions collectées par plusieurs lecteurs. Lorsque la première étape permet l'évaluation de la réponse du tag par rapport à une position connue dans l'espace (position du lecteur), la deuxième étape peut améliorer la précision du système en analysant la réponse du tag par rapport au système complet. Pour cela, il faudrait bien comprendre à quel moment et sous quelles conditions un lecteur participe à l'opération de localisation.

D'autre part, comme démontré par l'évaluation d'une solution du marché, les configurations pour une opération d'inventaire sont différentes de celles pour une opération de localisation. Pour cela, il est impératif de séparer les deux modes et permettre aux lecteurs de changer de mode pour ne pas bloquer l'ensemble des lecteurs dans un seul mode. Pour cela, nous optons pour une remontée asynchrone des données.

6.4.1.3 Choix des lecteurs et implémentation

L'utilisation de plusieurs lecteurs pour localiser des produits dans un rayon entraîne une question cruciale à l'égard du nombre de lecteurs à installer. Dans le but de minimiser le coût et résoudre la problématique pour le pire cas, un nombre maximal de deux lecteurs par rayon est fixé (voir figure 6.5). Dans le but de diminuer les coûts, il faut choisir le matériel sur lequel l'algorithme de localisation serait implémenté. La solution commerciale «*xArray*» est choisie au détriment du système assemblé, présenté dans le chapitre 5 (deux module M6e et quatre antennes planaires), pour deux raisons. La première est sa capacité à générer 52 faisceaux ce qui pourrait servir lors de la fiabilisation des réponses des tags. La deuxième est l'élimination des pertes des câbles dans le cas d'un lecteur embarqué. De plus, il serait intéressant de comparer les performances de notre solution à celle d'Impinj en utilisant le même matériel. Il est convenable de noter que l'algorithme intelligent est universel et il est possible de l'implémenter sur les «*xArrays*» pour améliorer leurs performances en inventaire. En utilisant le même matériel pour la localisation et l'inventaire, les faibles coûts d'implémentation et la simplicité de la solution sont garanties. La limitation du nombre d'antennes à 2 élimine naturellement les techniques de trilatération qui nécessite trois points de lecture connus. La valorisation de la simplicité et des faibles coûts en utilisant uniquement les lecteurs RFID UHF sans aucun matériel supplémentaire élimine les solutions basées sur le calcul du temps de propagation et autres possibilités de solutions hybrides (utilisation des caméras, ondes sonores, etc ..)

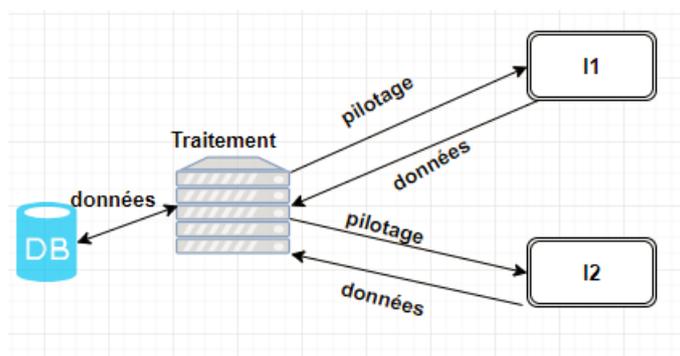


FIGURE 6.9 – Implémentation de la solution de localisation

Comme indiqué ci-avant, un fonctionnement asynchrone est envisagé pour gérer l'ensemble des lecteurs. Comme illustré dans la figure 6.9, la solution sera implémentée sur un ordinateur qui envoie des requêtes de pilotage à chaque lecteur indépendamment. Les

lecteurs, à leurs tours, remontent les données collectées à l'ordinateur qui, à son tour, les sauvegarde séparément pour chaque lecteur et les traite pour dériver la position des tags.

Finalement, une application du bureau est développée dans l'environnement Visual Studio avec le langage C# pour implémenter l'algorithme de localisation. La communication entre les lecteurs et l'ordinateur afin de piloter les lecteurs et extraire les données est gérée via le kit de développement logiciel publié par Impinj [303].

6.4.2 Étude préliminaire

Dans les parties précédentes de ce chapitre, une revue de la littérature est réalisée autour des divers indicateurs de performance des tags RFID UHF et leur impacts sur la précision de la localisation. L'objectif principal de cette revue, est de mettre en question la fiabilité de l'estimation de la position d'un tag en fonction de l'amplitude de sa réponse (RSSI) ou de sa phase. Les études montrent la dépendance de ces paramètres vis-à-vis plusieurs facteurs, comme le multi-chemin. Néanmoins, ces études ne prêtent pas suffisamment d'attention à l'impact du nombre de tags présents dans le milieu et la densité d'agencement sur la fluctuation de la réponse instantanée d'un tag. Pour cela, une étude est menée dans le but de mesurer cet impact et d'évaluer la fiabilité de la localisation en fonction des indicateurs d'amplitude et de phase. L'étude est divisée en deux parties : la première partie est réalisée dans une chambre anéchoïque et la deuxième dans un milieu magasin émulé (voir figure 6.4).

6.4.2.1 Mesures dans la chambre anéchoïque

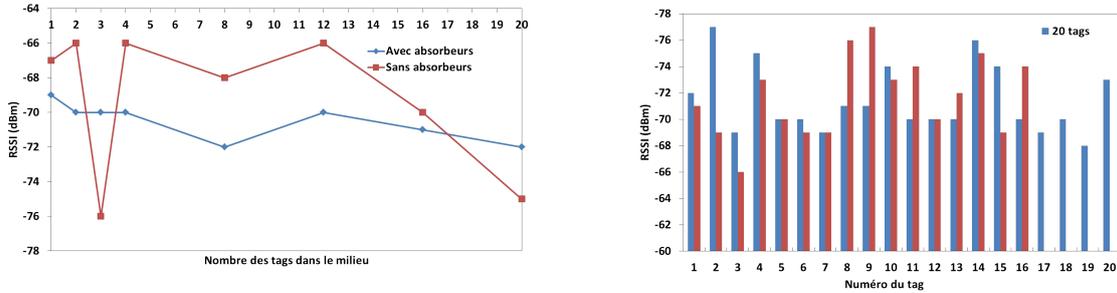
Pour la première étude, une antenne de type patch à polarisation circulaire est branchée au module RFID Thingmagic M6e. Ce dispositif de lecture est configuré pour émettre à une puissance fixe de 27 dBm. Les tags sont placés à une distance fixe à 3 mètres de l'antenne. Vingt tags (Zephyr 1) sont considérés pour cette première étude. Il est important de noter, que les valeurs de la phase et du RSSI enregistrées représentent les premières mesures instantanées et n'ont subi aucun traitement. Le module M6e remonte la différence de phase (entre onde émise et onde reçue) normalisée entre 0° et 180° au lieu de 0° et 360° ou -180° et 180° ; cela est dû à l'ambiguïté de la phase d'émission qui peut être soit 0° soit 180° .



FIGURE 6.10 – Agencement des tags dans la chambre anéchoïque

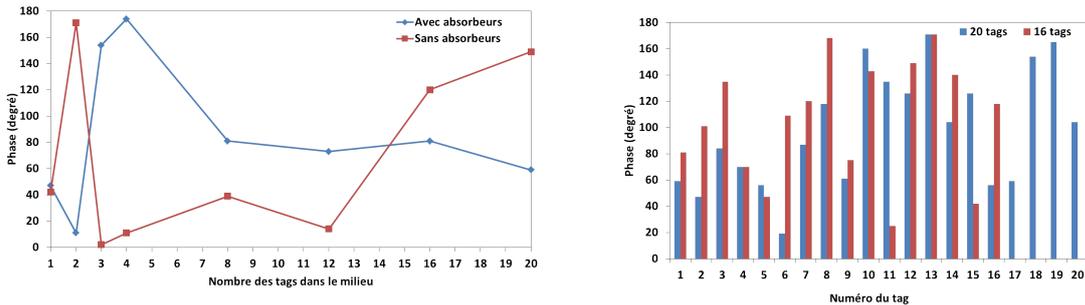
Les figures 6.11a et 6.12a, montrent les variations des valeurs du RSSI et de la phase pour un seul tag (tag n°1) pour chaque ajout de tag dans le milieu. Les tags sont ajoutés dans un volume de $150 \times 100 \times 70 \text{ mm}^3$ avec une séparation verticale de 3 mm entre deux tags, comme le montre la figure 6.10. Les mousses utilisées pour la séparation des tags

n'ont aucun effet sur les performances. Dans une chambre anéchoïque, les valeurs du RSSI enregistrées pour ce tag (tag n°1) varient très faiblement en fonction du nombre de tags présents dans le milieu. Lorsque les absorbeurs du sol sont enlevés, la fluctuation entre les différents points de mesure devient plus importante. La phase (figure 6.12a) subit des variations plus importantes que le RSSI en fonction du nombre des tag présents dans le milieu. Par contre, lorsque ce dernier est diminué, la variation diminue.



(a) Variation en fonction du nombre total des tags (b) Variation en fonction du tag interrogé

FIGURE 6.11 – Évaluation des variations du RSSI



(a) Variation en fonction du nombre total des tags (b) Variation en fonction du tag interrogé

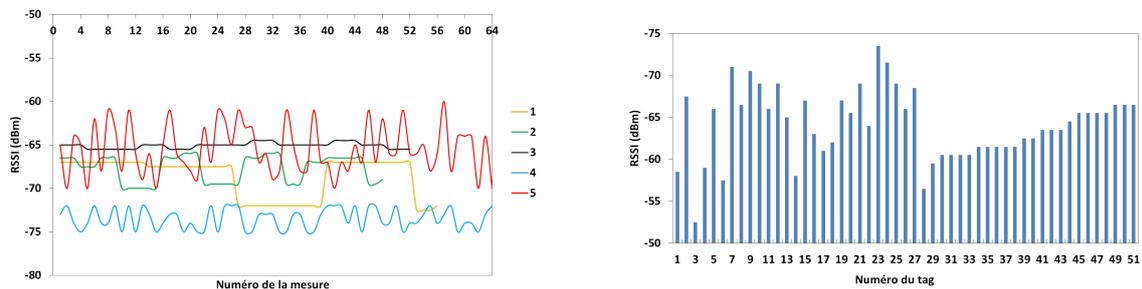
FIGURE 6.12 – Évaluation des variations de la phase

Les mesures illustrées sur les figures 6.11a et 6.12a montrent la variation de la valeur instantanée des indicateurs pour un seul tag parmi la population. Pour visualiser le comportement des tags dans une population, deux tailles de population (16 et 20 tags) sont considérées dans la chambre anéchoïque en présence des absorbeurs. Les valeurs du RSSI et de la phase pour chaque tag de la population sont illustrées dans les figures 6.11b et 6.12b respectivement. L'observation de plusieurs réponses montre une variation des RSSI entre -65 et -78 dBm et des phases entre 10 et 170° pour des tags présents dans une zone géométrique très limitée en taille, dans le champs lointain de l'antenne du lecteur. Ces résultats montrent l'inutilité des valeurs de la phase puisque des tags présents dans la même zone retourne des réponses en phases qui varient entre le minimum et le maximum de la gamme ; cela cause des erreurs très larges. Par contre, les valeurs du RSSI varient dans une gamme légèrement inférieure à la moitié de la gamme des valeurs possibles. A côté de cela, la majorité des RSSI dans la population varient autour de -70 dBm. En se basant sur ces observations, nous constatons que le RSSI est un meilleur candidat que la phase pour la localisation.

Les graphes des figure 6.11 et 6.12 montrent que dans une population, la contrainte la plus importante sur la précision de la localisation est le nombre de tags présents dans le milieu.

6.4.2.2 Mesure dans un milieu de type magasin

Afin de mieux comprendre le comportement des tags dans des populations plus denses, il est important de reproduire ce type de test dans un milieu réel. Un seul lecteur «*xArray*» est monté au plafond à 150 cm devant le rayon cible. L'«*xArray*» est utilisé pour évaluer la fiabilité à des fins de localisation. Un seul faisceau est activé pour l'ensemble des essais afin d'éviter le bruit introduit par la mesure de la réponse d'un seul tag sur plusieurs faisceaux.



(a) Les divers formes des courbes des mesures instantanées (b) Variation des mesures instantanées pour 51 produits

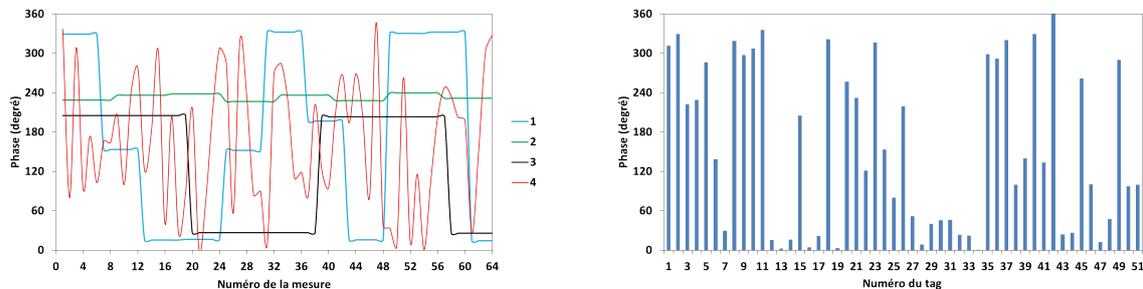
FIGURE 6.13 – L'évaluation des variation du RSSI en milieu réel

Les figures 6.13a et 6.14a montrent les valeurs du RSSI et de la phase sur 64 points de mesure temporels. La figure 6.13a montre cinq courbes typiques de la variation d'amplitude et quatre courbes typiques de la variation de la phase 6.14a dans un milieu réel. Ces courbes sont extraites de l'analyse de toutes les réponses de tags qui ont participé à l'inventaire. Les cinq allures montrent de différents niveaux de fluctuation, et par conséquent, de fiabilité de localisation. Les courbes présentant des paliers appartiennent à des tags qui n'ont pas été détectés sur les 64 points de mesures.

Pour les amplitudes (voir 6.13a), toutes les courbes varient autour d'une moyenne constante, traduisant la situation statique des tags vis-à-vis le lecteur. Toutefois, pour les courbes 1 et 5, l'écart type est plus important que celui des courbes 2 et 4, ce qui peut induire des erreurs plus importantes. La localisation d'un tag ayant une réponse similaire à celle illustrée en courbe 3 sera plus fiable du fait de la stabilité de la courbe par rapport à sa moyenne. En considérant la variation de la phase (voir 6.14a), les mêmes type de courbes de variation d'amplitude se retrouvent, mais l'ordre des variations est beaucoup plus important. La présence des courbes ayant de faibles variations (courbe 2), même s'il est rare, reste important à noter.

Les types de variation de la réponse pour un seul tag pendant une période d'interrogation confirme le besoin d'éliminer les tags ayant des réponses qui fluctuent fortement ; ceci constitue du bruit pour le système de localisation. Pour mieux comprendre le comportement des tags dans un milieu réel, les valeurs du RSSI et de la phase de 51 produits tagués (sous-vêtement, serviettes et chaussures agencé dans un seul panier avec deux compartiments) sont observés. Les figures 6.13b et 6.14b montrent le RSSI et la phase respectifs pour chaque tag. Les déductions basées sur les essais dans la chambre anéchoïque sont

confirmées : la majorité des tags présents dans la même zone géographique remontent des valeurs du RSSI similaires, ce qui fait de cet indicateur un bon candidat à exploiter pendant la localisation. A l'égard de la phase, les résultats montrent qu'en milieu réel et pour des objets statiques devant l'antenne, cette valeur n'est pas maîtrisable. Un écart de phase de quasiment 200° entre deux tags adjacents signifie que même si la problématique de l'ambiguïté est complètement résolue, les larges erreurs ne sont pas évitables.



(a) Les divers formes des courbes des mesures instantanées (b) Variation des mesures instantanées pour 51 produits

FIGURE 6.14 – L'évaluation des variation de la phase en milieu réel

6.4.3 Technique de localisation en deux dimensions

6.4.3.1 Architecture de l'algorithme

Compte tenu des divers études précédentes, nous avons imaginé une solution de localisation composée de trois phases : une phase de sélection, une phase de calcul des positions des tags sélectionnés et une phase d'estimation des positions des autres tags inconnus.

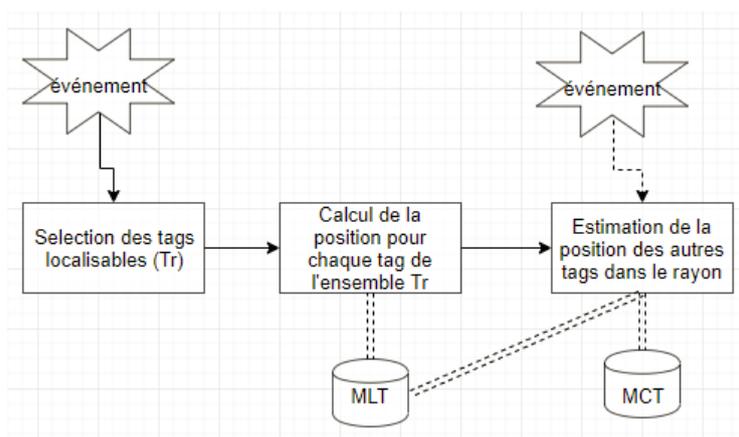


FIGURE 6.15 – Architecture de la solution de localisation

Comme le montre la figure 6.15, la première phase est déclenchée par un événement, puis les positions des tag sélectionnés, dénotés tags de référence (Tr), sont calculées et stockées dans une mémoire long terme (MLT). Les événements comme la vente d'une partie des tags de référence ou le réarrangement des rayon dans un magasin peuvent déclencher la phase une. Les tags de référence sont des tags du milieu ayant les réponses les plus fiables. Nous supposons qu'en localisant ces tags, il est possible de reconstruire la carte d'un rayon avec une faible résolution mais avec une meilleure précision.

Autrement, une troisième phase est proposée. C'est une phase d'estimation de la position des autres tags du rayon (réponses moins fiables) par rapport aux tags de référence. Les positions de ces tags sont stockées dans une mémoire à court terme. Cette phase peut être lancée automatiquement après la deuxième phase ou par un événement. Les événements sont des requêtes de localisation Temps Réel d'un produit particulier. Lorsqu'une telle requête est envoyée, le système cherche dans la MLT pour vérifier si c'est un tag de référence et fournir la position. Si ce tag n'existe pas dans la MLT, une opération d'estimation de la position est lancée, et le résultat est enregistré dans la MCT.

Une telle architecture permet l'application des cas d'usage orientés événements (localisation d'un produit suite à la demande d'un client), ou la gestion des tâches pré-configurées et automatisées (traçage de la trajectoire d'un produit dans le magasin en estimant sa position statique tous les "N" secondes). Il convient de rappeler que le système envisagé, a pour objectif de localiser les tags statiques sur les rayons et non pas les tags en mouvement.

6.4.3.2 Première phase : sélection

La première phase de la solution consiste à choisir les tags de référence. Ces tags doivent avoir des réponses suffisamment fiables pour calculer la distance qui les séparent de chacun des deux lecteurs avec la moindre erreur. Pour réaliser cela, une phase de sélection est introduite. La sélection est basée sur deux critères :

1. Le nombre de fois qu'un tag est lu : ce critère est important pour assurer qu'un tag est détectable la majorité du temps. D'un côté, ceci est nécessaire pour la collecte des informations pendant un temps continu. De l'autre côté, ceci est important pour vérifier si le tag de référence sélectionné a été vendu ou s'il existe toujours dans le rayon. La disponibilité des tags de référence est primordiale pour l'estimation de la position des autres tags inconnus en temps réel.
2. La stabilité des indicateurs de performances : ce critère de d'élimination vérifie que seuls les tags localisables sont pris en considération lors de la phase de calcul de la position.

Pseudocode 5 Algorithme de sélection

entrée : Nm ; Dm ; Nc ; Dc ; p^{RSSI} ; p^{Phase}

sortie : Liste des tags de référence

Lecture du milieu avec le lecteur 1 pour une période égale à Dm

Lecture du milieu avec le lecteur 2 pour une période égale à Dm

Sélectionner $Nm\%$ des tags les plus lus

Attribuer à chaque tag un faisceau

pour tous les faisceaux activés **faire**

 Lecture des tags assignés à ce faisceau pendant une période Dc

 Calcul du C_v^{RSSI} pour chaque tag

 Calcul du C_v^{Phase} pour chaque tag

 Pondération de la valeur globale de C_v en fonction de p^{RSSI} et p^{Phase}

fin pour

Sélectionner $Nc\%$ des tags les plus stables

Écrire Liste des tags de référence

La première étape est de sélectionner les tags les plus lus pendant une période de temps bien déterminée. Cela est possible à mesurer en effectuant deux lectures du milieu d'une période "Dm" avec les deux lecteurs, d'une façon séquentielle. Chaque lecteur est lancé séparément de l'autre, pour privilégier le choix des tags placés dans des endroits différents du rayon. Une fois les deux lectures terminées, les réponses des tag sont analysées et les (Nm%) des tags les plus lus sont sélectionnés. Ensuite, chaque faisceau (de chaque lecteur) activé est assigné à un groupe de tags. Le groupement des tags est effectué en fonction du nombre de lectures de chaque tag sur chaque faisceau des deux lecteurs. L'utilisation d'un seul faisceau par lecteur pour interroger et localiser un tag est important pour réduire l'impact des multi-chemins.

Lorsque ce premier critère élimine les tags dont la détection n'est pas garantie, le deuxième critère sert à éliminer les tags qui ont des réponses très bruitées à cause des facteurs d'impact d'un milieu réel. Dans cette étape, une lecture sur un chemin (Dc) est nécessaire pour évaluer la réponse de chaque tag. Par exemple, pour évaluer les réponses sur un chemin, un faisceau unique d'un seul lecteur est activé et seul le groupe du tag affecté à ce faisceau est interrogé. Cette opération est répétée sur les deux lecteurs pour tous les faisceaux activés. Pour distinguer une réponse fiable d'une réponse non fiable, le coefficient de variation des valeurs du RSSI et de la phase est calculé pour chaque tag. Le coefficient de variation (équation 6.8) est tout simplement le rapport de l'écart type (σ) sur la moyenne (μ). Ce coefficient (C_ν), sans unité, est exprimé en pourcentage et nous permet dans ce cas, de mesurer la dispersion des valeurs du RSSI ou de la phase d'un tag unique pendant une période du temps. La dispersion des valeurs de la phase est prise en compte puisque l'étude préliminaire à la conception de cet algorithme, démontre son utilité pour déterminer la fiabilité d'une réponse. Ceci est dû à sa haute sensibilité aux différents facteurs du milieu réel. Toutefois, pour le calcul de la position statique dans la bande RFID UHF, ce paramètre n'est pas utilisé.

$$C_\nu = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100 \quad (6.8)$$

$$C_\nu = p^{RSSI} \cdot C_\nu^{RSSI} + p^{Phase} \cdot C_\nu^{Phase} \quad (6.9)$$

En fonction de la formule du coefficient de variation globale donnée par l'équation 6.9, seulement (Nc%) des tags qui ont les dispersions les plus faibles sont maintenus. Les poids p^{RSSI} et p^{Phase} sont des variables nécessaire pour pondérer le calcul de la dispersion en fonction du RSSI et de la phase. Finalement, comme montré dans le pseudo-code 5, une dernière étape de nettoyage est réalisée. Le nettoyage consiste à éliminer tous les tags qui ne sont pas lus par les deux lecteurs. Comme établi précédemment, l'évaluation des réponses d'un seul tag sur deux lecteurs permet de pallier les erreurs de localisation en 2D (plan x,y) lorsque ce tag est placé à une hauteur (sur l'axe z) aléatoire dans le rayon. Il est nécessaire de signaler l'importance d'éliminer les tags non localisable en amont pour minimiser le temps de calcul dans la prochaine phase.

6.4.3.3 Phase 2 : technique de localisation

Selon la revue de la littérature et l'évaluation de la solution du marché, un élément se montre indispensable pour le choix d'une technique de localisation : la résistivité aux multi-chemins. Si de plus, les contraintes d'implémentation réaliste de la solution dans un magasin sont considérées, le placement d'un très grand nombre de tags dans des positions connues pour estimer la position relative des autres, n'est pas possible. Ces contraintes

éliminent la possibilité d'utiliser des techniques d'analyse de scène, comme elles sont proposées actuellement. Les techniques de proximité, étant aussi ignorées pour les faibles précisions, la multi-latération reste la technique la plus convenable. Néanmoins, seulement deux lecteurs sont disponibles pour chaque tag. Pour cela, la version la plus simple de la multilatération est utilisée : la bilatération. Considérant un tag situé à des distances d_1 et d_2 des deux lecteurs I_1 et I_2 , dont les coordonnées sont connues, il est possible de trouver deux solutions aux intersections des deux cercles. Le premier a un rayon d_1 et un centre $I_1(x_1,y_1)$ et le deuxième a un rayon d_2 et un centre $I_2(x_2,y_2)$.

$$d_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \quad (6.10)$$

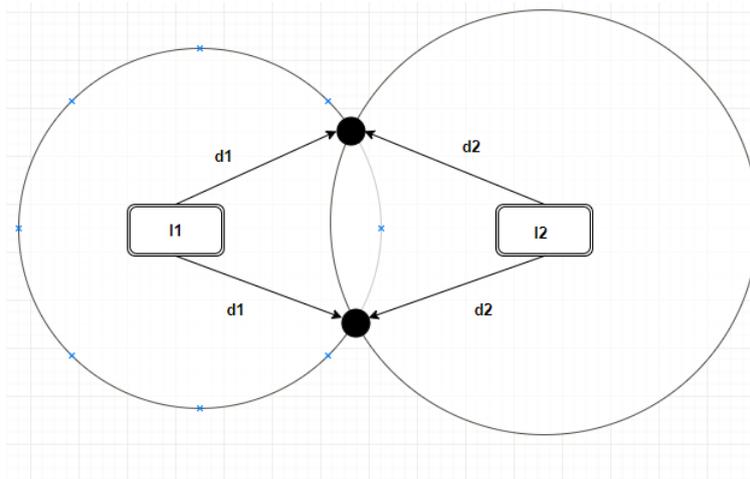


FIGURE 6.16 – Bilatération de la position d'un tag

La figure 6.16 montre les deux solutions possibles lorsque les points d'intersection de deux cercles sont calculés. Pour trouver la solution réelle et donc déterminer les coordonnées d'un tag, il est important de déterminer la direction dans laquelle le tag est placé par rapport à l'antenne. Dans cette expérience, lorsqu'un seul rayon est considéré la direction est connue et la pluralité des solutions est facilement résolue. Lorsque le système est déployé dans un milieu réel, les deux lecteurs seraient probablement montés entre deux rayons parallèles et donc la direction est importante pour déterminer la position réelle du tag. Pour résoudre cette problématique, la solution est de surveiller le nombre de lectures sur les secteurs dans une des deux directions (positives ou négatives) selon l'axe y . En activant les secteurs 3,9 et 2 il est possible de détecter les tags du côté négatif de l'axe y et en activant les secteurs 7,6,5 il est possible de détecter les tag du côté positif de l'axe (voir figure 6.3b).

L'équation 6.10 montre que pour calculer les coordonnées des intersections, le rayon du cercle et donc la distance entre le tag et l'antenne (x_n, y_n) doit être connue. Comme établi ci-avant, cette distance peut-être calculée en fonction des valeurs du RSSI ou de la phase. L'étude préliminaire et la revue de la littérature montrent que seules les mesures du RSSI dans le milieu du test sont exploitables. Dans cet étape de calcul, la moyenne des valeurs du RSSI collectées lors de l'étape précédent (calcul du C_ν) pour chaque tag est calculée. Comme indiqué dans la littérature, le fait de calculer la moyenne peut améliorer les performances du système en favorisant la valeur du RSSI du chemin prédominant. Nous supposons qu'en retenant seulement les tags localisables (ou stables) et en utilisant qu'un seul faisceau d'un lecteur pour l'acquisition des réponses d'un tag, les effets des

multi-chemins seraient réduite. De plus, en utilisant l'équation 6.3 pour le calcul de la distance, il serait possible d'ajuster le facteur du multi-chemin (n) lors de l'évaluation des performances du système. L'algorithme responsable de la partie de calcul des coordonnées et des distances est décrit dans le pseudocode 6.

Pseudocode 6 Algorithme de calcul

entrée : Liste des tags de référence; D_{rssi} ; D_{phase} ; n (facteur multi-chemin); $x1$; $x2$; $y1$; $y2$; RSSI0 (RSSI de référence d'un tag à 1 mètre)

sortie : Coordonnées des tags de référence

pour tous Lecteurs **faire**

pour tous Tags de référence **faire**

 Lecture pendant D_{rssi} sur une seule fréquence

 Lecture pendant D_{phase} sur deux fréquences

 Calcul de RSSI = moyenne (valeurs du RSSI)

 Calcul de la distance en fonction de n et RSSI0 et RSSI

fin pour

Écrire $d1$, $d2$

fin pour

pour tous Tags de référence **faire**

 Calcul de coordonnées en fonction de $d1$, $d2$, $x1$, $x2$, $y1$, $y2$

fin pour

Sélectionner $Nc\%$ des tags les plus stables

Écrire Coordonnées des tags de référence

Les valeurs du RSSI détectées lors la deuxième sélection sont utilisables pour le calcul de la distance entre le lecteur et le tag. Néanmoins, pour assurer un niveau de bruit plus faible, une lecture individuelle de chaque tag parmi ceux qui ont été sélectionnés est lancée avant le calcul. La période de lecture de chaque tag est fixe pour l'enregistrement des valeurs du RSSI (D_{rssi}) et de la Phase (D_{phase}). Pour la récupération des valeurs du RSSI, une seule fréquence est utilisée. Afin d'évaluer expérimentalement les erreurs, la distance est calculé une deuxième fois en fonction de la phase. Pour cela, la méthode de résolution d'ambiguïté en mesurant la phase sur plusieurs fréquences est utilisée. En réalité, la phase d'un tag est enregistré pour deux lectures à deux fréquences séparées de 2 MHz. Les valeurs instantanées remontées sont moyennées pour chaque fréquence et la distance est calculée en suivant l'équation 6.6.

6.4.3.4 Phase 3 : Estimation des autres positions

Dans les phase précédentes, la sélection des tags de référence et le calcul de leurs positions sont suffisants pour reconstruire la carte d'un rayon avec une faible résolution. Il est jugé suffisant qu'un tag de chaque catégorie ou agencement soit détecté, puisque logiquement les autres tag (de la même famille) seront à proximité. Dans le cas où une meilleur résolution de localisation est exigée, une troisième phase peut être ajoutée à l'algorithme. Cette phase permettrait par exemple de reconstruire la carte du rayon avec seulement 50 tags de référence. Cela est possible en estimant la position des tags les moins fiables en fonctions des tags de référence sélectionnées en phase 1 et dont leurs coordonnées sont connues à partir de la phase deux. L'utilisation des tags du rayon sélectionnées dynamiquement élimine le besoin d'implémenter des balises ou des tag à des positions connues dans le rayon, ce qui est compliqué à réaliser en réalité.

Les techniques traditionnellement utilisées pour estimer la position d'un tag par rapport à un autre tag sont des techniques d'analyse de scène. Comme établi dans la première partie de ce chapitre, l'algorithme le plus populaire de ces techniques dans le domaine de la RFID passive est le «*K-NN*» ou les *K* voisins les plus proches. Pour cette étude, le même algorithme est utilisé. Le pseudo-code 7 décrit sa logique. Par exemple dans un système où 100 tags sont considérés, en se basant sur 60 tags dont les positions sont connues, il serait possible d'estimer les positions des 100 tags en les distribuant sur les positions des 60 tags. Un inconvénient de ce système est l'exigence d'un nombre très élevé de tags de référence pour réaliser des précisions de localisation acceptables. Puisque cela n'est pas possible dans un milieu réel, l'utilisation des tags sélectionnés dans la phase 1 et de leurs positions calculées dans la phase 2 pourrait être plus avantageux pour deux raisons :

1. La sélection des tags de référence dans la phase 1 et le calcul de leurs positions sont dynamiques. Cela veut dire que même si leurs positions changent, cela serait pris en compte.
2. Une fois les positions des tags les plus fiables sont calculées (phase 2), une carte du rayon peut être construite avec des faibles erreurs. En estimant la localisation des tags appartenant à ce même rayon il est possible de reproduire une carte du rayon avec une résolution supérieure sans augmenter les erreurs.

Pseudocode 7 Algorithme de la phase 3

entrée : Liste des tags de référence ; Liste des autres tags, k , D_{tr}

sortie : Coordonnées des autres tags

Traduire chaque configuration de produit de référence en une catégorie

Apprentissage : comparaison entre les indicateurs des plusieurs tags de référence (RSSI, ou RSSI et faisceau, etc ..) et leurs catégories.

Lecture du milieu pendant une période D_{tr}

pour tous Autres tags **faire**

Déterminer les *K* tags de référence dont les indicateurs sont les plus proches à un tag inconnu

Parmi les *K* tags de référence les plus proches, la catégorie d'un tag inconnu est déterminé par un vote majoritaire (la catégorie à laquelle la majorité des *K* voisins appartient)

fin pour

Traduire chaque catégorie en un couple de coordonnées

Écrire Coordonnées des autres tags

Enfin pour déterminer quel tag est proche de quel tag de référence, il suffit de comparer les valeurs du RSSI. Néanmoins, pour les tags moins fiables, la comparaison des RSSI n'est pas suffisante. Pour améliorer la précision de décision de l'algorithme «*K-NN*», d'autres indicateurs comme le faisceau et la phase pourraient être évalués. La librairie utilisée pour l'implémentation de l'algorithme «*K-NN*» fait partie d'un ensemble de bibliothèques développées par et publiées par Accord.NET [304]. Il est important que la sortie de cet algorithme soit un nombre entier qui sera par la suite traduit par des coordonnées. Ce nombre entier correspond à une catégorie qui représente une famille de produits ou un seul produit. Par exemple si dans la deuxième phase la position d'une carte jaune est calculé, ses coordonnées représentent une seule catégorie. Pour retraduire la catégorie en position, la couple (x,y) associé à la catégorie est retournée. Ce type de catégorisation

basique simplifiée et rend plus rapide la phase 3 mais porte toujours l'erreur calculée pour les tags de référence.

6.4.4 Résultats : évaluation de la précision et de la résolution de la localisation

6.4.4.1 Plan d'évaluation

L'évaluation des performances de l'algorithme suit la logique de sa conception. Les variables jugées impactantes sont identifiées comme entrées pour les algorithmes de sélection (pseudocode 5), de calcul (pseudocode 6) et de groupement (pseudocode 7). L'objectif de cette partie est de trouver la meilleure configuration de ces variables et l'effet de chacune sur la précision de la localisation. Pour cela, le plan d'évaluation est divisé en trois parties, comme le montre le tableau 6.2. Il convient de signaler que les deux lecteurs sont configurés en session 2 à une puissance d'émission maximale et en M8 pour l'encodage. De plus, seuls les secteurs 2, 9 et 3 sont activés afin de limiter la zone de lecture. Cette configuration est choisie en se référant à l'évaluation de la solution d'Impinj de localisation avec le même système de lecture («*xArray*»).

Dans le tableau 6.2a, seuls les paramètres liés à la phase de sélection sont considérés. Premièrement, le temps de lecture du milieu (D_m) varie. Lorsque ce temps augmente, plus de tags seront détectés. Ce temps doit être suffisamment large pour permettre la récupération d'un nombre important de tags, sans augmenter considérablement le temps attribué à l'opération de sélection. Le paramètre N_c est fixé à 70%. Ce paramètre détermine le pourcentage des tags les plus détectables. Ces tags sont traités dans la deuxième étape de sélection. Un pourcentage de 70% est choisi comme compromis entre la stabilité de la solution et sa précision. Deuxièmement, le temps de lecture sur chaque faisceau (D_c) varie afin de trouver la valeur minimale à partir de laquelle le calcul de la distance est stable. Pour optimiser la configuration de la première phase, nous faisons varier en plus, le pourcentage des tags à garder comme références et les poids pour le calcul du coefficient de variation.

Dans le tableau 6.2b, les paramètres liés directement à la phase 2, et donc au calcul de la distance et des coordonnées des tags de référence sont considérés. Les essais visent à trouver la meilleure précision en fonction du facteur du multi-chemin (n), la valeur RSSI de référence à 1 mètre (RSSI0) et la durée de lecture individuelle pour chaque tag. Lorsque cette durée augmente, une meilleure précision est attendue grâce au moyennage des valeurs dans une intervalle de temps plus important.

Finalement, les paramètres affectant la dernière phase (phase 3) sont évalués. Les différentes variations de paramètre sont indiquées dans le tableau 6.2c. Normalement, les performances d'un algorithme «*K-NN*» dépendent de deux facteurs principaux : le nombre k (nombre de voisins), et le nombre de tags de référence disponibles dans le milieu. Puisque, dans le cadre de ce cas d'usage le nombre de tags de référence ne peut pas être contrôlé, seul le nombre k est varié. Le nombre k doit être impair pour trouver toujours une solution. A cause du nombre limité des tags de référence sauf les valeurs 3, 5, 7 et 9 de " k " sont évaluées. De même, le temps de lecture Temps Réel ou (D_{tr}) est de varier pour évaluer son impact sur la précision. Théoriquement, cette valeur, est extrêmement dépendante des données d'entraînement (tags de référence). La modification de la position de quelques données peut entraîner une perte de performance significative [305]. Cette valeur doit être suffisamment large pour que l'effet du bruit soit minimisé. D'autre part, si elle est trop large, des tags lointains seraient considérés comme voisins lors

de l'étape de prise de décision. De plus, pour que l'algorithme «*K-MN*» puisse comparer les réponses des tags collectés en Temps Réel à ceux de référence, il est important de choisir les indicateurs judicieusement. Puisque la phase n'est pas stable pour une telle manipulation, les indicateurs choisis sont les RSSI du tag sur chaque lecteur et les faisceaux où le tag est le plus détecté pour les deux lecteurs. L'ensemble de ces essais seront menés pour la meilleure configuration trouvée parmi celles évaluées (tableaux 6.2a et 6.2b).

Configuration	Dm (s)	Dc (ms)	Nm (%)	Nc (%)	p ^{RSSI}	p ^{Phase}
1	5	450	70	50	0,5	0,5
2	20	450	70	50	0,5	0,5
3	25	450	70	50	0,5	0,5
4	50	450	70	50	0,5	0,5
5	100	450	70	50	0,5	0,5
6	200	450	70	50	0,5	0,5
7	50	650	70	50	0,5	0,5
8	50	250	70	50	0,5	0,5
9	50	850	70	50	0,5	0,5
10	50	2500	70	50	0,5	0,5
11	50	2000	70	50	0,5	0,5
12	50	2500	70	60	0,5	0,5
13	50	2500	70	70	0,5	0,5
14	50	2500	70	80	0,5	0,5
15	50	2500	70	90	0,5	0,5
16	50	2500	70	80	0,6	0,4
17	50	2500	70	80	0,7	0,3
18	50	2500	70	80	0,8	0,2
19	50	2500	70	50	1	0

(a) Les variations des paramètres de sélection (phase 1)

Configuration	n	RSSI0	$D_{\text{rssi}} = D_{\text{phase}} \text{ (s)}$
17	2,2	-58	2,5
20	3,5	-58	2,5
21	4	-58	2,5
22	4,5	-58	2,5
23	4,5	-55	2,5
24	4	-55	2,5
25	4	-54	2,5
26	4	-56	2,5
27	4	-55	5
28	4	-55	6
29	4	-55	8
30	4	-55	10

(b) Variation des paramètres de localisation (phase 2)

Configuration	k	Indicateurs	$D_{\text{tr}} \text{ (s)}$
31	3	RSSI (I1, I2) et faisceaux (I1, I2)	50
32	5	RSSI (I1, I2) et faisceaux (I1, I2)	50
33	7	RSSI (I1, I2) et faisceaux (I1, I2)	50
34	9	RSSI (I1, I2) et faisceaux (I1, I2)	50
35	7	RSSI (I1, I2)	50
36	7	faisceaux (I1, I2)	50
37	7	RSSI (I1, I2) et faisceaux (I1, I2)	100
38	7	RSSI (I1, I2) et faisceaux (I1, I2)	500
39	7	RSSI (I1, I2) et faisceaux (I1, I2)	800

(c) Variation des paramètres de la phase 3

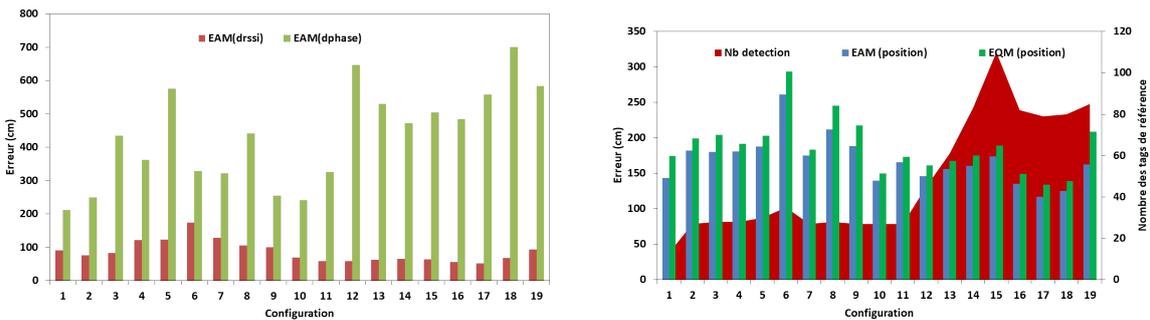
Tableau 6.2 – Plan d'évaluation de la solution de localisation proposée

6.4.4.2 Évaluation des phases 1 et 2

L'évaluation des deux phases initiales (phase 1 et 2) est essentiellement l'évaluation de la localisation des tags de référence en fonction des paramètres de sélection et de calcul. Pour comprendre l'impact de chaque paramètre sur le système, les erreurs de calcul des distances (d_{rssi} et d_{phase}) et les erreurs sur le calcul des coordonnées sont calculées. La figure 6.17 montre les résultats pour des configurations du tableau 6.2a et la figure 6.18 montre les résultats de celles du tableau 6.2b.

Tout d'abord, pour la phase de sélection, en plus de l'erreur calculée, le nombre de tags de référence sélectionnés est illustré afin de montrer son impact sur les erreurs. La figure 6.17a montre les erreurs absolues moyennes des distances calculées à partir des mesures du RSSI et de la phase. Sur la figure 6.17b, les erreurs absolues et quadratiques moyennes des coordonnées calculées, sont illustrées. Ces coordonnées sont calculées à partir de la distance (d_{rssi}) entre chaque tag et les deux antennes. De plus, le nombre de tags de référence sélectionnés est illustré pour son importance pour la résolution du système dans la phase 3. En observant l'évolution des valeurs de distances sur la figure 6.17a en fonction des différentes configurations, les distances calculées à partir des mesures du RSSI montrent de meilleures stabilité et précision par rapport à celles calculées à partir des mesures de la phase. Ces dernières ont un comportement presque aléatoire avec des erreurs qui s'élèvent jusqu'à 700 cm. Les erreurs absolues de distances (d_{rssi}) varient entre 52 et 174 cm. De plus, il était possible d'améliorer le calcul de la distance à partir des valeurs du RSSI en variant la configuration du système. Premièrement, le temps de lecture du milieu (D_m) varie entre 5 et 200 secondes. Lorsque ce paramètre augmente la précision de la solution diminue : cela est observable par l'augmentation des erreurs absolues et quadratiques (figure 6.17b) entre les configurations 2 et 6 par rapport à la configuration 1. En revanche, l'erreur de la distance (RSSI) diminue pour les configuration 2 et 3 par rapport à la configuration 1. En effet en augmentant ce temps, des tags qui ne sont pas facilement détectables peuvent répondre avec des valeurs hautes de RSSI, augmentant ainsi les erreurs sur la précision. En le diminuant, le temps devient trop petit pour calculer la distance d'un manière stable puisque le nombre des mesures du RSSI diminue. Comme compromis, la configuration 4 ($D_m = 50$ secondes) est choisie pour la suite. Entre les configurations 6 et 11, la durée de lecture du chemin par faisceau (D_c) pour le calcul du coefficient de variation pour chaque tag varie. L'erreur de la distance calculée à partir du RSSI est de l'ordre de 120 cm, et reste au dessus de 100 cm pour toutes les durée de lecture (D_c) inférieures à 2 secondes. En augmentant cette valeur à 2 puis à 2,5 secondes, l'erreur de distance baisse significativement à 59 et 68 cm respectivement : l'erreur de distance augmente entre 2 et 2,5 secondes. Pourtant, cela n'est pas vrai pour les erreurs absolue et quadratique de position : pour la configuration 10 ($D_c=2,5$ secondes), une erreur absolue minimale de 149 cm est calculée. Il est important de noter la diminution de l'erreur quadratique pour les configuration 10 et 11, signalant ainsi un système plus stable avec moins de larges erreurs. Ensuite, la configuration 10 est fixée et les erreurs sont évaluées en fonction du pourcentage de tags sélectionnés lors de la phase 2. Lorsque cette valeur passe de 50% à 90% entre les configuration 10, 12, 13, 14 et 15, l'erreur de la distance reste quasi-constante (voir figure 6.17a). Quant aux erreurs de positions (figure 6.17b, une augmentation de l'erreur absolue est constatée à chaque augmentation de 10% de N_c . Comme compromis entre la précision et l'augmentation du nombre des tags de référence (résolution), la configuration 14 est choisie. Pour cette configuration 83 tags de référence sont sélectionnées et un erreur absolue de 160 cm de position est calculée. Il est important de rappeler que le nombre de tags sélectionnés affiché, est celui obtenu après

l'étape de nettoyage. Comme indiqué dans le pseudo-code 5, après cette étape seuls les tags détectés par les deux lecteurs sont conservés, ce qui explique la limitation du nombre de tags. Finalement, la dernière piste d'amélioration de la sélection est la variation des poids. Jusqu'ici, les valeurs sont 0,5 et 0,5 affectant un poids égal à la stabilité des mesures du RSSI et de la phase. Étant donné que seules les distances calculées à partir des mesures du RSSI sont considérées pour le calcul des positions, il est logique d'augmenter la dépendance de la sélection de la stabilité de ces mesures au détriments des mesures de la phase. En augmentant le poids du RSSI et en diminuant celui de la phase ($p^{\text{phase}} = 1 - p^{\text{rssi}}$), les erreurs absolues de la distance et de la position diminuent de 160 cm (configuration 14) à 117 cm (configuration 17). Pour la configuration 17, le poids du RSSI est fixé à 0,7. En augmentant cette valeur à 0,8 (configuration 18), l'erreur absolue de la position augmente de nouveau. Pour un calcul du coefficient de variation dépendant uniquement des mesures du RSSI ($p^{\text{rssi}} = 1$), un erreur quadratique de 162 cm est constatée. Plus important, pour cette erreur absolue comparable à celle de la configuration 14, l'erreur quadratique pour la configuration 19 est plus élevée de 33 cm. Ce résultat montre l'importance des mesures de la phase pour la sélection puisque cela améliore la stabilité du système grâce à sa haute sensibilité aux facteurs du milieu réel, surtout les multi-chemins.



(a) L'erreur de calcul de la distance en fonction du RSSI et de la phase

(b) L'erreur de calcul des coordonnées

FIGURE 6.17 – L'évaluation des erreurs de localisation en fonction des paramètres de sélection

Les paramètres de la phase 1 ayant été optimisés, les paramètres de la phase 2 sont ensuite évalués. Les différentes configurations choisies sont indiquées dans le tableau 6.2b. Premièrement, nous faisons varier le facteur du multi-chemin (n). Lorsque n est égal à 1, la distance est calculée à partir des mesures du RSSI pour un milieu en espace libre. Puisque ce n'est pas le cas, ce facteur est initialisé depuis le début des essais à 2,2. Cette valeur est généralement utilisée dans le cas d'un milieu réel. Pourtant, il est possible d'augmenter cette valeur lorsque le milieu devient plus complexe où les pertes dues aux multi-chemins sont plus importantes. La configuration 17 est reconsidérée comme base pour évaluer l'impact de l'augmentation du facteur du multi-chemin (n). Sur la figure 6.18, la diminution des erreurs absolue et quadratique est évidente lorsque n est incrémenté jusqu'à 4 par rapport aux erreurs obtenues dans la configuration 17. Si n est égal à 4 (configuration 21), l'erreur absolue moyenne des positions diminuent jusqu'à 91 cm. Si cette valeur est augmentée à 4,5 le EAM s'accroît de nouveau au-dessus de 100 cm. La valeur optimale pour diminuer le EAM et le EQM des positions est 4. Cette valeur est un compromis entre un mauvais ajustement aux multi-chemins dans le milieu et un sur-ajustement du modèle en équation 6.3. Une fois ce facteur ajusté, deux autres

paramètres peuvent être varié afin d'améliorer les performances de la solution : la valeur RSSI de référence (RSSI0) et la durée de lecture (mesure) des RSSI pour chaque tag (D_{rssi}). Le premier est directement lié au calcul de la distance à partir des mesures du RSSI. Initialement cette valeur est fixée à -58 dBm. Il est possible de mesurer cette valeur en mesurant le RSSI d'un seul tag à 1 mètre du lecteur. Néanmoins, il est possible que les pertes du milieu réel impose la modification de cette valeur. Les différentes valeurs testées sont -54, -55, -56, -58 dBm. La valeur du RSSI0 égale à -55 dbm est prouvée la plus convenable d'après la figure 6.18 où elle correspond à la configuration 24. Cette valeur est inférieure de 3dB à la valeur initialement mesurée pour un seul tag à 1 mètre. Pour -55 dBm , l'erreur absolue, ainsi que l'erreur quadratique diminuent à 87 et 96 cm respectivement. Pour cette configuration, la durée de collecte des mesures du RSSI est de 2,5 secondes. En augmentant cette valeurs entre 5 et 10 secondes dans les configurations de 27 à 39, une EAM et une EQM minimales de 88 et 92 cm respectivement sont constatées pour la configuration 27. Pour la configuration 27, la durée de lecture est de 5 secondes. Une durée de lecture plus longue ou plus courte peut augmenter les erreurs. Cela est dû à la variation des mesures des tags de référence les moins stable. Pour une durée de 10 secondes, un abaissement des erreurs est observé grâce à la durée très longue de lecture. Si elle est augmentée davantage, nous estimons que les erreurs peuvent diminuer encore plus mais ceci n'est pas efficace puisque cela peut augmenter fortement le temps de calcul de la phase deux. Finalement, la configuration 27 est retenue comme la configuration optimale malgré une EAM inférieure à celle de la configuration 24. Cette déduction s'explique en observant l'écart entre l'EAM et l'EQM des deux configurations. L'écart inférieur pour la configuration 27 révèle des performances plus stables avec une précision comparable.

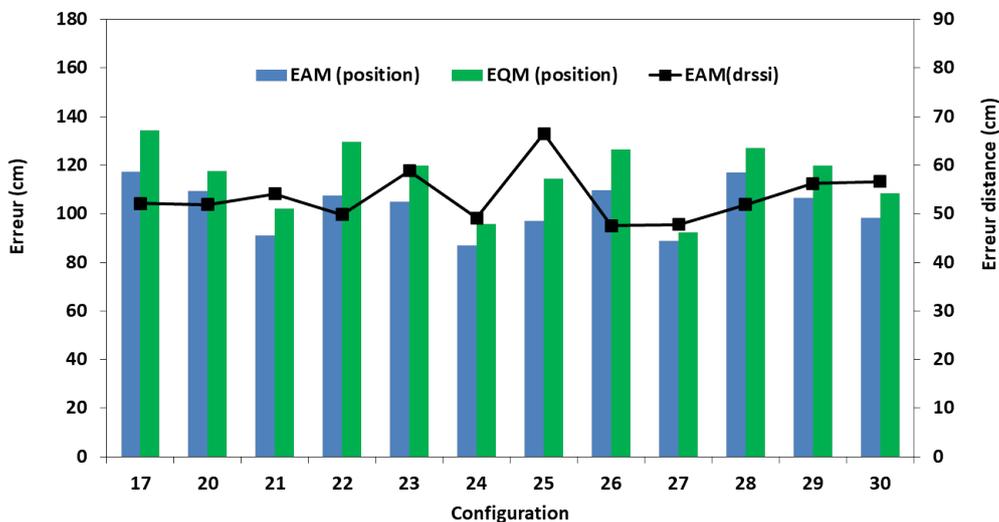


FIGURE 6.18 – Les erreurs en fonction des paramètres de calcul de la distance

Enfin, la meilleure configuration (27) est analysée en fonction de plusieurs agencements et configurations des produits. Au total, 83 tags de référence sont sélectionnés et localisé pour cette configuration. En examinant la figure 6.19, nous constatons qu'aucun produit tagué n'est retenu comme tag de référence des configurations "Bouteilles H", "Bouteilles B" et "Carte Magenta". En se référant à la figure 6.4, il est notable que ces agencement sont placés aux extrémités du rayon, dans la partie basse. Ceci nous amène à conclure que ces tags sont éliminés suite à l'étape du nettoyage puisqu'ils ne sont pas détectés par

les deux lecteurs.

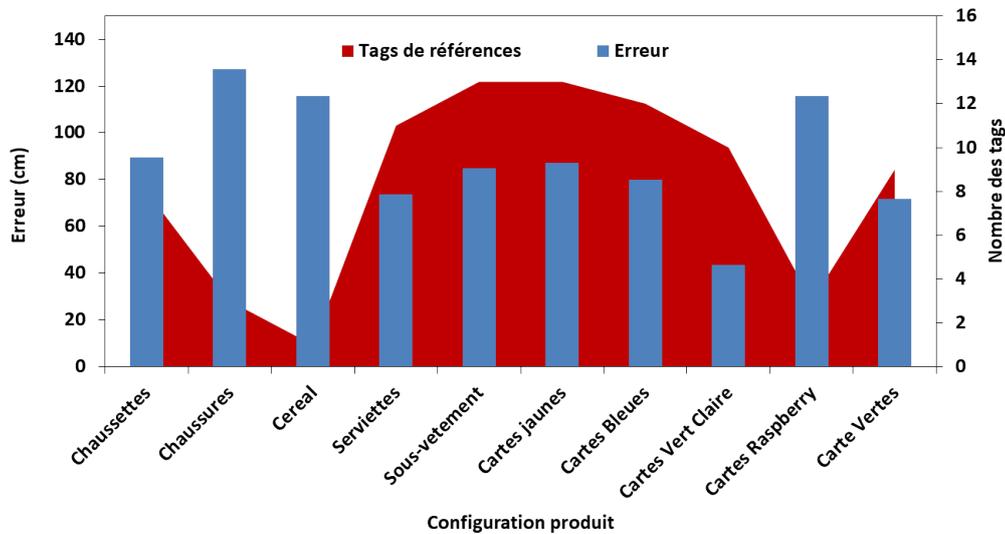


FIGURE 6.19 – L’erreur absolue moyenne de la position en fonction de la configuration du produit

Sur la figure 6.19, le nombre de tags détectés de chaque configuration de produit, ainsi que l’erreur absolue moyenne sont illustrés. Les erreurs de la majorité des configurations varient entre 70 et 120 cm, ce qui montre que cette solution de localisation tend à homogénéiser les erreurs. Toutefois, la configuration "Cartes Vert claire" montre une EAM de 43 cm pour 10 tags détectés. Pour les chaussures, l’erreur est très élevée à cause de leur présence dans à proximité du lecteur sur un support métallique. Pour les "Cartes Raspberry", leur proximité du sol pourrait être la cause des erreurs élevées par rapport aux autres configurations situées dans la partie droite du rayon. Pour les barres de céréale et à cause du faible nombre de tags détectés (1 seul) il n’est pas possible d’interpréter les résultats les concernant.

6.4.4.3 Évaluation de la troisième phase

Une fois les phases 1 et 2 achevées, il serait possible d’indiquer le placement des serviettes avec un niveau de confiance élevé. Par contre, il n’est pas possible d’indiquer le placement d’une bouteille puisqu’aucun tag de l’agencement (ou de la configuration du produit) n’est détecté. Pour cela, afin d’inclure plus de tags dans la procédure de localisation, la troisième phase est évaluée et optimisée. Comme il est indiqué dans le pseudo-code 7, pour localiser un groupe de tags relativement à des tags de référence, il est nécessaire de connaître les positions de ces derniers. Les tags de référence sélectionnés dans la configuration 27 de la phase 2 et leurs positions calculées sont considérés comme entrées pour l’algorithme de la phase 3. Les configurations testées sont données dans le tableau 6.2c.

Premièrement, les différents paramètres d’apprentissage et de décision de l’algorithme « K -NN» sont évalués. Le premier paramètre est le facteur k . Ce facteur détermine le nombre de voisins à considérer lors de l’étape de l’estimation de la position d’un tag inconnu. Comme indiqué précédemment, la valeur k ne doit être ni trop large ni trop petite. Dans la configuration 31, une valeur de k égale à 3 est choisie. Dans la configuration

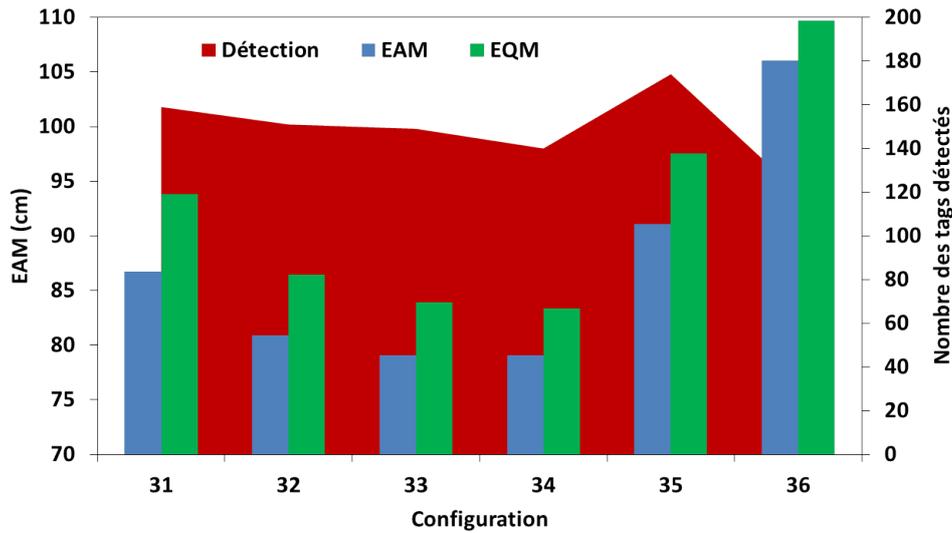


FIGURE 6.20 – L'évaluation des erreurs en fonction du facteur "k" et des indicateurs

34, le valeur de k est égale à 9. Dans la première, la présence d'un tag avec une erreur élevée peut changer complètement la position du tag inconnu. Dans la deuxième, l'inclusion des tags à des positions lointaines peut aussi augmenter les erreurs. Ceci dit, il est important de rappeler que les positions calculées des tags de référence portent des erreurs. Sur la figure 6.20, les résultats de l'augmentation de la valeur de k de 3 à 5 sont illustrés. Nous observons une diminution de l'erreur absolue moyenne et de l'erreur quadratique moyenne de 6 et de 7 cm respectivement. Lorsque cette valeur augmente de 5 à 9, aucun changement n'est perçu sur les erreurs. Pourtant, le nombre des tags détectés diminue. En réalité, le nombre des tags détectés est toujours stable puisque pour les configurations 31 à 36, puisque la même base des tags inconnus est utilisée. En effet, en augmentant k, le nombre des failles de calcul retournées par le logiciel augmente et donc, moins de positions sont estimées. Par la suite la valeur du k est fixée à 7. Jusqu'ici, les indicateurs considérés pour comparer les tags sont les deux valeurs du RSSI collectées par le premier et le deuxième lecteur et les deux numéros de faisceaux des deux lecteurs. Dans la configuration 35, lorsque seulement les valeurs du RSSI sont utilisées, l'EAM et l'EQM augmentent. Ces erreurs sont plus importantes, si nous considérons seulement les numéros des faisceaux.

Deuxièmement, le temps de lecture en temps réel est étudié comme paramètre clé des performances du système en Temps Réel. Cette solution est conçue pour fonctionner à partir d'un événement ou en Temps Réel. Nous désignons par cette dénomination (Temps Réel), la localisation d'un ensemble des tag (ou la totalité idéalement) dans un court intervalle de temps correspondant à l'exigence du revendeur. Seul le fonctionnement en Temps Réel est évalué par la suite puisqu'il est le plus contraignant. La configuration 33 est considérée comme référence à l'augmentation du temps de lecture (D_{tr}) des tags inconnus. Pour cette dernière, la durée est fixée à 50 secondes. Dans la figure 6.21, elle est augmentée jusqu'à 800 secondes (13,3 minutes). En augmentant cette durée le nombre de tags détectés et localisés augmente. Néanmoins, l'EAM et l'EQM augmente aussi. L'autre inconvénient de l'augmentation du temps, est l'augmentation du temps nécessaire pour compléter l'opération. Par exemple, 149 réponses de positions à une requête sous 1 minute peut être considéré comme une réponse Temps Réel. Par contre, pour localiser 579 tags inconnus, il faut un délai plus important d'environ 15 minutes. D'où, l'importance

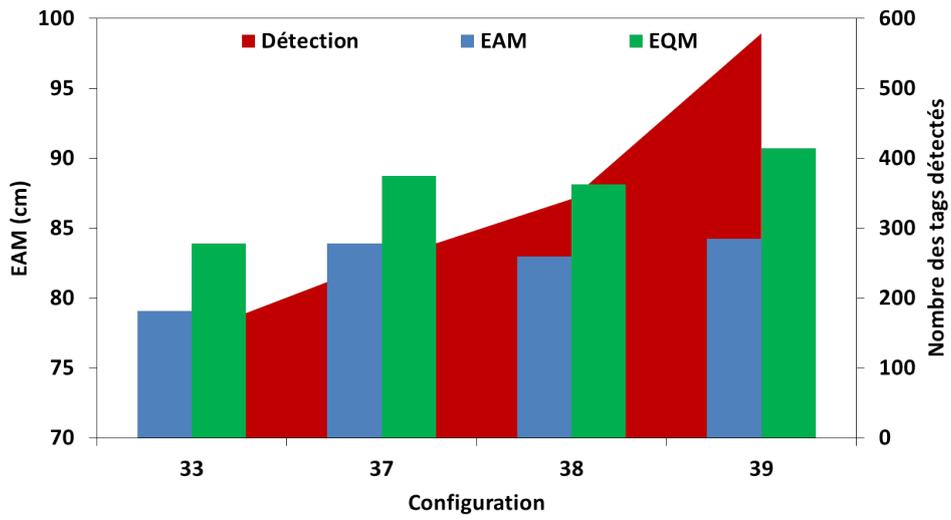


FIGURE 6.21 – L'évaluation des erreurs en fonction du temps de lecture en Temps Réel

d'adapter l'algorithme avec les paramètres proposés à l'usage souhaité.

6.5 Discussion

Afin de mieux comprendre l'apport de la solution proposée, et ses points faibles, la solution de localisation 2D proposée est comparée à celle d'Impinj. La comparaison est divisée en deux parties : la première porte sur le mode de fonctionnement et la deuxième sur la précision et la stabilité du système.

En ce qui concerne le fonctionnement, la solution de localisation d'Impinj permet de localiser un ensemble de tags dans un intervalle de temps. En Temps Réel, les positions des tags sont mises à jour en fonction de cette intervalle. Le système proposé dans cette étude propose plusieurs modes de fonctionnement pour déservir plusieurs applications. En implémentant notre algorithme, le même matériel serait capable de localiser un tag ou un ensemble de tags en continu en Temps Réel ou à partir d'un événement. En se basant sur un événement, une opération de localisation peut être déclenchée par une demande d'un client ou d'un employé de connaître la position d'un produit. En Temps Réel, plusieurs cycle de la phase 3 peuvent être programmés afin d'assurer une mise à jour continue des positions. La souplesse de la solution proposée permet de l'adapter entièrement pour servir à des différents usages.

$$T_{phase1+phase2} = N_{lecteurs} \cdot D_m + N_{faisceaux} \cdot D_c + N_{tag} \cdot D_{rssi} \quad (6.11)$$

Néanmoins, la solution proposée est plus complexe à paramétrer pour un certain usage. En effet, pour optimiser les performances, il faut configurer 12 paramètres contre seulement 4 paramètres pour la solution d'Impinj. D'autre part, pour calculer les positions des tags, les deux phases initiales sont indispensables à l'extraction des tags de référence et au calcul de leurs positions. Ce qui nécessite un temps relativement long. Pour cela, ces deux phases constituent une étape d'apprentissage préalable à la localisation comme le montre le schéma de la figure 6.15. De plus, le temps est un autre point faible de la solution. Par contre le temps nécessaire pour compléter ces deux phases peut augmenter rapidement en fonction du nombre de tags et de lecteurs dans le milieu comme le montre l'équation 6.11. En Temps Réel, la meilleure précision relative aux nombre de détections est obtenue pour une intervalle de 33 minutes avec la solution commerciale. Avec le nouvel algorithme proposé, cette intervalle se réduit à 15 minutes (tableau 6.2c).

Après la discussion des différents aspects du fonctionnement de l'algorithme, sa stabilité et sa précision face à la solution du marché est analysée. Pour cela, les erreurs absolues des deux solutions sont comparées. Sur la figure 6.22, la répartition des erreurs est tracée pour 83 tags de références (localisation avant «*K-NN*»), 547 tags (Configuration 39 après *K-NN*) et 720 tags avec la solution Impinj (test 9, tableau 6.1).

En analysant la répartition des erreurs absolues de la figure 6.22, l'amélioration sur la précision de l'ensemble des tags dans le milieu est évidente. En effet 90% ont des erreurs inférieures ou égales à 120 cm. Ce seuil passe à 420 cm pour la solution d'Impinj. Deuxièmement, la répartition des erreurs montre que la courbe jaune (après «*K-NN*») suit la distribution des erreurs de la courbes vertes (avant «*K-NN*»). Ceci montre que malgré le petit nombre de tags de référence (83 tags) par rapport aux tags inconnus (547 tags), les erreurs sont toujours bien encadrées. Pour cela, il est crucial de bien paramétrer les phases 1 et 2 pour garantir la stabilité du système. Troisièmement, en comparant la courbe jaune et la courbe bleue, nous constatons que grâce à l'approche proposée, les larges erreurs sont majoritairement éliminées.

Lorsque l'analyse de la répartition des erreurs est importante pour comprendre les performances globales du système, les différents facteurs du milieu ne sont pas considérés.

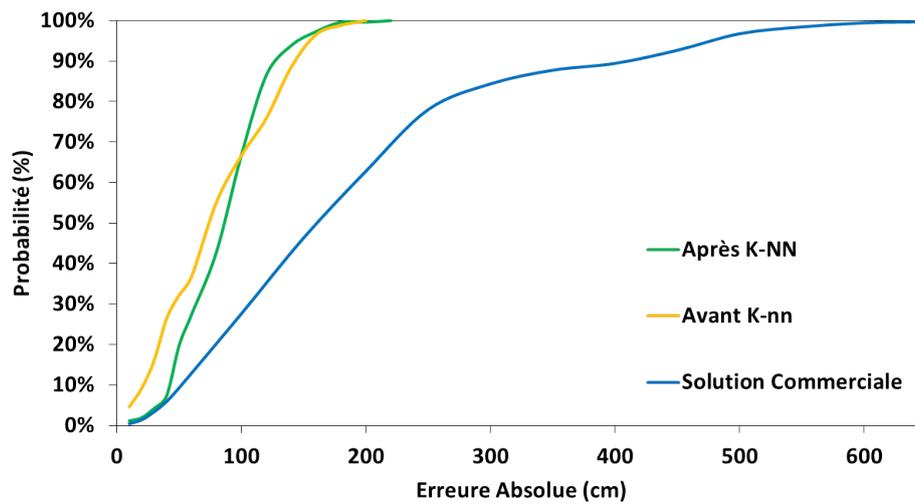


FIGURE 6.22 – Comparaison de la répartition des erreurs absolues

Pour cela, les erreurs absolues moyennes sont tracées en fonction de la configuration du produit. Sur la figure 6.23, les barres bleues représentent les erreurs de la solution Impinj et les barres jaunes représentent celles de notre solution. La comparaison entre ces deux diagrammes confirme l'élimination des larges erreurs discutée précédemment. Néanmoins, en creusant ces résultats, il s'avère que même des petites erreurs (exemple : "Carte Magenta") sont éliminées au détriment de l'homogénéisation des erreurs sur la majorité des configurations de produit et des agencements. Ceci démontre la résistance de notre approche face aux différents facteurs du milieu, procurant ainsi un système plus stable et plus précis à la fois.

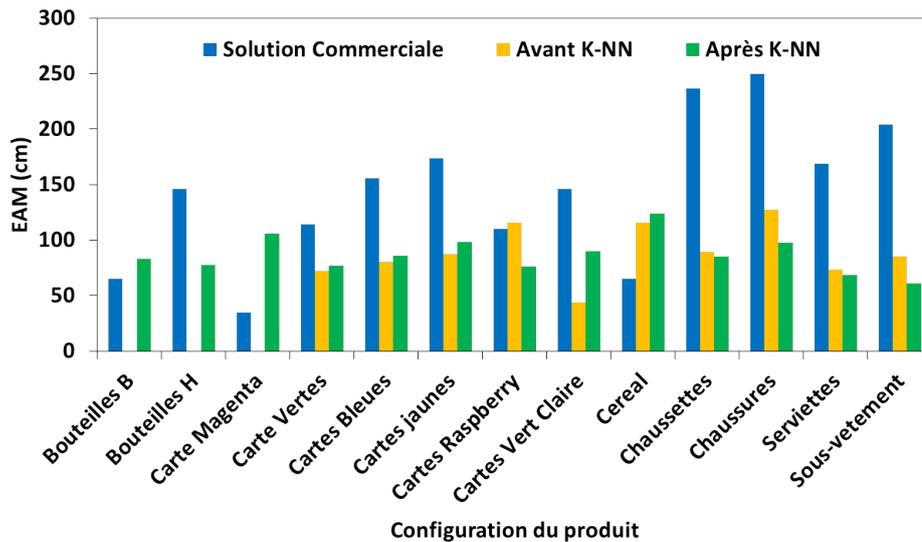


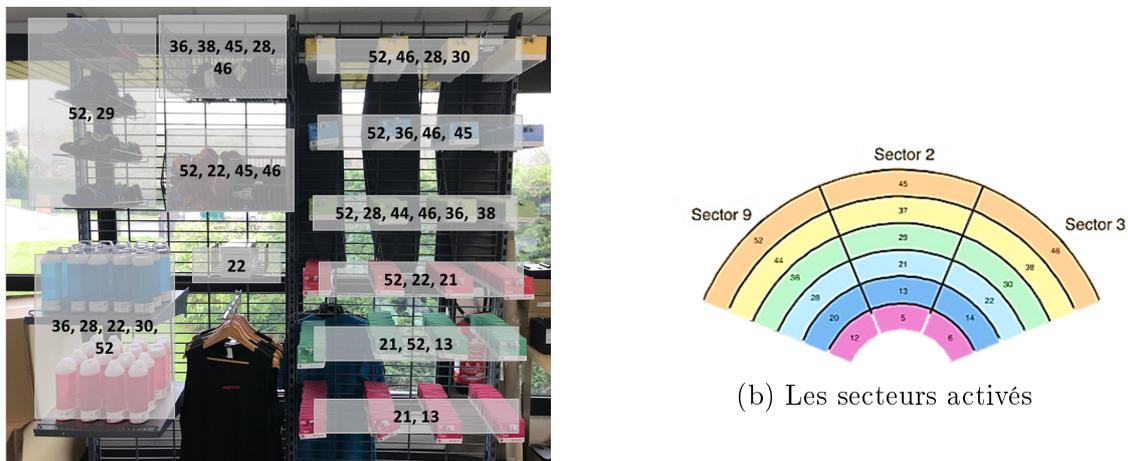
FIGURE 6.23 – Comparaison des erreurs absolues moyennes en fonction de la configuration du produit

6.6 Perspectives : la hauteur des produits dans le rayon

La solution de localisation proposée, comme la plupart des solutions sur le marché, estime la position d'un tag dans un plan 2D. Une telle solution répond à la plupart des usages ou des applications cités au début du chapitre. Par contre, dans le cas où la hauteur du produit dans le rayon est une information importante, les solutions disponibles ne parviennent pas à atteindre l'objectif. Une solution capable de déterminer la position d'un produit dans un plan 3D est plus avantageuse. L'installation des lecteurs au plafond et leur distribution dans un plan 2D orthogonal à la hauteur du rayon, limite la possibilité de calculer une position dans un plan 3D. Plus particulièrement, la technique utilisée dans notre solution, se base sur le calcul de l'intersection de deux cercles dans le plan 2D (x,y), où les deux lecteurs sont les centres des deux cercles. Pour transformer cette solution en une solution 3D, il faut placer un troisième lecteur dans le plan (y, z) et calculer les intersections de trois sphères afin d'estimer la position d'un tag en 3D. En [306], cette solution est abordée en proposant une installation de quatre lecteurs pour former un tétraèdre et minimiser le niveau de puissance afin d'affiner la zone d'intersection des sphères. Bien évidemment, ce type de solutions n'est pas implémentable dans un magasin ou autres espaces du commerce du détail, à cause de l'encombrement au niveau sol qui peut bloquer le passage des clients et des employés. Dans le même article [306], une autre solution est proposée. Elle consiste à utiliser un réseau d'antennes intelligent qui permet la variations de l'angle horizontal et vertical du faisceau. En se projetant sur les résultats obtenus avec notre installation, il s'avère que l'utilisation de cette technique n'est pas possible. En effet, à cause de la complexité du milieu, les tags sont détectés sur un nombre très limité de faisceaux. Ceci signifie que les tags sont détectés avec un angle vertical et horizontal limité qui ne permette pas d'utiliser les calculs proposés en [306].

Néanmoins en analysant les numéros des faisceaux sur lesquels les produits du rayon sont détectés, il est possible de diviser le rayon en deux parties. Cette faible précision est due au fait que l'angle vertical du réseau d'antenne de l'équipement commercial ne varie qu'entre 0° et 60° par rapport au centre de l'antenne. Il est important de noter, que pour

chaque produit, un seul faisceau (nombre de lecture le plus élevé) du lecteur le plus proche est indiqué. En premier lieu, nous constatons que plusieurs produits appartenant à un seul agencement répondent le plus sur le même faisceau. Les résultats pour les configurations 27, 28, 29 et 30 (voir tableau 6.2b) sont traités et les faisceaux correspondants à chaque agencement sont illustrés sur la figure 6.24a.



(a) Les faisceaux affectés aux produits tagués dans chaque agencement du rayon

FIGURE 6.24 – La relation entre les faisceaux du calcul et la hauteur d'un produit dans le rayon

En observant la figure 6.24a, nous constatons que le faisceau 52 est présent pour la plupart des configurations quel que soit leur placement dans le rayon. Cela est dû à l'élévation de 60° de ce faisceau, qui le rend accessible à la majorité des tags. Bien évidemment, les tags associés à ce faisceau et aux autres faisceaux dépend fortement de la hauteur des deux antennes et de la distance qui les sépare du rayon. La différenciation entre plusieurs placements dans le rayon est par contre possible en surveillant les autres faisceaux : par exemple, pour les tags présents dans la moitié basse du rayon, la plupart des faisceaux appartiennent aux anneaux bleu et bleu clair (figure 6.24b). Pour la moitié haute du rayon, la plupart des faisceaux appartiennent aux anneaux orange et jaune qui ont un angle vertical plus élevé par rapport aux autres anneaux. Lorsque cette extension de la solution de localisation n'est pas tout à fait précise, et dépend fortement de la géométrie du milieu de lecture, elle fournit une première approximation de la hauteur d'un produit dans un milieu de lecture très complexe.

6.7 Conclusion

Dans ce chapitre la problématique de localisation des objets statiques dans un milieu complexe de lecture est abordée. Dans la partie introductive, les intérêts de déployer une solution de localisation à l'intérieur sont discutés. Plus particulièrement, les usages et les applications dans un magasin ou un espace du commerce sont soulignés. En fonction des applications et des contraintes d'un tel espace intérieur, les différentes technologies possédant ces capacités sont considérées, pour finalement choisir la technologie RFID UHF. Le choix s'est essentiellement basé sur des critères de complexité et de coût.

Ensuite, les défis de la réalisation d'une solution de localisation avec la technologie RFID UHF sont identifiés et une étude des tendances de la recherche dans ce domaine a été effectuée. A la base de cette étude, trois éléments principaux d'un système de localisation RFID sont identifiés : la collecte des données, les mesures physiques et le traitement des données. Pour creuser davantage chacun de ces éléments une revue de littérature a permis de mieux appréhender les contraintes de la réalisation d'un tel système et l'état de l'art de la recherche.

Les propositions issues de la littérature ne sont pas compatibles avec les exigences des applications visées. En effet, la conception de ces solutions est menée autour d'un nombre trop faible de tags. De plus, pour les solutions étudiées, nous notons l'absence des résultats de validation dans un milieu complexe. Pour cela, nous nous sommes orientés vers le marché pour identifier une solution capable de localiser un nombre important de tags dans un milieu réel. L'«*xArray*» est un système de lecture proposé par Impinj qui offre la possibilité de localiser les tags en Temps Réel. Une étude du brevet lié à la technique de localisation utilisée, ainsi que l'évaluation de ses performances dans un milieu de type magasin nous a permis de bien comprendre le fonctionnement du système et identifier ses limites.

Inspiré par cette solution commerciale et par plusieurs publications scientifiques, nous avons conçu une nouvelle technique de localisation. Cette technique, divisée en trois phases, est implémentée sur le matériel «*xArray*». La première phase est une phase de sélection des tags les plus fiables du milieu : ce sont les tags de référence. La deuxième phase consiste à calculer la distance et la position de chacun des tags de référence. Les deux premières phases représentent ensemble une étape d'apprentissage nécessaire pour le bon fonctionnement du système. La troisième phase, est une phase de localisation Temps Réel, qui estime la position d'un tag relativement aux positions des tags de référence. Cette approche à trois phases permet de bénéficier de la simplicité et des faibles coûts d'une technique d'analyse de scène sans être amené à déployer des tags de référence statiques supplémentaires dans le milieu ; ce qui n'est pas possible dans un magasin.

Ensuite, la solution proposée est évaluée afin de trouver le meilleur paramétrage et les points forts et faibles sont identifiés en comparant ses performances à celles de la solution d'Impinj. Cela a démontré une amélioration au niveau de la stabilité et de la précision de la localisation au détriment d'une phase d'apprentissage relativement longue et qui nécessite un paramétrage plus complexe que la solution d'Impinj. Finalement, les limites de la réalisation d'un système de localisation en "3 dimensions" avec des antennes installées au plafond sont discutées et une première approximation est proposée pour fournir une information de précision modeste sur la hauteur d'un produit tagué.

Conclusion générale et perspectives

Ce document décrit des travaux effectués pendant trois ans qui concernent l'amélioration globale des performances d'un système utilisant la technologie RFID dans un milieu réel. L'objectif final de ces travaux est de proposer un système de localisation basé sur la technologie RFID passive. Pour aborder cette problématique, trois axes de recherche principaux sont définis : autour du tag, du système de lecture et de la problématique de la localisation.

Les problématiques liées à la lecture d'un tag RFID passif sont traitées en chapitre 3 en se concentrant particulièrement sur la conception d'antennes et sur la stabilisation des performances dans un environnement réel lorsque les tags sont placés à proximité les uns des autres. Dans le chapitre 4, les méthodes de caractérisation classiques des tags RFID sont mises en question et une nouvelle méthode d'évaluation des performances effectuée directement dans un milieu réel de type magasin est proposée. Cette méthode se base sur l'analyse des réponses des tags afin de les grouper en différentes catégories de performances par le biais d'un algorithme d'apprentissage automatique. Puisque la proximité n'est pas le seul facteur impactant les performances d'un tag dans un milieu réel, cette nouvelle méthode de caractérisation permet le contrôle continu des performances afin d'intervenir en temps réel et de trouver des solutions.

Dans le chapitre 5, les possibilités d'optimisation des solutions de lecture RFID existantes sont étudiées. En profitant de l'état de l'art, de l'expérimentation, du retour d'expérience, et de la méthode de caractérisation proposée en chapitre 4, une nouvelle approche est étudiée. Elle envisage de rendre le système de lecture intelligent ; ceci signifie, qu'il serait capable d'adapter son paramétrage aux divers facteurs du milieu. La première phase d'étude portait sur les divers paramètres de configuration d'un lecteur RFID et leur influence sur la performance globale du système. En deuxième phase, la génération de configurations aléatoires pendant le temps de lecture est proposée. Afin de rendre la détection plus efficace encore, une optimisation génétique des configurations des lecteurs en fonction des réponses des tags est proposée. L'algorithme proposé est universel et peut être implémenté sur différents systèmes de lecture pour améliorer leurs performances dans différents contextes.

Enfin, le chapitre 6 traite de la localisation des produits tagués RFID. Une étude générale de la localisation en magasin est faite, suivie par une étude des différentes techniques de localisation pour finir par l'état de l'art de la localisation basée sur la technologie RFID passive. Les différents algorithmes publiés ainsi que les tendances de la recherche sont explorés et une nouvelle solution de localisation est proposée. Le principe de cette solution est de chercher en premier lieu les tags ayant les réponses les plus stables et de calculer leurs positions en utilisant des techniques classiques. En deuxième lieu, les positions des autres tags (moins stables) sont estimées en utilisant l'algorithme «*K-NN*». Grâce à la conception d'un algorithme de localisation autour d'un cas d'usage spécifique, la précision s'élève à 120 cm pour 90% des produits tagués par rapport à une précision de 420 cm

avec un algorithme commercial.

En conclusion, ce travail nous a permis d'analyser les performances d'un système RFID en s'appuyant sur chaque composant afin d'identifier les limitations, les contraintes et les voies d'amélioration. Suite à la compréhension de ces éléments, nous avons proposé des solutions qui répondent aux besoins identifiés. Ces solutions sont compatibles avec les réglementations actuelles et se basent sur la technologie disponible de nos jours et n'ajoute aucun coût supplémentaire sur le matériel. Pour parvenir à relever ces défis, nous avons basé nos travaux sur l'exploitation de la réponse des nombreux tags. Le potentiel significatif des informations apportées par ces données, à côté des autres avantages de la RFID, peuvent permettre le développement de divers cas d'usage surtout de nos jours, où la technologie UHF RFID passive arrive à maturité.

En perspectives, afin de pousser ces optimisations et de les adapter à plusieurs types d'applications qui dépassent le magasin et la grande distribution, nous proposons trois axes de travail correspondant à nos trois axes de recherches.

En premier temps, nous avons montré que le tag, l'élément de base du système, peut être optimisé en fonction de l'application visée. Lorsque l'environnement a moins de variable, cette méthode serait suffisante pour l'amélioration des performances. En surveillant les variations des performances, il est possible d'optimiser ces dimensions pour stabiliser les performances sans aucun coût supplémentaire.

Deuxièmement, concernant la classification et la détection, le potentiel significatif des informations apportées par l'exploitation des réponses des tags en Temps Réel, à côté des autres avantages de la RFID, peuvent permettre le développement de divers cas d'usage surtout de nos jours, où la technologie UHF RFID passive arrive à maturité. Comme la solution de détection proposée a montré, il est possible d'adapter la configuration d'un système en fonction des objectifs de l'application. Il sera possible d'extraire plus d'information et analyser ces données plus profondément en réalisant l'apprentissage et la classification avec des réseaux de neurones en analysant une quantité plus importante de réponses de tags.

Troisièmement, la solution de localisation proposée peut être améliorée ; en premier lieu, il est possible d'utiliser un modèle d'ellipse pour représenter le rayonnement d'une antenne au lieu du cercle afin d'améliorer la précision. Pour remonter les coordonnées en trois dimensions, cela nécessite l'utilisation d'un système antennaire capable de générer un nombre plus important de faisceaux avec une meilleure résolution de balayage des angles d'élévation et d'azimut.

Bibliographie

- [1] Jeremy Landt. The history of rfid. *IEEE potentials*, 24(4) :8–11, 2005.
- [2] History and evolution of RFID technology. In *RFID-A Guide to Radio Frequency Identification*, pages 25–31. John Wiley & Sons, Inc., aug 2006.
- [3] Patrick J Sweeney et al. *RFID for Dummies*. John Wiley & Sons, 2010.
- [4] Kevin Ashton. *How to fly a horse : The secret history of creation, invention, and discovery*. Anchor, 2015.
- [5] Mark Roberti. Why rfid is essential in retail. <https://www.rfidjournal.com/articles/view?16543>, Aout 2017.
- [6] Klaus Finkenzeller. *RFID handbook : fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication*. John Wiley & Sons, 2010.
- [7] Qu'est-ce que le spectre ?, Sep 2018. URL <https://www.anfr.fr/1-anfr/quest-ce-que-le-spectre/>.
- [8] Fonctionnement d'un système rfid. URL <https://www.connectwave.fr/techno-appli-iot/rfid/fonctionnement-dun-systeme-rfid/>.
- [9] Stephanie Paaske, Ashleigh Bauer, Tonianne Moser, and Charlotte Seckman. The benefits and barriers to rfid technology in healthcare. *On-Line Journal of Nursing Informatics*, 21(2), 2017.
- [10] Byoung Nam Lee, Yong-Woon Kim, and Hyoung Jun Kim. Evolution of rfid applications and its implications : Standardization perspective. In *Management of Engineering and Technology, Portland International Center for*, pages 903–910. IEEE, 2007.
- [11] Iso - international organization for standardization, Aug 2018. URL <https://www.iso.org/standard/43458.html>.
- [12] Iso - international organization for standardization, Aug 2018. URL <https://www.iso.org/standard/43459.html>.
- [13] Raghu Das and Peter Harrop. Rfid forecasts, players and opportunities 2016-2026 ; the complete analysis of the global rfid industry. *IDTechEx Report*, 2016.
- [14] EPC Global. Tag data standard. *EPC-global Inc. epglobal@ epglobalinc.*, September 2017.

-
- [15] Sgtn info. URL <https://www.epc-rfid.info/sgtin>.
- [16] Julie Krueger. Omni-channel shoppers : An emerging retail reality, Mar 2015. URL <https://www.thinkwithgoogle.com/marketing-resources/omnichannel/omni-channel-shoppers-an-emerging-retail-reality/>.
- [17] Omni-channel retailing : What is omni-channel commerce, really? URL <https://www.shopify.com/enterprise/omni-channel-retailing-commerce-what>.
- [18] Rebecca Angeles. Rfid technologies : supply-chain applications and implementation issues. *Information systems management*, 22(1) :51–65, 2005.
- [19] Bill Hardgrave. Move to Ohio. <https://www.rfidjournal.com/articles/view?10443>, Février 2013. Dernier accès : 2018-10-22.
- [20] Claire Swedberg. Temporary rfid system tracks flow of shoppers. <https://www.rfidjournal.com/articles/view?10603>, April 2013. Dernier accès : 2018-10-24.
- [21] *Retail systems study 2017*. RISNEWS.COM, 2017.
- [22] Kurt Salmon. Kurt salmon rfid in retail study 2016, October 2016.
- [23] RAIN RFID. Retail market - rain rfid. <https://rainrfid.org/markets/retail-2/>. Dernier accès : 2018-10-23.
- [24] l’Autorité de régulation des communications électroniques et des postes. Décision n° 2014-1263, 2014.
- [25] Rajkishore Nayak, Amanpreet Singh, Rajiv Padhye, and Lijing Wang. Rfid in textile and clothing manufacturing : technology and challenges. *Fashion and Textiles*, 2(1) : 9, 2015.
- [26] NXP. The arrival of rfid in industry 4.0. <https://blog.nxp.com/rf/rf-identification/the-arrival-of-rfid-in-industry-4-0>. Dernier accès : 2018-10-10.
- [27] Judith M Myerson. *RFID in the supply chain : a guide to selection and implementation*. Auerbach Publications, 2006.
- [28] Raghu Das and Peter Harrop. Rfid forecasts, players and opportunities 2017-2027 : Idtechex. <https://www.idtechex.com/research/reports/rfid-forecasts-players-and-opportunities-2017-2027-000546.asp>. Dernier accès : 2018-10-22.
- [29] *2018 RFID BRAND REPORT*. RFID Journal, 2018.
- [30] Soleyman Paydar, Intan Rohani Endut, and Ali Lajevardi. Environmental determinants of rfid adoption in retail supply chain, a binary logistic regression analysis. In *RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2013.
- [31] Susan Flake, Dean Frew, and Danielle Dawson. Increase omnichannel sales using rfid-based inventory accuracy. <https://www.rfidjournal.com/account/login?r=%2Fvideos%2Fview%3F1954>. RFID Journal Webinars.
-

- [32] Pavel V Nikitin and KV Seshagiri Rao. Antennas and propagation in uhf rfid systems. In *RFID, 2008 IEEE International Conference On*, pages 277–288. IEEE, 2008.
- [33] *Indy® R2000 Reader Chip Overview*. Impinj, 7 2015. Rev. 2.0.
- [34] European Telecommunications Standards Institute. Electromagnetic compatibility and radio spectrum matters (erm); short range devices (srd) intended for operation in the bands 865 mhz to 868 mhz and 915 mhz to 921 mhz; guidelines for the installation and commissioning of radio frequency identification (rfid) equipment at uhf, 2014. En ligne; accès le 19 Avril 2018.
- [35] Huiyun Li. Development and implementation of rfid technology, cristina turcu (ed.), isbn : 978-3-902613-54-7, intech, 2009.
- [36] EPC EPCglobal. Radio-frequency identity protocols generation-2 uhf rfid specification for rfid air interface protocol for communications at 860 mhz–960 mhz, version 2.0.1 ratified. *GS1, EPCglobal*, 2015.
- [37] Manar Mohaisen, HeeSeok Yoon, and KyungHi Chang. Radio transmission performance of epcglobal gen-2 rfid system. In *Advanced Communication Technology, 2008. ICACT 2008. 10th International Conference on*, volume 2, pages 1423–1428. IEEE, 2008.
- [38] Sari Linnea Merilampi, Toni Bjorninen, Antti Vuorimaki, Leena Ukkonen, Pekka Ruuskanen, and Lauri Sydanheimo. The effect of conductive ink layer thickness on the functioning of printed uhf rfid antennas. *Proceedings of the IEEE*, 98(9) : 1610–1619, 2010.
- [39] Toni Björninen, Sari Merilampi, Leena Ukkonen, Lauri Sydänheimo, and Pekka Ruuskanen. The effect of fabrication method on passive uhf rfid tag performance. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2009, 2009.
- [40] Anne Blayo and Bernard Pineaux. Printing processes and their potential for rfid printing. In *Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence : innovative context-aware services : usages and technologies*, pages 27–30. ACM, 2005.
- [41] Riccardo Colella, Almudena Rivadeneyra, Alberto J Palma, Luciano Tarricone, Luis Fermin Capitan-Vallvey, Luca Catarinucci, and Jose F Salmeron. Comparison of fabrication techniques for flexible uhf rfid tag antennas [wireless corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 59(5) :159–168, 2017.
- [42] Peter Harrop. Flexo vs gravure. https://www.idtechex.com/research/articles/flexo_vs_gravure_00000465.asp, 2006. Dernier accès : 2018-09-13.
- [43] Technology, sml. <https://www.smartrac-group.com/technology.html>, 2018. Dernier accès : 2018-09-13.
- [44] Yanfang Xu, Luhai Li, Yingkun Ding, and Wenbo Li. Evaluations of the printing qualities of rfid tag’s conducting line. In *Image and Signal Processing (CISP), 2012 5th International Congress on*, pages 1245–1248. IEEE, 2012.

-
- [45] Shuai Shao, Robert J Burkholder, and John L Volakis. Design approach for robust uhf rfid tag antennas mounted on a plurality of dielectric surfaces [antenna designer's notebook]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 56(5) :158–166, 2014.
- [46] Kamron Sockolov and Dean Arakaki. Uhf rfid antenna impedance matching techniques. In *Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017 IEEE International Symposium on*, pages 2433–2434. IEEE, 2017.
- [47] MA Ennasar, M Essaaidi, I Aznabet, and O EL Mrabet. A uhf rfid tag antenna with improved bandwidth. In *Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2016 5th International Conference on*, pages 465–467. IEEE, 2016.
- [48] Mahreen Riaz, Grzegorz Rymar, Mohammad Ghavami, and Sandra Dudley. A novel design of uhf rfid passive tag antenna targeting smart cards limited area. In *Consumer Electronics (ICCE), 2018 IEEE International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2018.
- [49] Xiaping Yu, Jian Dong, Yu Hu, Huabin Ren, Donglin Li, Jingwen Zhou, and Kongliang Rong. Design of a bending dipole rfid antenna at uhf band. In *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2016 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1075–1077. IEEE, 2016.
- [50] *Ucode 7 Product Datasheet*. NXP, 2017. Rev. 3.9.
- [51] *Ucode G2iL and G2iL+ Product Datasheet*. NXP, 2014. Rev. 4.4.
- [52] *Ucode 8/8m Product Datasheet*. NXP, 2017. Rev. 3.1.
- [53] Benjamin D Braaten and Robert P Scheeler. Design of passive uhf rfid tag antennas using metamaterial-based structures and techniques. In *Radio Frequency Identification Fundamentals and Applications Design Methods and Solutions*. InTech, 2010.
- [54] D Hamzaoui, TP Vuong, F Djahli, and GI Kiani. Metamaterial rfid tag designs for long read range. In *Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015 IEEE International Symposium on*, pages 1764–1765. IEEE, 2015.
- [55] Abed Pour Sohrab, Yi Huang, Muayad Kod, Muaad Hussein, and Paul Carter. Label-type 3d rfid tag mountable on metallic and non-metallic objects. In *Antennas & Propagation Conference (LAPC), 2016 Loughborough*, pages 1–3. IEEE, 2016.
- [56] Ramiro A Ramirez, Eduardo A Rojas-Nastrucci, and Thomas M Weller. Uhf rfid tags for on-/off-metal applications fabricated using additive manufacturing. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16 :1635–1638, 2017.
- [57] Yasumitsu Ban and Manabu Kai. Design of a uhf rfid tag antenna to keep the read range constant between on and off metal. In *Antennas and Propagation (APSURSI), 2016 IEEE International Symposium on*, pages 943–944. IEEE, 2016.
- [58] YJ Zhang, J Zhang, GC Wan, and MS Tong. Design of miniaturized uhf rfid tag antenna attached to dielectric and metallic objects. In *Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015 IEEE International Symposium on*, pages 1578–1579. IEEE, 2015.
-

- [59] Galatee Ginetet, Nicolas Brechet, Jeremie Torres, Elham Moradi, Leena Ukkonen, Toni Bjorninen, and Johanna Virkki. Embroidered antenna-microchip interconnections and contour antennas in passive uhf rfid textile tags. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16 :1205–1208, 2017.
- [60] Xiaochen Chen, Han He, Liquan Chen, Pasi Raunonen, Leena Ukkonen, and Johanna Virkki. Two-part stretchable passive uhf rfid textile tags. In *Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS), 2017*, pages 3318–3321. IEEE, 2017.
- [61] Sitthichai Dentre, Pitchanun Wongsiritorn, and Pornanong Pongpaibool. Graphene-based tag antenna for universal uhf-rfid system using modified single loop-matching techniques. In *Antennas and Propagation (ISAP), 2017 International Symposium on*, pages 1–2. IEEE, 2017.
- [62] Han He, Mitra Akbari, Xiaochen Chen, Amy Nommeots-Nomm, Liquan Chen, Leena Ukkonen, and Johanna Virkki. Fabrication and performance evaluation of 3d-printed graphene passive uhf rfid tags on cardboard. In *Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS), 2017*, pages 3322–3325. IEEE, 2017.
- [63] Sayeed Sajal and Benjamin D Braaten. A conformal antenna on a passive uhf rfid tag using 97% carbon content graphene-based conductors and paper substrates. In *Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017 IEEE International Symposium on*, pages 2427–2428. IEEE, 2017.
- [64] Lukas W Mayer and Arpad L Scholtz. Sensitivity and impedance measurements on uhf rfid transponder chips. In *Proceedings of the second international EURASIP workshop on RFID technology, Budapest*, 2008.
- [65] Lingting Shan and Huaibao Xiao. Impedance characterization of rfid tag antennas and application in conformal tag antenna. In *Environmental Electromagnetics (CEEM), 2015 7th Asia-Pacific Conference on*, pages 140–142. IEEE, 2015.
- [66] Thomas Bauernfeind, Werner Renhart, Piergiorgio Alotto, and Oszkar Biro. UHF RFID antenna impedance characterization : Numerical simulation of interconnection effects on the antenna impedance. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(6) :1–4, jun 2017.
- [67] Pavel V Nikitin, KV Seshagiri Rao, Sander F Lam, Vijay Pillai, Rene Martinez, and Harley Heinrich. Power reflection coefficient analysis for complex impedances in rfid tag design. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(9) : 2721–2725, 2005.
- [68] Darmindra D. Arumugam, Daniel W. Engels, and Marlin H. Mickle. An analysis of surface/wire currents and charges of commercially available passive UHF RFID tag antennas. In *2009 IEEE Radio and Wireless Symposium*. IEEE, jan 2009.
- [69] AC de Souza, TP Vuong, Y Duroc, and A Luce. Normalized power calculation to uhf rfid passive tags characterization. In *RFID, 2014 IEEE Brasil*, pages 54–56. IEEE, 2014.

-
- [70] Pavel Nikitin, K. Sanmukh Rao, and Sander Lam Intermec. Uhf rfid tag characterization : Overview and state-ofthe-art. 2012.
- [71] Luis F. Lagunes-Aranda, Andrea G. Martinez-Lopez, J. Martínez-Castillo, Luis E. Carrion-Rivera, Ruben A. Gonzalez-Benitez, and Jose L. Garcia Gervacio. Testbed module for uhf passive rfid tags. *2016 IEEE International Engineering Summit, II Cumbre Internacional de las Ingenierias (IE-Summit)*, pages 1–6, 2016.
- [72] L. Koné, N. Rolland, and R. Kassi. UHF RFID tags backscattered power measurement in reverberation chamber. *Electronics Letters*, 51(13) :972–973, jun 2015. doi : 10.1049/el.2015.1008. URL <https://doi.org/10.1049/e1.2015.1008>.
- [73] Riccardo Colella, Luca Catarinucci, Paolo Coppola, and Luciano Tarricone. Measurement platform for electromagnetic characterization and performance evaluation of uhf rfid tags. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65 : 905–914, 2016.
- [74] Max0301rcio Fex0301lix, Frederico Pereira, Vinicius Ferro, Everson Martins, and Ivando Severino Diniz. Using labview to automate rfid tag tests : comparison between implemented system and voyantic test system. *2015 IEEE Brasil RFID*, pages 1–5, 2015.
- [75] Luiz Renato Costa. Uhf rfid tags in a controlled environment : anechoic chamber case. *2015 IEEE Brasil RFID*, pages 1–5, 2015.
- [76] Rattapong Suwalak and Chuwong Phongcharoenpanich. Impedance effect of elliptical curved surface on RFID tag performances. In *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. IEEE, oct 2017. doi : 10.1109/isanp.2017.8229058. URL <https://doi.org/10.1109/isanp.2017.8229058>.
- [77] Wenyang Li, Wenhai Zhang, Kam-Weng Tam, Chun Pong Chiang, and Ka Hing Chiang. On the measurements of liquid sensing based on UHF RFID. In *2016 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*. IEEE, sep 2016. doi : 10.1109/rfid-ta.2016.7750737. URL <https://doi.org/10.1109/rfid-ta.2016.7750737>.
- [78] Kirsi Saarinen, Laura Frisk, and Leena Ukkonen. Effects of different combinations of environmental tests on the reliability of uhf rfid.
- [79] Qi Zhang, Michael J. Crisp, Ian H. White, and Richard V. Penty. Power margin reduction in linear passive uhf rfid tag arrays. *2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA)*, pages 306–311, 2014.
- [80] Qi Zhang, Michael Crisp, Ian H. White, and Richard V. Penty. Power margin reduction in linear passive UHF RFID tag arrays. In *2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA)*. IEEE, sep 2014.
- [81] Hiroyuki Yojima, Yu Tanaka, Yohtaro Umeda, Osamu Takyu, Machiko Nakayama, and Kazunari Kodama. Analysis of read range for UHF passive RFID tags in close proximity with dynamic impedance measurement of tag ICs. In *2011 IEEE Radio and Wireless Symposium*. IEEE, jan 2011.
-

- [82] Qi Zhang, Michael. J. Crisp, Richard V. Penty, and Ian H. White. Reduction of proximity effects on UHF passive RFID systems by using tags with polarization diversity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(5) :2264–2271, may 2015.
- [83] Jong-Wook Lee and Bomson Lee. A long-range uhf-band passive rfid tag ic based on high- q design approach. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 56(7) : 2308–2316, 2009.
- [84] Nagaveni Vamsi, Pramod Kaddi, Ashudeb Dutta, and Shiv Govind Singh. A- 30 dbm sensitive ultra low power rf energy harvesting front end with an efficiency of 70.1% at- 22 dbm. In *System-on-Chip Conference (SOCC), 2015 28th IEEE International*, pages 328–332. IEEE, 2015.
- [85] Jiayi Wang, Yongan Zheng, Shi Wang, Maoqiang Liu, and Huailin Liao. Human body channel energy harvesting scheme with- 22.5 dbm sensitivity 25.87% efficiency threshold-compensated rectifier. In *Circuits and Systems (ISCAS), 2015 IEEE International Symposium on*, pages 89–92. IEEE, 2015.
- [86] Lukas Zöscher, Peter Herkess, Jasmin Grosinger, Ulrich Muehlmann, Dominik Amschl, Hubert Watzinger, and Wolfgang Bösch. Threshold voltage compensated rf-dc power converters in a 40 nm cmos technology. In *Microelectronics (Austrochip), 2016 Austrochip Workshop on*, pages 30–34. IEEE, 2016.
- [87] A Vaz, H Solar, I Rebollo, I Gutierrez, and R Berenguer. Long range, low power uhf rfid analog front-end suitable for batteryless wireless sensors. In *Microwave Symposium Digest (MTT), 2010 IEEE MTT-S International*, pages 836–839. IEEE, 2010.
- [88] Yi Miao, Jiancheng Li, Hongyi Wang, Lei Cai, Yu Xiao, Li Yang, and Miaoxia Zheng. Adjustable duty cycle ask demodulator for passive uhf rfid tags. In *Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), 2016 IEEE International Conference on*, pages 259–262. IEEE, 2016.
- [89] HM Chen, SA Yeh, YF Lin, SC Pan, and SW Chang. High chip reactance matching for ultra-high-frequency radio frequency identification tag antenna design. *IET microwaves, antennas & propagation*, 6(5) :577–582, 2012.
- [90] J-W Lee and B Lee. Design of high- q uhf radio-frequency identification tag antennas for an increased read range. *IET microwaves, antennas & propagation*, 2(7) :711–717, 2008.
- [91] Gary Seigneuret. *Analyse et Optimisation de télé-alimentation pour systèmes RFID UHF*. PhD thesis, Aix Marseille 1, 2011.
- [92] Onur Kazanc, Franco Maloberti, and Catherine Dehollain. High- q adaptive matching network for remote powering of uhf rfids and wireless sensor systems. In *Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), 2013 IEEE Topical Conference on*, pages 10–12. Ieee, 2013.

-
- [93] Chong Huang, Xiaochen Gu, Lei Cai, Cong Li, Dun Yan, Bingbing Zhang, Qin Qin, Hongyi Wang, and Jiancheng Li. An adaptive q factor tuning and input impedance matching method for ultra-low power front end of uhf rfid tag. In *ASIC (ASICON), 2013 IEEE 10th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2013.
- [94] Paulo MM Silva, Fernando Rangel de Sousa, and Calvin Plett. On-chip automatic lc tuner for rfid tags based on negative resistances. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II : Express Briefs*, 2018.
- [95] Gary Seigneuret, Emmanuel Bergeret, and Philippe Pannier. Auto-tuning in passive uhf rfid tags. In *NEWCAS Conference (NEWCAS), 2010 8th IEEE International*, pages 181–184. IEEE, 2010.
- [96] *U8/8m Product Data*. Impinj, 2016. Version 3.0.
- [97] *Monza R6 Tag Chip Datasheet*. Impinj, 2017. Version 5.0.
- [98] *Monza R6-A Tag Chip Datasheet*. Impinj, 2017. Version 2.0.
- [99] *Monza R6-P Tag Chip Datasheet*. Impinj, 2017. Version 4.0.
- [100] *Monza S6-C Tag Chip Datasheet*. Impinj, 2017. Version 3.0.
- [101] Shailendra Srinivas, Jay Kuhn, Ronald A Oliver, John D Hyde, and Christopher J Diorio. Self tuning rfid tags, May 24 2016. US Patent 9,349,090.
- [102] John D Hyde, Harley K Heinrich, Charles Peach, Christopher J Diorio, and Theron Stanford. Rectifier biasing for self-tuning rfid tags, May 9 2017. US Patent 9,646,186.
- [103] John D Hyde, Shailendra Srinivas, Jay Kuhn, Ronald A Oliver, Harley Heinrich, Theron Stanford, and Christopher J Diorio. Rfid tag clock frequency reduction during tuning, June 19 2018. US Patent App. 14/820,502.
- [104] Theron Stanford, Charles JT Peach, Jay A Kuhn, Harley K Heinrich, John D Hyde, Christopher J Diorio, and Alberto Pesavento. Impedance-change mitigation in rfid tags, February 6 2018. US Patent 9,886,658.
- [105] Ian James Forster. Systems and methods for reading large populations of rfid tags, September 19 2017. US Patent 9,767,402.
- [106] Gianfranco Andia Vera, Shankar D Nawale, Yvan Duroc, and Smail Tedjini. Read range enhancement by harmonic energy harvesting in passive uhf rfid. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 25(9) :627–629, 2015.
- [107] Gianfranco Andia Vera, Yvan Duroc, and Smail Tedjini. Third harmonic exploitation in passive uhf rfid. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(9) :2991–3004, 2015.
- [108] Yunfei Ma and Edwin C Kan. Multi-path interference reduction in passive ntl rfid tags. In *Wireless Symposium (IWS), 2013 IEEE International*, pages 1–4. IEEE, 2013.
-

- [109] Shadi Ebrahimi-Asl, Mohammad Tayeb Ahmad Ghasr, and Maciej Zawodniok. Application of low scattering antennas to rfid networks. In *RFID (RFID), 2016 IEEE International Conference on*, pages 1–7. IEEE, 2016.
- [110] Hannes Reinisch, Martin Wiessflecker, Stefan Gruber, Hartwig Unterassinger, Günter Hofer, Michael Klamminger, Wolfgang Pribyl, and Gerald Holweg. A multi-frequency passive sensing tag with on-chip temperature sensor and off-chip sensor interface using epc hf and uhf rfid technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 46(12) :3075–3088, 2011.
- [111] Riccardo Colella, Luciano Tarricone, and Luca Catarinucci. Spartacus : Self-powered augmented rfid tag for autonomous computing and ubiquitous sensing. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 63(5) :2272–2281, 2015.
- [112] Tao Yang, Junhui Xiang, Yu Wang, Xi Tan, Junyu Wang, Na Yan, Lirong Zheng, and Hao Min. An active tag using carrier recovery circuit for epc gen2 passive uhf rfid systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018.
- [113] Jae-Young Jung, Hyunseok Kim, Heyung-Sub Lee, and Kyung-Whan Yeom. An uhf rfid tag with long read range. In *Microwave Conference, 2009. EuMC 2009. European*, pages 1113–1116. IEEE, 2009.
- [114] Alanson P Sample, Jeff Braun, Aaron Parks, and Joshua R Smith. Photovoltaic enhanced uhf rfid tag antennas for dual purpose energy harvesting. In *RFID (RFID), 2011 IEEE International Conference on*, pages 146–153. IEEE, 2011.
- [115] Abdulhadi Ebrahim Abdulhadi and Ramesh Abhari. Multiport uhf rfid-tag antenna for enhanced energy harvesting of self-powered wireless sensors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(2) :801–808, 2016.
- [116] Gary Seigneuret, Emmanuel Bergeret, Christophe Moreaux, Thibaut Deleruyelle, and Philippe Pannier. Influence of multiantenna tag on the read range of a passive uhf rfid system. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10 :1174–1177, 2011.
- [117] Yassine Gmih, Younes El Hachimi, El Mostafa Makroum, and Abdelmajid Farchi. A small printed antenna with circular slot for european uhf rfid reader devices. In *Optimization and Applications (ICOA), 2018 4th International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [118] Rong Cao and Shun-Chuan Yu. Wideband compact cpw-fed circularly polarized antenna for universal uhf rfid reader. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(9) :4148–4151, 2015.
- [119] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory Analysis and design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [120] Gaozhi Xiao, Pouya Aflaki, Stephen Lang, Zhiyi Zhang, Ye Tao, Christophe Py, Philip Lu, Cedric Martin, and Shoude Change. Printed uhf rfid reader antennas for potential retail applications. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2(1) : 31–37, 2018.

-
- [121] Newave rfid smart shelves. <http://www.newaverfid.com/RFID-Solutions/Smart-Shelf>, 2018. Dernier accès : 2018-07-16.
- [122] Smart shelves and smart showcases : Advanshelf. <https://www.keonn.com/systems/view-all-2/smart-showcases.html>, 2018. Dernier accès : 2018-07-16.
- [123] A Boursianis, A Theopoulos, T Samaras, AC Polycarpou, and JN Sahalos. Uhf rfid antenna for etsi and fcc reading applications. In *Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST), 2016 5th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2016.
- [124] Andrea Michel, Marcos Rodriguez Pino, and Paolo Nepa. Reconfigurable modular antenna for nf uhf rfid smart point readers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(2) :498–506, 2017.
- [125] Jayaram Kizhekke Pakkathillam, Malathi Kanagasabai, and M Gulam Nabi Alsath. Compact multiservice uhf rfid reader antenna for near-field and far-field operations. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16 :149–152, 2017.
- [126] Jingming Zheng, Yang Yang, Xiaoxiang He, Chenyang Mao, Jin Gao, and Chun Zhou. Multiple-port reader antenna with three modes for uhf rfid applications. *Electronics Letters*, 54(5) :264–266, 2018.
- [127] Mossaab Daiki and Etienne Perret. Near-field modular antenna concept with configurable reading area for rfid applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(3) :1015–1025, 2017.
- [128] Pavel Nikitin. Self-reconfigurable rfid reader antenna. In *RFID (RFID), 2017 IEEE International Conference on*, pages 88–95. IEEE, 2017.
- [129] Walter D Burnside, Robert J Burkholder, and Feng-Chi Eddie Tsai. Elongated twin feed line rfid antenna with distributed radiation perturbations, November 15 2011. US Patent 8,058,998.
- [130] Carla R Medeiros, Jorge R Costa, and Carlos A Fernandes. Rfid smart shelf with confined detection volume at uhf. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7 :773–776, 2008.
- [131] Kyosuke Mayama and Yoshinobu Okano. Development of nearby cluttered tags detection unit with uhf-rfid technology. In *Antennas and Propagation (ISAP), 2015 International Symposium*, pages 1–4. IEEE, 2015.
- [132] Cristina Picher, Jaume Anguera Pros, Aurora Andújar Linares, Carles Puente Bardiarda, and Adrián Bujalance Jurado. Concentrated ground plane booster antenna technology for multiband operation in handset devices. *Radioengineering*, 23(4) : 1061–1070, 2014.
- [133] Aurora Andujar, Jaume Anguera, and Carles Puente. Ground plane boosters as a compact antenna technology for wireless handheld devices. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(5) :1668–1677, 2011.
- [134] Jaume Anguera Pros and Aurora Andujar Linares. Multi-structure antenna for multiband operation, July 27 2017. US Patent App. 15/415,557.
-

- [135] Shuai Yang, Nicolas Scirocco, Michael Crisp, Richard V Penty, and Ian H White. Large metal objects as near field uhf rfid antennas. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 1(1) :13–21, 2017.
- [136] Thomas Guthrie Zimmerman. System and method for performing inventory using a mobile inventory robot, April 6 2010. US Patent 7,693,757.
- [137] Isaac Ehrenberg, Christian Floerkemeier, and Sanjay Sarma. Inventory management with an rfid-equipped mobile robot. In *Automation Science and Engineering, 2007. CASE 2007. IEEE International Conference on*, pages 1020–1026. IEEE, 2007.
- [138] Jian Zhang, Yibo Lyu, Thaddeus Roppel, Justin Patton, and CP Senthilkumar. Mobile robot for retail inventory using rfid. In *Industrial Technology (ICIT), 2016 IEEE International Conference on*, pages 101–106. IEEE, 2016.
- [139] Marc Morenza-Cinos, Victor Casamayor-Pujol, Jordi Soler-Busquets, José Luis Sanz, Roberto Guzmán, and Rafael Pous. Development of an rfid inventory robot (advanrobot). In *Robot Operating System (ROS)*, pages 387–417. Springer, 2017.
- [140] Prabakar Parthiban, Boon-Chong Seet, and Xue Jun Li. Low-cost low-profile uhf rfid reader antenna with reconfigurable beams and polarizations. In *RFID (RFID), 2017 IEEE International Conference on*, pages 81–87. IEEE, 2017.
- [141] Xuan Yi, Laure Huitema, and Hang Wong. Polarization and pattern reconfigurable cuboid quadrifilar helical antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018.
- [142] Jirasin Tanglukchai, Suramate Chalermwisutkul, and Alongkorn Namahoot. A circularly polarized uhf rfid reader antenna array with seven elements for indoor object identification. In *Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI-NCON), 2018 International ECTI Northern Section Conference on*, pages 48–53. IEEE, 2018.
- [143] Flávia C Costa, Ricardo T Yoshioka, Eduardo R Lima, and Fernando I Leite. T-matching variation effect of rfid tag antenna for 915mhz. In *RFID, 2014 IEEE Brasil*, pages 7–9. IEEE, 2014.
- [144] Gaetano Marrocco. The art of uhf rfid antenna design : Impedance-matching and size-reduction techniques. *IEEE antennas and propagation magazine*, 50(1), 2008.
- [145] Hind Raihani, Ali Benbassou, Mohammed El Ghzaoui, and Jamal Belkaid. Performance evaluation of a passive uhf rfid tag antenna using the embedded t-match structure. In *Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), 2017 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [146] Tajchai Pumpoung, Pitchanun Wongsiritorn, Chuwong Phongcharoenpanich, and Sompol Kosulvit. Characteristics of a meander line tag antenna with t-loop structure for the passive uhf rfid applications. In *Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC), 2012 IEEE International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2012.
- [147] Michael T Reich and Cherish Bauer-Reich. Uhf rfid impedance matching : When is a t-match not a t-match? In *RFID (IEEE RFID), 2014 IEEE International Conference on*, pages 23–30. IEEE, 2014.

-
- [148] Smartrac n.v. web g2il. <https://www.smartrac-group.com/web.html>, 2018. Dernier accès : 2018-09-01.
- [149] Cst microwave studio. <https://www.cst.com/products/cstmws>, 2018. Dernier accès : 2018-09-01.
- [150] Johan Sidén and Hans-Erik Nilsson. Rfid antennas—possibilities and limitations. In *Radio frequency identification fundamentals and applications design methods and solutions*. InTech, 2010.
- [151] Kirsi Saarinen, Laura Frisk, and Leena Ukkonen. Effects of different combinations of environmental tests on the reliability of uhf rfid tags. In *Microelectronics and Packaging Conference (EMPC), 2011 18th European*, pages 1–5. IEEE, 2011.
- [152] EPC Global. Tag performance parameters and test methods. *EPC-global Inc. epGLOBAL@epGLOBALinc.org, version*, 2008.
- [153] Florin St C Mustata and Adriana Mustata. Dielectric behaviour of some woven fabrics on the basis of natural cellulosic fibers. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 2014.
- [154] Jae Sung Choi, Mingon Kang, Ramez Elmasri, and Daniel W Engels. Investigation of impact factors for various performances of passive uhf rfid system. In *RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 152–159. IEEE, 2011.
- [155] Qi Zhang, Michael James Crisp, Ian Hugh White, and Richard Vincent Penty. Power margin reduction in linear passive uhf rfid tag arrays. 2014.
- [156] Yu Tanaka, Yohtaro Umeda, Osamu Takyu, Machiko Nakayama, and Kazunari Kodama. Change of read range for uhf passive rfid tags in close proximity. In *RFID, 2009 IEEE International Conference on*, pages 338–345. IEEE, 2009.
- [157] Hans Gregory Schantz. Near field propagation law & a novel fundamental limit to antenna gain versus size. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*, volume 3, pages 237–240. IEEE, 2005.
- [158] Inductance Calculations. Fw grover. *Van Nostrand Co., New York, NY*, 1946.
- [159] Yuhua Cheng and Yaming Shu. A new analytical calculation of the mutual inductance of the coaxial spiral rectangular coils. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50 (4) :1–6, 2014.
- [160] R Sharpshkar. Ultra low power bioelectronics : Fundamentals, biomedical applications, and bio-inspired system, 2010.
- [161] Gaetano Marrocco, Emidio Di Giampaolo, and R. Aliberti. Estimation of uhf rfid reading regions in real environments. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 51, 2009.
- [162] Wei Fu and Jianguo Ma. Propagation model and performance analysis for short range microwave passive rfid systems. *2009 Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and Systems*, pages 228–231, 2009.
-

- [163] Rui Li, Han Ding, Jinsong Han, Shaoping Li, Xing Wang, Hui Liu, and Jizhong Zhao. Nowhere to hide : An empirical study on hidden uhf rfid tags. *2014 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, pages 608–615, 2014.
- [164] Bing Li, Yigang He, Lei Zuo, and Ying Long. Metric of the application environment impact to the passive uhf rfid system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63 :2387–2395, 2014.
- [165] Lei Xie, Qun Li, Chuyu Wang, Xi Chen, and Sanglu Lu. Exploring the gap between ideal and reality : An experimental study on continuous scanning with mobile reader in rfid systems. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 14 :2272–2285, 2015.
- [166] Arc benchmarking equipment. <https://rfid.auburn.edu/doc/BenchmarkingEquipment.pdf>, 2014. Version 1.27, Dernier accès : 2018-10-01.
- [167] Arc benchmarking methodology. <https://rfid.auburn.edu/doc/BenchmarkingMethodology.pdf>, 2014. Version 1.40, Dernier accès : 2018-10-01.
- [168] Tagged category performance specification category a. <https://rfid.auburn.edu/doc/ARCInlayRequirementSpecificationA.pdf>, 2014. Version 1.3, Dernier accès : 2018-10-01.
- [169] Tagged category performance specification category b. <https://rfid.auburn.edu/doc/ARCInlayRequirementSpecificationB.pdf>, 2014. Version 1.3, Dernier accès : 2018-10-01.
- [170] GS1. Tagged-item performance protocol (tipp) tagged item grading : Testing methodology guideline, 2017.
- [171] *M6e Hardware Guide*. ThingMagic, 9 2013. Rev A.
- [172] *Mercury API Programmer’s Guide*. ThingMagic, 1 2011. Rev A.
- [173] Bill Hardgrave. The truth about high inventory accuracy. <https://www.rfidjournal.com/articles/view?14092>, 2016. Dernier accès : 2018-10-03.
- [174] James McCaffrey. *Machine Learning Using C# Succinctly*. Syncfusion Inc., 2014.
- [175] Wikipedia. Silhouette (clustering), 2018. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Silhouette_\(clustering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Silhouette_(clustering)). Dernier accès : 2018-10-04.
- [176] Daniel G Kuester, David R Novotny, and Jeffrey R Guerrieri. Forward and reverse link constraints in uhf rfid with passive tags. In *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 680–685. IEEE, 2010.
- [177] Pavel V Nikitin, KV Seshagiri Rao, Rene Martinez, and Sander F Lam. Sensitivity and impedance measurements of uhf rfid chips. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 57(5) :1297–1302, 2009.

-
- [178] Abdelmoula Bekkali, Sicheng Zou, Abdullah Kadri, and Richard Penty. Impact of reader-to-tag interference and forward link fading on rfid system performance. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*, pages 317–322. IEEE, 2014.
- [179] Pavel V Nikitin and KVS Rao. Performance limitations of passive uhf rfid systems. In *Antennas and Propagation Society International Symposium 2006, IEEE*, pages 1011–1014. IEEE, 2006.
- [180] G Marrocco, E Di Giampaolo, and R Aliberti. Estimation of uhf rfid reading regions in real environments. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 51(6), 2009.
- [181] Antonio Lazaro, David Girbau, and David Salinas. Radio link budgets for uhf rfid on multipath environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(4) :1241–1251, 2009.
- [182] Le Ye, Huailin Liao, Fei Song, Jiang Chen, Chen Li, Jinshu Zhao, Ruiqiang Liu, Chuan Wang, Congyin Shi, Junhua Liu, et al. A single-chip cmos uhf rfid reader transceiver for chinese mobile applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 45(7) :1316–1329, 2010.
- [183] Ickjin Kwon, Yunseong Eo, Heemun Bang, Kyudon Choi, Sangyoon Jeon, Sungjae Jung, Donghyun Lee, and Heungbae Lee. A single-chip cmos transceiver for uhf mobile rfid reader. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 43(3) :729–738, 2008.
- [184] Khanh Nguyen Tuan and PM Cuong Huynh. A 180-nm cmos rf transmitter for uhf rfid reader. In *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2015 International Conference on*, pages 254–257. IEEE, 2015.
- [185] Peng Bai, Yingzeng Yin, and Xi Yang. A novel rx-tx front-ends for passive rfid reader with high isolation. In *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2007 International Symposium on*, pages 332–335. IEEE, 2007.
- [186] GS EPCglobal. Regulatory status for using rfid in the epc gen 2 band (860 to 960 mhz) of the uhf spectrum. August 2018.
- [187] Scott Chiu, Issy Kipnis, Marc Loyer, Jan Rapp, David Westberg, Jonas Johansson, and Peter Johansson. A 900 mhz uhf rfid reader transceiver ic. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 42(12) :2822–2833, 2007.
- [188] Pradeep Basappa Khannur, Xuesong Chen, Dan Lei Yan, Dan Shen, Bin Zhao, M Kumarasamy Raja, Ye Wu, Rendra Sindunata, Wooi Gan Yeoh, and Rajinder Singh. A universal uhf rfid reader ic in 0.18- μ m cmos technology. *IEEE Journal of solid-state circuits*, 43(5) :1146–1155, 2008.
- [189] Wang Yao, Wen Guangjun, Mao Wei, He Yanli, and Zhu Xueyong. Design of a passive uhf rfid tag for the iso18000-6c protocol. *Journal of Semiconductors*, 32(5) : 055009, 2011.
-

- [190] Changming Ma, Chun Zhang, and Zhihua Wang. A low-power ac/dc rectifier for passive uhf rfid transponders. In *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2007 International Symposium on*, pages 309–314. IEEE, 2007.
- [191] Wenxu Zhao, Kirti Bhanushali, and Paul Franzon. Design of a rectifier-free uhf gen-2 compatible rfid tag using rf-only logic. In *RFID (RFID), 2016 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [192] Udo Karthaus and Martin Fischer. Fully integrated passive uhf rfid transponder ic with 16.7- μ w minimum rf input power. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 38(10) :1602–1608, 2003.
- [193] Pavel V Nikitin and KVS Rao. Measurement of backscattering from rfid tags. In *Proceedings of Antennas Measurement Techniques Association Symposium*, pages 425–443, 2005.
- [194] Johannes G Schulze and Solon J Spiegel. Analysis of a passive uhf rfid tag analog front-end consuming 1 μ a compliant with the epcglobal class1 gen2 standard. In *Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2012 IEEE 27th Convention of*, pages 1–5. IEEE, 2012.
- [195] Damien Jausseran, Emmanuel Bergeret, Jean Gaubert, Christophe Moreaux, and Gary Seigneuret. Adaptive uhf rfid analog front end for communication range improvement. In *New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), 2016 14th IEEE International*, pages 1–4. IEEE, 2016.
- [196] M Zahra’a and Haider M AlSabbagh. Limitations of forward and return links in uhf rfid with passive tags. *Int. J. Eng. Trends Technol*, 5 :238–242, 2013.
- [197] Liang Ma, Lu Wang, Yang Yang, and Hongjun Wang. Test method for uhf rfid readers in dense environment. In *Control Conference (CCC), 2017 36th Chinese*, pages 9025–9029. IEEE, 2017.
- [198] Zhonghua Li, Jianming Li, Chunhui He, Chengpei Tang, and Jieying Zhou. Rfid reader-to-reader collision avoidance model with multiple-density tag distribution solved by artificial immune network optimization. *Applied Soft Computing*, 30 : 249–264, 2015.
- [199] Kin Seong Leong, Mun Leng Ng, and Peter H Cole. The reader collision problem in rfid systems. In *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2005. MAPE 2005. IEEE International Symposium on*, volume 1, pages 658–661. IEEE, 2005.
- [200] Rasmus Krigslund, Petar Popovski, Gert F Pedersen, and Kim Olesen. Measuring the interference at an rfid tag : Where does it have an impact ? In *RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 264–271. IEEE, 2011.
- [201] Dheeraj K Klair, Kwan-Wu Chin, and Raad Raad. A survey and tutorial of rfid anti-collision protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(3) :400–421, 2010.

-
- [202] Renato Ferrero, Filippo Gandino, Bartolomeo Montrucchio, and Maurizio Rebaudengo. Experimental investigation on the interference between uhf rfid and gsm. In *RFID Technology (EURFID), 2015 International EURASIP Workshop on*, pages 140–143. IEEE, 2015.
- [203] Pavel V Nikitin and KVS Rao. Harmonic scattering from passive uhf rfid tags. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. APSURSI'09. IEEE*, pages 1–4. IEEE, 2009.
- [204] Wang Yong and Liu Qing. Research on uhf rfid wireless channel. In *Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2016 Sixth International Conference on*, pages 752–755. IEEE, 2016.
- [205] Abdelmoula Bekkali, Sicheng Zou, Abdullah Kadri, and Richard Penty. Detection probability of passive rfid systems under cascaded rician and rayleigh fading channel. In *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference; Proceedings of*, pages 1–6. VDE, 2014.
- [206] Abdelmoula Bekkali, Sicheng Zou, Abdullah Kadri, Michael Crisp, and Richard V Penty. Performance analysis of passive uhf rfid systems under cascaded fading channels and interference effects. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(3) :1421–1433, 2015.
- [207] Yan Gao, Yunfei Chen, and Abdelmoula Bekkali. Performance of passive uhf rfid in cascaded correlated generalized rician fading. *IEEE Communications Letters*, 20(4) :660–663, 2016.
- [208] CH Loo, AZ Elsherbeni, F Yang, and D Kajfez. Experimental and simulation investigation of rfid blind spots. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 23(5-6) :747–760, 2009.
- [209] Antonis G Dimitriou, Aggelos Bletsas, Anastasis C Polycarpou, and John N Sahalos. Theoretical findings and measurements on planning a uhf rfid system inside a room. *Radioengineering*, 20(2), 2011.
- [210] Sithamparanathan Sabesan, Michael Crisp, Richard V Penty, and Ian H White. An error free passive uhf rfid system using a new form of wireless signal distribution. In *RFID (RFID), 2012 IEEE International Conference on*, pages 58–65. IEEE, 2012.
- [211] Pascal Djiknavorian. Mimo pour les nuls. *Laboratoire de Radio télécommunications et du Signal Université LAVAL, édition révisé Janvier*, 2007.
- [212] Sicheng Zou, Michael James Crisp, Sithamparanathan Sabesan, Abdullah Kadri, Richard Vincent Penty, and Ian Hugh White. An optimization model for antenna selection and deployment in single and multi-cell rfid systems. *IEEE International Conference on RFID Technology and Applications*, 2015.
- [213] Sithamparanathan Sabesan, Michael J Crisp, Richard V Penty, and Ian H White. Wide area passive uhf rfid system using antenna diversity combined with phase and frequency hopping. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(2) : 878–888, 2014.
-

- [214] Sithamparanathan Sabesan, Michael Crisp, Richard Penty, and Ian H White. Rfid tag interrogation systems, July 5 2016. US Patent 9,384,376.
- [215] Vijay Pillai, Pavel Nikitin, et al. Phase hopping to reduce interference and improve radio frequency identification (rfid) tag throughput, May 28 2013. US Patent 8,451,094.
- [216] RV Penty, MJ Crisp, S Sabesan, and IH White. Radio over fibre enabled sensing and communications system for in building. In *Networks and Optical Communications (NOC), 2011 16th European Conference on*, pages 8–11. IEEE, 2011.
- [217] Sithamparanathan Sabesan, Michael Crisp, Richard V Penty, and Ian H White. Passive uhf rfid interrogation system using wireless rfid repeater nodes. In *RFID (RFID), 2013 IEEE International Conference on*, pages 136–143. IEEE, 2013.
- [218] Wang-Sang Lee, Seung-Tae Khang, Won-Seok Lee, Hyun-Sung Tae, and Jong-Won Yu. Wide-coverage array antenna using a dual-beam switching for uhf rfid applications. In *IEEE RFID 2013*, pages 36–41. IEEE, 2013.
- [219] Pavel Nikitin, Venkata Kodukula, et al. Method and apparatus to increase the range of rfid systems, May 15 2008. US Patent App. 11/558,339.
- [220] Ramin Sadr, John Gevargiz, Robert Lee, Majid Manteghi, Gordon Oliver, Mike Colender, Christopher Jones, and Hasan Syed. Rfid systems using distributed exciter network, March 12 2013. US Patent 8,395,482.
- [221] Jun-Seok Park, Jin-Woo Jung, Si-Young Ahn, Hyoung-Hwan Roh, Ha-Ryoung Oh, Yeung-Rak Seong, Yoon-Deock Lee, and Kyoung Choi. Extending the interrogation range of a passive uhf rfid system with an external continuous wave transmitter. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 59(8) :2191–2197, 2010.
- [222] Hsin-Chin Liu, Yung-Ting Chen, and Wen-Shin Tzeng. A multi-carrier uhf passive rfid system. In *null*, page 21. IEEE, 2007.
- [223] Hsin-Chin Liu, Yi-Fan Chen, and Yung-Ting Chen. A frequency diverse gen2 rfid system with isolated continuous wave emitters. *Journal of Network*, 2(5) :54–60, 2007.
- [224] Hsin-Chin Liu and Jhen-Peng Ciou. Performance analysis of multi-carrier rfid systems. In *Performance Evaluation of Computer & Telecommunication Systems, 2009. SPECTS 2009. International Symposium on*, volume 41, pages 112–116. IEEE, 2009.
- [225] Hisanori Matsumoto and Ken Takei. An experimental study of passive uhf rfid system with longer communication range. In *Microwave Conference, 2007. APMC 2007. Asia-Pacific*, pages 1–4. IEEE, 2007.
- [226] Peter Kuhn, Philip Schmidt, Frederic Meyer, Gerd vom Boegel, and Anton Grabmaier. Comparison of energy harvesting via modulation schemes for passive sensor rfid. In *Smart SysTech 2016; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies; Proceedings of*, pages 1–6. VDE, 2016.

-
- [227] Matthew S Trotter, Joshua D Griffin, and Gregory D Durgin. Power-optimized waveforms for improving the range and reliability of rfid systems. In *RFID, 2009 IEEE International Conference on*, pages 80–87. IEEE, 2009.
- [228] Matthew S Trotter and Gregory D Durgin. Survey of range improvement of commercial rfid tags with power optimized waveforms. In *RFID, 2010 IEEE International Conference on*, pages 195–202. Citeseer, 2010.
- [229] Christopher R Valenta and Gregory D Durgin. Link budgets for backscatter radio and rfid systems using power-optimized waveforms. In *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2013 IEEE*, pages 2317–2318. IEEE, 2013.
- [230] Taoufik Ben-Jabeur and Abdullah Kadri. Enhancing passive uhf rfid communication in multipath fading channels using time-varying continuous wave signals. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2015 IEEE*, pages 574–579. IEEE, 2015.
- [231] K Leong, M Ng, A Grasso, and P Cole. Dense rfid reader deployment in europe using synchronization. 2006.
- [232] Sicheng Zou, Michael Crisp, Sithamparanathan Sabesan, Abdelmoula Bekkali, Abdullah Kadri, Richard V Penty, and Ian H White. Tag read enhancement using unsynchronized signal from adjacent readers in multi-cell rfid system. In *RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), 2014 IEEE*, pages 62–67. IEEE, 2014.
- [233] Christopher J Diorio and Kurt E Sundstrom. Method and apparatus to configure an rfid system to be adaptable to a plurality of environmental conditions, April 11 2006. US Patent 7,026,935.
- [234] Impinj. *Reader Modes made easy*, 2018. <https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/360000046899-Reader-Modes-Made-Easy> [Dernier accès : 13 Juillet 2018].
- [235] Lei Xie, Qun Li, Xi Chen, Sanglu Lu, and Daoxu Chen. Continuous scanning with mobile reader in rfid systems : An experimental study. In *Proceedings of the fourteenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 11–20. ACM, 2013.
- [236] Xunteng Xu, Lin Gu, Jianping Wang, and Guoliang Xing. Negotiate power and performance in the reality of rfid systems. In *Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2010 IEEE International Conference on*, pages 88–97. IEEE, 2010.
- [237] Pavel V Nikitin and KVS Rao. Effect of gen2 protocol parameters on rfid tag performance. In *Proc. IEEE Int. Conf. RFID*, pages 117–122, 2009.
- [238] Jussi Nummela, Petri Oksa, Leena Ukkonen, and Lauri Sydänheimo. Evaluation of the effect of gen2 parameters on the uhf rfid tag read rate. *International Journal of Latest Trends in Computing (E-ISSN : 2045-5364)*, 2(1), 2011.
-

- [239] Fatih Cilek, Kay Seemann, Gerald Holweg, and Robert Weigel. Impact of the local oscillator on baseband processing in rfid transponder. In *Signals, Systems and Electronics, 2007. ISSSE'07. International Symposium on*, pages 231–234. IEEE, 2007.
- [240] Manar Mohaisen, HeeSeok Yoon, and KyungHi Chang. Radio transmission performance of epcglobal gen-2 rfid system. In *Advanced Communication Technology, 2008. ICACT 2008. 10th International Conference on*, volume 2, pages 1423–1428. IEEE, 2008.
- [241] Petar Šolić, Matko Šarić, and Maja Stella. Rfid reader-tag communication throughput analysis using gen2 q-algorithm frame adaptation scheme. *International Journal of Circuits, Systems, and Signal Processing*, 8 :233, 2014.
- [242] Petar Šolić, Josip Maras, Joško Radić, and Zoran Blažević. Comparing theoretical and experimental results in gen2 rfid throughput. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 14(1) :349–357, 2017.
- [243] Chonggang Wang, Mahmoud Daneshmand, Bo Li, and Kazem Sohraby. Performance improvement of generation-2 rfid protocol. In *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness*, page 17. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.
- [244] Yael Maguire. Systems and methods for q value determination, December 20 2011. US Patent 8,081,063.
- [245] Eibe Frank, Mark Hall, and Ian Witten. The weka workbench. online appendix for "data mining : Practical machine learning tools and techniques", 2016. <https://swww.cs.waikato.ac.nz> [Dernier accès : 14 Juillet 2018].
- [246] Melanie Mitchell. *An introduction to genetic algorithms*. MIT press, 1998.
- [247] John Newcombe. Implementing genetic algorithms in c#. <https://www.codeproject.com/Articles/873559/Implementing-Genetic-Algorithms-in-Csharp>, 2016. Dernier accès : 16 Juillet 2018.
- [248] Beth Hoffman, John Santosuosso, Gordon Smith, and George Van Leeuwen. Customer guidance system for retail store, November 28 2002. US Patent App. 09/863,105.
- [249] Yunhao Liu, Zheng Yang, Xiaoping Wang, and Lirong Jian. Location, localization, and localizability. *Journal of Computer Science and Technology*, 25(2) :274–297, 2010.
- [250] Luca Mainetti, Luigi Patrono, and Ilaria Sergi. A survey on indoor positioning systems. In *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2014 22nd International Conference on*, pages 111–120. IEEE, 2014.
- [251] Ramon F Brena, Juan Pablo García-Vázquez, Carlos E Galván-Tejada, David Muñoz-Rodríguez, Cesar Vargas-Rosales, and James Fangmeyer. Evolution of indoor positioning technologies : A survey. *Journal of Sensors*, 2017, 2017.

-
- [252] Faheem Zafari, Athanasios Gkelias, and Kin Leung. A survey of indoor localization systems and technologies. *arXiv preprint arXiv :1709.01015*, 2018.
- [253] Ramanujam Jagannath. System and method for indoor location mapping and tracking, May 31 2016. US Patent 9,357,346.
- [254] Jun Xiang MAH and Nigel Ka Ing ANG. Retail customer analytic system, 2016. WO2016187648A1.
- [255] Petri Myllymäki, Henry Tirri, Petri Kontkanen, Jussi Lahtinen, Tomi Silander, Teemu Roos, Antti Tuominen, Kimmo Valtonen, and Hannes Wettig. Location estimation in wireless telecommunication networks, June 5 2007. US Patent 7,228,136.
- [256] John A Swart. Bluetooth low energy (ble) real-time location system (rtls) having tags that harvest energy, bridges that instruct tags to toggle beacon modes on and off, beacons and bridges that self-report location changes, and optional use of a single beacon channel, July 17 2018. US Patent App. 15/610,072.
- [257] Ki-Uk Song, Dae-Kwang Jung, Jeong-Seok Choi, Hong-Seok Shin, Kyung-Woo Lee, Sung-Bum Park, and Jae-Gwang Shim. System and method for indoor positioning using led lighting, July 21 2011. US Patent App. 13/008,455.
- [258] Aaron Ganick and Daniel Ryan. Independent beacon based light position system, March 15 2016. US Patent 9,287,976.
- [259] Lawrence Wilcock and Robert Francis Squibbs. Associating image and location data, May 25 2004. US Patent 6,741,864.
- [260] PARK Nam-Shik. Camera-based indoor position recognition apparatus and method, June 11 2013. US Patent 8,463,541.
- [261] Rajarshi Gupta, Saumitra Mohan Das, Hui Chao, and Ayman Fawzy Naguib. Image-based indoor position determination, April 28 2015. US Patent 9,020,191.
- [262] Mehran Moshfeghi. Hybrid multi-camera based positioning, September 27 2016. US Patent 9,453,904.
- [263] Steven Kessel, Ian W Freed, Guy A Story Jr, Howard Wolfish, Amit D Agarwal, Nanyan Nicholls, John Lattyak, James C Slezak, Beryl Tomay, Jeffrey P Bezos, et al. Synchronization of digital content, September 9 2014. US Patent 8,832,319.
- [264] Gianna Lise Puerini, Dilip Kumar, and Steven Kessel. Transitioning items from a materials handling facility, January 8 2015. US Patent App. 14/495,818.
- [265] Tak Keung Joseph Lui, Jeremy Dashe, Oleg Kantor, Maju Cheruvallil Kuruvilla, Alton Paul Werronen, and Nelson Ramon. Wireless identifier based real time item movement tracking, February 13 2018. US Patent 9,892,353.
- [266] Matt Burgess. The technology behind amazon’s surveillance-heavy go store, Janvier 2018. URL <https://www.wired.co.uk/article/amazon-go-seattle-uk-store-how-does-work>. Dernier Accès 08 Aout 2018.
- [267] Junhui Zhao and Yongcai Wang. Autonomous ultrasonic indoor location system, apparatus and method, June 19 2012. US Patent 8,203,910.
-

- [268] Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés. Règlement (ue) 2016/679 du parlement européen et du conseil du 27 avril 2016, Avril 2016. URL <https://www.cnil.fr/fr/reglement-europeen-protection-donnees>. Dernier Accès 08 Aout 2018.
- [269] Mathieu Bouet and Aldri L Dos Santos. Rfid tags : Positioning principles and localization techniques. In *Wireless Days, 2008. WD'08. 1st IFIP*, pages 1–5. IEEE, 2008.
- [270] Han-Yen Yu, Jiann-Jone Chen, and Tien-Ruey Hsiang. Design and implementation of a real-time object location system based on passive rfid tags. *IEEE Sensors Journal*, 15(9) :5015–5023, 2015.
- [271] Belal Alsinglawi, Mahmoud Elkhodr, Quang Vinh Nguyen, Upul Gunawardana, Anthony Maeder, and Simeon Simoff. Rfid localisation for internet of things smart homes : a survey. *arXiv preprint arXiv :1702.02311*, 2017.
- [272] Andre Gleser and Oldrich Ondracek. Real time locating with rfid : Comparison of different approaches. In *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2014 24th International Conference*, pages 1–4. IEEE, 2014.
- [273] SL Ting, Siu Keung Kwok, Albert HC Tsang, and George TS Ho. The study on using passive rfid tags for indoor positioning. *International journal of engineering business management*, 3(1.) :9–15, 2011.
- [274] Liu Yao-Zong and Han Fa-Wang. Rfid complex event processing for rtils. In *Multimedia Information Networking and Security (MINES), 2012 Fourth International Conference on*, pages 392–395. IEEE, 2012.
- [275] Yang Zhao, Kaihua Liu, Yongtao Ma, Zheng Gao, Yangguang Zang, and Jianfu Teng. Similarity analysis-based indoor localization algorithm with backscatter information of passive uhf rfid tags. *IEEE Sensors Journal*, 17(1) :185–193, 2017.
- [276] Jun Wang, Yiyin Wang, and Xinping Guan. An indoor localization system based on backscatter rfid tag. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2016 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [277] Gang Li, Daniel Arnitz, Randolph Ebel, Ulrich Muehlmann, Klaus Witrisal, and Martin Vossiek. Bandwidth dependence of cw ranging to uhf rfid tags in severe multipath environments. In *RFID (RFID), 2011 IEEE International Conference on*, pages 19–25. IEEE, 2011.
- [278] Meng Liu, Hongjun Wang, Yang Yang, Yajun Zhang, Ligong Li, Jianhua Xu, Yao Du, Liang Ma, and Na Wang. Rfid indoor localization system for tag and tagfree target based on interference. In *Advanced Communication Technology (ICACT), 2017 19th International Conference on*, pages 372–376. IEEE, 2017.
- [279] Jinkai Liu, Yanqing Qiu, Kezhao Yin, Wentong Dong, and Jiaqing Luo. Rils : Rfid indoor localization system using mobile readers. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(4) :1550147718771288, 2018.

-
- [280] A D'Alessandro, A Buffi, P Nepa, and G Isola. A localization technique for smart bookshelves based on uhf-rfid systems. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, pages 1112–1113, 2013.
- [281] Markus Cremer. *Digital Beamforming Techniques for Passive UHF RFID Tag Localization*. PhD thesis, London South Bank University, 2016.
- [282] Gonzalo Crespo, Jorge Teniente, Iñigo Ederra, and Ramon Gonzalo. Experimental study of the antenna influence in rtls based-on rfid. In *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on*, pages 2500–2504. IEEE, 2012.
- [283] Yunfei Ma and Edwin C Kan. Passive ranging by low-directivity antennas with quality estimate. In *Microwave Symposium (IMS), 2015 IEEE MTT-S International*, pages 1–4. IEEE, 2015.
- [284] Jae Sung Choi. Impact of passive uhf rfid reader antenna locations for immobile object localization. In *Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing*, pages 102–107. Springer, 2017.
- [285] Markus Cremer, Anjum Pervez, Uwe Dettmar, Thomas Knie, and Rainer Kronberger. Improved uhf rfid localization accuracy using circularly polarized antennas. In *RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), 2014 IEEE*, pages 175–180. IEEE, 2014.
- [286] Alejandro Aguilar-Garcia, S Fortes, Raquel Barco, and E Colin. Enhancing localization accuracy with multi-antenna uhf rfid fingerprinting. In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2015 International Conference on*, pages 1–9. IEEE, 2015.
- [287] Pavel V Nikitin, Rene Martinez, Shashi Ramamurthy, Hunter Leland, Gary Spiess, and KVS Rao. Phase based spatial identification of uhf rfid tags. In *RFID, 2010 IEEE International Conference on*, pages 102–109. IEEE, 2010.
- [288] Scott Y Seidel and Theodore S Rappaport. 914 mhz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 40(2) :207–217, 1992.
- [289] Qian Dong and Walteneus Dargie. Evaluation of the reliability of rssi for indoor localization. In *Wireless communications in unusual and confined areas (ICWCUCA), 2012 international conference on*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [290] Rashid Ahmed and John N Avaritsiotis. The propagation parameters on rfid-localization accuracy. In *Science and Information Conference (SAI), 2015*, pages 1435–1439. IEEE, 2015.
- [291] Uroš Todorović Mikšaj and Davor Bonefačić. Propagation characteristics of uhf radiofrequency identification system signal for application in indoor positioning. In *Applied Electromagnetics and Communications (ICECOM), 2016 22nd International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [292] Jordy Huiting, Hubert Flisijn, Andre BJ Kokkeler, and Gerard JM Smit. Exploiting phase measurements of epc gen2 rfid tags. In *RFID-technologies and applications (RFID-TA), 2013 IEEE international conference on*, pages 1–6. IEEE, 2013.
-

-
- [293] Yongtao Ma, Kaveh Pahlavan, and Yishuang Geng. Comparison of poa and toa based ranging behavior for rfid application. In *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on*, pages 1722–1726. IEEE, 2014.
- [294] Belal Alsinglawi, Tony Liu, Quang Vinh Nguyen, Upul Gunawardana, Anthony Maeder, and Simeon J Simoff. Passive rfid localisation framework in smart homes healthcare settings. In *The Promise of New Technologies in an Age of New Health Challenges : Selected Papers from 5th Global Telehealth Conference 2016, Auckland, New Zealand, 1-2 November 2016*, pages 1–8, 2016.
- [295] Kevin Bouchard, Dany Fortin-Simard, Sebastien Gaboury, Bruno Bouchard, and Abdenour Bouzouane. Accurate trilateration for passive rfid localization in smart homes. *International journal of wireless information networks*, 21(1) :32–47, 2014.
- [296] Dmitry A Savochkin. Simple approach for passive rfid-based trilateration without offline training stage. In *RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), 2014 IEEE*, pages 159–164. IEEE, 2014.
- [297] Yongtao Ma, Bobo Wang, Shuyang Pei, Yunlei Zhang, Shuai Zhang, and Jiexiao Yu. An indoor localization method based on aoa and pdoa using virtual stations in multipath and nlos environments for passive uhf rfid. *IEEE Access*, 2018.
- [298] Lionel M Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau, and Abhishek P Patil. Landmarc : indoor location sensing using active rfid. In *Pervasive Computing and Communications, 2003.(PerCom 2003). Proceedings of the First IEEE International Conference on*, pages 407–415. IEEE, 2003.
- [299] Martin Scherhäufl, Markus Pichler, and Andreas Stelzer. Uhf rfid localization based on evaluation of backscattered tag signals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(11) :2889–2899, 2015.
- [300] Jae Sung Choi, Hyun Lee, Ramez Elmasri, and Daniel W Engels. Localization systems using passive uhf rfid. In *2009 Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC*, pages 1727–1732. IEEE, 2009.
- [301] *XARRAY AND XSPAN GATEWAYS : DEPLOYMENT AND BEST PRACTICES*. Impinj, 2017. Version. 2.0.
- [302] Alberto Pesavento and Christopher J Diorio. Rfid tag location using synthesized-beam rfid readers, August 24 2017. US Patent App. 15/588,119.
- [303] Impinj. *Octane SDK*, 2018. <https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/202755268-Octane-SDK> [Dernier accès : 19 Juillet 2018].
- [304] Accord .NET. *Accord.NET Framework*, 2018. http://accord-framework.net/docs/html/R_Project_Accord_NET.htm [Dernier accès : 20 Juillet 2018].
- [305] Antonio Mucherino, Petraq J Papajorgji, and Panos M Pardalos. K-nearest neighbor classification. In *Data Mining in Agriculture*, pages 83–106. Springer, 2009.
- [306] Abdallah Almaaitah, Kashif Ali, Hossam S Hassanein, and Mohamed Ibnkahla. 3d passive tag localization schemes for indoor rfid applications. In *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2010.

Annexes

Annexe A

Catalogue de tags

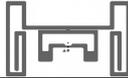
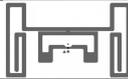
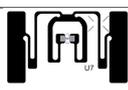
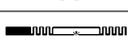
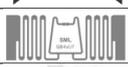
Identifiant	Tag	Référence	Fournisseur	Puce	Taille
Tag 1		Web	Smartrac	G2iL	49 x 30 mm
Tag 2		Belt	Smartrac	Monza 5	70 x 14 mm
Tag 3		Zephyr 1	Checkpoint	G2iL	50 x 30 mm
Tag 4		Zephyr 2	Checkpoint	Ucode 7	50 x 30 mm
Tag 5		AD320 ETSI	Avery Dennison	Ucode 7	41,4 x 16 mm
Tag 6		AD383	Avery Dennison	Ucode 7	50 x 30 mm
Tag 7		AD180	Avery Dennison	Ucode 7	diamètre = 26 mm
Tag 8		AD160	Avery Dennison	Ucode 7	60 x 4 mm
Tag 9		AD171	Avery Dennison	Monza 5	27 x 14 mm
Tag 10		GB1E	SML	Monza 5	50 x 30 mm
Tag 11		GB4	SML	Ucode 7	42 x 16 mm
Tag 12		1020349E	BoingTech	Monza R6	42 x 20 mm
Tag 13		Vortex2	Checkpoint	Ucode 7	42 x 16 mm

Tableau A.1 – Catalogue de tags utilisés

Annexe B

Laird SP8658WPR



S8658WPR S8658WPL

Circular Polarity Wide Band RFID Panel Antenna



865-960 MHz 8.5 dBic CIRCULAR POLARITY PANEL

The Laird S8658WPR antenna is a circularly polarized panel antenna that provides reception and transmission of signals in the 865-960 MHz frequency band. Laird's industry renowned design methodology achieves maximum efficiency and performance across the entire frequency band.

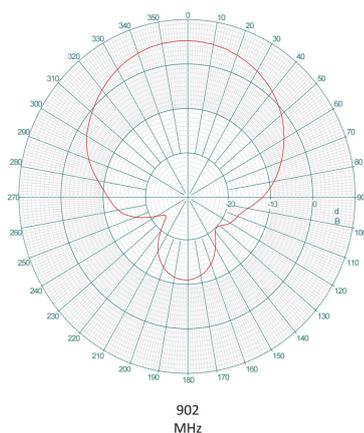
Both VSWR and axial ratios are both excellent and allow the user to achieve the maximum performance for an antenna of this type. The antenna is housed in a heavy duty radome enclosure that can be directly wall mounted. An optional articulating mount allows either wall or mast mounting. The antenna is offered with an integrated coax pigtail and a variety of connector types are available.

FEATURES

- Low profile
- Extremely low VSWR and axial ratio
- Wide band
- Weather and UV resistant radome
- Wide range of connector and cable options
- Left hand and right hand CP versions

APPLICATIONS

- Warehouse
- Distribution center
- Airports and hospitals
- Transit terminals
- Conveyer belt



SPECIFICATIONS

Antenna Part Number	S8658WPR and S8658WPL
Frequency Range	865 - 960 MHz
Gain	8.5 dBic
Maxium VSWR	1.4:1
3 dB Beamwidth - Azimuth	65°
Front to Back Ratio	20 dB
Polarization	Circular Right-hand or circular Left-hand
Maxium Input Power	3 Watts
Input Impedence	50 Ohms
Axial Ratio	1dB
Weight (Kg)	2.5 lbs (1.13)
Mechanical Size (mm)	10.2" x 10.2" x 1.32" (259 x 259 x 34)
Antenna Connection	Coax Pigtail, Rev TNC Male (others available)
Radome	High Strength PC
Mount Style	Threaded Stud
Temperature Operational	-25°C to +70°C
Lightning Protection	DC Grounded
Environmental Rating	IP 54



1.888.238.1155 • Inside USA
1.205.383.2244 • Outside USA

info@atlasRFIDstore.com • www.atlasRFIDstore.com

ANT-DS-S8658WPR S8658WPL_0915

Any information furnished by Laird Inc. and its agents is believed to be accurate and reliable. All specifications are subject to change without notice. Responsibility for the use and application of Laird materials rests with the end user, since Laird and its agents cannot be aware of all potential uses. Laird makes no warranties as to the fitness, merchantability or suitability of any Laird materials or products for any specific or general uses. Laird shall not be liable for incidental or consequential damages of any kind. All Laird products are sold pursuant to the Laird Terms and Conditions of sale in effect from time to time, a copy of which will be furnished upon request. © Copyright 2015 Laird Inc. All Rights Reserved. Laird, Laird Technologies, the Laird Logo, and other marks are trade marks or registered trade marks of Laird Inc. or an affiliate company thereof. Other product or service names may be the property of third parties. Nothing herein provides a license under any Laird or any third party intellectual property rights.

Annexe C

Rayon et tags cibles

Identifiant	Famille	Nombre de produits	Tag
A	Sacs à dos - Vert/Vert	7	Web
B	Sacs à dos - Violet/Rose	7	Web
C	Sacs à dos - Bleu/Orange	10	Web
D	Sacs à dos - Bleu marine/Bleu	10	Web
E	Sacs à dos - Rose/Marron	16	Web
F	Sacs à dos - Gris/Bleu	16	Web
G	Sacs à dos - Gris/Orange	16	Web
H	T-Shirts (cintre)	20	Zephyr 1
I	Anti-vibration Tennis	20	Zephyr 2
J	Cordes à sauter	5	AD320
K	Chambres à air	14	AD383
L	Chaussures (partie haute)	9	Zephyr 1
M	Tubes proteïne	95	Web
N	Sachets proteïne tomate	8	Web
O	Câbles de frein	12	Zephyr 2
P	Chaînes de vélo	15	AD383
Q	Chaussures (partie basse)	18	Zephyr 1
R	Shorts	8	Zephyr 2
S	T-shirts enroulés	9	Zephyr 2
T	Balles de Ping Pong	10	AD320
U	Bouteilles	57	AD383
V	T-shirts gris	21	Zephyr 1
W	Lampes frontales (boîtier)	14	Web
X	Serviettes	27	AD383

Tableau C.1 – Famille de produits



FIGURE C.1 – Rayon Cible

Annexe D

Informations relatives à la technique de localisation de l'xArray

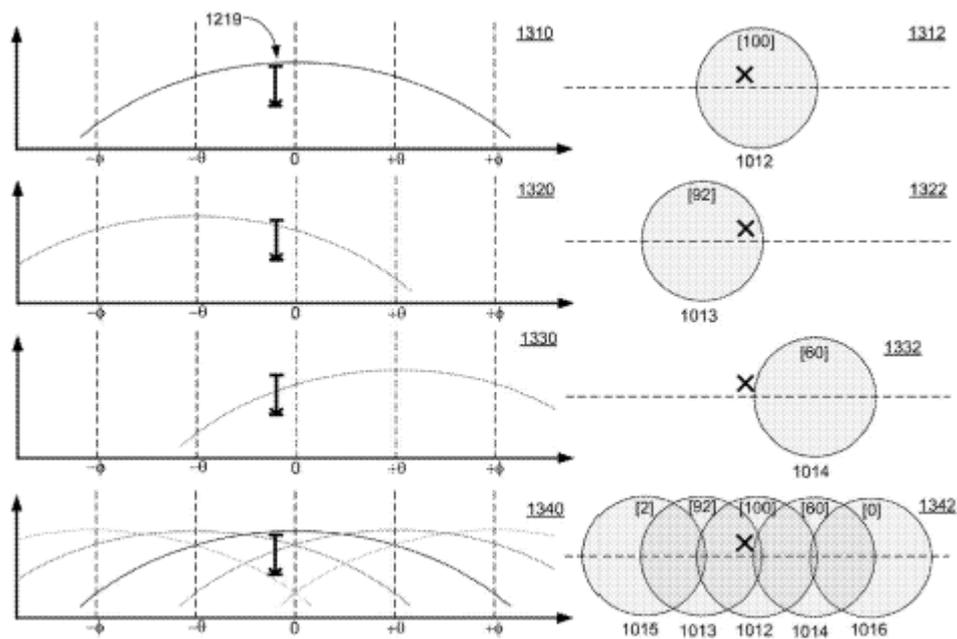


FIG. 13

(a) Les graphes à gauche montrent l'évolution des taux de lecture en fonction du faisceau choisi pour la lecture. Les diagrammes à droite montrent comment la position d'un tag (X) est déterminé en fonction de plusieurs faisceaux

1400

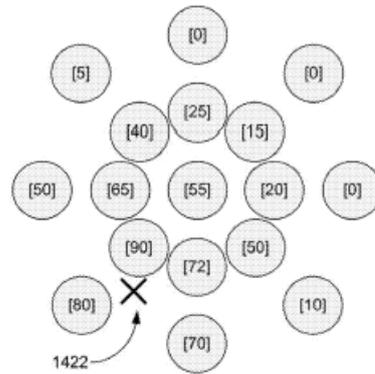


FIG. 14

(b) La position d'un tag (X) lorsque plusieurs faisceaux sont utilisée

1800

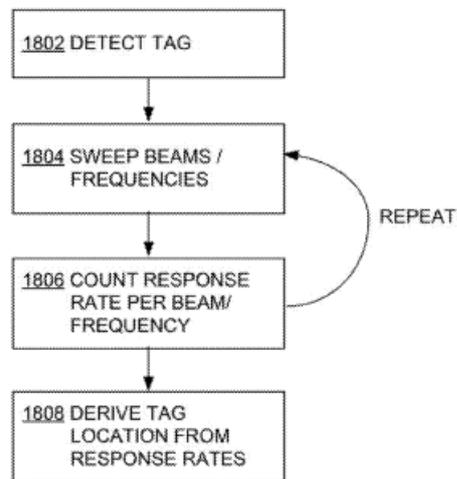


FIG. 18

(c) Organigramme pour la dérivation de la position d'un tag à partir des taux de lectures

FIGURE D.1 – Captures du brevet [302] qui résumet la technique de localisation utilisée pour le xArray